

# SILOS PARA ARMAZENAMENTO DE LARANJAS

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**FRANCISCO CARLOS GOMES**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Carlito Calil Júnior

**São Carlos  
1994**

Class.	TCSE
PHA	G614.2
Tombo	400/96. SET

G633

GOMES, Francisco Carlos

Silos para armazenamento de laranjas / Francisco Carlos Gomes. -- São Carlos, 1994.

107 p.

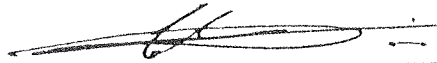
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos, 1994.

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

1. Silos. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 22/9/1994  
pela Comissão Julgadora:



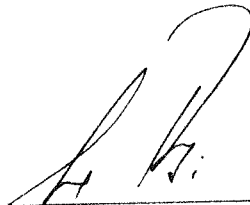
Prof. Dr. Carlito Calil Junior (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



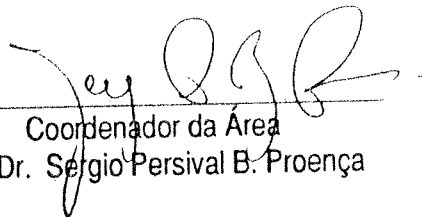
Prof. Dr. Maximiliano Malite  
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



Prof. Dr. Tetuo Hara  
(Universidade Federal de Viçosa - MG)



Presidente da CPG  
Prof. Dr. Jurandyr Povinelli



Coordenador da Área  
Prof. Dr. Sergio Persival B. Proença



Aos meus pais,  
meus grandes mestres.  
À Ângela,  
minha querida companheira.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Carlito Calil Júnior pela excelente orientação fornecida e empenho dispensado durante a elaboração do trabalho, o que certamente, permitiu a conclusão com êxito desta pesquisa.

Aos professores Francisco Antônio Rocco Lahr, João César Hellmeister e Akemi Ino, pelo apoio demonstrado.

À Escola Superior de Agricultura de Lavras - ESAL, e ao Departamento de Engenharia pela colaboração necessária para que este trabalho fosse realizado.

Aos funcionários do LaMEM, pela cooperação e apoio na realização dos ensaios e especial agradecimento ao Sílvio, Marivaldo, Arnaldo e Bragato.

À Citrosuco Paulista S.A., na pessoa do engenheiro Takao, pelo fornecimento de dados e apoio nos ensaios realizados.

À Citrovita Industrial S.A., na pessoa do engenheiro Ivan M. P. M. Shuermans, pelo fornecimento de dados.

Aos colegas contemporâneos de curso de pós-graduação, pela convivência agradável.

Aos grandes amigos Wallace e Márcia pela colaboração nos trabalhos, durante o curso.

Ao Fernando e ao Dino pela colaboração na área de informática.

Aos meus irmãos, minha eterna gratidão pelo incentivo e confiança demonstrados.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	v
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
INTRODUÇÃO .....	1
1 A INDÚSTRIA CITRÍCOLA.....	3
1.1 Desenvolvimento da indústria citrícola.....	3
1.2 A situação atual.....	5
1.3 Fluxograma do processamento na indústria citrícola.....	6
1.4 Problemas na indústria e de armazenamento.....	8
2 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO ARMAZENADO E ESTUDO DOS DANOS MECÂNICOS.....	11
2.1 Introdução.....	11
2.2 Propriedades mecânicas.....	12
2.2.1 Elasticidade aplicada às frutas.....	13
2.2.2 Comportamento viscoelástico das laranjas.....	14
2.3 Impacto em laranjas.....	13
2.3.1 Danos devido ao impacto.....	21
2.3.2 Utilização de materiais amortecedores de impacto.....	24
2.3.3 Aceleração de impacto e altura de queda.....	25
2.3.4 Aspectos teóricos da curva de impacto.....	27
3 SILOS PARA ARMAZENAMENTO DE LARANJAS.....	28
3.1 Histórico e desenvolvimento.....	28
3.2 Tipos de silo.....	29
3.2.1 Silos a nível de fazenda.....	29
3.2.2 Silos industriais.....	31
3.2.2.1 Quanto ao material empregado na construção.....	31

3.2.2.2 Quanto aos tipos de rampas adotadas.....	32
3.3 Estudo das pressões em silos para armazenamento de laranjas.....	39
3.3.1 A norma canadense (CFBC).....	40
3.3.1.1 Pressões em armazenamento de grãos e produtos pulverulentos.....	41
3.3.1.2 Pressões em silos para armazenamento de frutas.....	43
3.3.2 Considerações sobre o estudo de pressões em silos para armazenamento de laranjas.....	44
<b>4 CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS EMPREGADAS NA CONSTRUÇÃO DOS SILOS PARA LARANJAS.....</b>	<b>45</b>
4.1 Introdução.....	45
4.2 A utilização de madeiras de reflorestamento.....	46
4.2.1 Eucalipto.....	46
4.2.2 Pinus.....	47
4.3 Resistência mecânica e elasticidade das madeiras.....	48
4.3.1 Eucalipto.....	48
4.3.2 Pinus.....	48
4.3 Tratamento e preservação da madeira.....	51
<b>5 ENSAIOS REALIZADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
5.1 Introdução.....	54
5.2 Ensaio de carga estática.....	55
5.2.1 Objetivos.....	55
5.2.2 Materiais e métodos.....	55
5.2.3 Resultados obtidos.....	56
5.2.4 Análise dos resultados.....	60
5.3 Ensaio de carga de impacto.....	61
5.3.1 Objetivos.....	61
5.3.2 Materiais e métodos.....	61
5.3.3 Resultados obtidos.....	62
5.3.4 Análise dos resultados.....	66
5.4 Ensaio de Modelo- Determinação de pressões laterais.....	66
5.4.1 Objetivos.....	66
5.4.2 Materiais e métodos.....	68



5.4.3 Resultados obtidos.....	69
5.4.4 Análise dos resultados.....	71
5.5 Ensaaios dos silos em modelos reduzidos.....	74
5.5.1 Objetivos.....	74
5.5.2 Materiais e métodos.....	74
5.5.3 Resultados obtidos.....	75
5.5.4 Análise dos resultados.....	75
5.6 Conclusões gerais do capítulo.....	76
6 ANÁLISE ESTRUTURAL DO MODELO DE SILO.....	81
6.1 Introdução.....	81
6.2 Definição do modelo a ser adotado.....	82
6.3 Dados para a análise estrutural.....	82
6.3.1 Altura máxima de armazenamento.....	82
6.3.2 Material a ser utilizado.....	82
6.3.3 Características do produto armazenado.....	82
6.4 Critérios de dimensionamento.....	84
6.4.1 Rampas defletoras.....	84
6.4.2 Vigas de apoio das rampas.....	84
6.4.3 Colunas de apoio das rampas.....	87
6.4.4 Colunas centrais.....	87
6.4.5 Colunas externas.....	87
6.4.6 Fechamentos laterais.....	88
6.4.7 Fundo do silo.....	88
6.4.8 Ligações.....	88
7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	92
ANEXOS.....	94
BIBLIOGRAFIA.....	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Regiões produtoras de laranja e localização das fábricas de suco.....	04
Figura 02 - Fluxograma da produção do suco de laranja e subprodutos.....	10
Figura 03 - Comportamento elástico das laranjas.....	14
Figura 04 - Comportamento elástico de produtos Agrícolas.....	14
Figura 05 - Curvas de relaxação para carregamentos estáticos de laranjas Satsuma.....	15
Figura 06 - Curva característica de carregamento estático para laranjas.....	16
Figura 07 - Curvas características de carregamento estático em laranjas satsuma.....	17
Figura 08 - Curva característica do modelo de Burgers.....	18
Figura 09 - Curvas características de impacto em função do módulo de elasticidade.....	20
Figura 10 - Curvas obtidas para o modelo de impacto em limas.....	21
Figura 11 - (a) e (b) - Áreas danificadas na fruta após o impacto e compressão.....	22
Figura 12 - (a)-Curva de energia de impacto-altura de queda e peso das frutas.....	23
(b)-Gráfico de aceleração de impacto-altura de queda.....	26
(c)-Curva característica de tempo-aceleração para frutos e vegetais.....	27
Figura 13 - (a)-Silo de encosta a nível de fazenda.....	30
(b)-Silo elevado metálico com rampas de alimentação.....	30
Figura 14 - Modelo de silo com rampa espiral.....	33
Figura 15 - Silo misto-corte transversal.....	35
Figura 16 - Silos com rampas tipo tremonhas.....	36
Figura 17 - Silos com rampas perimetrais.....	37
Figura 18 - Silos com rampas alternadas.....	38
Figura 19 - Montagem para o ensaio de carregamento estático.....	56
Figura 20 - Curvas de tempo-deslocamento.....	57
(a)-Carregamento equatorial.....	57
(b)-Carregamento axial.....	57
Figura 21 - (a) e (b)- Curvas de tempo-deslocamento obtidas com o carregamento de frutas nas posições equatorial e axial.....	59
Figura 22 - Modelo de ensaio de impacto.....	65
Figura 23 - Gráfico de aceleração máxima de impacto-altura de queda para valores teóricos e valores obtidos experimentais.....	67

Figura 24 - Modelo de ensaio para avaliação de pressões.....	68
Figura 25 -(a), (b), (c). Gráficos de Pressões horizontal e vertical para silos de laranjas.....	70
Figura 26 - Gráfico da relação PE/PT em função da altura de armazenamento.....	72
Figura 27 - Modelo reduzido de silo com rampas alternadas.....	79
Figura 28 - Modelo reduzido de silo - rampas alternadas,modificado.....	79
Figura 29 - Modelo reduzido de silo com rampas tipo tremonhas.....	80
Figura 30 - Modelo reduzido de silo com rampas perimetrais.....	80
Figura 31 - Esquema do modelo de silo adotado.....	83
Figura 32 - Detalhe da rampa.....	85
Figura 33 - Detalhe da posição das colunas das rampas.....	85
Figura 34 - Módulos centrais dos silos para laranjas.....	86
Figura 35 - Detalhe de ligação entre as rampas.....	87
Figura 36 - Emendas entre vigas e colunas externas.....	87
Figura 37 - Ligações das colunas com parafusos.....	90
Figura 38 - Detalhes das ligações entre rampa-colunas,rampa-viga,viga-coluna.....	90
Figura 39 - Esquema do protótipo do silo.....	91
Figura 40 - Vista interna dos módulos do silo.....	99
Figura 41 - Modelo de rampas tipo tremonha.....	99
Figura 42 - Modelo de rampas alternadas.....	100
Figura 43 - Modelo de rampas perimetrais.....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Produção e destino das safras de laranjas.....	05
Tabela 02 - Valores de Módulo de elasticidade para laranjas em função do carregamento quase-estático.....	13
Tabela 03 - Energia produzida nos diferentes métodos de aplicação de cargas.....	19
Tabela 04 - Valores de parâmetros padronizados para modelos de impacto.....	20
Tabela 05 - $\mu$ - Coeficientes de atrito interno para grãos.....	41
Tabela 06 - K - Relação entre pressões lateral e vertical.....	42
Tabela 07 - Massa específica dos materiais agrícolas armazenados.....	42
Tabela 08 - Valores de resistência mecânica e de elasticidade de cinco espécies de eucalipto em daN/cm <sup>2</sup> .....	49
Tabela 09 - Valores de resistência mecânica e de elasticidade de cinco espécies de pinus em daN/cm <sup>2</sup> .....	50
Tabela 10 - Valores de tensão do acelerômetro.....	64
Tabela 11 - Valores de aceleração de impacto em função da altura de queda .....	64
Tabela 12 - Seção transversal da base em função da relação H/L.....	69
Tabela 13 - Relação entre pressão vertical calculada e pressão vertical de ensaio em função da variação da seção transversal do modelo.....	73
Tabela 14 - Volume de ocupação em %, obtidos nos ensaios de modelos reduzidos...75	
Tabela 15 - Modelos de silos - Vantagens e desvantagens.....	78
Tabela 16 - Deslocamentos médios obtidos nos ensaios de carregamento estático. Posição equatorial .....	93
Tabela 17 - Deslocamentos médios obtidos nos ensaios de carregamento estático. Posição axial.....	94
Tabela 18 - Resultados de pressões obtidos nos ensaios do modelo 1. S=0,3025 m <sup>2</sup> .....	96
Tabela 19 - Resultados de pressões obtidos nos ensaios do modelo 2. S=0,605 m <sup>2</sup> .....	97
Tabela 20 - Resultados de pressões obtidos nos ensaios do modelo 3. S=1,21 m <sup>2</sup> .....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

E	- Módulo de Elasticidade longitudinal, Pa.
$\nu$	- Coeficiente de Poisson
K	- Relação entre pressão lateral e vertical
D	- Deslocamento, mm
P	- Carga, daN
kn	- Parâmetros de viscosidade, Kg.h/cm
T	- Tempo de relaxação, h
R	- Raio, m
h	- Altura de queda, m
$G_1$ e $G_2$	- Parâmetros de elasticidade do modelo de Burgers, Kg/cm
G	- Módulo de Elasticidade Transversal, Pa.
I	- Aceleração de impacto,
v	- Velocidade, m/s
g	- Aceleração, $m/s^2$
m	- Massa, Kg
$K_1$	- Viscosidade, $cm^3/Kg$
L	- Pressão horizontal, Pa
V	- Pressão vertical, Pa
$\mu$	- Coeficiente de atrito interno
$\rho$	- Massa específica, $daN/m^3$
$\phi$	- Ângulo de atrito interno entre grão-parede
$\theta$	- Ângulo de repouso
H/L	- Relação altura-lado

PE/PT	- Relação entre pressão obtida em ensaio e pressão total
V <sub>a</sub>	- Voltagem, volt
g	- Aceleração da gravidade, m/s <sup>2</sup>
S <sub>a</sub>	- Sensibilidade do acelerômetro, mV/g
PT	- Pressão total, Pa
PE	- Pressão obtida no modelo ensaiado, Pa
f <sub>c,0</sub>	- Valor médio da resistência da madeira à compressão, daN/m <sup>2</sup>
f <sub>t,0</sub>	- Valor médio da resistência da madeira à tração paralela às fibras, daN/m <sup>2</sup>
f <sub>t,90</sub>	- Valor médio da resistência da madeira à tração normal às fibras, daN/m <sup>2</sup>
v <sub>0</sub>	- Valor médio da resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras, daN/m <sup>2</sup>
f <sub>M</sub>	- Valor médio da resistência da madeira à flexão paralela às fibras, daN/m <sup>2</sup>
ppsm	- Valor médio da densidade aparente da madeira saturada, daN/m <sup>3</sup>

### SIGLAS

SBR-50	- Borracha de Estireno Butadieno - dureza Shorn : 50
CFBC	- Canadian Farm Building Code
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABECITRUS	- Associação Brasileira de Citricultura.
LaMEM	- Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras
IBRAMEM	- Instituto Brasileiro de Madeira e Estruturas de Madeira
DIN	- Deutsche Industrie Normen
NBR	- Norma Brasileira Registrada

## RESUMO

GOMES, F.C. *Silos para armazenamento de laranjas*. São Carlos, 1994. 107p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O Brasil é o maior produtor de suco de laranja do mundo. O desenvolvimento de tecnologia para o projeto e a construção de silos para armazenamento de laranjas é uma necessidade do setor, considerando as atuais deficiências existentes, principalmente, com relação a capacidade real e os danos ocorridos no processamento devido ao impacto do produto.

Este trabalho tem como finalidades principais: o estudo do comportamento mecânico da laranja com a avaliação do carregamento estático e dinâmico; a análise das pressões laterais, fluxo e capacidade útil nos módulos dos silos; a proposta de utilização de espécies de madeiras de reflorestamento de eucalipto e pinus para a estrutura do silo e de superfícies amortecedoras para a diminuição do impacto.

Com base no estudo teórico e experimental realizado, é proposto o projeto e detalhes construtivos de um protótipo de silo, utilizando madeiras de reflorestamento para o armazenamento de laranjas tanto a nível de fazendas como de indústrias.

Palavras-chave: Comportamento mecânico - Projetos de Silos - Madeiras de reflorestamento.

## *ABSTRACT*

GOMES, F.C. *Silos for storage of oranges*. São Carlos, 1994. 107p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Brazil is the largest orange juice producer in the world. The technological development for silos design and construction for orange storage is a sector necessity, considering the present deficiencies existing, mainly, concerning the real capacity and damages occurring in the processing due to the product impact. The aims of this work are: the study of the orange mechanical behaviour with the evaluation of the static and dynamic loading; determination of lateral pressure, flow and real capacity for the silos module; and the proposal for the utilization of reforestation timber of eucaliptus and pines to the silo structure and shock absorber surfaces for impact reduction. Based on the theoretical and experimental study performed, it was proposed a prototype silo design with constructive details, using reforestation wood for orange storage in farms as well as industries.

**Key- words :** Mechanical behaviour - Silos design - Reforestation woods



## INTRODUÇÃO

A indústria citrícola brasileira encontra-se num alto grau de automação e desenvolvimento tecnológico, permitindo um aproveitamento quase total da matéria prima. O setor compete com o mercado mundial alcançando expressivo destaque na exportação devido à qualidade do produto.

Dentro desta realidade verifica-se que, alguns problemas de soluções ainda pouco satisfatórias, têm ocorrido, no que diz respeito aos danos mecânicos ocasionados durante a colheita, transporte e recepção das laranjas e no armazenamento do produto com a sub-ocupação dos silos, o que vem acarretando grandes perdas para a indústria.

No decorrer do período de colheita observa-se a variação das características físico-mecânicas da laranja, o que contribui diretamente no eficiente aproveitamento do produto e ainda na utilização dos equipamentos de processamento.

Dentro do processamento, uma das fases mais importantes é o armazenamento em silos. Atualmente as indústrias tem processado os frutos de duas formas: na primeira a laranja é recebida e encaminhada diretamente para o processamento não passando pelos silos; na segunda, o fruto é encaminhado para os silos permanecendo durante 48 horas. Tal procedimento é definido em função do grau de maturação em que se encontra o fruto e o tipo de suco a ser produzido, seguindo as exigências do mercado consumidor interno e externo.

O conhecimento do comportamento mecânico da laranja incidirá nos projetos de silos mais adequados para o produto. Dados como altura máxima de armazenamento, altura máxima de queda e pressões nas paredes laterais devem ser considerados, para que, caso ocorram danos nas frutas estes não comprometam o seu processamento e a capacidade (volume útil) dos silos.

Outro fato importante é que nos projetos atuais, as indústrias tem optado por estruturas metálicas, na construção dos silos. Estas têm apresentando problemas de corrosão e abrasão, devido ao ataque de ácidos componentes da fruta, e ainda, o impacto com as paredes do silo e com as rampas defletoras, que permitem o

escoamento do produto, são muito frequentes e tem comprometido a conservação da fruta. Dado este fato, a madeira como material de construção já utilizada em projetos anteriores, volta a ser estudada. Sua aplicação não é vista apenas como elemento estrutural, mas também, como material amortecedor. A opção por madeiras de reflorestamento, ainda traz mais uma vantagem, considerando a sua grande disponibilidade, o que torna os projetos futuros economicamente viáveis.

O estudo aprofundado de alguns parâmetros da fruta devem ser considerados, para que se obtenha melhores resultados no armazenamento. Alguns são destacados a seguir:

**Na caracterização físico-mecânica da laranja.**

- 1- o módulo de elasticidade à compressão
- 2- parâmetros de viscosidade
- 3- aceleração de impacto

**Na escolha do material a ser empregado na construção dos silos:**

- 1- baixo custo
- 2- capacidade de amortecimento e durabilidade
- 3- sistema estrutural

**No estudo de fluxo:**

- 1- tipos de rampas defletoras usadas
- 2- capacidade real dos silos

Esta pesquisa compara as estruturas já existentes com o modelo proposto e ainda os materiais atualmente empregados definindo parâmetros que servem de subsídios aos projetistas e demais técnicos responsáveis, com o objetivo de analisar o comportamento estrutural do silo e com isso obter um projeto que possa ser executado na indústria e nas fazendas a baixo custo.

Este estudo visa principalmente a otimização dos projetos de silos para armazenamento de laranjas. Para tal são analisados alguns fatores como; o comportamento mecânico durante o carregamento estático, o efeito do impacto da laranja nas rampas dos silos, o estudo do fluxo buscando aumentar o volume útil, e também determinar a relação e a intensidade das pressões nas paredes dos silos.

Dessa forma, através da caracterização mecânica do produto a ser armazenado, o estudo dos materiais empregados e a análise estrutural dos silos, é proposto um projeto otimizado destas unidades armazenadoras.

## 1 - A INDÚSTRIA CITRÍCOLA

### 1.1 - DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA CITRÍCOLA

O desenvolvimento da indústria citrícola ocorreu a partir do aumento da produção de laranjas, a partir da década de 60. Nos anos 80 um impulso maior foi dado, com a melhoria dos níveis de produção e queda das taxas de importação.

A exportação e o consumo interno dos países, aumentaram em decorrência da melhor distribuição do produto, novas formas de oferta ao mercado consumidor e a melhoria das condições de armazenamento.

Os países produtores de citrus, no mundo, podem ser divididos em três grandes grupos. Norte e América Central, a região do mediterrâneo e outras regiões, incluindo a África, Ásia, Oceania e América do Sul. Neste último grupo se destaca o Brasil e Argentina, alcançando áreas de plantação superiores às dos outros países.

A indústria de suco no Brasil, com suas 14 fábricas instaladas, é dominada pelo estado de São Paulo com a produção aproximada de 70% da brasileira. O consumo per-capta no Brasil tem aumentado, mas os registros mostram que 5 a 6% são destinados ao consumo interno. Nos anos de 76 e 77, 94% da produção foi destinada ao consumo externo.

No estado de São Paulo a citricultura encontrou condições favoráveis para o seu desenvolvimento; solo, temperatura, pluviosidade. O índice de crescimento anual foi estimado em 7,4% de acordo com MYERS e GRIERSON (1978), na última década.

O estado de São Paulo é o líder da indústria citrícola com mais de 70% do total da produção e uma área plantada de 52000 Km<sup>2</sup>. A região apresenta uma boa distribuição de chuvas, o que permite 2 a 3 florações no ano. O estado tem duas áreas principais de plantio: a região das cidades de Limeira e de Bebedouro, com o maior número de fábricas instaladas.

Os principais importadores de suco concentrado no Brasil são: Alemanha, Holanda, Estados Unidos e Canadá.

A principal variedade plantada no estado é a pêra (*citrus sinensis*). Outras variedades também são utilizadas na indústria, as chamadas variedades precoces que aumentam a produtividade.

A localização das áreas de plantio, bem como a região de instalação das fábricas de suco, são mostradas na figura 1.



FIGURA 1- Regiões produtoras de laranjas e localização das fábricas de suco.

## 1.2 - A SITUAÇÃO ATUAL

O Brasil aparece como o principal produtor do hemisfério Sul, representando mais de 70% da produção, com a Argentina como o segundo produtor com 15%.

Hoje pode-se dizer que o setor passou por um momento de euforia e nos últimos dois anos o preço sofreu uma queda. Muitos fatores podem ser relacionados como: o aparecimento de pragas e a organização dos concorrentes no exterior (Flórida, México e Cuba) e os mercados regionais protegidos.

A citricultura brasileira está passando por uma fase de estagnação, com provável queda da safra futura. Nos anos de 1988/89 e 1991/92, a produção chegou a 364,3 milhões de caixas e a expectativa para a próxima safra é de 302 milhões. Essa redução, de acordo com especialistas diminuirá o "carry over" de suco e seus altos custos de armazenagem a frio excitará o mercado com a disputa de matéria prima.

Considerando ainda, que, novas indústrias de suco estão sendo instaladas, a perspectiva de reaquecimento do setor tem estimulado os produtores a aumentar a área plantada das lavouras em função dos ótimos contratos de venda da produção.

A tabela 1, mostra a situação atual do setor e a previsão da safra de laranjas para o futuro, com a expectativa de reação do setor conforme as tendências observadas no mercado interno e externo.

TABELA 1 - Produção e destino das safras (em milhões de caixas de 40,8 Kg).

SAFRAS	P.TOTAL	INDÚSTRIA	EXPORTAÇÃO mil ton. de suco	CONSUMO interno
88/89	364,3	261,2	-	103,1
90/91	240,0	200,0	791,0	40,0
91/92	244,0	204,0	959,0	40,0
92/93	315,0	275,0	1045,0	40,0
93/94	302,0	247,0	900,0*	55,0
94/95	298,0	240,0	-	58,0

### 1.3 - FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA CITRÍCOLA

Para melhor entendimento do processamento da laranja para a produção de suco, são relatadas todas as suas fases com a inclusão das fases precedentes, tais como a colheita, recepção e armazenamento do produto na indústria. O fluxo da produção pode ser entendido da seguinte forma :

#### 1- *Colheita e teste de maturidade:*

É feita uma análise primária das condições dos lotes de frutas, com o descarte das que apresentam fermentação e ferimentos.

Durante o período de maturação, são estimadas a produção de suco por lote e o período de colheita, permitindo às indústrias levantar dados sobre a safra futura.

#### 2- *Transporte:*

É feito por tratores e caminhões até os silos de fazenda. Destes silos de pequena capacidade até os silos industriais as laranjas são transportadas por caminhões e carretas de capacidade de 400 e 700 caixas de 40,8 Kg, respectivamente.

#### 3- *Recepção:*

São feitas amostragens das frutas para verificação do grau de maturação, permitindo a classificação por lotes. Rampas hidráulicas permitem a descarga rápida dos caminhões e carretas. Em seguida o produto é conduzido para os silos por meio de correias transportadoras e elevadores de canecas.

#### 4- *Armazenamento:*

As frutas são armazenadas em módulos de silos, a partir de amostragens, conforme citado no item da recepção, onde são encaminhados os lotes com o grau de maturação e concentração de sólidos solúveis. A coloração da casca, também é um bom indicativo para a destinação das frutas.

#### 5- *Pré-limpeza e lavagem:*

Nesta fase, são retirados, galhos, folhas e alguns detritos aderidos na casca da fruta, permitindo assim, menores danos nos extratores de suco e demais equipamentos no decorrer do processamento.

#### **6- Extração:**

Na extração mecânica, as frutas são separadas por tamanho, para melhor eficiência dos extratores. Estes separam o suco, as sementes e a polpa permitindo a total utilização dos produtos derivados desta fase.

#### **7- Desaeração e extração do óleo:**

O suco contém uma grande quantidade de ar e óleo que, devem ser reduzidos, para melhorar a sua qualidade. Nesta fase o suco é concentrado, sendo sua redução feita em tanques de desaeração (evaporadores), onde é aquecido até 100°C. Em seguida parte do óleo e todo o suco são condensados e levados à centrifugação. A concentração do suco diminui os gastos com o transporte e embalagens, diminuindo os custos de produção.

Durante a evaporação, o suco perde o seu aroma original e o óleo da casca resfriado é usado para compensar esta perda, quantificada em torno de 10%.

#### **8- Acondicionamento:**

O produto é geralmente aquecido e estabilizado para aumentar sua vida útil e colocado em diferentes tipos de recipientes, geralmente metálicos ou de plástico, e logo após é refrigerado.

#### **9- Sub-produtos:**

Do material proveniente da extração do suco concentrado, grande parte (52%), é usada na produção de farelo de ração animal. Vários produtos são extraídos da casca. Os óleos essenciais é um deles, e sua conservação é importante, para a composição final do suco.

Um outro importante subproduto é o álcool, que também tem alcançado bons índices de comercialização. A sua comercialização ainda é pequena devido os altos custos do produto.

O bagaço da laranja tem uma função importante na produção de energia da indústria, o que o torna uma fonte de energia disponível e barata, diminuindo os custos de produção do suco.

Ainda são aproveitados os óleos essenciais para cosméticos (1%), e o óleo d'limoneno para vernizes (2%). Para melhor entendimento o fluxograma esquemático destas operações é apresentado na figura 2, com a indicação do destino do suco concentrado e os subprodutos.

#### 1.4- PROBLEMAS NA INDÚSTRIA E DE ARMAZENAMENTO

Com o surgimento de novas técnicas de cultivo da laranja, o aumento de áreas plantadas, o maior consumo interno e externo, verificou-se a expansão da indústria citrícola e o aparecimento de novas fábricas de suco. Dentro das fases de processamento de uma indústria tornou-se necessário o aumento da capacidade armazenadora, pois os silos existentes tornaram-se obsoletos diante da demanda estimada e a avaliação dos danos mecânicos que ocorriam nas frutas devido aos projetos pouco adequados passou a ser relevante.

A função dos silos está relacionada diretamente com a composição do suco concentrado, dependendo do tipo de laranja armazenada em cada módulo do silo, permite-se o controle de qualidade do produto em função de suas características, isto é, da maturação das frutas. Dessa forma os silos proporcionam a distribuição adequada dos lotes, pois a colheita se processa num período prolongado, iniciando com as variedades precoces e finalizando com a variedade pêra.

Outro dado importante na construção dos silos, diz respeito, a adequação da capacidade destes ao volume de laranjas transportadas da lavoura até a indústria. A capacidade do silo deve ser tal que permita a descarga rápida, não incidindo em perdas e ociosidade no transporte, o que aumenta os custos de produção principalmente nos períodos de pique de safra. Uma das formas encontradas para resolução deste problema, foi a instalação de silos de pequena capacidade próximos às lavouras, diminuindo o tempo gasto no carregamento e transporte otimizando a utilização de caminhões e carretas.

Dimensionados para a capacidade de 400 a 600 toneladas, os silos industriais passaram a não comportar o escoamento da produção da lavoura. De acordo com TAKAO (1993)\*, as estimativas feitas pela indústria indicam perdas em torno de 15% na capacidade real dos silos.

Em síntese os silos devem satisfazer não só as exigências da indústria, mas como também, atender ao produtor. O alto custo nos combates às pragas, o atraso de colheitas e o escoamento de safras são problemas que atingem diretamente o setor. Buscando minimizá-los, os silos, são assim considerados, um elo entre a lavoura e o produto final acabado, o suco concentrado. No campo ou na indústria, os silos devem manter as condições de armazenamento, controlando o apodrecimento, perda de água e evitar danos devido a ações de cargas estáticas ou dinâmicas.

Quanto a estrutura, cuidados especiais de manutenção devem ser tomados, pois é notório o desgaste nas rampas dos silos devido ao atrito e ao ataque

\* TAKAO, R. (Citrosuco S.A.). Comunicação Pessoal, 1993.



de ácidos, provenientes da produção, principalmente nas superfícies onde são aplicadas as mantas de borracha para diminuir os danos devido ao impacto nas frutas. Algumas observações feitas nas rampas e telas de fechamento laterais em silos metálicos, comprovaram que a colocação de mantas de borracha contribuíram ainda mais para o aumento do efeito da corrosão nestas regiões. Nos locais onde ocorre o impacto da fruta com a superfície, o desgaste é bem caracterizado pela abrasão, exigindo a manutenção em intervalos de tempo muito curtos.

Considerando ainda que, as novas indústrias tem optado por silos metálicos os problemas com a falta de manutenção nas estruturas tende a se agravar. O ambiente das fábricas de suco é altamente agressivo a este material e o efeito da corrosão devido às concentrações de umidade próximas às estruturas passam a ser relevantes, pois temos nestes silos a ação conjunta da corrosão e abrasão.

Dessa forma, a opção por silos de madeira passa a ter destaque, pois a manutenção tende a ser menos onerosa para o setor citrícola. É importante ressaltar que as exigências de projeto deverão ser obrigatoriamente seguidas, principalmente quando se trata do emprego de madeiras de reflorestamento, o qual é o objetivo desta pesquisa, com atenção especial aos métodos de tratamento e preservação, atendendo às normas de segurança quanto ao projeto estrutural e a utilização de compostos preservativos que não comprometam o produto armazenado, e sejam de baixa toxidez ao homem.

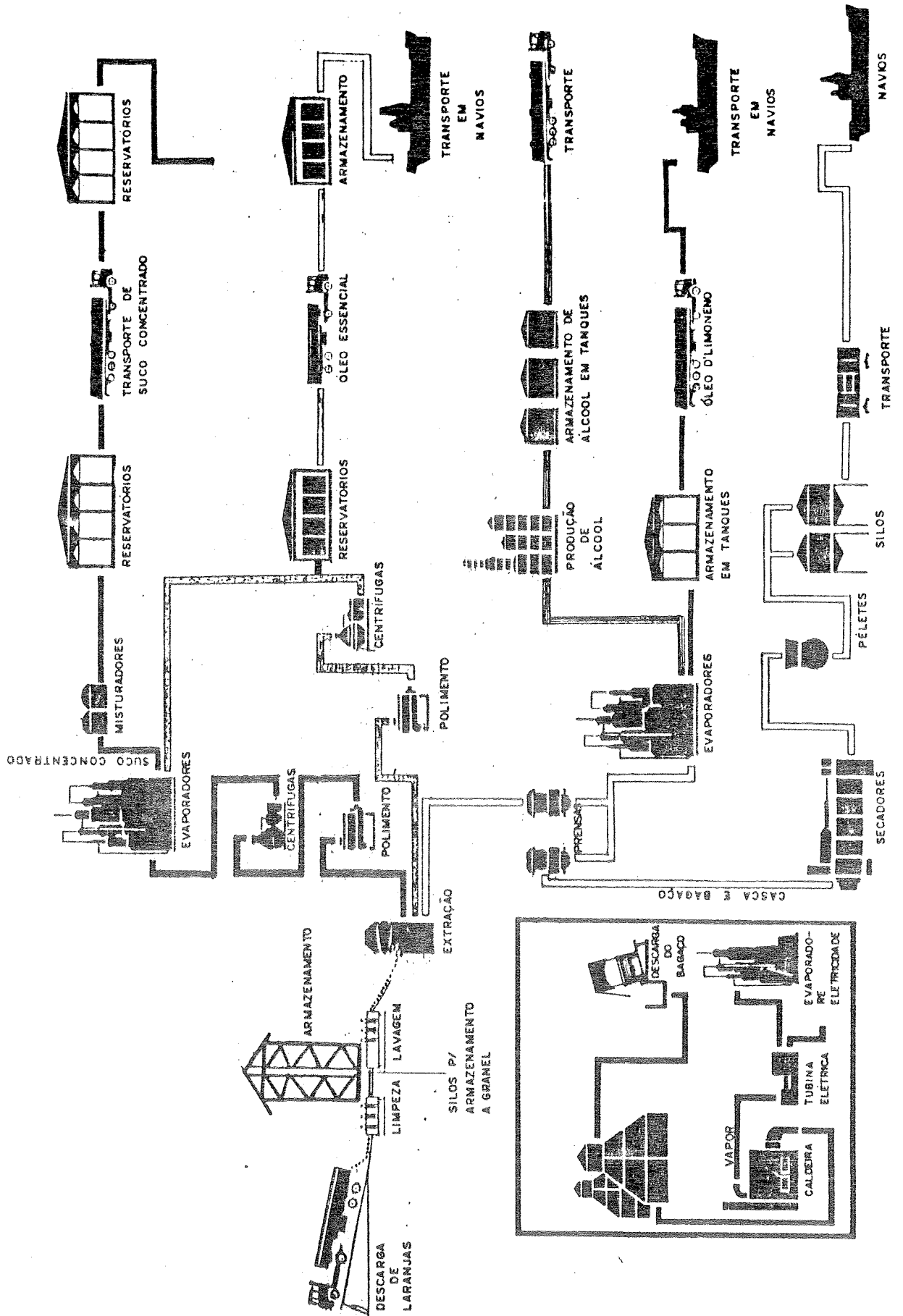


FIGURA 2 - Fluxograma da produção do suco de laranja e sub-produtos.

## 2 - CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO ARMAZENADO E ESTUDO DOS DANOS MECÂNICOS

### 2.1 - INTRODUÇÃO

As frutas cítricas, particularmente as laranjas, são expostas a uma série de solicitações causadas por operações , manuais e mecânicas, observadas durante a colheita, transporte e principalmente no armazenamento e processamento, que podem comprometer a qualidade desses produtos.

A adequação dos projetos das unidades armazenadoras está relacionada com o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do produto e com as solicitações medidas durante o processamento. O redimensionamento dos silos dependerá da avaliação do fluxo do produto armazenado no silo e da sua capacidade real, ou volume útil dos módulos de armazenamento.

As laranjas durante o seu transporte e processamento estão sujeitas a ações por períodos de tempo prolongados e variáveis. Dessa forma torna-se necessário levar em consideração o efeito do tempo durante o carregamento, nos estudos de caracterização, através de modelos reológicos.

O estudo da morfologia e fisiologia também auxiliam no entendimento das características que estão diretamente relacionadas com o comportamento mecânico. Estas informações são necessárias para definir a relação entre os níveis de qualidade do produto e as propriedades que os afetam. A laranja em sua constituição apresenta três partes morfológicas: o epicarpo, que, contém carotenos, dando a cor característica de cada variedade; o mesocarpo, que é a parte esponjosa e branca e o endocarpo, que é composto por membranas e vesículas de sucos. Vários constituintes químicos estão distribuídos entre os tecidos, apresentando concentrações diferenciadas. Como exemplo, o ácido ascórbico, que é encontrado em grande quantidade nos resíduos processados na indústria de sucos.

O ácido cítrico é encontrado, freqüentemente, nas vesículas de sucos e no próprio suco. Sua concentração aumenta com a maturação e decresce com o aumento do tamanho da fruta.

De acordo com GRIERSON E PHILIPS (1957), a maturação do fruto passa por três estágios, ocorrendo um aumento dos sólidos solúveis e açúcares, com a diminuição da acidez e mudanças quantitativas na composição química dos vários elementos.

Estas informações básicas são importantes, pois a partir destas características é que se define, durante a maturação dos frutos, por processo de amostragem, a qualidade do suco em função das exigências do mercado consumidor. Os lotes de laranjas selecionados são encaminhados para os módulos dos silos armazenadores.

Em síntese, o estudo das características de comportamento mecânico e dos danos, aliados a análise de projetos de silos tem como objetivo otimizar as unidades de armazenamento. Os dados aqui levantados visam fornecer subsídios aos projetistas, fornecendo parâmetros para os cálculos, adequando os projetos ao produto a ser armazenado.

## 2.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS

A caracterização mecânica pode mostrar como o material se comporta sob diferentes condições de carregamento. O módulo de elasticidade de uma fruta é essencial para se calcular a carga máxima admissível quando armazenada a granel, impostas cargas estáticas ou dinâmicas.

A avaliação e controle da qualidade das frutas partindo-se da dureza, firmeza e flexibilidade, são associadas aos termos de engenharia como rigidez do tecido, módulo de elasticidade, módulo de deformabilidade, etc.

As frutas quando sujeitas a certos tipos de ações (carregamento estático, quase-estático e dinâmico), se deformam. O tempo de atuação dessas ações é um parâmetro importante quando analisada a resposta do produto a estes carregamentos. As laranjas apresentam deformações elásticas até o ponto de máxima tensão, ou o ponto onde a fruta não se rompe. Nos carregamentos estáticos de longa duração, a laranja apresenta uma deformação residual ou plástica que pode alcançar níveis que venham a comprometer a sua qualidade. A partir desta análise, alguns parâmetros são

importantes, para o entendimento desse comportamento. O módulo de elasticidade e os parâmetros de viscosidade conferem às frutas um comportamento viscoelástico e passam a ser indispensáveis no estudo de adequação dos projetos de silos armazenadores.

### 2.2.1- ELASTICIDADE APLICADA ÀS FRUTAS

De acordo com MARTINS (1993), os materiais biológicos apresentam propriedades elásticas e dessa forma as constantes E, G,  $\nu$ , e K, podem ser determinadas pela teoria da elasticidade.

De acordo com a Teoria da Elasticidade citada por MOHSEENIM (1970), a relação entre as constantes elásticas e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), é dada por:

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

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

VÉLEZ PASSOS (1987), analisando o comportamento mecânico de laranjas-pêra a granel, a partir de modelos de elementos finitos, obteve um valor médio para o módulo de elasticidade,  $E = 2330$  KPa, utilizando o coeficiente de Poisson igual a 0,49. Em ensaios de compressão realizados obteve os seguintes resultados, conforme é mostrado na tabela 2.

TABELA 2- Valores de Módulo de elasticidade para laranjas em função do carregamento quase-estático.

TAXA DE DEFORMAÇÃO (CM/MIN)	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (MM/MM)	FORÇA MÁXIMA N	MOD.DE ELASTICIDADE KPa
1,29	0,354(+0,036)	264,7(+45,1)	2343,18(356,16)
1,45	0,334(+0,034)	265,2(+39,6)	2391,73(305,78)
2,00	0,365(+0,028)	291,9(+41,3)	2182,31(270,38)
2,70	0,367(+0,036)	303,1(+44,4)	2394,56(339,22)

CHUMA e SHIGA (1978), estudaram o comportamento de laranjas satsuma e obtiveram através de carregamento quase-estático as curvas de força-deslocamento. Na figura 3, é mostrado o comportamento elástico e o ponto de ruptura (resistência compressiva), para este produto.

MOHSEENIM (1965), definiu o conceito de "Bioyeld Point", como a máxima carga que uma fruta pode suportar sem apresentar danos visíveis em sua superfície. A curva característica para os produtos agrícolas é mostrada na figura 4.

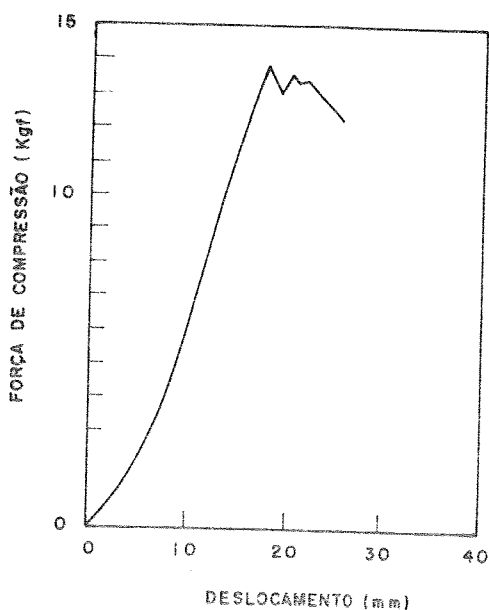


FIGURA 3.- Comportamento elástico das laranjas.

Chuma e Shiga (1978).

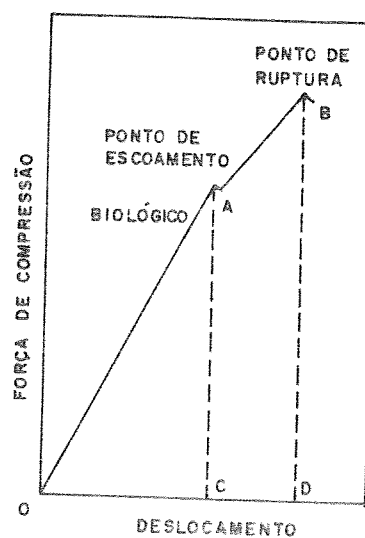


FIGURA 4.- Comportamento elástico de produtos

Agrícolas. Mohsenim (1970).

### 2.2.2- COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS LARANJAS

Os materiais biológicos têm o comportamento viscoelástico, isto é, as características elásticas são afetadas pelo tempo de aplicação da carga ou da deformação.

SARIG e ORLOVSKY (1974), estudaram o comportamento viscoelástico de laranjas e verificaram que as frutas cítricas apresentam deformação lenta, e força de relaxação, que são propriedades características de materiais viscoelásticos.

A deformação é significativamente dependente das forças aplicadas seguindo um modelo linear, e as medidas de relaxação são dependentes da deformação imposta. Na figura 5, são mostradas as curvas de tempo-força, obtidas no

ensaio de fluência. As curvas foram levantadas para carregamentos estáticos, no intervalo 2 horas, com cinco repetições.

A aplicação da carga produz uma resposta elástica, seguida de outra prolongada. Quando a carga é removida, a resposta elástica instantânea é restabelecida imediatamente, com a fruta apresentando uma deformação residual ou plástica.

Ainda pode-se observar as curvas de relaxação, com a deformação constante para o período de carregamento de duas horas, onde a força de relaxação depende da carga aplicada.

KUMAR e WANG (1971), mostraram que o uso de cargas dinâmicas é a melhor maneira de se determinar modelos mecânicos de produtos viscoelásticos. O número de ciclos a que o fruto deve ser submetido, até que ocorra os danos, depende do grau de maturação e do valor da força aplicada.

SITKEY (1986), estudando o comportamento viscoelástico de maçãs, observou que, durante o amadurecimento as propriedades mecânicas variam. O módulo de elasticidade,  $G$ , decresce de 15 a 20% durante o período de colheita até cinco semanas depois.

CHAPPELL e HAMANN (1986), através de ensaio de compressão, determinaram, observando o comportamento viscoelástico de três variedades de maçãs, as equações para o coeficiente de Poisson em função do tempo e da tensão.

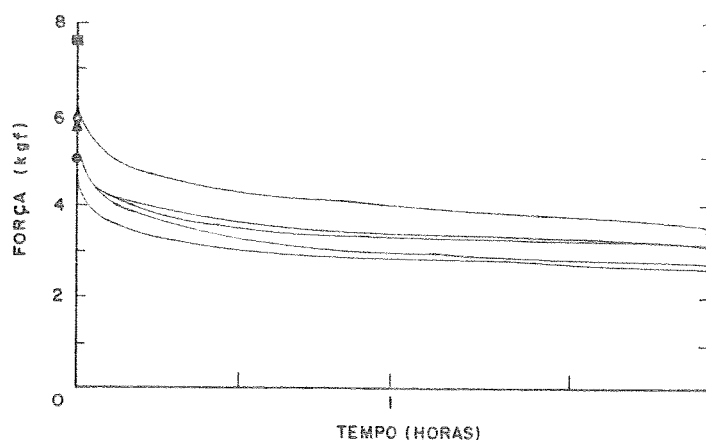
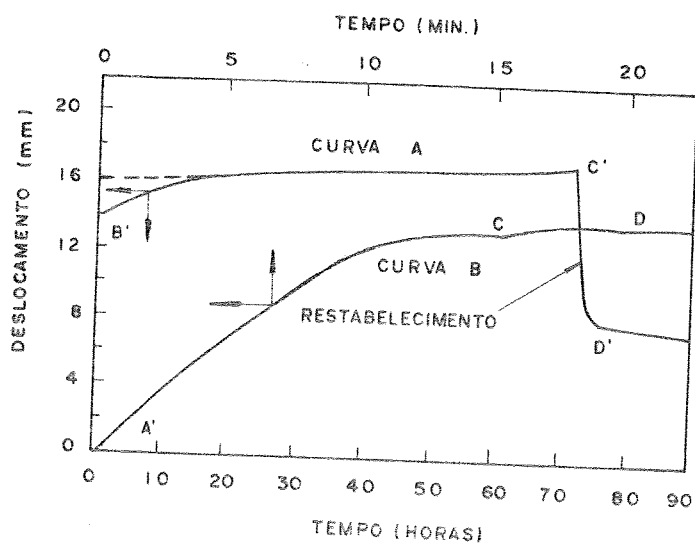


FIGURA 5-Curvas de relaxação para cinco carregamentos estáticos em laranjas, de variedade Satsuma, no intervalo de 2 horas. (Sarig e Orlovsky- 1974).

A histerese, ocorrida durante o ciclo de carregamento e descarregamento ou a quantidade de energia dissipada durante o carregamento, chega a valores bastante expressivos, (73%). Aparentemente as frutas podem absorver grandes quantidades de energia sob a ação de cargas e a histerese decresce com o grau de elasticidade, de acordo com SARIG e ORLOVSKY (1974). Na figura 6, é mostrada a curva A, obtida no carregamento estático para as laranjas de variedade Satsuma e a curva B com uma descontinuidade devido ao rompimento da casca da fruta.



Curva A - Tempo em horas. Curva B - Tempo em minutos.

FIGURA 6 - Curva característica de carregamento estático de laranja.  
(Chuma e Shiga, 1978).

SITKEY(1986), demonstrou que as deformações dos materiais agrícolas são parcialmente elásticas e parcialmente plásticas. Após uma série de carregamentos e descarregamentos permanece uma deformação residual, e o módulo de elasticidade é caracterizado pela taxa de elasticidade e deformações totais (elásticas e plásticas). As deformações plásticas residuais ocorrem devido, primariamente, à presença de poros, fendas microscópicas e descontinuidades nos tecidos. Em consequência disso, as taxas de deformação plástica e elástica, não permanecerão constantes durante os ciclos de carregamento e descarregamento.



Na figura 7, são mostradas as curvas características de tempo-deslocamento para laranjas, aplicadas as cargas estáticas, e verifica-se que, cargas acima de 5,5 Kgf levam ao rompimento da casca num período de 10 horas, quando a deformação específica encontra-se em torno de 21 mm.

As curvas foram levantadas a partir de ensaios conduzidos por CHUMA e SHIGA (1978), para laranjas de variedade Satsuma, obtendo valores de carregamento para um período de 60 horas.

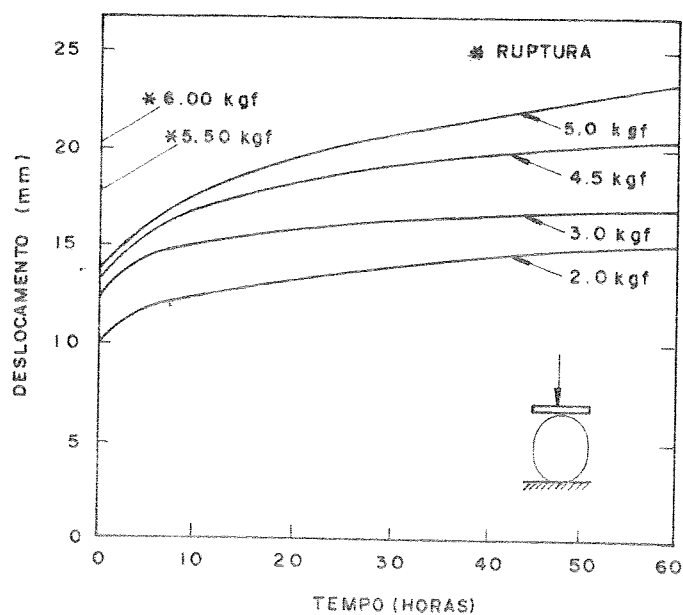


FIGURA 7 - Curvas características de carregamento estático em laranjas Satsuma.  
(Chuma e Shiga, 1978)

A curva de tempo-deslocamento para laranjas, sob carga estática, é similar ao comportamento da curva de materiais viscoelásticos e pode ser explicada pelo modelo reológico de Burgers, de acordo com CHUMA e SHIGA (1978). A curva GBC, característica do comportamento, definida em função dos parâmetros de elasticidade e viscosidade, é mostrada na figura 8, e sua expressão dada a seguir :

$$D = \frac{P}{G_1} + \frac{P}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2 T}{\eta_2}} \right) + \frac{P}{\eta_3} T \quad (3)$$

A curva CDE, é definida no momento em que a carga é retirada, considerando a deformação restituída e a deformação residual, onde :

$$D = \frac{P}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_2} t_1} \right) e^{-\frac{G_2}{\eta_2} (t-t_1)} + \frac{P}{\eta_3} t_1 \quad (4)$$

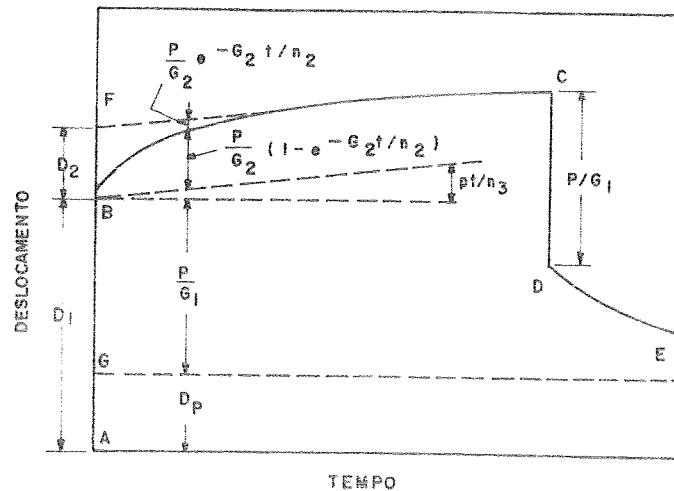


FIGURA 8- Curva característica do modelo de BURGERS. (Chuma e Shiga, 1978).

### 2.3 - IMPACTO EM LARANJAS

O impacto entre frutas e vegetais e outros materiais agrícolas é uma das maiores causas de danos em sistemas mecanizados de colheita, armazenamento e processamento. Os danos mais notados são os ferimentos e manchas. GOLDSMITH

(1960), definiu o impacto como um fenômeno de carregamento mecânico sobre uma faixa de velocidade entre o carregamento estático e o comportamento fluido. O impacto dos produtos agrícolas tem sido considerado numa faixa de velocidade entre 25 cm/s a 4000 cm/s, de acordo com FLETCHER et al (1965).

As frutas e vegetais também estão sujeitas aos danos devido ao carregamento estático e quase-estático, mas, os danos de impacto que ocorrem em grandes velocidades e curto espaço de tempo são de difícil previsão e análise, dadas as condições que ocorrem e a série de variáveis observadas no fenômeno.

FRIDLEY et al (1964), calcularam a energia produzida na ocorrência dos danos para diferentes tipos de carregamento e obtiveram os valores que são mostrados na tabela 3.

TABELA 3 - Energia produzida nos diferentes métodos de aplicação de carga.

Método de aplicação de carga	Energia produzida (Kgf cm)
Teste de compressão com êmbolo	0,304
Impacto com êmbolo	0,855
Teste de compressão com esponja de borraça - esp. 0,917cm	6,336
Teste de compressão com esponja de borraça - esp. 1,846 cm	13,364
Teste de impacto com esponja de borraça - esp. 0,917cm	14,632
Teste de impacto com esponja de borraça - esp. 1,846 cm	26,959

SITKEY (1986), estudando o impacto de corpos viscoelásticos, observou que para a análise dos materiais é necessário conhecer o módulo de elasticidade E, a viscosidade  $\eta$  e o tempo de relaxação T.

MOHSEENIM (1970), caracterizou o impacto nas seguintes formas:

- 1- Impacto de materiais viscoelásticos contra superfícies oblíquas.
- 2- Impacto entre corpos viscoelásticos, quando um está estacionário.
- 3- Impacto de materiais viscoelásticos contra superfícies amortecedoras.

LICHTENSTEIGER et al (1988), analisaram o sistema de impacto, determinando a aceleração e velocidade de objetos esféricos viscoelásticos e tomates,

onde observaram que para diferentes fases de maturação, as forças de impacto variam inversamente, isto é, quanto maior o grau de maturação menor a força de impacto registrada.

DELWICHE (1987), determinou as forças de choque das frutas em uma superfície rígida usando os modelos de impacto. Também avaliou o efeito das variações dos parâmetros das frutas como: massa, raio de curvatura, elasticidade; e os parâmetros de impacto, velocidade de contato e altura de queda. Utilizando os valores da tabela 4, o autor pôde definir a curva de tempo-força para frutas que apresentavam módulos de elasticidade variáveis.

TABELA 4. Valores de parâmetros padronizados para o modelo de impacto.

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Raio	R	$3,2 \times 10^{-2} \text{ m}$
Massa	m	0,152 Kg
Elasticidade	E	4,0 MPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,49
Altura de queda	h	$3,0 \times 10^{-2} \text{ m}$
Velocidade de contato	$V = (2gh)^{1/2}$	0,767 m/s

As curvas obtidas a partir da tabela são mostradas na figura 9, denotando o comportamento do material em função do módulo de elasticidade. As curvas plotadas simulam a força de impacto para os módulos de elasticidade com os seguintes valores:  $E = 7,0 \text{ Mpa}$  ( ... ),  $E = 4,0 \text{ Mpa}$  ( \_ \_ ),  $E = 1,0 \text{ MPa}$  (---).

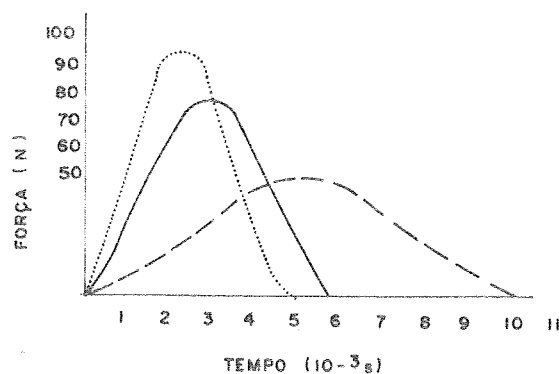


FIGURA 9 - Curvas características de impacto em função do módulo de elasticidade (Delwiche, 1987).

FLUCK e AHMED (1973), estudaram através de modelos de impacto, o comportamento das frutas, medindo a velocidade, o deslocamento e a aceleração, propondo a análise do gráfico em função do tempo, mostrado na figura 10 para se calcular a energia de impacto.

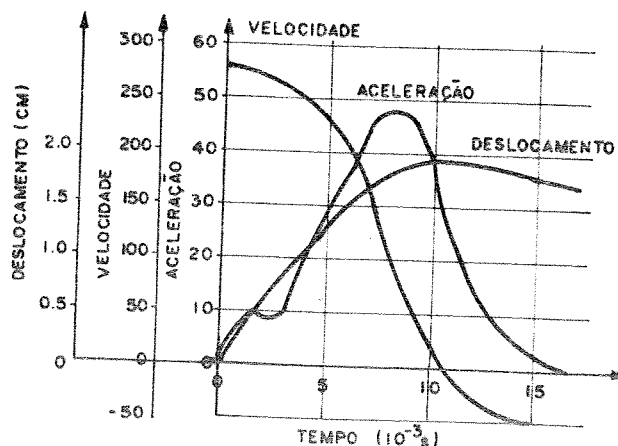


FIGURA 10 - Curvas obtidas para o modelo de impacto em limas.(Fluck et al, 1973).

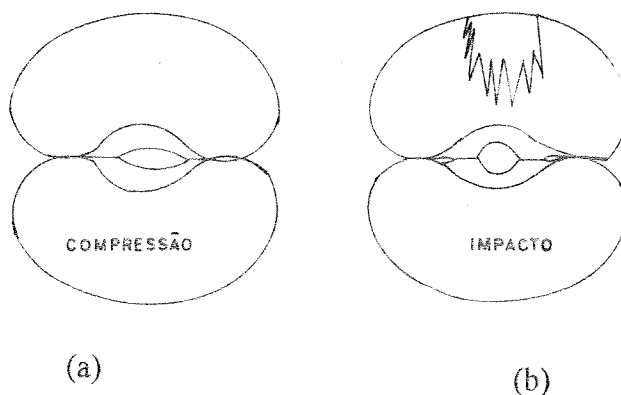
FLETCHER et al (1965), relacionaram as propriedades mecânicas para prever o comportamento das frutas, depois da queda livre para as alturas verificadas na colheita, transporte, armazenamento e processamento para diferentes taxas de carregamento.

HORSFIELD (1970), em recentes estudos de aplicação da teoria da elasticidade, observando a importância da determinação do módulo de elasticidade da fruta nos impactos, sugeriu que o rompimento da mesma é devido às tensões internas de cisalhamento, concluindo que essas tensões são proporcionais a : *a- energia de queda, b- ao módulo de elasticidade da fruta, c- ao raio da fruta e a superfície de contato.*

### 2.3.1- DANOS DEVIDO AO IMPACTO

Os danos causados pelo impacto apresentam características distintas daqueles ocasionados pelo carregamento quase-estático ou estático. Nas figuras 11a e 11b, são mostradas as seções transversais de uma fruta, caracterizando os danos causados pela compressão lenta e impacto. Na figura 11a, verifica-se a semelhança da curva a uma parábola, já na figura 11b, os danos causados pelo impacto sempre se espalham radialmente da região de impacto para dentro da fruta. Isto pode dificultar a medição do grau do dano causado pelo impacto.

De acordo com TSUKAMOTO (1981), a área danificada pela compressão pode ser estimada por uma parábola, entretanto é difícil estimar os danos causados pelo impacto através de um ajustamento de curvas. As forças ocorridas durante a colisão são exercidas e removidas num estreitíssimo intervalo de tempo, caracterizando a duração do impacto. Recentes pesquisas mostram que, para pequenos corpos o período de colisão é muito curto, e depende da deformação que ocorre na região de contato.



FIGURAS 11(a) e (b). Áreas danificadas na fruta após impacto e compressão. (Tsukamoto, 1981).

Os efeitos de vários parâmetros sobre a sensibilidade aos danos podem ser analisados sobre o estado físico e biológico do material (temperatura, umidade, estágio de crescimento e amadurecimento) e quanto as características de carregamento (estática, dinâmica, etc).

O estágio de amadurecimento influencia a sensibilidade ao dano, decisivamente, para certos frutos e vegetais. As características dessas frutas variam uniformemente, a partir dos dias que precedem a colheita até o amadurecimento aumentando a susceptibilidade aos danos ou diminuindo para outras.

Para evitar danos às frutas, a altura de queda permissível e pressão estática são de grande importância. De acordo com SITKEY (1986), a altura de queda depende do peso da fruta. Isto permite uma avaliação da máxima energia permissível para uma dada espécie. Pêras podem suportar cerca de 1,5 daN de carga estática sem danos. Isto significa que podem ser armazenadas em camadas com altura até 70 cm. Para grandes alturas de pilhas os danos aumentam devido a pressão estática.

BURKNER et al (1972), estudando os danos devido ao impacto em laranjas, classificaram-os em dois tipos: externos e internos. Grande quantidade de

danos são facilmente vistos com uma simples inspeção visual. Os danos internos causados pelo impacto já não são facilmente detectáveis.

A área danificada não se torna marrom, como em muitas frutas maduras e não ficam amolecidas, a não ser que, a força de impacto seja grande o bastante para romper as vesículas de suco.

EAKS (1961), correlacionou a proporção de  $\text{CO}_2$ , na respiração da fruta, com os danos de impacto, quando estas não apresentavam rompimento das vesículas de suco. Foram testados vários tipos de superfícies com amortecimento, objetivando reduzir os danos na fruta.

Os danos causados pelo impacto podem ser avaliados a partir da relação entre o peso da fruta e altura de queda, ou energia de impacto. CHUMA e SHIGA (1978), analisaram a relação de impacto e o peso das frutas (laranjas satsuma), obtendo resultados para duas repetições que fornecem as curvas mostradas na figura 12(a). A energia de impacto é influenciada pelo período de colheita, conforme verificaram os autores acima, e decresce com o aumento da fragilidade das frutas, ou seja, com a maturação as frutas absorvem o choque através do tecido da casca.

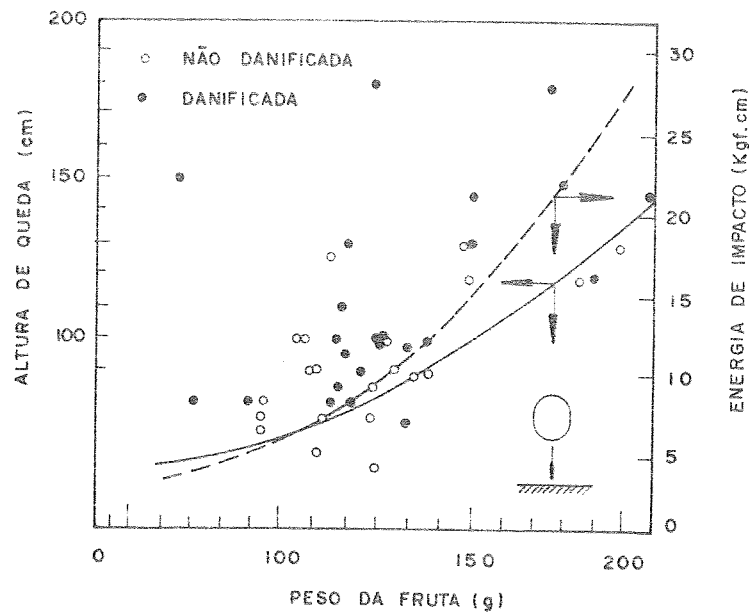


FIGURA 12(a)- Curva de energia de impacto - altura de queda e peso das frutas.  
(Chuma e Shiga, 1978).

### 2.3.2- UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS AMORTECEDORES DE IMPACTO

Com objetivo de minimizar os danos causados nas frutas, as superfícies podem ser cobertas por materiais amortecedores. Estes trabalham absorvendo a energia de impacto, prolongando a duração do mesmo e aumentando consideravelmente a área da superfície de contato como resultado de sua própria deformação.

No dimensionamento da superfície amortecedora é necessário conhecer as características físico-mecânicas do produto agrícola, a tensão permissível, as condições de impacto e as características dinâmicas do material amortecedor. Trabalhos já desenvolvidos, mostraram que para a solução do problema de impacto, as equações da teoria da elasticidade podem ser utilizadas sem cometer grandes erros.

A máxima deformação ocorre durante o impacto e pode ser determinada pelas equações básicas de contato de Hertz\* , de acordo com TIMOSHENKO e GOODIER (1970).

Na seleção do material amortecedor adequado, uma característica importante é o valor da expressão  $E/(1 - \nu^2)$  em função de uma deformação relativa do material, ou altura de queda.

BITTNER et al (1968), propuseram as equações de balanço de energia para os cálculos de energia absorvida pelos frutos durante o impacto, em alguns tipos de superfícies amortecedoras. Dispondo de um aparato com um dispositivo tipo pêndulo, foram levantados os dados dos materiais amortecedores utilizados, baseando-se nos cálculos de balanço de energia. Os materiais ensaiados foram uma espuma com espessuras de 1,6 e 2,86 cm e o polietileno com espessuras de 1,3 e 2,6 cm, obtendo melhores resultados para o primeiro material em relação a absorção da energia de impacto.

BURKNER et al (1972), testaram algumas superfícies amortecedoras e não amortecedoras para a avaliação de danos em laranjas de variedade Navel e Valência e observaram que uma queda a uma altura de 15,2 cm sobre uma superfície não amortecedora equivale aos mesmos danos que uma queda proporciona a uma altura de 3,04 m em uma superfície com um sistema de amortecimento. Os danos foram avaliados pelo monitoramento da taxa de respiração e proporção de CO<sub>2</sub> após a queda dos frutos. Os ensaios mostraram que a esponja de neoprene e poliuretano absorvem o impacto, e que a combinação destes materiais pode ser empregada na

---

\* Hertz, H. J. Math. (Crelle's J.), v. 92, 1981.

- Gesammelte Werke von Heinrich Hertz, v.1, Leipzig, 1985. p.155-196



indústria citrícola. As chapas de poliuretano e neoprene apoiadas sobre uma malha de arame pode ser usada em painéis defletores e nas paredes dos módulos dos silos.

SIYAMI et al (1988), estudaram o efeito do impacto em maçãs sobre superfícies rígidas e amortecedoras para avaliar os danos causados. Observaram que as superfícies muito duras apresentam características de impacto com alta aceleração e curta duração e as superfícies macias, baixas acelerações e grandes durações. Para superfícies duras como as chapas de aço, chegou-se a valores de tempo igual a  $2 \times 10^{-3}$  segundos com aceleração em torno de  $3000 \text{ m/s}^2$ , e para superfícies macias, madeiras, o tempo de impacto foi de  $6 \times 10^{-3}$  segundos com acelerações em torno de  $1000 \text{ m/s}^2$ .

ZAPP et al (1990), desenvolveram um sistema de instrumentação, para gravar impactos de produtos agrícolas (maçãs, pêras e laranjas). As acelerações determinadas foram usadas para estimar os danos nas frutas resultantes de sucessivos impactos. As características avaliadas foram, pico de aceleração e velocidade. Um pico de aceleração de  $110 \text{ I's}$  (aceleração de impacto), com correspondente velocidade de  $0,85 \text{ m/s}$ , produzirá um dano de aproximadamente de  $13 \text{ mm}$  de diâmetro em maçãs. Um impacto similar de  $110 \text{ I's}$  sobre uma superfície amortecedora com velocidade de  $2 \text{ m/s}$  não produzirá nenhum tipo de dano. As superfícies comparadas foram ; placa de aço e espumas de  $3,2 \text{ mm}$  e  $6,4 \text{ mm}$  de espessura.

### 2.3.3 - ACELERAÇÃO DE IMPACTO E ALTURA DE QUEDA

De acordo com CHUMA e SHIGA (1978), a aceleração de impacto pode ser expressa em função de H, definida como aceleração de impacto, relacionada com a gravidade. Para as laranjas estudadas a equação que relaciona as duas variáveis pode ser expressa da seguinte forma:

$$I = 10,8 H^{0.60} \quad (5)$$

Para obter a relação entre as variáveis I e H, usa-se a teoria de contato de Hertz, onde a máxima aceleração é dada pela eq. (6). Para a aplicação prática as eq. (7) e (8), foram modificadas, substituindo para o nosso estudo as esferas da teoria do contato, para a laranja e a superfície de impacto utilizando as eq. (9), (10), (11) e (12) resultantes das simplificações das equações propostas por TIMOSHENKO e GOODIER (1980). Os resultados obtidos pelos autores são mostrados na figura 12(b), comparando os valores teóricos e experimentais.

$$\alpha = -nn' \left( \frac{5v^2}{4nn'} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (6)$$

$$n = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{(K_1 + K_2)^2 (R_1 + R_2)}} \quad (7)$$

$$n' = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \quad (8)$$

$$n = \frac{4}{3\pi} \frac{\sqrt{R_1}}{K_1 + K_2} \quad (9)$$

$$n' = \frac{1}{m_1} \quad (10)$$

$$n = \frac{4}{3\pi} \frac{\sqrt{R_1}}{K_1} \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{1 - v^2}{\pi E} \quad (12)$$

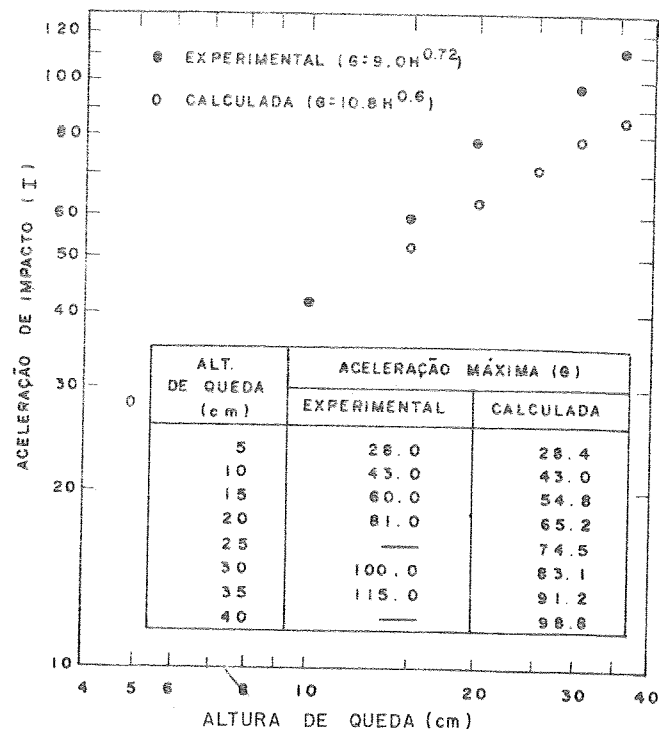


FIGURA 12(b)- Gráfico de aceleração de impacto-altura de queda.

### 2.3.4 - ASPECTOS TEÓRICOS DA CURVA DE IMPACTO

A curva típica de tempo-aceleração ou tempo-força é caracterizada na figura 12(c), para os frutos e vegetais, a partir de medições feitas com acelerômetros piezoelétricos. Ela pode ser obtida a partir dos seguintes modelos de instrumentação :

- 1- Uma massa instrumentada que cai sobre o produto (no caso a laranja).
- 2- Uma base instrumentada (célula de carga) com a qual o produto colide.
- 3- Uma superfície instrumentada (mesa de impacto) sobre a qual o produto colide.

Tomando-se como base o modelo 1, pode-se obter através da curva levantada o pico de aceleração e o tempo decorrido de impacto.

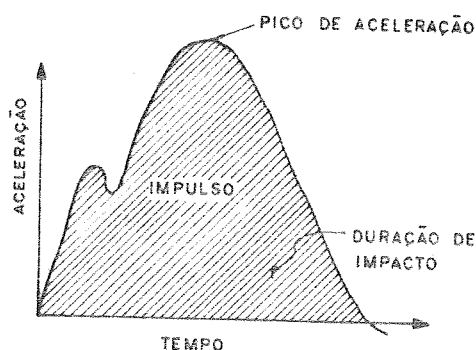


FIGURA 12(c)- Curva característica de tempo-aceleração para frutos e vegetais.

### 2.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO REALIZADA

1- A laranja comporta-se como um material viscoelástico, quando submetida a cargas estáticas e quase estáticas.

2- O modelo reológico de Burgers deve ser adotado para cálculo das deformações e determinação dos parâmetros envolvidos.

3- O impacto produz perdas significativas no processamento das laranjas e seu efeito deve ser minimizado, através da determinação da altura máxima de queda. Para este estudo será utilizada a teoria de contato de Hertz, com as simplificações já mencionadas, adotando os procedimentos de CHUMA E SHIGA (1978).

4- As superfícies amortecedoras são de grande importância para a diminuição dos danos em laranjas.

Estas conclusões definem a base teórica para a realização da pesquisa experimental para determinação dos parâmetros mecânicos do produto armazenado que serão utilizados no dimensionamento do protótipo.

### **3 - SILOS PARA ARMAZENAMENTO DE LARANJAS**

#### **3.1- HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO**

A história da construção dos silos está relacionada com o advento da citricultura no país. Os primeiros silos atenderam a demanda de produção de laranjas na região nordeste do estado de São Paulo na década de 60, suprimindo a necessidade de armazenamento do produto, próximas as fábricas que se instalavam. Com a expansão do cultivo de laranjas, e com a perspectiva de maior participação no mercado exterior de suco concentrado, os silos passaram a ter um papel fundamental, intermediando as fases de colheita e processamento, com a função de manter as condições de armazenamento da fruta até a fase de extração do suco.

Os primeiros silos a serem instalados junto às fábricas foram construídos em madeira nas fazendas e na indústria, apenas as colunas eram em elementos metálicos perfilados ou de concreto armado. Com o desenvolvimento do setor, novos silos foram desenvolvidos, com modificações em sua estrutura. Os silos passaram a apresentar elementos metálicos, compondo assim um modelo misto, com as colunas de sustentação e as vigas suportes do fundo do silo em perfis do tipo I. O fechamento dos módulos permaneceram em peças de madeira (tábuas), fixadas por meio de parafusos, espaçadas entre si permitindo a ventilação do produto armazenado. Com a instalação de novas fábricas, as indústrias desenvolveram modelos de silos metálicos, compondo sua estrutura com perfis do tipo I e o fechamento das laterais usando chapas perfuradas expandidas.

A característica básica que define os modelos de silos, industriais e alguns modelos de fazenda, são os tipos de rampas defletoras usadas no interior destes com objetivo de permitir o fluxo do produto, impedindo danos no mesmo, devido às quedas e diminuindo as pressões estáticas em função da altura de armazenamento.

A instalação de silos a nível de fazenda ocorreu com o aumento da produtividade, tornando-se necessário a construção de unidades de pequena capacidade, para permitir o escoamento do produto colhido, o que também contribuiu para a diminuição do tráfego de caminhões pesados nas proximidades das lavouras.

Construídos com o aproveitamento do desnível do terreno, permitem a descarga por gravidade através de seu fundo plano inclinado, ou podem ser elevados através de pilares e nestes casos apresentam o fundo tremonhado.

Para melhor caracterização e entendimento dessas unidades armazenadoras, é feita uma análise quanto ao material empregado na construção, quanto ao tipo de rampa defletora e quanto a instalação.

### **3.2 - TIPOS DE SILOS**

#### **3.2.1 - SILOS A NÍVEL DE FAZENDA**

Os primeiros silos instalados próximos às lavouras são de madeira, com seção quadrada e fundo inclinado plano, caracterizando o chamado silo de encosta. São unidades com capacidade adequada à produção da lavoura. Outro modelo de silo, também construído em madeira, é elevado, unimodular, de pequena capacidade com fechamento lateral com tábuas pregadas espaçadas ou telas metálicas de aço inoxidável e o fundo tremonhado.

Nos últimos anos, a indústria preocupada com melhoria no sistema de transporte e com a necessidade de carregamento mais rápido dos caminhões na lavoura, desenvolveu um silo metálico modular, com capacidade de 30 a 40 toneladas.

Para carregamento dos modelos elevados com apenas um módulo são utilizados elevadores de canecas, com capacidade de elevação de 30 a 60 toneladas/hora e na parte superior do silo é feito o acoplamento de uma bica. Nos multimodulares também são utilizados elevadores, que conduzem o produto até uma correia transportadora instalada na parte superior do silo, que distribuirá o produto nos módulos de armazenamento. Os silos de encosta por serem instalados aproveitando o desnível do terreno, dispensam o uso de elevadores para o carregamento.

A cobertura dos silos é feita com telhas de fibro-cimento ou de alumínio. Nos silos de madeira, as peças são tratadas e nos silos metálicos é feito um tratamento

anti-corrosivo e acabamento em esmalte sintético. Alguns modelos apresentam sistema de iluminação.

As figuras 13(a) e 13(b), ilustram o silo tipo encosta e o modelo elevado com a utilização de madeira e peças metálicas, respectivamente. Na figura, observa-se a construção da rampa de descarga para alimentação dos elevadores, podendo ainda apresentar um sistema de rampa hidráulica de elevação dos caminhões.

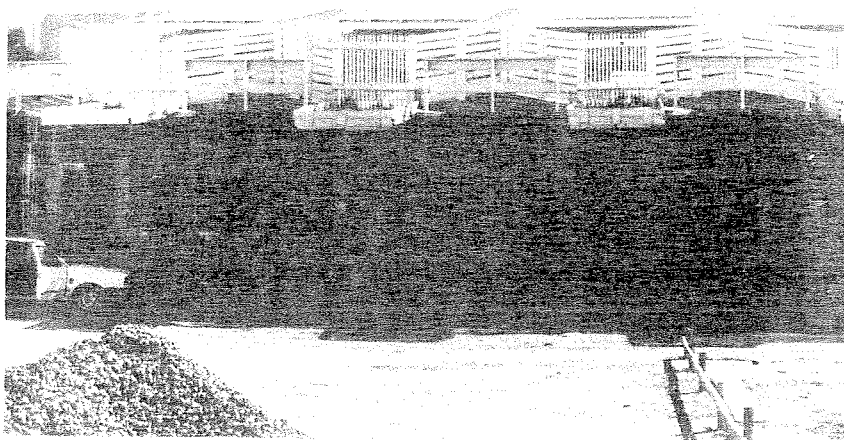


FIGURA 13(a)- Silo de encosta a nível de fazenda.

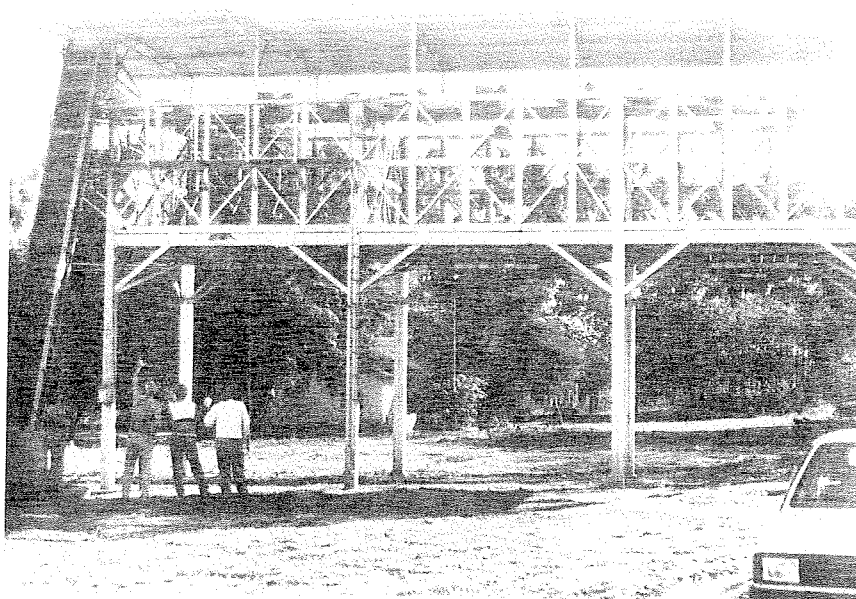


FIGURA 13(b) - Silo elevado com rampas e elevadores de alimentação.

### 3.2.2 - SILOS INDUSTRIAIS

São unidades armazenadoras instaladas na indústria, que permitem o escoamento e o fluxo do material (laranja), intermediando as fases de colheita e processamento.

Para um conhecimento mais detalhado alguns dados técnicos são descritos. São unidades com capacidades de 400 a 600 toneladas, modulares, com fixação por meio de parafusos entre os módulos. O abastecimento é feito por meio de elevadores de canecas, com capacidade de 120 ton./hora e a distribuição nos módulos é feita através de correia laminada e emborrachada com bicas acopladas individualmente. A alimentação dos elevadores é feita através de uma rampa construída no local, ou ainda podem ser instaladas rampas hidráulicas.

Os tipos de silos encontrados são classificados em função dos materiais empregados e os tipos de rampas adotadas e esta tipificação praticamente os caracteriza. Pode ser adotada a seguinte classificação :

#### Quanto ao material empregado na sua construção :

- 1- Silos de Madeira
- 2- Silos Mistos ( madeira e perfis metálicos )
- 3- Silos Metálicos

#### Quanto aos tipos de rampas adotadas

- 1- Silos com rampas em espiral
- 2- Silos com rampas tipo tremonhas
- 3- Silos com rampas perimetrais
- 4- Silos com rampas alternadas

#### 3.2.2.1- QUANTO AO MATERIAL EMPREGADO NA CONSTRUÇÃO

##### 1- SILOS DE MADEIRA

São os silos mais antigos encontrados na indústria citrícola. As primeiras unidades foram instaladas nos anos 60 juntamente com as fábricas. As peças estruturais como as colunas são em concreto armado e algumas unidades apresentavam peças perfiladas tipo C com as vigas em madeira e o fechamento das paredes laterais em peças de madeira fixadas por meio de parafusos com espaçamento

entre elas proporcionando ventilação no interior dos módulos. A estrutura da cobertura também é em madeira com o uso de telhas de fibro-cimento.

## 2- SILOS MISTOS

Neste modelo foram feitas algumas modificações estruturais, com substituição dos pilares de sustentação e vigas de madeira, por perfis metálicos tipo I, de aço A36. Nas rampas defletoras, algumas modificações foram feitas, mudando a inclinação das mesmas e o fechamento lateral não foi modificado, permanecendo as madeiras, e a cobertura em estrutura em madeira com telhas de fibro-cimento. A sustentação do fundo inclinado é feita por vigas de madeira (6 cm x 16 cm), apoiadas sobre vigas do tipo I 10".

## 3- SILOS METÁLICOS

É o tipo de silo mais usado atualmente pelas novas fábricas que estão sendo instaladas, onde todas as peças de madeira foram substituídas por peças metálicas perfiladas soldadas pelo processo MIG. A estrutura é montada com perfis do tipo I, de aço A36 (pilares e vigas laterais). As rampas são de chapas metálicas de 3,2 mm apoiadas em perfis do tipo cantoneira de 2" x 2" x 1/4" nas laterais e suportada por perfis do tipo I 4", espaçados de 60 cm. A rampa do fundo do silo é suportada por perfil tipo I 10". O fechamento das laterais é feito por telas de aço inoxidável de 19 mm, perfuradas, permitindo a ventilação do produto armazenado. A figura 15 ilustra um silo misto, apresentando algumas modificações nos módulos com a instalação de chapas metálicas no lugar das rampas de madeira e a substituição das vigas de madeira por perfis metálicos no fundo do silo.

### 3.2.2.2 - QUANTO AOS TIPOS DE RAMPAS ADOTADAS

#### 1- SILOS COM RAMPAS EM ESPIRAL

É um modelo experimental, estruturado com peças perfiladas metálicas e fechamento das paredes laterais em madeira. Suas rampas são em forma de um espiral em material de fibra plástica ou de madeira laminada. As rampas são fixadas em uma coluna central com altura correspondente à do silo. O objetivo da construção deste



modelo é a diminuição do efeito de impacto devido as quedas que os modelos anteriores proporcionam. Atendendo a esta necessidade o modelo foi adequado, mas a redução no volume real para a qual o silo foi dimensionado, impediram o seu uso efetivo e a construção de novas unidades. Alguns detalhes de construção deste modelo, são mostrados na figura 14, indicando o posicionamento da rampa e sua fixação na coluna central.

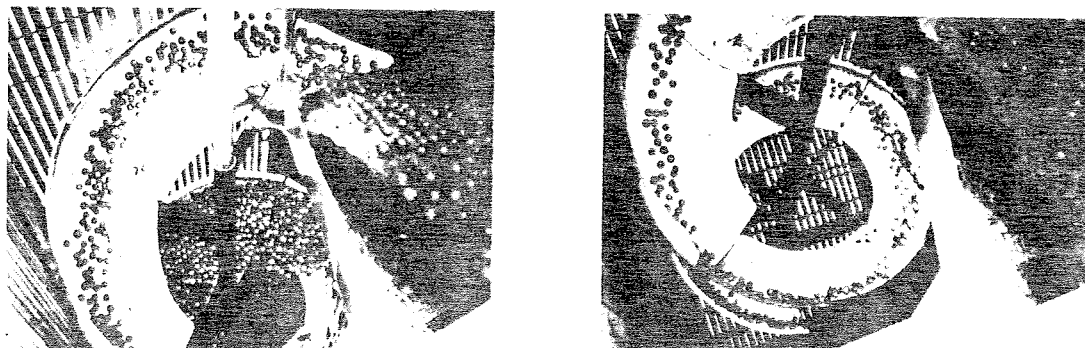


FIGURA 14- Modelo de silo com rampa espiral.

## 2 - SILOS COM RAMPAS TIPO TREMONHAS

É a versão mais antiga dos modelos de silos usados pela indústria, apresentando algumas peculiaridades quanto ao fluxo, com rampas centrais espaçadas de 1,20 m e a colocação de rampas defletoras entre elas diminuindo a altura de queda para 0,60 m, o que é interessante, propiciando a redução de danos, devido ao impacto, durante o fluxo do produto. As rampas são fixadas por meio de parafusos, com inclinação de  $26^\circ$ . Os módulos apresentam dimensões internas reduzidas em comparação ao modelo anterior. Sua largura é de 1,50 m e comprimento de 3,50 m; as paredes divisórias entre módulos é montada através de vigas de madeira com a fixação das tábuas de madeira nas duas faces da viga, formando um painel. A altura é de 5,50 m considerando o lado superior da rampa do fundo e 6,50 m na parte inferior, resultando numa inclinação de  $16^\circ$ , para o escoamento do produto. Não existem modelos de silos metálicos nessa configuração. Os primeiros silos construídos são de madeira e mistos, com a estrutura em peças perfiladas, ou com colunas de concreto armado, como citado anteriormente. A figura 16 ilustra este modelo, indicando o posicionamento das rampas e da divisória no interior dos módulos e a inclinação do

fundo do silo que é de  $28^\circ$ . Nas regiões de maior impacto do fruto com as paredes e rampas, tem sido efetuada a colocação de mantas de borracha como material amortecedor de choques.

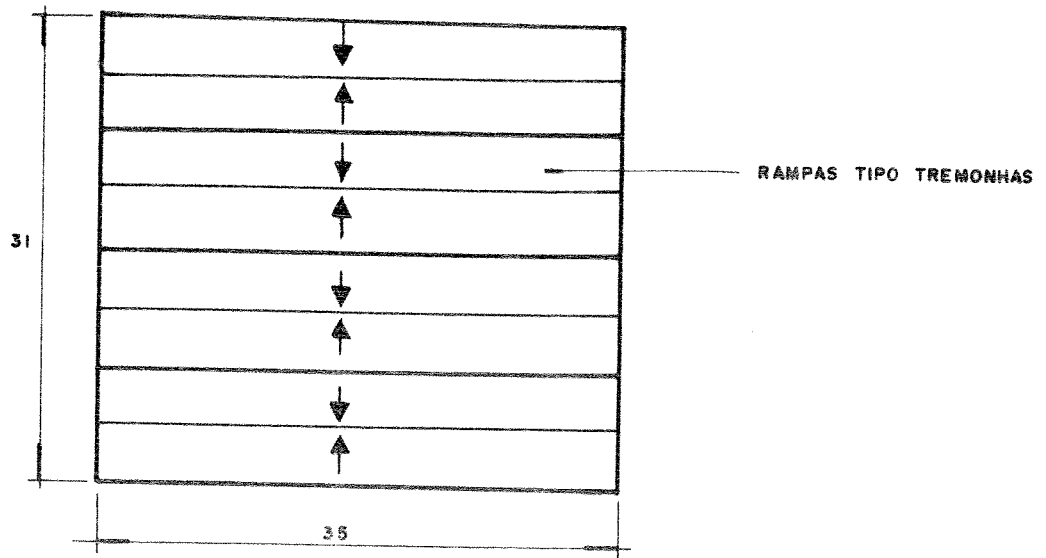
### 3- SILOS COM RAMPAS PERIMETRAIS

Construído totalmente em peças metálicas, tem sido a opção das novas fábricas instaladas na região. Alguns modelos mais antigos foram construídos com colunas em peças duplas perfiladas do tipo U de 6". As rampas defletoras de 3,2 mm de espessura são apoiadas em peças de perfil tipo cantoneira de 2"x2"x1/4", soldadas nas vigas laterais dos silos e sua parte interna apoiada em colunas centrais em modelo treliçado. O ângulo de inclinação das rampas é de  $18^\circ$ , e o fundo do silo tem uma inclinação de  $28^\circ$ , conforme é mostrado na figura 3.5. A estrutura de cobertura deste modelo é em peças metálicas em perfil tipo I, com telhas de alumínio. Alguns modelos apresentam lanternins, que permitem a ventilação da parte superior. Como estes silos são montados num ambiente altamente agressivo, as peças metálicas são submetidas ao um tratamento anti-corrosivo e com acabamento em esmalte sintético. Algumas modificações tem sido executadas para a solução do problema de impacto nas tremonhas de recepção e nas rampas internas dos silos com a fixação de mantas de borracha, por meio de arrebites ; modificações também sugeridas para o modelo anterior. A figura 17 ilustra os detalhes deste modelo.

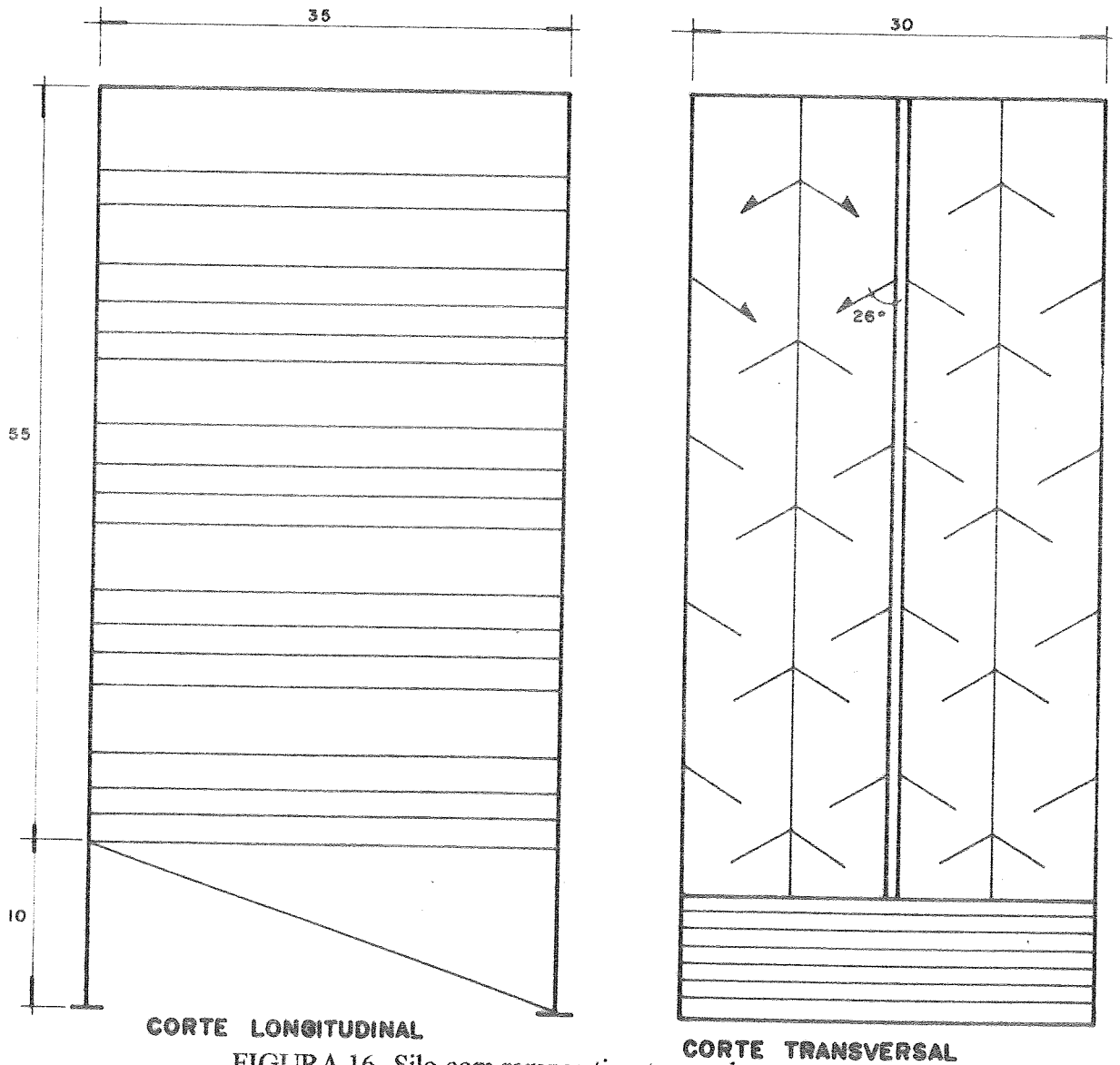
### 4- SILOS COM RAMPAS ALTERNADAS

Apresentam 6 rampas de amortecimento em madeira, fixadas, alternadamente nas paredes laterais e uma rampa central com inclinação oposta, permitindo o fluxo descendente das frutas, até o fundo do silo. O fundo tem uma inclinação de  $16^\circ$ , onde através de aberturas laterais, o produto escoará até as canaletas centrais para prosseguir o processamento. Neste modelo de silo, as ligações são feitas por meio de parafusos. As dimensões internas dos módulos são 3,50x3,10 m, com alturas de 5,5 m e 6,5 m no lado das aberturas laterais de escoamento. A figura 18 ilustra este modelo de silo, caracterizando alguns detalhes construtivos como a inclinação da primeira rampa com  $16^\circ$  e as duas rampas seguintes com inclinação de  $23^\circ$ .





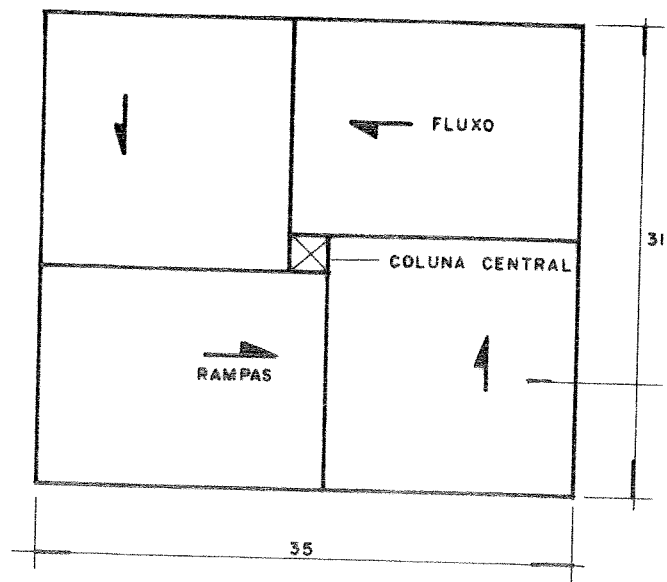
PLANTA  
MODELO REDUZIDO - ESC. 1:10



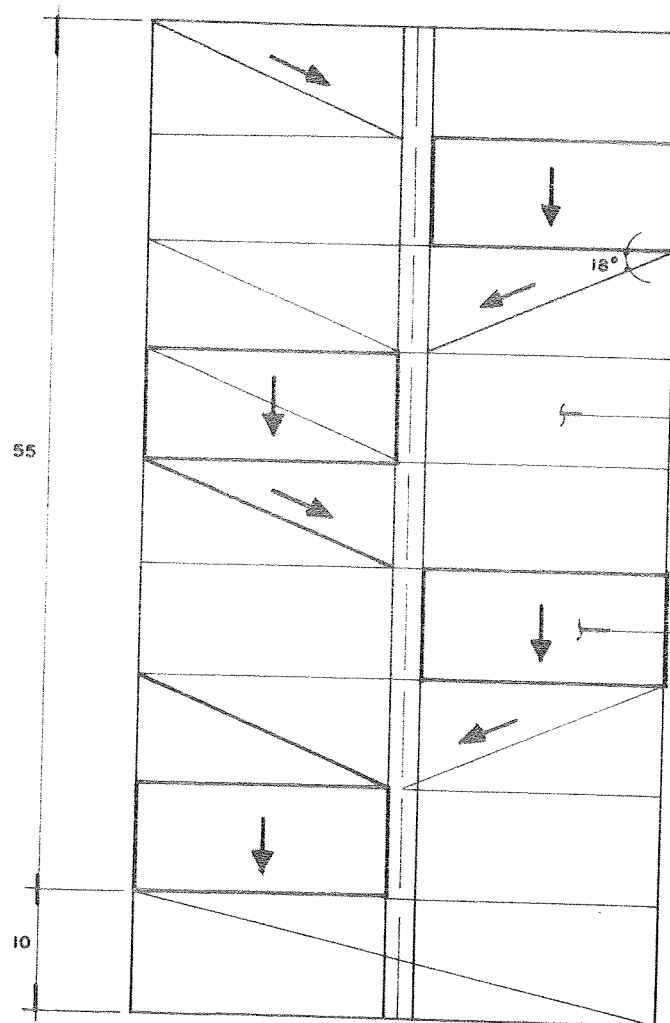
CORTE LONGITUDINAL

CORTE TRANSVERSAL

FIGURA 16- Silo com rampas tipo tremonhas.



- PLANTA -



CORTE

FIGURA 17 - Silos com rampas perimetrais.

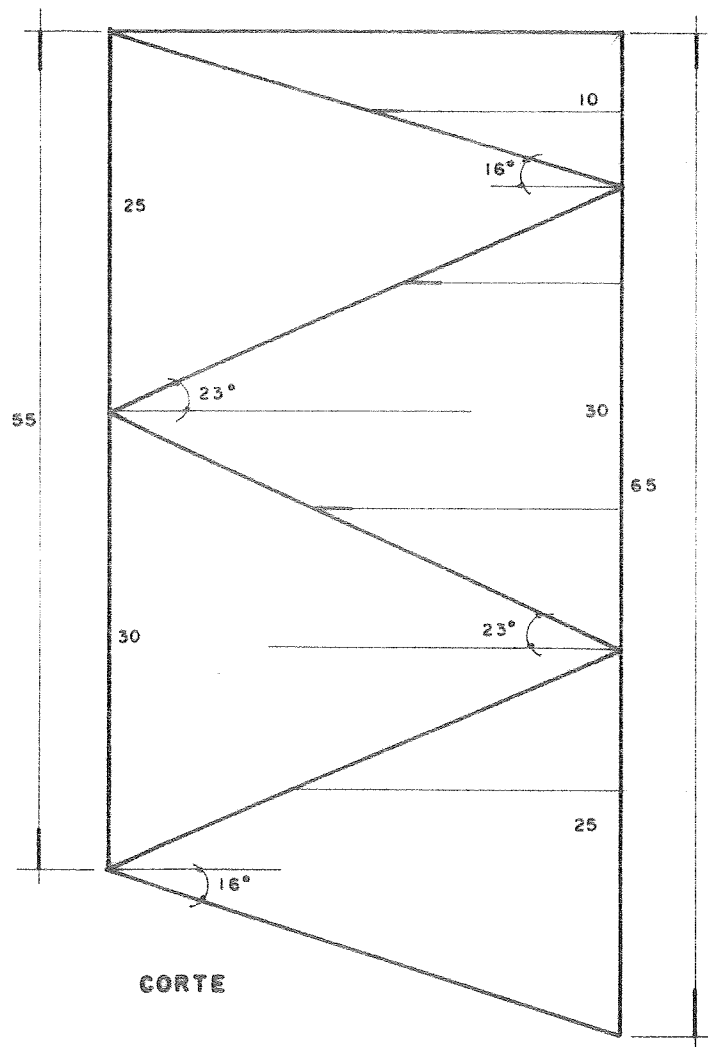
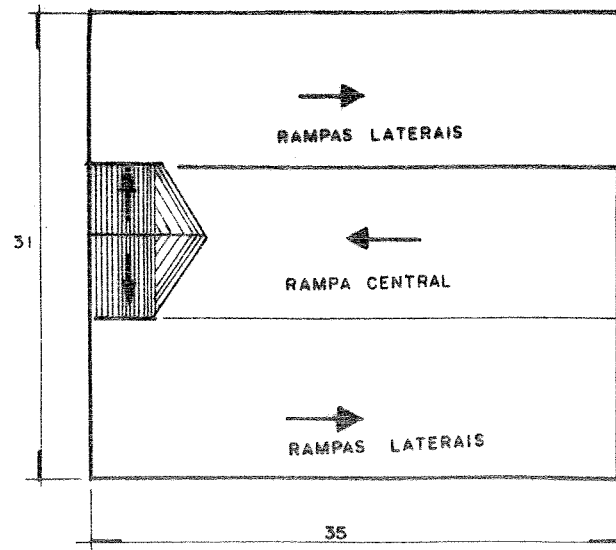


FIGURA 18- Silos com rampas alternadas.

### 3.3 - ESTUDO DAS PRESSÕES EM SILOS PARA ARMAZENAMENTO DE LARANJAS

De acordo com RAVENET(1992), os primeiros grandes silos para armazenamento de grãos, foram construídos em concreto armado com aplicação das pressões hidrostáticas.

Segundo esta teoria, a pressão sobre um ponto é constante e independente da direção. No estudo das pressões hidrostáticas, considera-se que o material não tem coesão e não se prevê o aparecimento de forças de atrito do produto com a parede.

Muitos silos foram dimensionados usando os princípios da hidrodinâmica, desconsiderando o efeito do atrito entre o material armazenado e as paredes de contenção destes, assumindo que todo o peso do produto era transmitido para o fundo do silo. Como resultado dessa hipótese muitas estruturas se romperam devido as forças de atrito exercidas nas paredes, que foram negligenciadas no cálculo.

A diferença entre um fluido e um produto granular é o atrito entre o produto e a parede, praticamente constante durante a descarga. O atrito entre os materiais granulares e as paredes dos silos é objeto de um vasto estudo para a aplicação no dimensionamento dessas estruturas. Estimar as pressões laterais e verticais e as cargas no fundo do silo, sobre as condições estáticas e dinâmicas, continua sendo um problema para os engenheiros projetistas.

Esta propriedade é que distingue, fundamentalmente um fluido e um produto granular, quando se projeta um silo para armazenamento de produtos agrícolas e verifica-se que este não é adequado para o armazenamento de fluidos devido as pressões laterais.

Várias teorias são propostas para o cálculo de pressões laterais e verticais em silos. É de consenso entre os pesquisadores que a relação entre pressões verticais e horizontais devem ser estimadas relacionando-as através de um coeficiente  $K$ , determinado a partir do produto armazenado e o tipo de parede usada na construção dos silos. Alguns valores estimados de  $K$  são mostrados na tabela 6.

YAEGER e PRATT (1974), avaliaram as pressões exercidas em painéis de madeira para armazenamento de batatas a granel, através de células de cargas e extensômetros, obtendo deslocamentos laterais de 3,73 mm nos painéis para uma carga de 890 N e um deslocamento de 0,3 mm no fundo do recipiente para a máxima carga. A utilização das células de carga segundo os autores é de aplicação confiável para avaliação da relação entre as pressões lateral e vertical, no dimensionamento numa escala comercial de armazenamento, isto é, na escala real.

Para o estudo das pressões nas paredes dos silos de laranjas utilizou-se a Norma Canadense (CANADIAN FARM BUILDING CODE, 1983).

O estudo das pressões em silos não é finalidade específica desta pesquisa. Trabalhos diretamente relacionados a este assunto são tratados por CALIL JR. (1989).

### 3.3.1- A NORMA CANADENSE (CFBC)

Alguns itens são definidos de forma sucinta, para melhor esclarecimento de sua aplicação das notações e conceitos.

*Projeto estrutural* : Os elementos estruturais em madeira em contato com o solo deverão ser tratados conforme as especificações do item de preservação da madeira.

*Cargas estruturais e Procedimentos* : As cargas mínimas especificadas pela norma para pisos que suportam cargas devido ao armazenamento de produtos agrícolas, deverão ser projetados de acordo com a necessidade, mas, não poderão ser menores que 5,0 KPa. Em áreas destinadas a descarga de veículos com instalação de máquinas de processamento e elevação, as cargas deverão ser acrescidas de 50% devido ao impacto e vibração desses equipamentos.

*Procedimentos de Projetos* : As tensões admissíveis comparadas com as tensões de trabalho deverão ser acrescidas de 25%. Para as cargas estáticas o fator de carga é 0.8 e exceto para as cargas estáticas de projeto, os fatores de carga em dimensionamento usando o concreto é permitido a redução de 20%.

*Pisos para Produtos Armazenados* : As densidades dos produtos agrícolas são mostradas na tabela 7, de acordo com CFBC (1983). As estruturas de armazenamento de grãos secos, frutos e vegetais deverão ser projetadas de acordo com as cargas impostas pelo produto.

*Ações em Pisos devido a Instalação de Equipamentos para Processamento de Produtos Agrícolas* : Na falta de informação específica, os pisos que sustentam os equipamentos deverão ser projetados para as seguintes cargas concentradas que produzem os efeitos mais críticos; 2,5 KPa e 5,0 KPa quando instalados em áreas de 0,75m x 0,30m e 1,2m x 1,0 m, respectivamente.

*Ações em Paredes de Silos Horizontais para silagem* : As paredes horizontais com inclinação menor que 10° com a vertical devem ser dimensionadas admitindo uma pressão de 6,7 KPa aplicada normal e uniformemente na área abaixo



da linha de 0,6 metros do topo da parede e, para a distribuição triangular de pressão de 0 KPa no topo e aumentando até 6,7 KPa na linha de 0,6 metros abaixo do topo da parede.

### 3.3.1.1- PRESSÕES EM ARMAZENAMENTO DE GRÃOS E PRODUTOS PULVERULENTOS

Para o cálculo das pressões verticais e horizontais em armazenamento de grãos e produtos pulverulentos, a Norma Canadense adota a seguinte simbologia :

F = Carga máxima vertical por unidade de perímetro devido ao atrito, KN/m

L = Pressão horizontal contra a parede do silo, KPa

V = L/K = Pressão vertical no fundo do silo com a massa de grãos, KPa

$\mu = \tan\phi_1$  = coeficiente de atrito entre o produto e a parede do silo ( tabela 5 )

K = relação entre pressão vertical e pressão horizontal ( tabela 6 )

H = altura considerada a partir do topo do silo, m

D = diâmetro do silo, m

R = Raio hidráulico :

-para silos circulares = 1/4 do diâmetro

-para silos retangulares =  $\frac{2ab - a^2}{4b}$  (maior lado)

=  $\frac{a}{4}$  (menor lado)

$\rho$  = massa específica, Kg/m<sup>3</sup> (tabela 7)

$\alpha$  = aceleração da gravidade - 9,81 m/s<sup>2</sup>

$\phi$  = ângulo de atrito interno entre grão-parede

TABELA 5 - Coeficientes de atrito para grãos. (CFBC - 1983)

Tipo de grão	Coeficiente de atrito do grão-parede ( $\mu$ )			Atrito interno $\tan \phi$
	aço	Compensado	Concreto	
Trigo	0,3	0,4	0,6	0,5
cevada	0,3	0,4	0,6	0,5
milho	0,3	0,4	0,6	0,5
soja	0,2	0,35	0,5	0,5

TABELA 6 - Relação entre pressões lateral e vertical. (CFBC - 1983).

Tipo de grão	Valores de K	
	Parede lisa	Parede rugosa
Trigo	0,4	0,6
cevada	0,4	0,6
milho	0,4	0,6
soja	0,4	0,6
aveia	0,55	0,8

TABELA 7 - Massa específica de materiais agrícolas armazenados. (CFBC - 1983)

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA ( $\rho$ )- Kg/m <sup>3</sup>
Cevada	650
Milho	800
Ervilhas	820
Arroz	600
Soja	780
Girassol	320-420
Alfafa	250-350
Maçãs a granel	600
Maçãs em caixas	500
Vagem	400
Repolho	450
Cenoura	650
Cereja	650
Cebola	650-740
Batatas	670

### 3.3.1.2-PRESSÕES EM SILOS PARA ARMAZENAMENTO DE FRUTAS

De acordo com a CFBC (1983), são definidas algumas equações que tratam dos cálculos de pressões laterais e verticais, para armazenamento a granel de frutas e vegetais que são de interesse da pesquisa. Inicialmente algumas notações são definidas para melhor entendimento destas :

L - Pressão horizontal contra a parede do silo, kPa

V - Pressão vertical sobre o fundo do silo, kPa

H - Altura de armazenamento, considerada na borda superior do silo, m

$\rho$  - Massa específica - Dados fornecidos na tabela 7.

g - Aceleração da gravidade, 9,81 m/s<sup>2</sup>

$\theta$  - Ângulo de repouso - É assumido o valor de 32° para batatas e para outros vegetais e frutas. Este valor tem sido usado com segurança. Para as laranjas foi calculado o valor de 37° - (valor experimental).

A norma canadense ainda define alguns conceitos para aplicação das equações de cálculo de pressões usando a notação citada.

#### SILOS BAIXOS

São silos onde a altura é menor que o diâmetro ou lado e as pressões horizontais, contra a parede vertical é igual a :

$$L = \frac{\rho g H}{1000} \left( \frac{1 - \text{sen } \theta}{1 + \text{sen } \theta} \right) \quad (13)$$

$$\text{onde; } K = \frac{1 - \text{sen } \theta}{1 + \text{sen } \theta}$$

A pressão vertical para os silos baixos é dada por :

$$V = \frac{\rho g H}{1000} \quad (14)$$

## SILOS ALTOS

São silos onde a altura é maior ou igual ao diâmetro ou lado, e o cálculo das pressões horizontais é feito através da equação :

$$L = \frac{C\rho gH}{1000} \left( \frac{1 - \text{sen } \theta}{1 + \text{sen } \theta} \right) \quad (15)$$

Onde C é :

- 1,0 para  $H \leq D$
- 0,8 para  $D < H < 1,5D$
- 0,7 para  $1,5 < H < 2,0D$
- 0,6 para  $H \geq 2,0D$

As pressões verticais para o silos é calculada por :

$$V = \frac{\rho gH}{1000} \quad (16)$$

### 3.3.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO DE PRESSÕES EM SILOS PARA ARMAZENAMENTO DE LARANJAS

Será adotada a Norma Canadense para os cálculos das pressões laterais e verticais para este tipo de silo devido as suas características próprias e as características do produto a ser armazenado (laranjas). Esta norma é a única que trata explicitamente sobre o armazenamento de frutas e legumes.

Considerados silos baixos, em função do seu sistema construtivo, algumas simplificações são adotadas nos cálculos, admitindo que a relação entre pressão vertical e pressão horizontal se mantém constante. Para isso o valor de K para laranjas é definido em função do ângulo de repouso.

Entre as normas existentes, todas tratam essa relação em função desse fator, admitindo o seu cálculo a partir do ângulo de atrito entre o produto e a parede do silo. Para o caso de silos para armazenamento de frutas, considera-se o ângulo de repouso que permite cálculos seguros das pressões, conforme é especificado pela Norma Canadense.

## **4 - CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS EMPREGADAS NA CONSTRUÇÃO DOS SILOS PARA LARANJAS**

### **4.1 - INTRODUÇÃO**

A madeira é um material que apresenta algumas propriedades que a fazem ocupar um lugar de destaque em diversas áreas, acompanhando o desenvolvimento tecnológico da indústria e da construção civil. A resistência mecânica elevada em relação a massa própria, a facilidade de usinagem, a resistência química, as boas propriedades de isolamento térmico e elétrico, além de ser encontrada na natureza com ampla faixa de texturas e colorações, conferem a este material a sua aplicação nas construções e estruturas como matéria-prima e em vários setores industriais.

Considerando estas características favoráveis a sua utilização, a madeira devido à natureza orgânica dos seus constituintes poliméricos pode ter sua durabilidade comprometida por uma série de agentes biológicos, físicos e ou químicos, que analisados, exigiu o desenvolvimento de técnicas de preservação para cumprir um importante papel econômico, principalmente quando se trata de madeiras de reflorestamento.

Atualmente as madeiras de eucalipto e pinus, têm sido um material largamente utilizado, atendendo a diversas finalidades desde a produção de energia e no aproveitamento na indústria da construção civil, devido ao grande aumento das áreas reflorestadas tornando-a numa grande fonte de matéria-prima.

Com o desenvolvimento da indústria de preservativos e o crescimento da utilização das madeiras de reflorestamento, o setor industrial passou a utilizar os postes preservados em linhas de telefonia e dormentes nas ferrovias. O setor da construção civil acompanhando a evolução das técnicas de preservação estendeu a aplicação dessas madeiras com desempenho satisfatório no uso de peças de acabamento e também estruturais.

As vantagens apresentadas, caracterizam a madeira de reflorestamento como um material de utilização na construção civil de baixo custo e de grande disponibilidade, colocando estas madeiras como fonte de recursos e exploração renovável e inesgotável, com o aumento de seu emprego devido ao baixo custo.

A opção por este material, é justificada pelas vantagens descritas acima e ainda, pela proximidade que este se encontra disponível para o uso. Como já mencionado no capítulo 1, a maioria das fábricas de suco e áreas de lavoura de laranja estão localizadas no estado de São Paulo e próximas a grandes áreas de reflorestamento. Com isso, o seu emprego é viabilizado devido ao custo de transporte ser diminuído, já que para a maioria das espécies de madeiras tropicais isto não acontece, dada também a escassez de matéria prima.

## 4.2 - A UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO

### 4.2.1 - EUCALIPTO

O eucalipto foi introduzido no Brasil entre 1865 e 1868 como árvore decorativa e começou a ser plantado para fins industriais em 1903. As primeiras aplicações dessa madeira foram feitas em linhas telefônicas como postes e em ferrovias como dormentes e em seguida para a produção de papel e celulose.

A utilização de postes de eucalipto não preservados já se fazia necessária na década de 30, devido a relativa escassez das madeiras nativas e o aumento da demanda em diversas áreas.

No estado de São Paulo, grandes áreas de reflorestamento estão sendo cultivadas para atender às várias utilizações do eucalipto, na indústria de celulose, na produção de energia, na utilização nas ferrovias como dormentes, postes e cruzetas.

De acordo com SALLES (1991), existe uma grande oferta de matéria prima com um estoque de madeira de eucalipto em torno de 141 milhões de m<sup>3</sup> o que a torna um material de construção de grande destaque e aceitação.

Muitas das espécies de eucalipto são conhecidas como árvores típicas de florestas altas, com altura variando de trinta a cinquenta metros, podendo, alcançar até cem metros de altura. Algumas espécies são consideradas arbustivas.

Devido ao seu rápido crescimento e sua fácil adaptação a diferentes condições climáticas, os eucaliptos se distribuíram por várias regiões. Dada a

variedade de espécies, apresentam considerável diversidade de características físico-mecânicas.

As madeiras de reflorestamento de eucalipto, dadas as suas características peculiares, tem sido empregadas com maior frequência na construção civil. Além das inúmeras aplicações que são conhecidas, como por exemplo as espécies do gênero *Eucalyptus* que apresentam uma diversidade de usos : celulose, carvão, construção naval, dormentes, com o conhecimento de suas características mecânicas e preservação estas madeiras passaram a ser empregadas com função estrutural.

De acordo com ANDRADE (1960), a madeira de eucalipto pode ser empregada de diversas formas, caracterizando a aplicação de algumas espécies como a *Maculata*, *Paniculata*, *Citriodora*, *Punctata* e a *Teriticornis* em estruturas de cobertura, de pontes e na construção civil em geral.

#### 4.2.2 - PINUS

A introdução de coníferas no Brasil, foi inicialmente feita para fins ornamentais e em seguida para fins silviculturais. A finalidade era a de suprir a escassez de matéria prima causada pelo intenso extrativismo das nossas reservas e a dependência nacional da importação de celulose e resina; produtos típicos de coníferas que geraram evasão de divisas para o exterior.

O *Pinus* é uma conífera do gênero *Pinus* da família botânica das *Pináceae*. São plantas lenhosas, em geral arbóreas, de altura variando de 30 a 50 metros, dependendo da espécie. Seu tronco é reto, mais ou menos cilíndrico, e sua copa em forma de cone. A madeira possui massa específica a 15% de umidade, que varia de 400 a 520 Kg/m<sup>3</sup>.

Segundo ARRUDA VEIGA (1981), as regiões de reflorestamento no estado de São Paulo se apresentam adequadas para os *Pinus* subtropicais e tropicais. Os *Pinus* subtropicais como *Pinus elliottii* variedade *elliottii* e *Pinus taeda*, ocupam a maior área do estado de São Paulo, cujo o clima é dotado de invernos frios e de chuvas quase uniformemente distribuídas, durante o ano todo. Os *Pinus* tropicais, (*Pinus caribaea* e *Pinus oocarpa*) o seu maior povoamento está situado na região de inverno secos, com deficiência hídrica.

Segundo BORTOLETO JÚNIOR (1993), a madeira de *pinus* também pode ser usada estruturalmente como vigas e caibros, destacando algumas variedades como a *Caribaea*, a *Hondurensis*, a *Oocarpa* e a *Taeda*. Uma característica pouco

estudada, mas, de grande importância, é a dureza, pois a partir dela, pode-se optar por vários empregos, na construção civil como em escadas, assoalhos, parquetes e em geral é indicadora da trabalhabilidade da madeira.

#### **4.3- RESISTÊNCIA MECÂNICA E ELASTICIDADE DAS MADEIRAS**

Com a utilização das madeiras de reflorestamento com finalidade estrutural o conhecimento das características mecânicas passou a ser exigido, dando maior confiabilidade aos projetos.

A utilização dessas madeiras, na construção civil só se tornou possível a partir dos estudos de resistência e elasticidade, realizados em centros de pesquisa. O uso das madeiras de eucalipto e pinus, assim como qualquer outro material, está relacionado com o conhecimento de suas características, pois, a determinação dos valores das diversas propriedades possibilita maior economia e segurança.

A determinação das características físicas e mecânicas das madeiras de eucalipto e Pinus, foi baseada na "Proposta dos Métodos de Ensaio para Caracterização de Madeiras", elaborado pelo Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e pelo Instituto Brasileiro de Madeiras e das Estruturas de Madeira (IBRAMEM), com o apoio da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo.

##### **4.3.1- EUCALIPTO**

De acordo com a proposta do método de ensaios LaMEM (1987), SALLES (1991) e NOGUEIRA (1991), obtiveram estas características para as madeiras de eucalipto. A tabela 8 mostra as características mecânicas e de elasticidade da madeira verde para cinco espécies.

##### **4.3.2 - PINUS**

De acordo com BORTOLETO JÚNIOR (1993), os valores de resistência mecânica e de elasticidade para a madeira verde de pinus, são fornecidos na tabela 9, obtidos através de ensaios conduzidos no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira de acordo com a proposta de ensaios acima citada.



TABELA 8- Valores de resistência mecânica e de elasticidade de cinco espécies de eucalipto em daN/cm<sup>2</sup>

ESPECIES	COMPRESSÃO			TRAÇÃO			FLEXÃO			Cisalhamento		Densidade
	f <sub>c,0k</sub>	E <sub>c,0</sub>	f <sub>t,0k</sub>	E <sub>t,0</sub>	f <sub>t,90</sub>	f <sub>M,k</sub>	E <sub>M</sub>	v·0	v·0	ppsm		
E. Maculata	387	110361	431	111933	17	683	105138	93		1,14		
E. Paniculata	444	119600	452	90413	12	605	86481	121		1,20		
E. Citriodora	377	105360	415	98915	16	705	113651	92		1,13		
E. Punctata	335	90506	363	119501	13	512	97528	103		1,10		
E. Teriticornis	308	81111	226	56452	10	555	86584	100		1,10		

TABELA 9- Valores de resistência mecânica e de elasticidade de cinco espécies de madeira verde de pinus, em daN/cm<sup>2</sup>.

ESPÉCIE	COMPRESSÃO			TRAÇÃO			CISALHAMENTO			FLEXÃO		DENSIDADE ppsm
	f <sub>c,0k</sub>	E <sub>c,0</sub>	f <sub>t,0k</sub>	E <sub>t,0</sub>	f <sub>t,90k</sub>	v <sub>0k</sub>	f <sub>M,k</sub>	E <sub>M</sub>				
PINUS												
caribaea	107	5053	95	7035	11	54	268	31156			1.06	
v.bahanensis												
caribaea	123	3215	198	15872	14	53	183	26730			1.06	
v.caribaea												
caribaea	96	483	228	8439	13	48	222	31447			0.94	
v.hondurensis												
elliottii	155	25756	188	57846	12	54	247	48684			1.07	
v.elliottii												
occarpa	128	24329	197	46609	14	59	273	36141			0.97	

A simbologia adotada está de acordo com a revisão da Norma Brasileira para caracterização das Madeiras, com a seguinte notação :

$f_{c,0}$  ;  $f_{t,0}$  ;  $f_{t,90}$  ;  $v_{,0}$  ;  $f_M$  = Valor médio da resistência da madeira : à compressão paralela às fibras ; à tração paralela às fibras ; à tração normal às fibras ; ao cisalhamento paralelo às fibras e à flexão paralela às fibras.

O índice **K** indica o valor característico da resistência da madeira.

$\rho_{psm}$  = Valor médio da densidade aparente da madeira saturada. (daN/m<sup>3</sup>)

### 4.3 - TRATAMENTO E PRESERVAÇÃO DA MADEIRA

Com o intuito de aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas de madeira, é necessário o seu tratamento com o uso de preservativos, principalmente quando se trata da construção em meios altamente agressivos, como é no caso das indústrias de suco, que apresentam grandes concentrações de umidade e a presença de ácidos no local de instalação das unidades armazenadoras.

A indústria química desenvolveu vários produtos que tratam e preservam a madeira, diminuindo a susceptibilidade ao ataque de agentes como fungos, insetos, etc.

As madeiras de reflorestamento, devido ao seu crescimento rápido, precisam ser tratadas com preservativos. A quantidade de ingredientes ativos, no tratamento, varia com a densidade das madeiras, dimensões das peças e quantidade de cerne existente. Existem recomendações com relação a esta porcentagem dependendo da finalidade de sua utilização.

As madeiras de pinus spp, pela sua baixa densidade tem pouca durabilidade e são de fácil tratamento devido a alta permeabilidade. Já a madeira de eucalipto que apresenta média a alta densidade deve ser tratada com a observação desta característica com a impregnação dos ingredientes ativos ocorrendo sobre pressão, para atingir melhores resultados.

Entre as formas de tratamento e preservação temos o banho quente e frio, o pincelamento ou aspersão, a imersão rápida, a imersão prolongada, a substituição da seiva e a difusão, muito usados no meio rural, também chamados de processos caseiros. Os processos industriais dispõem de autoclaves sendo classificados como processos de célula cheia e o de célula vazia.

Muitos fatores tais como custo, disponibilidade e efeitos de acabamento, aliados a toxidez e efeito residual, devem ser considerados na escolha de um preservativo.

No caso específico dos silos, a escolha do preservativo além de atender as exigências da NBR 6229/80, que trata das normas de aplicação, estes não devem apresentar níveis de toxidez que comprometam a manutenção das condições de armazenamento do produto.

A CFBC (1983), em sua parte 2, sessão 2.1, ítem 2, coloca que, as madeiras tratadas com produtos químicos tóxicos a base de pentaclorofenol ou creosoto, não devem entrar em contato direto com os produtos alimentícios ou comidas para animais.

Entretanto, os preservativos disponíveis no mercado não atendem a todas as exigências e condições de uso na madeira e essa finalidade é que vai definir as propriedades do preservativo. Este problema é agravado ainda mais pelo custo elevado dos produtos.

Dentre os tipos de preservativos podemos citar os oleosos, os oleossolúveis e hidrossolúveis. Alguns são relacionados aqui, para caracterizar melhor os tipos de soluções preservantes e dar a dimensão do problema enfrentado.

O creosoto é um preservativo oleoso de grande aplicação e apresenta grande resistência à lixiviação e não é corrosivo aos metais. Do ponto de vista estrutural é de grande aplicabilidade, mas, devido ao forte odor e a impossibilidade de receber acabamentos superficiais ele não é recomendado para armazenamento de produtos agrícolas.

Entre os hidrossolúveis atualmente em uso podem ser citados : o CCB, entre os compostos de boro e o CCA, entre os compostos de arsênio. A alta toxidez de seus ingredientes ativos impede a sua utilização para tratamentos em madeiras para fins de armazenamento de produtos agrícolas.

Os inseticidas também são aplicados para eliminar insetos xilófagos e são divididos em dois grupos de acordo com o efeito sobre o inseto e a permanência na madeira tratada. Os do primeiro grupo mais usados são : a fosfina e o brometo de metila com baixo efeito residual. Os do segundo grupo são conhecidos como tratamento de superfície, uma vez que não penetram na madeira. Os produtos utilizados são pesticidas organoclorados e os mais difundidos são: ddt, dieldrin, heptacloro, etc. São tóxicos ao homem e devem ser manuseados por pessoas treinadas, pois quando aplicados na dosagem incorreta podem apresentar um efeito residual que compromete seu uso no armazenamento de produtos agrícolas. Estes produtos são muito empregados em unidades armazenadoras em períodos

prolongados de armazenamento, o que não ocorre na indústria de sucos, devido também as dificuldades de aplicação e alta toxidez sendo dessa forma descartados.

Ainda podem ser citados os preservativos anti-intemperismo como tintas, vernizes e os hidrorrepelentes que dão um acabamento externo às madeiras, mas com sua utilização restrita devido ao seu alto custo.

No grupo dos oleossolúveis podemos citar ; o pentaclorofenol e o quinolinolato de cobre 8 (solubilizado). Estes, consistem de um produto químico ativo, inseticida e ou fungicida, dissolvido em um solvente orgânico. O tratamento com estes compostos dá ótima proteção devido à sua solubilidade na água, permanecendo o produto ativo. O pentaclorofenol devido a sua composição não é recomendado para armazenamento de grãos e frutas. O quinolinolato de cobre é inodoro, incolor e de boa toxidez aos organismos xilófagos, porém sua toxidez ao homem é muito baixa, sendo o único preservativo recomendado para o tratamento de madeiras que estarão em contato com produtos alimentícios. Seu uso é restrito a casos especiais devido ao seu alto custo. O tratamento deve ser feito na madeira seca e a solução preservante pode ser aplicada com pincel ou rolos. Aplica-se o produto em várias demãos até que a madeira não mais o absorva.

O tratamento poderá ser feito por imersão. Nesse caso, o período de tempo o qual a madeira deve permanecer submersa é controlado por pesagens antes e durante o tratamento. Entretanto, salienta-se que a absorção é muito maior no início e decresce rapidamente com o decorrer do tempo. Recomenda-se retenções de 3,2 Kg do produto por metro cúbico de madeira. Isso corresponde a aproximadamente a 128 Kg da solução a 2,5% por metro cúbico de madeira.

Em síntese, vários são os processos e produtos usados no tratamento das madeiras e sua importância na durabilidade é notória, aliada aos baixos níveis de toxidez de seus compostos, que devem ser rigorosamente observados, daí a importância de se utilizar o mais adequado para o tratamento das madeiras empregadas no armazenamento de produtos agrícolas, especificamente de frutas.

## 5 - ENSAIOS REALIZADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, os ensaios realizados são descritos para maior entendimento da metodologia adotada. Estes foram divididos em três fases distintas : 1- Caracterização mecânica do produto ensilado (ensaios de compressão com carga estática e ensaio dinâmico); 2- Avaliação das pressões nos silos; 3- Avaliação do fluxo e capacidade real (ocupação) dos silos.

Os ensaios, na primeira fase do projeto, definiram os parâmetros do produto conduzindo a determinação da altura máxima de armazenamento a granel em função do tempo e altura máxima de queda no interior dos silos entre as rampas. Os ensaios de carregamento estático e de impacto são descritos nesta fase.

Na segunda fase, foi avaliada a intensidade e a relação das pressões vertical e horizontal com a variação da seção transversal do modelo, com o objetivo de determinar as dimensões dos módulos dos silos. Com esta finalidade, foi realizado o ensaio com um modelo montado em madeira laminada, com seção variável, instrumentado para a avaliação das pressões.

A terceira fase de ensaios, constou da montagem de modelos reduzidos, a partir dos projetos existentes, para a avaliação do fluxo e capacidade real dos silos. A análise qualitativa, buscou adequar e otimizar os projetos, diminuindo os custos, no tocante ao tipo e quantidade de material empregados.

Neste capítulo são especificados a instrumentação e os materiais utilizados nos ensaios. A metodologia utilizada se baseia no levantamento feito em pesquisas anteriores, sendo empregadas as mais adequadas às nossas disponibilidades. Foram propostos métodos de ensaios com o intuito de avaliar as características tanto do produto a ser armazenado como da estrutura de armazenamento.

Os dados coletados são apresentados e discutidos, através de uma análise dos modelos teóricos estudados e comparados com os resultados experimentais.

## 5.2 - ENSAIO DE CARGA ESTÁTICA

### 5.2.1- OBJETIVOS

Determinar a carga estática máxima admissível para laranjas-pêra no período de 48 horas de carregamento através dos deslocamentos ocorridos e avaliar o comportamento mecânico da fruta no período em que é retirada a carga através da aplicação do modelo reológico de Burgers. Estimado o parâmetro, definir a altura máxima de armazenamento para laranjas durante o período de 48 horas.

### 5.2.2- MATERIAIS E MÉTODOS

As laranjas de variedade pêra (*Citrus sinensis*), foram adquiridas das indústrias citrícolas da região de São Carlos-SP, em dezembro de 1993, colhidas no mesmo período, procurando-se obter maior homogeneidade do lote em função da maturação. Foram selecionadas as frutas com peso médio de 186 gramas, diâmetro equatorial de 68 mm e diâmetro axial de 72 mm (valores médios).

Para este ensaio foi montado um dispositivo de carregamento simultâneo para 6 frutas. Foram aplicadas as cargas de 2,3,4,5,6 e 7 Kgf. As cargas usadas simulam as solicitações atuantes durante a colheita, transporte, armazenamento e processamento na indústria. A figura 19 ilustra o aparato montado, que é composto de uma placa de compressão de diâmetro de 10 mm, com um apoio para colocação dos pesos. Para as leituras de deslocamentos foram usados relógios comparadores com sensibilidade de 0,01 mm, marca Mitutoyo.

O ensaio foi dividido em duas fases; a primeira as frutas foram carregadas na posição axial e a segunda na posição equatorial. O tempo de carregamento foi de 48 horas, estimado pelo período de armazenamento nos silos da indústria. Foram usadas 48 frutas nas duas fases, com 4 repetições para cada carga e posição de carregamento das frutas.

Decorridas as 48 horas de carregamento os pesos foram retirados, e as leituras nos relógios comparadores prosseguiram até não se observar mais nenhum deslocamento, registrando as deformações residuais nas frutas.

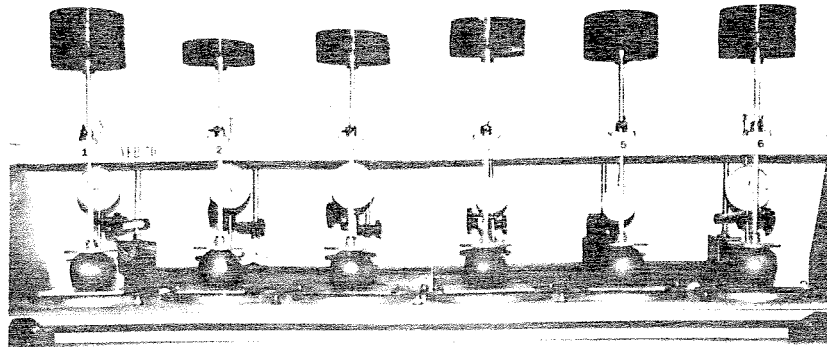


FIGURA 19- Montagem para o ensaio de carregamento estático

### 5.2.3- RESULTADOS OBTIDOS

Durante o período de carregamento e logo após retirada a carga os valores de deslocamentos foram lidos e registrados através dos relógios comparadores no intervalo de tempo conforme é mostrado na tabela 16, em anexo. Com estes dados foram plotadas as curvas de tempo-deslocamento para os carregamentos nas duas posições definidas, axial e equatorial. As figuras 20(a) e 20(b) ilustram essas curvas.

As curvas obtidas experimentalmente, foram comparadas com a curva da figura 8, onde aplicando as equações do modelo viscoelástico de Burgers, foram determinados os parâmetros elástico e de viscosidade para as laranjas de variedade pêra. Tomando como exemplo as curvas obtidas dos carregamentos (axial e equatorial) de 2 Kgf, mostradas nas figuras 21(a) e 21(b), foram obtidos os resultados mostrados a seguir.

Os parâmetros para as laranjas-pêra foram estimados, segundo o modelo de Burgers, como segue :

- **Parâmetro de viscosidade  $\eta_3$** : Obtido graficamente pela tangente da curva de deslocamento a partir do ponto em que ele se mantém constante. Para o exemplo,  $\eta_3$  é calculado em função do tempo decorrido em horas, a partir do qual a curva de deslocamento se estabiliza, mantendo-se constante.



- **Parâmetro de elasticidade  $G_1$** : O deslocamento instantâneo elástico é dado por :  
 $D_i = D_1 - D_p$  e  $G_1 = P/D_i$
- **Parâmetro de elasticidade  $G_2$**  : É calculado a partir do valor de BF retirado graficamente, na curva experimental.
- **Parâmetro de viscosidade  $\eta_2$** : É obtido a partir da substituição dos demais parâmetros, já conhecidos, na equação derivada das eq. (3) e eq. (4).

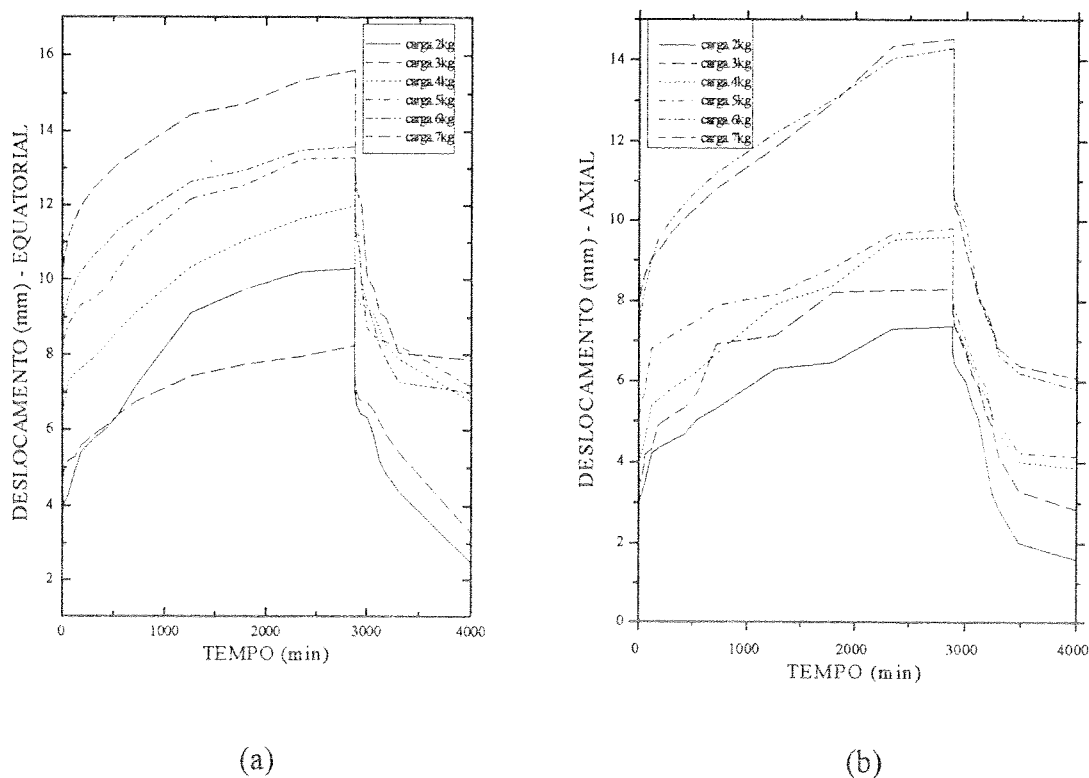


FIGURA 20 - Curvas de tempo-deslocamento. Carregamento Equatorial(a) e axial(b).

Os cálculos a seguir, referem-se aos parâmetros de viscosidade e de elasticidade, obtidos no carregamento estático com as posições axial e equatorial.

#### a- CARREGAMENTO ESTÁTICO NA POSIÇÃO AXIAL

-Parâmetro de viscosidade  $\eta_3$  :

Obtido através da tangente à curva, quando esta se torna constante.

$$\frac{P_t}{\eta_3} = 0,17$$

Adotando  $P = 2 \text{ Kgf}$  e  $t = 42 \text{ horas}$ , temos:

$$\eta_3 = 494 \text{ Kgf.h/cm}$$

-Parâmetro elástico  $G_1$ :

Calculado em função do deslocamento elástico instantâneo. ( $D_i = D_1 - D_p$ )

$$\text{logo } D_i = 0,28 - 0,16 = 0,12 \text{ cm.}$$

$$\text{Sendo } G_1 = \frac{P}{D_i},$$

$$G_1 = 16,67 \text{ Kgf/cm}$$

-Parâmetro elástico  $G_2$ :

Calculado graficamente. Para o nosso exemplo  $BF = 0,42 \text{ cm}$ .

$$G_2 = \frac{P}{BF} = \frac{2}{0,42} = 4,76 \text{ Kgf/cm}$$

$$G_2 = 4,76 \text{ Kgf/cm}$$

-Parâmetro de viscosidade  $\eta_2$ :

É calculado a partir dos dados calculados anteriormente, utilizando a equação, derivada das eq. (3) e (4):

$$\frac{P}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2 t}{\eta_2}} \right) = D - \left( D_p + \frac{P}{G_1} + \frac{P}{\eta_3} t \right) \quad (17)$$

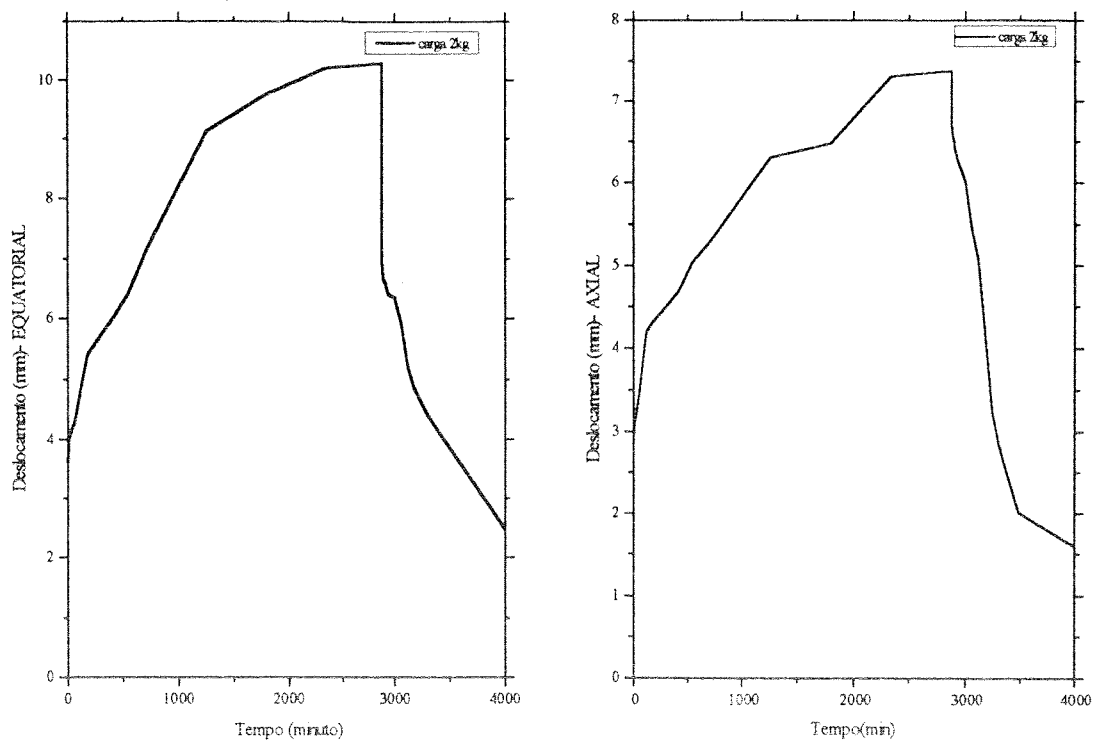
onde :  $D = 0,738 \text{ cm}$ ,  $t = 42 \text{ horas}$ ,  $P = 2 \text{ Kgf}$

Resolvendo a equação temos:

$$\eta_2 = 172,73 \text{ Kgf.h/cm}$$

Utilizando a eq. (3), pode-se calcular o deslocamento pelo modelo, dada pela curva GBC do modelo de Burgers, mostrada na figura 8.

$$D = 0,58 \text{ cm}$$



(a)

(b)

FIGURA 21- Curva de tempo-deslocamento para a carga de 2 Kgf com as frutas nas posições equatorial(a) e axial(b).

#### b-CARREGAMENTO ESTÁTICO NA POSIÇÃO EQUATORIAL

Os parâmetros também levantados, para efeito de comparação. Usou-se a mesma carga e o mesmo tempo decorrido até a estabilização dos deslocamentos. Os resultados obtidos foram os seguintes :

-Parâmetro de viscosidade :  $\eta_3 = 420 \text{ Kgf.h/cm}$

-Parâmetro de elasticidade :  $G_1 = 8,4 \text{ Kgf/cm}$

-Parâmetro de elasticidade :  $G_2 = 4,45 \text{ Kgf/cm}$

-Parâmetro de viscosidade :  $\eta_2 = 124,36 \text{ Kgf.h/cm}$

Para uma deformação calculada, para o tempo de carregamento, no valor de :  $D = 0,78 \text{ cm}$

## 5.2.4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

As figuras 20(a) e 20(b), ilustram as curvas experimentais de tempo-deslocamento das laranjas de variedade pêra obtidas através da aplicação das cargas estáticas durante o período de 48 horas. Algumas laranjas ensaiadas na posição equatorial, apresentaram danos nas cascas em 18 horas de carregamento, quando as cargas excediam a 5 Kgf, onde se observou uma descontinuidade nas curvas.

Verificou-se que algumas laranjas não se romperam, mesmo para a carga de 7 Kgf. Isto ocorreu devido ao fato de algumas frutas serem mais rígidas que outras, ou seja, mesmo retirando uma amostra de um mesmo lote de laranjas, algumas apresentaram maior resistência às estas solicitações.

O deslocamento inicial no instante de aplicação das cargas foi 27%, em média, maior na posição equatorial comparada com a posição axial, para as seis cargas aplicadas.

O comportamento das laranjas, durante o período de carregamento e após retirada da carga, é mostrado nas figuras 21(a) e 21(b), nas posições equatorial e axial. A curva de tempo-deslocamento nas duas posições, indicam que na posição axial, 50% do deslocamento ocorre nos primeiros 25 minutos de carregamento e se mantém constante após 42 horas de aplicação das cargas e 17% do deslocamento é recuperado no instante de retirada da carga. Com o carregamento na posição equatorial 56% do deslocamento ocorre nos primeiros 25 minutos se mantendo também constante após 42 horas e 16,5% é recuperado no instante que é retirada a carga. Os deslocamentos residuais foram 29%, em média, maiores, para o carregamento na posição equatorial comparado ao carregamento na posição axial.

Após o carregamento no período de 48 horas, chegou-se a deslocamentos residuais máximos de 12,28 mm para 5,0 Kgf, na posição equatorial e 7,22 mm para 6,0 Kgf na posição axial em algumas laranjas ensaiadas, o que é coerente com os dados obtidos em pesquisas anteriores, como foi mostrado no capítulo de caracterização do produto, onde se analisou os deslocamentos axial e equatorial obtidos em função dos diâmetros, não sendo consideradas as deformações específicas para os dois casos.

Com os resultados obtidos nos ensaios e através das curvas 21a e 21b, experimentais, pode-se observar a adequação do modelo de Burgers. Após retirada a carga, comparando a curva do modelo com as curvas obtidas experimentalmente, nota-se que a diferença entre os pontos AB e CD, que de acordo com o modelo, ocorre devido ao fluxo plástico, definido a partir do ponto na curva onde o

deslocamento permanece constante com o tempo. Os valores obtidos para os parâmetros de elasticidade e viscosidade comprovam que as frutas quando solicitadas na posição equatorial são menos resistentes, apresentando deslocamentos residuais significativos maiores do que quando solicitadas na posição axial; 0,78 cm na posição equatorial e 0,58 cm na posição axial. Observando os dados de deslocamento residual na tabela 16, verifica-se um deslocamento de 6,75 mm para um carga estática de 4 Kgf, para o período de 48 horas de carregamento, em comparação com as laranjas comercializadas "in natura", o máximo deslocamento permitido é de 6,2 mm de acordo com CHUMA e SHIGA (1978). O deslocamento dado pela curva GBC, calculado pelo modelo foi 23%, menor que o estimado experimentalmente para os dois carregamentos.

### 5.3- ENSAIO DE CARGA DE IMPACTO

#### 5.3.1- OBJETIVOS

O objetivo principal deste ensaio foi determinar a altura máxima de queda de laranjas sobre seis tipos de superfície, através do modelo citado por CHUMA e SHIGA(1978), a partir da avaliação da aceleração de impacto.

#### 5.3.2- MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta fase dos ensaios foi avaliado o impacto de laranjas sobre seis tipos de superfícies : 1- base de madeira (pinus) com espessura de 25 mm; 2- base de concreto com espessura de 60 mm, e 3- base metálica com espessura de 13 mm. A estas superfícies foram coladas uma manta de borracha (SBR-50) de 6 mm, configurando as outras 3 superfícies utilizadas na avaliação de impacto. Os materiais empregados e a espessura das superfícies estão de acordo com as condições reais encontradas na indústria, observadas durante as etapas de recepção e armazenamento.

O modelo de ensaio proposto é mostrado na figura 22, composto de 2 hastes de deslizamento, fixadas nas bases acima descritas. Uma peça de madeira de massa conhecida (valor médio das massas das laranjas ensaiadas) foi posicionada em alturas pré-estabelecidas e liberada atingindo a fruta colocada sobre a superfície.

Foram medidas as massas das laranjas, para verificar a necessidade de colocação de lastros na peça de madeira durante o ensaio. Para medição dos valores de aceleração de impacto, foi instalado nesta peça um acelerômetro piezoelétrico uniaxial, com sensibilidade de 8mV/g, de marca B&K (tipo 4371). Os sinais de tensões de saída eram amplificados e transferidos para um osciloscópio de memória DUAL DIFF AMPL (5A26), onde as curvas de tensão (volts) eram plotadas e registrados os valores de pico.

As alturas estabelecidas foram : 50, 100, 150, 200 cm, e os valores de pico de tensão eram lidos após cada queda do corpo de madeira que se chocava contra a laranja posicionada sobre as superfícies descritas. Foram ensaiadas 144 frutas com a simulação de quedas sucessivas, o corpo de madeira era liberado sobre a mesma laranja, duas vezes para cada altura correspondente.

Os ensaios de impacto foram divididos em duas fases. Na primeira, foram ensaiadas as superfícies de madeira, concreto e metálica e na segunda fase foi colada uma manta de borracha sobre estas superfícies, compondo um sistema de amortecimento, com o objetivo de avaliar o impacto sobre estes materiais.

### 5.3.3- RESULTADOS OBTIDOS

Os valores médios de picos de tensão ( $V_a$ ) de saída do acelerômetro registrados no osciloscópio, durante o ensaio são mostrados na tabela 10.

Para o cálculo da aceleração de impacto, foram usadas as eq. (6) a (12) da teoria de contato de Hertz descritas no capítulo 2.

Segundo CHUMA e SHIGA(1978), a eq.(18) relaciona a aceleração de impacto (I), com a altura de queda (H) em superfície de concreto, e seguindo o mesmo modelo a equação foi calculada para as laranjas de variedade pêra, como segue:

$$I = 7,83H^{0,6} \quad (18)$$

Onde :

I ; é a aceleração de impacto, definida pela relação  $\alpha/g$ , sendo  $\alpha$  a aceleração calculada pela eq. (6) e g a aceleração da gravidade (980 cm/s<sup>2</sup>).

H ; é a altura de queda.

Para os cálculos foram usados os seguintes dados do produto:

$$E = 2330 \text{ kPa (VÉLEZ PASSOS, 1987)}$$

$$K_1 = 10,4 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{Kg (viscosidade da laranja)}$$

$$m = 180 \text{ g (valor médio)}$$

$$R_1 = 3,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Os valores de I (aceleração de impacto) em função da altura, são mostrados na tabela 11, calculados a partir da eq.(19) e comparados com os valores obtidos experimentalmente através do modelo para os seis tipos de superfície testadas.

Para os cálculos de aceleração de impacto medidos no ensaio, foram usados os dados fornecidos pelo fabricante e a equação de calibração do acelerômetro, de acordo com DALLY et al (1984), mostrada a seguir :

$$I = \frac{V_a}{S_a} \quad (19)$$

Onde :

- $V_a$  é a voltagem de saída do acelerômetro durante o impacto (tabela 10); estes valores foram obtidos durante o ensaio, através do registro das curvas de tensão pelo osciloscópio de memória e lidas as tensões máximas em volts.

- $S_a$  é a sensibilidade do acelerômetro (8mV/g de acordo com o fabricante).

-I é a aceleração de impacto.

TABELA 10- Valores de tensão de saída ( $V_a$ ) do acelerômetro em relação a altura de queda.

S/H	MB		M		C		CB		$M_e$		$M_eB$	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
50	3,03	3,22	4,86	4,23	6,03	5,67	5,30	4,40	6,22	5,48	4,56	4,23
100	7,20	7,26	8,47	7,46	6,94	6,43	8,60	8,30	8,60	8,24	8,40	8,40
150	6,47	6,53	9,90	10,1	6,07	5,84	9,90	9,10	8,80	8,78	8,33	8,30
200	12,2	12,1	12,2	12,0	11,7	11,4	11,9	11,4	11,1	10,6	9,66	9,56

TABELA 11- Valores de aceleração de impacto em função da altura de queda.

SUPERFÍCIE	ALTURA DE QUEDA (CM)			
	50	100	150	200
ACELERAÇÃO MÁXIMA DE IMPACTO ( I )				
ESTIMADA	81,9	124,1	158,3	188,1
MADEIRA -1	62,01	107,88	126,14	155,87
MADEIRA -2	53,94	95,14	147,14	152,90
CONCRETO -1	76,83	88,43	77,34	149,59
CONCRETO -2	72,24	81,93	74,41	145,26
METÁLICA -1	79,25	109,58	112,13	140,54
METÁLICA -2	69,82	104,99	111,87	135,06
CONC+B. -1	57,53	109,58	126,14	128,44
CONC+B. -2	56,03	105,75	115,95	145,25
METAL+B. -1	58,16	107,03	106,14	123,09
METAL+B. -2	53,89	107,03	105,75	121,81
MAD+B. -1	38,61	91,74	82,44	155,83
MAD+B. -2	40,98	92,58	83,20	154,60



A simbologia adotada caracteriza os tipos de superfície adotadas nas fases de ensaio de impacto.

1- Superfície de madeira ( Pinus )	-----	M
2- Superfície de concreto	-----	C
3- Superfície metálica	-----	M <sub>e</sub>
4- Superfície de madeira e borracha	-----	MB
5- Superfície de concreto e borracha	-----	CB
6- Superfície metálica e borracha	-----	M <sub>e</sub> B

Os números 1 e 2 para cada superfície, indicados na tabela referem-se aos dados obtidos para duas quedas sucessivas do corpo instrumentado sobre a laranja.

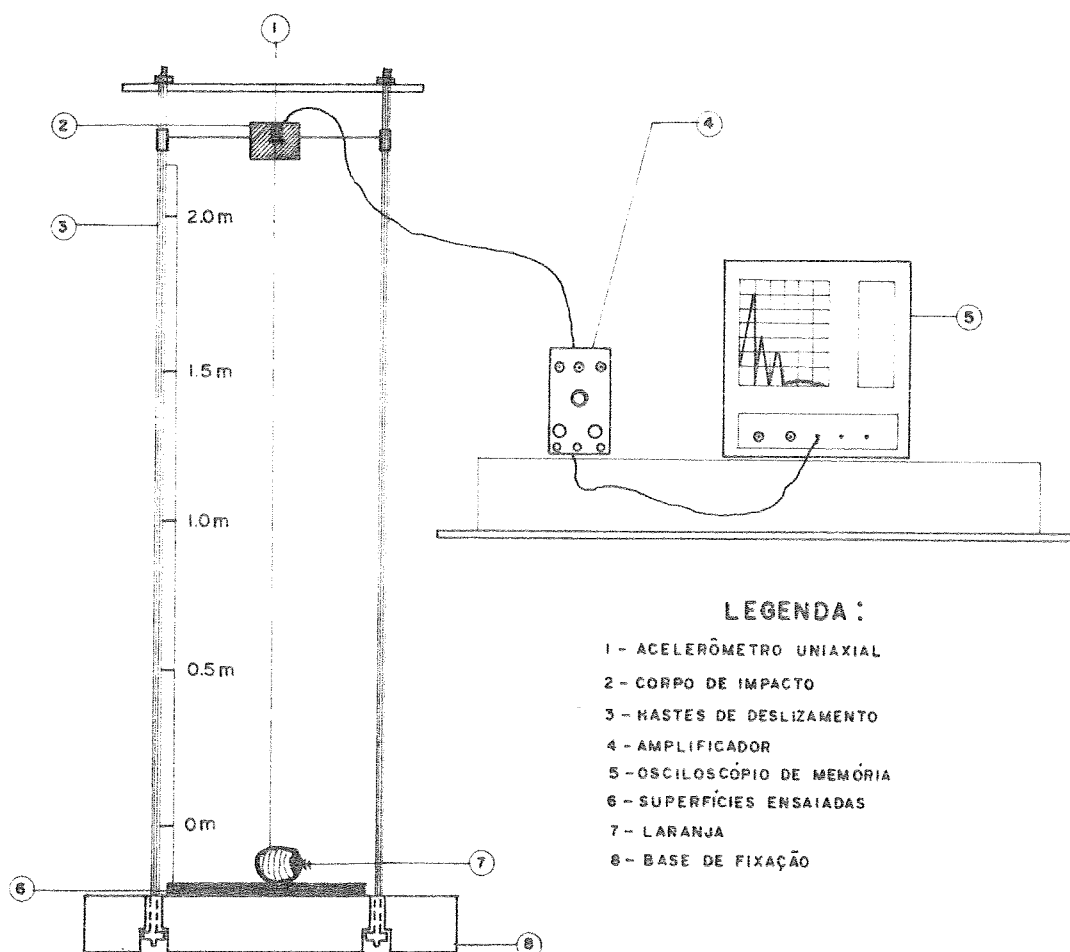


FIGURA 22- Modelo de ensaio de impacto.

### 5.3.4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a análise do gráfico, mostrado na figura 23, verifica-se que os valores de aceleração de impacto se ajustam melhor para alturas de queda abaixo de 1,00 m.

Entre as superfícies ensaiadas os valores de aceleração de impacto para a superfície de madeira com revestimento de borracha foram 19,8%, em média, mais baixos para as alturas inferiores a 1,50 m, quando comparados com a superfície de madeira sem revestimento, e 41%, para alturas abaixo de 0,5 m, quando comparados com outras superfícies. Os valores de aceleração de impacto na segunda queda também foram, 6,3%, em média menores, quando comparados as superfícies sem revestimento e 2,9% com revestimentos amortecedores.

A aceleração de impacto medida nas superfícies de concreto e metálicas revestidas com a manta de borracha foram 16,5%, em média, inferiores quando comparadas com as mesmas superfícies não revestidas.

Algumas variações podem ser constatadas a partir dos resultados obtidos. Estas ocorreram devido ao grande número de variáveis inseridas no estudo de impacto de materiais viscoelásticos, como tempo decorrido, deformações ocorridas no material ensaiado e ainda algumas limitações do modelo, consideradas como erros experimentais assumidos preliminarmente, devido às simplificações adotadas.

## 5.4- ENSAIO DE MODELO - DETERMINAÇÃO DE PRESSÕES LATERAIS

### 5.4.1- OBJETIVOS

Determinar as pressões laterais e verticais e a relação entre elas de acordo com a Norma Canadense, utilizando o modelo de ensaio proposto para o armazenamento a granel de laranjas.

Definir as dimensões mais adequadas dos módulos dos silos em função da variação da relação altura/lado.

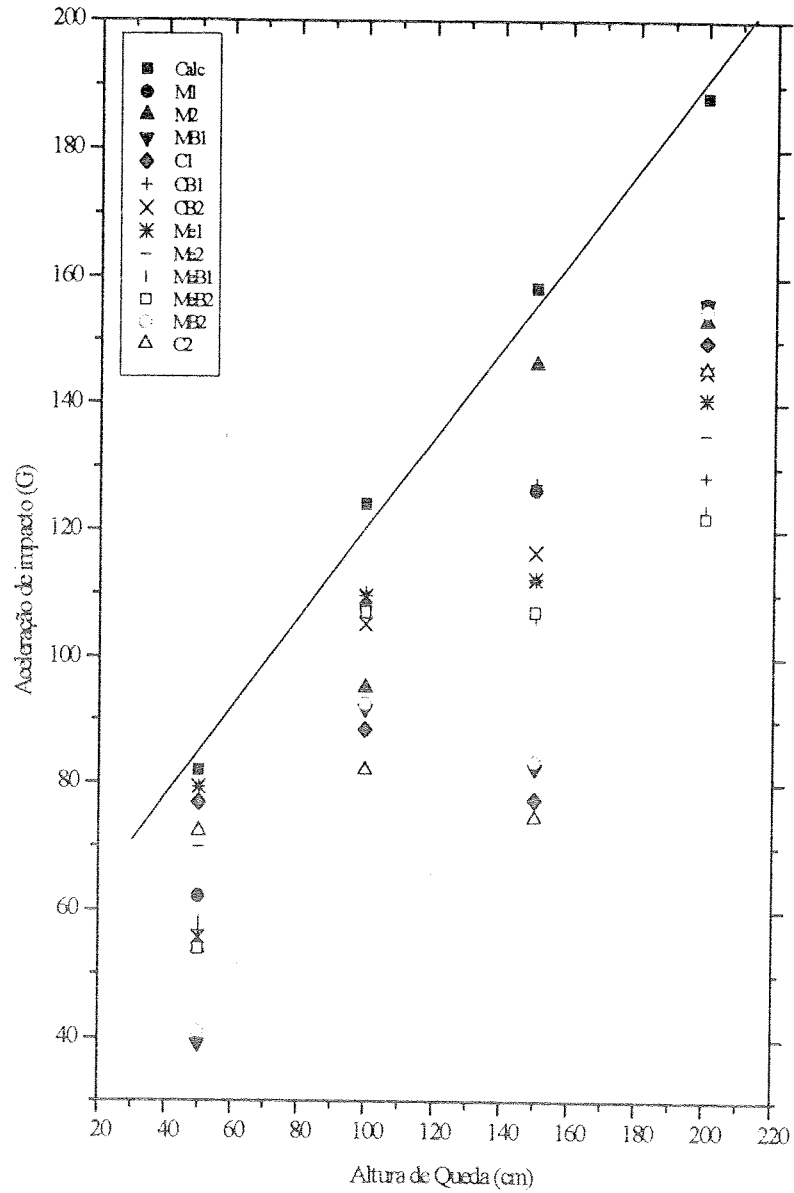
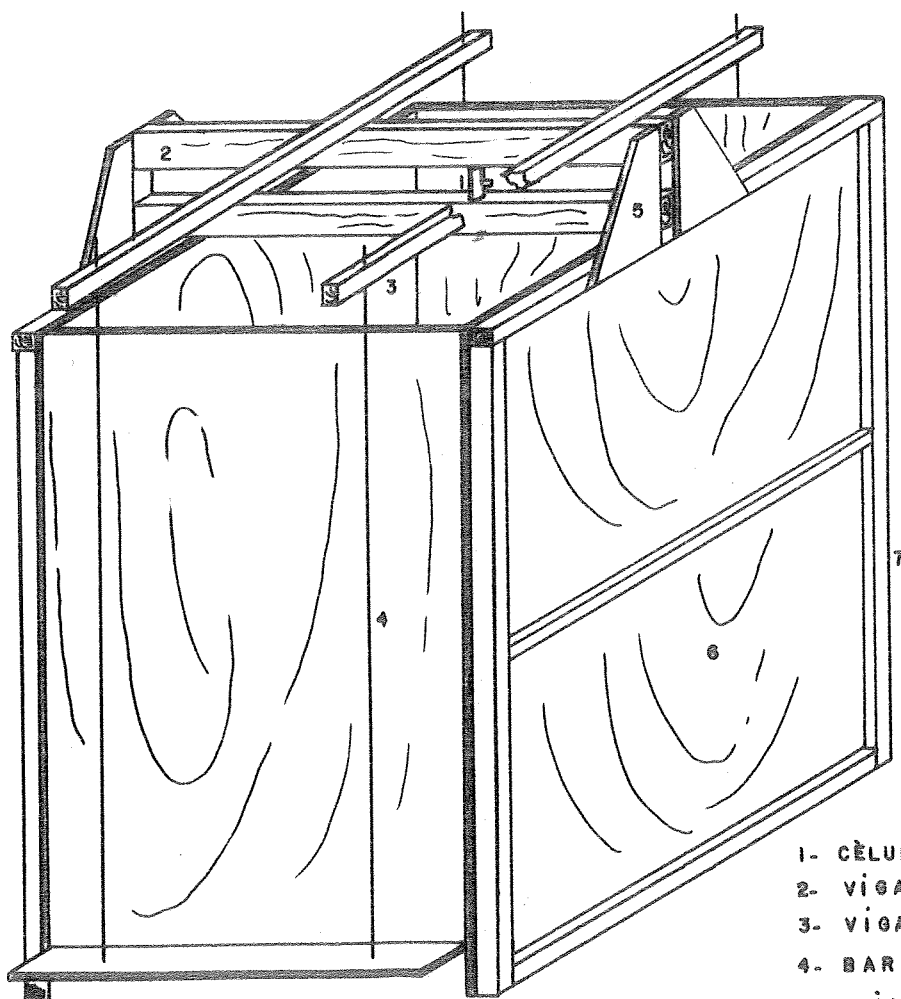


FIGURA 23- Gráfico de aceleração máxima de impacto-altura de queda para valores teóricos e valores obtidos experimentalmente.

#### 5.4.2- MATERIAIS E MÉTODOS

Na determinação das pressões laterais nas paredes dos silos, montou-se um modelo com as seguintes dimensões: 110x110x220 cm, em chapa compensada, espessura de 10 mm. O fundo desse recipiente foi suspenso por 4 barras de aço de diâmetro 3/8", fixo às extremidades de duas vigas de seção 6x12 cm<sup>2</sup>, apoiadas no centro de uma terceira viga de mesma seção. Entre esta terceira viga e uma quarta apoiada na parede do modelo, foi instalada uma célula de carga de capacidade de 5 toneladas (Constante = 3.24 kg/div.), para medição da carga dentro do recipiente. Conforme é mostrado na figura 24, observa-se o modelo com a instrumentação adotada. Foram empregados um seletor de canais e um aparelho para medição de deformações (STRAIN METER), conectados à célula de carga.



- 1- CÉLULA DE CARGA
- 2- VIGAS 6 x 12
- 3- VIGAS 6 x 12
- 4- BARRAS 3/8"
- 5- GUIAS
- 6- CHAPA 10 mm
- 7- ESQUADRIAS

FIGURA 24- Modelo de ensaio para avaliação de pressões.

Para avaliação das pressões nas paredes, em função da seção transversal, este modelo permitia alterar a relação altura/lado com o deslocamento de duas paredes laterais, variando dessa forma a seção do fundo do recipiente. As relações adotadas de H/L são mostradas na tabela 12.

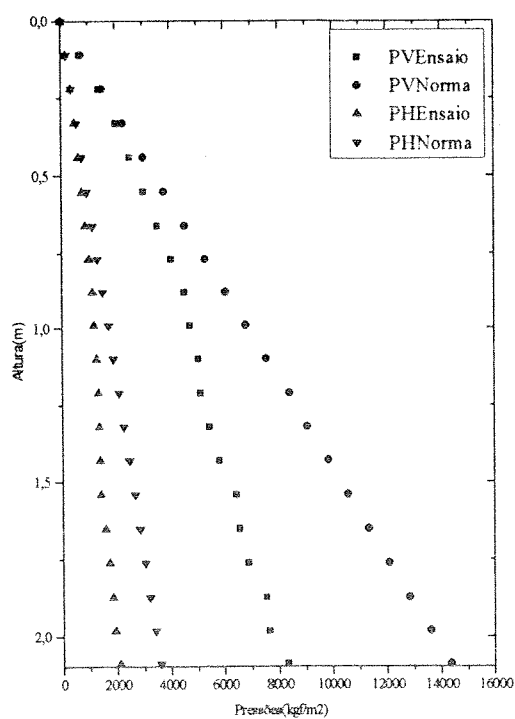
TABELA 12 - Seção transversal da base em função da relação altura/lado.

ALTURA (cm)	SEÇÃO DA BASE (cmxcm)	RELAÇÃO H/L
220	110x110	2
220	55 x110	4
220	27,5x110	8
110	110x110	1
110	55x110	2
110	27,5x110	4

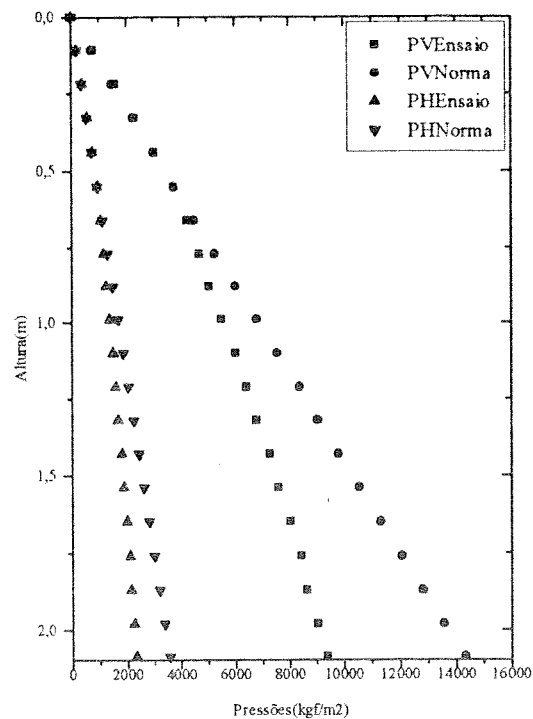
Colocado o sistema em equilíbrio e aferidos a célula de carga e o modelo de ensaio, iniciou-se o carregamento do silo com laranjas até as alturas de 110 e 220 cm, em função da variação da relação H/L. O silo foi carregado gradativamente com caixas de laranja de 24 Kg em média; as laranjas foram pesadas com uma balança digital. A cada altura correspondente eram feitas leituras no aparelho (Strain Meter). Para cada relação foram feitos 3 repetições e as médias de leituras foram calculadas.

#### 5.4.3- RESULTADOS OBTIDOS

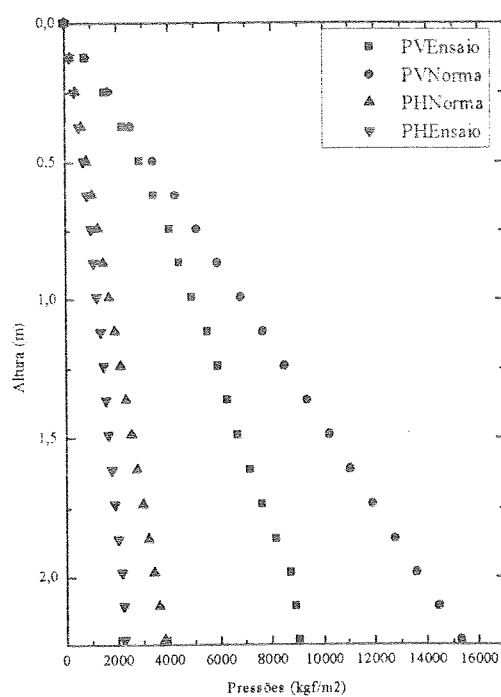
Os resultados obtidos são mostrados em anexo. Os valores de pressão vertical e pressão lateral foram calculados a partir das eq. (13) e (14), descritas no capítulo 3. A figuras 25(a), (b) e (c) ilustram as curvas de pressão obtidas no ensaio. O gráfico levantado é mostrado na figura 25(a) a partir dos dados obtidos no ensaio do modelo para a seção transversal  $0,3025 \text{ m}^2$ , os gráficos mostrados nas figuras 25b e 25c, foram plotados com os resultados obtidos nos ensaios do modelo com seções transversais de  $0,605 \text{ m}^2$  e  $1,21 \text{ m}^2$ , respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Os gráficos das figuras a, b e c, referem-se aos dados obtidos nos ensaios do modelo proposto, para as seções citadas anteriormente. As pressões foram calculadas segundo a Norma Canadense e podem ser comparadas com os valores obtidos nos ensaios, através dos gráficos.

A simbologia adotada na legenda colocada no canto superior da figura significa :

PVEnsaio - PHEnsaio Pressões vertical e horizontal obtidas no ensaio do modelo.

PVNorma - PHNorma Pressões vertical e horizontal calculada pela Norma.

FIGURAS 25 -a, b e c. Gráficos de Pressões horizontal e vertical para o modelo.

#### 5.4.4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados obtidos verificou-se que, as pressões verticais seguem o modelo de pressão hidrostática, isto é, as pressões máximas verticais ocorrem no fundo do silo para as seções estudadas. A constante  $K=0,25$  que relaciona as pressões horizontais e verticais foi definida de acordo com o ângulo de repouso, calculado experimentalmente, a partir de medições feitas nos silos durante o seu carregamento até a acomodação das camadas do produto no interior destes. Os valores de pressões horizontais, calculados pela Norma Canadense, baseiam-se no valor da constante  $K$ .

Os gráficos de pressões plotados mostram que os valores obtidos nos ensaios do modelo confirmam aplicação da norma para o cálculo de pressões laterais e verticais. Com os resultados obtidos durante os ensaios pôde-se quantificar a intensidade da pressão lateral em função da altura, a partir das medições feitas das pressões totais (PT), estimadas no modelo e as pressões de ensaio (PE) calculadas em função das medições feitas pela célula de carga em função da variação das seções.

A tabela 13 mostra os valores obtidos nos ensaios indicando a pressão vertical experimental com a variação das relações de altura/lado, sendo  $PT=PE+PV$ .

Na tabela 13 abaixo, com os valores médios medidos durante o ensaio, observadas as relações altura/lado, verifica-se que 66% da pressão é vertical e 34% é pressão horizontal para uma relação H/L igual a 4. Quando esta relação é alterada para 8, 51% das pressões são horizontais. Para as relações 2 e 4, as pressões horizontais são 25% e 37% das pressões totais, respectivamente. Para as relações de H/L de 1 e 2, as pressões horizontais são 24% e 33% das pressões totais. A figura 26, ilustra o comportamento das pressões em relação a altura, obtidas no ensaio do modelo, consideradas as variações da relação altura/lado e conseqüentemente a seção transversal.

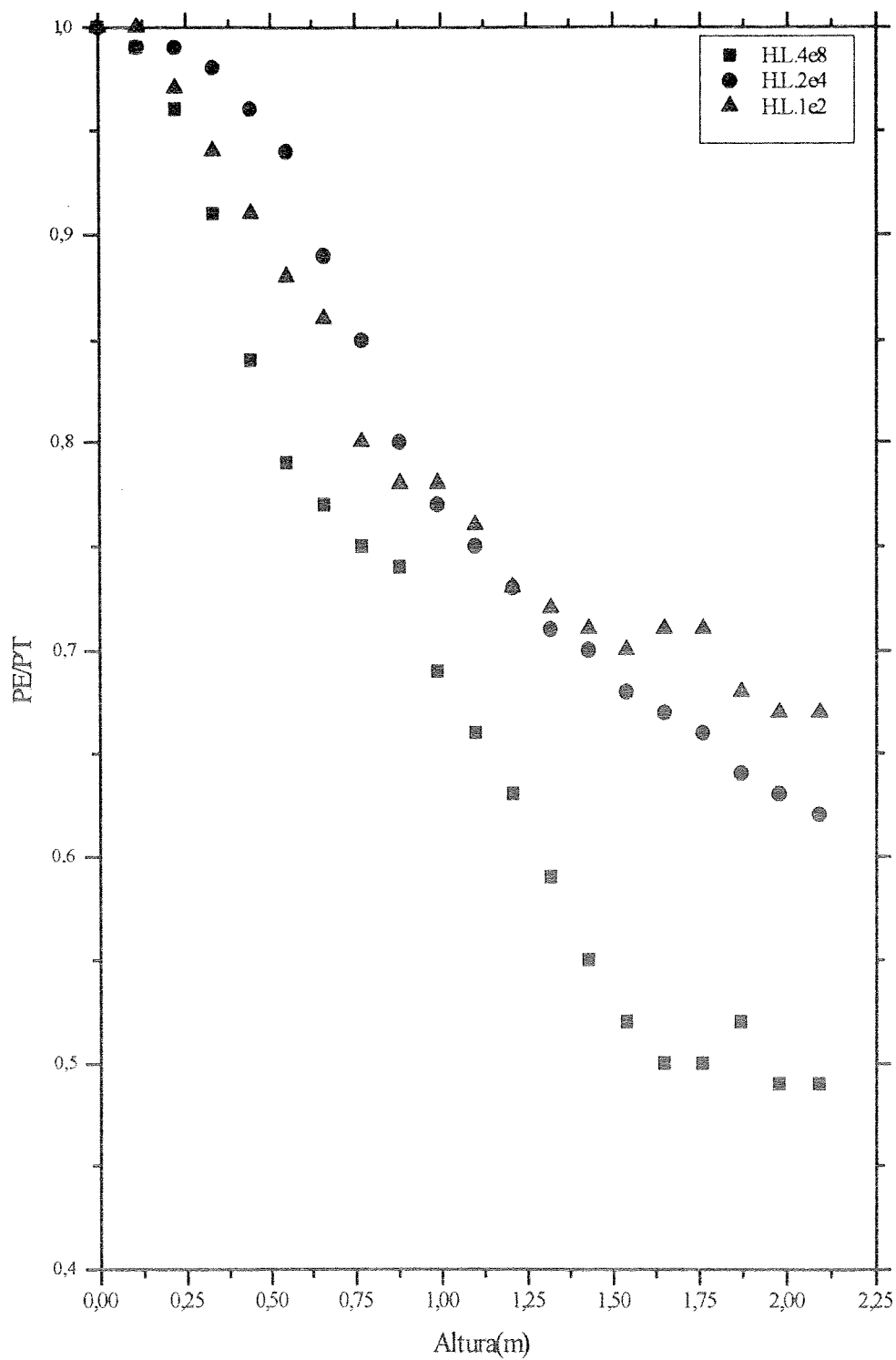


FIGURA 26- Gráfico da relação PE/PT em função da altura de armazenamento.



TABELA 13 - Relação entre pressão vertical calculada e pressão vertical de ensaio em função da variação da seção transversal modelo.

SEÇÃO	27,5X110	55X110	SEÇÃO	110X110
H(cm)	PE/PT	PE/PT	H(cm)	PE/PT
11	0,99	0,99	12,4	1,00
22	0,96	0,99	24,8	0,97
33	0,91	0,98	37,2	0,94
44	0,84	0,96	49,6	0,91
55	0,79	0,94	62,0	0,88
66	0,77	0,89	74,4	0,86
77	0,75	0,85	86,8	0,80
88	0,74	0,80	99,2	0,78
99	0,69	0,77	111,6	0,78
110	0,66	0,75	124,0	0,76
	H/L=4	H/L=2		H/L=1
121	0,63	0,73	136,4	0,73
132	0,59	0,71	148,8	0,72
143	0,55	0,70	161,2	0,71
154	0,52	0,68	173,6	0,70
165	0,50	0,67	186,0	0,71
176	0,50	0,66	198,4	0,71
187	0,52	0,64	210,8	0,68
198	0,49	0,63	223,2	0,67
209	0,49	0,63	-	-
	H/L=8	H/L=4		H/L=2

## 5.5- ENSAIOS DOS SILOS EM MODELOS REDUZIDOS

### 5.5.1- OBJETIVOS

Avaliar a capacidade útil (ocupação) e o fluxo do produto armazenado durante o carregamento e descarga, dos tipos de silos existentes, através de modelos reduzidos.

### 5.5.2- MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta fase, foram avaliados o fluxo do material armazenado e a capacidade útil dos silos em função da disposição das rampas defletoras, através de modelos reduzidos. Estes modelos foram construídos em chapas de compensado de 4 mm, com as rampas defletoras em chapas de 2 mm.

Para a montagem desses modelos em escala reduzida, optou-se, pela utilização dos grãos de soja, devido às características de dimensão e forma do produto agrícola, o que tornou possível a construção de modelos na escala de 1/10. A montagem dos modelos acompanharam os tipos de silos já caracterizados no capítulo 3. Este ensaio foi dividido em três fases, em função da montagem dos modelos com a avaliação individual de seu desempenho.

*FASE 1- Modelo de silo com rampas alternadas:* Na figura 27 é mostrado que existem 4 lances de rampas e o fundo inclinado. As rampas defletoras são dispostas no modelo com as extremidades alternadas e com o uso de defletores permitindo o escoamento do material no silo. As inclinações das rampas são mostradas nas figuras. Foram feitas modificações no modelo, com a inclusão de mais uma rampa, (figura 28), após uma série de carregamentos. Esta modificação, foi uma tentativa de melhorar o fluxo do material e diminuir o impacto do produto contra as paredes do silo. Dessa forma a inclinação das rampas passou a ser 20 graus. A capacidade real do silo foi comparada com a capacidade nominal.

*FASE 2- Modelo de silo com rampas tipo tremonha:* Na figura 29 é mostrado este modelo de silo, com as rampas do tipo tremonha com inclinação de 26 graus. O fundo é inclinado permitindo a descarga do silo. A capacidade real do silo foi calculada e em seqüência foram feitos três carregamentos com soja, observando o fluxo do produto, as regiões de maior impacto com as paredes e rampas.

FASE 3- *Modelo de silo com rampas perimetrais*: O modelo foi montado conforme é mostrado na figura 30. Como se verifica as características desse modelo são bem distintas, apresentando uma coluna central para fixação das rampas.

### 5.5.3- RESULTADOS OBTIDOS

Através dos ensaios dos modelos reduzidos pôde-se avaliar a ocupação dos silos em função da disposição das rampas. A estimativa de volume útil ocupado é mostrada a seguir.

TABELA 14- Volume de ocupação em %, obtido nos ensaios de modelos reduzidos.

MODELO DE SILO	OCUPAÇÃO (%)
SILO COM RAMPAS ALTERNADAS	
A- 4 RAMPAS	87
B- 5 RAMPAS	73
SILO COM RAMPAS TIPO TREMONHAS	67
SILO COM RAMPAS PERIMETRAIS	77

### 5.5.4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

A avaliação do fluxo, no carregamento e descarga foi qualitativa. Durante o carregamento e descarga do silo foram feitas as seguintes observações :

O volume útil de ocupação dos silos foi aumentado gradativamente com as modificações propostas durante o ensaio. Algumas proporcionaram o escoamento do produto, melhorando o fluxo no carregamento e descarga do silo.

Nos silos com rampas alternadas, a utilização de calhas laterais dificultaram o escoamento do produto para os módulos inferiores. Com abertura das calhas laterais, verificou-se o escoamento por essas aberturas para o módulo seguinte e como consequência, houve um aumento da altura de queda do produto para 1,5 m entre rampas.

A modificação sugerida, com a inclusão de mais uma rampa, permitiu a redução de impacto na parte inferior das rampas e o escoamento do produto passou a ser mais lento, em contrapartida, o volume útil de armazenamento foi reduzido.

Nos silos com rampas do tipo tremonha, as alturas de queda do produto são menores, 1,20 m, mas, em função da disposição dessas rampas o efeito de múltiplas quedas é prejudicial ao produto. Um outro agravante é a capacidade de armazenamento deste modelo reduzida de 33%, conforme citado no item anterior.

Os silos com rampas perimetrais acarretam também perdas significativas no volume de armazenamento. A disposição das rampas permite o fácil escoamento do produto e uma altura do módulo do silo de 2 metros, o que é desaconselhável para grandes períodos de armazenamento, consideradas as características de comportamento mecânico da laranja. A incidência de danos no produto devido a altura de queda entre rampas é praticamente inexistente, entretanto, nas paredes laterais os impactos são freqüentes.

#### 5.6- CONCLUSÕES GERAIS DO CAPÍTULO

Os dados e as análises aqui feitas permitiram tirar algumas conclusões que serão aplicadas no dimensionamento dos silos.

- A altura máxima de armazenamento para laranjas é de 1,60m para uma deformação de 6,75 mm na fruta, considerando o período de armazenamento de 48 horas.

- Para a diminuição do efeito de impacto a altura máxima de queda não deve ser superior 0,50m, em superfícies que sejam desprovidas de um sistema de amortecimento. A colocação da manta de borracha (SBR-50) é viável para alturas inferiores a 1,00 metro. Para alturas superiores a esta outros materiais devem ser pesquisados, permitindo a redução dos danos devido ao impacto.

- Na avaliação das pressões, as equações para silos baixos de acordo com a norma Canadense podem ser aplicadas o que permite adotar as hipóteses simplificadoras para os cálculos e posterior dimensionamento dos componentes estruturais do silo.

- A partir da variação da seção transversal do modelo e a altura de armazenamento pode-se afirmar que as pressões laterais são estimadas em 24% e 33% do valor das pressões verticais calculadas pela Norma Canadense para silos baixos, considerada a seção 1,10m x 1,10m, para as relações de altura/lado igual a 1 e 2.

- A utilização de rampas defletoras é imprescindível na diminuição do efeito do impacto do produto no interior do silo, incidindo em menores danos. Dentre os modelos existentes, a disposição alternada das rampas, proporcionou menores perdas no volume de armazenamento nos silos, com alturas de armazenamento de 1,80 metros, o que repercute em deformações na fruta para o período de armazenamento considerado, mas que não comprometem as características fisiológicas das frutas. Ao diminuir a inclinação das rampas para  $16^\circ$  foi necessária a inclusão de mais um lance de rampas. Isto diminuiu a velocidade de escoamento do produto no silo, incidindo em menores impactos da fruta contra as paredes, em contrapartida, a capacidade real deste modelo foi estimada em 73% da capacidade total. Este fato permite concluir que inclinações menores para as rampas incidem em menores danos para o fruto, mas comprometem a capacidade real do silo para os modelos com rampas perimetrais e rampas alternadas. Para melhor entendimento na tabela 15, são descritas algumas vantagens e desvantagens dos modelos de silos.

O modelo de silo com rampas tipo tremonhas, mostrou-se não adequado para o armazenamento de laranjas, devido aos problemas apresentados, como capacidade real estimada em 67% da total e quedas sucessivas da fruta devido à disposição das rampas. Este modelo mesmo apresentando altura de queda de 0,6 metros entre rampas, é necessária a instalação de um material amortecedor de choques.

TABELA 15- Modelos de silos - Vantagens e desvantagens.

TIPOS DE SILOS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
RAMPAS EM ESPIRAL Silos com fechamento lateral em madeira	-Escoamento satisfatório e inexistência do impacto do produto com as paredes	-Capacidade útil é reduzida -Modelo experimental
RAMPAS ALTERNADAS Silos de madeira com as colunas de sustentação em peças metálicas perfiladas.	-Escoamento do produto é satisfatório -Capacidade útil estimada em 87%.	-Há necessidade de colocação de defletores nas extremidades das rampas. - Altura de armazenamento nos módulos é superior a 1.8m. -Necessitam de sistema de amortecimento nas rampas.
RAMPAS EM TREMONHA Silos de madeira com as colunas de sustentação em peças metálicas perfiladas.	-Escoamento do produto é o de melhor desempenho -A altura de queda entre as rampas é 0,6m	- A colocação de várias rampas diminui a sua capacidade útil estimada em 67%. - As frutas estão sujeitas a múltiplas quedas.
RAMPAS PERIMETRAIS Silos com fechamento em chapas metálicas perfuradas e estrutura em peças metálicas perfiladas.	- Devido a inclinação e disposição de suas rampas os danos devido ao impacto do produto, são minorizados.	-Por serem metálicos, podem apresentar problemas de corrosão devido ao ambiente agressivo das indústrias. - Necessitam de sistema de amortecimento nas rampas.

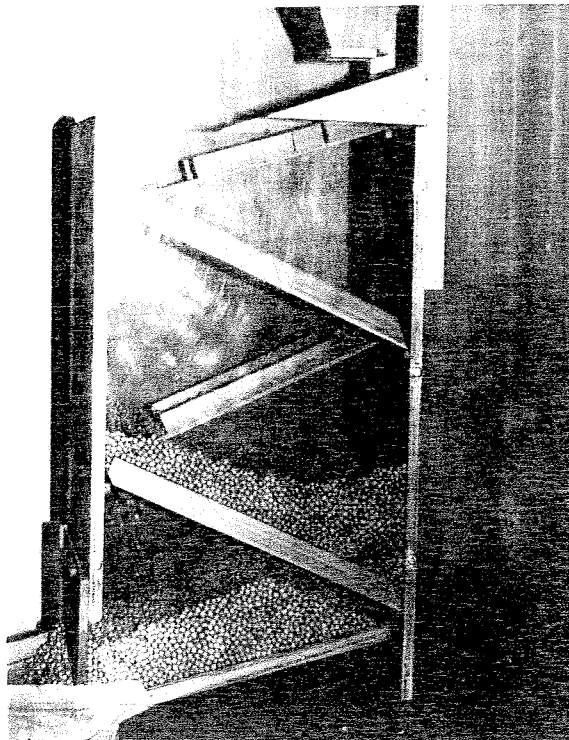


FIGURA 27- Modelo reduzido de silo com rampas alternadas.

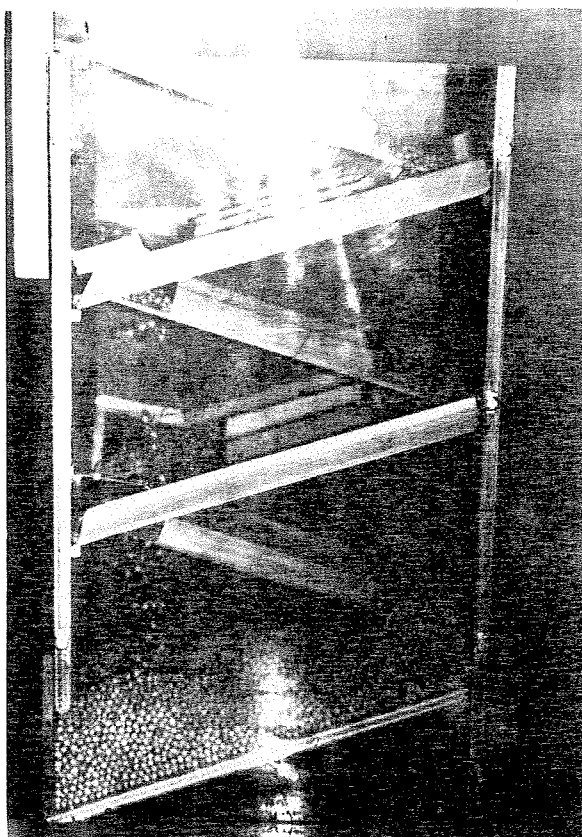


FIGURA 28 - Modelo reduzido de silo com rampas alternadas, modificado



FIGURA 29 - Modelo reduzido de silo com rampas tipo tremonhas.

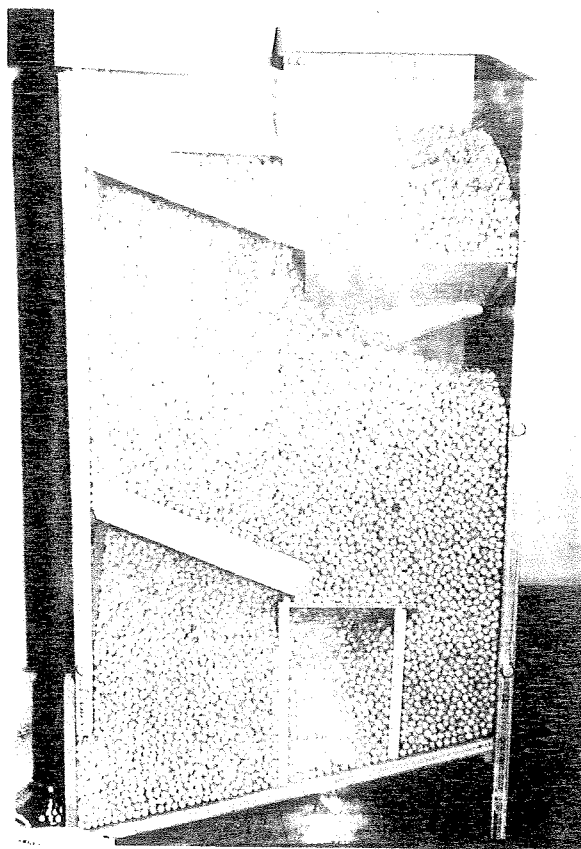


FIGURA 30 - Modelo reduzido de silo com rampas perimetrais



## 6 - ANÁLISE ESTRUTURAL DO MODELO DE SILO

### 6.1 - INTRODUÇÃO

As conclusões sobre o levantamento dos tipos de silos existentes, o estudo dos dados sobre as frutas com avaliação do comportamento mecânico, estático e dinâmico, a avaliação das pressões nas paredes e ainda a análise do fluxo, permitiram definir o projeto de um silo que atendesse aos parâmetros definidos (altura máxima de armazenamento, altura máxima de queda entre rampas e capacidade real).

A concepção inicial do projeto visou atender aos requisitos buscando otimizar o modelo mais adequado, a partir dos tipos de silos já existentes, caracterizados no capítulo 3.

Em síntese, a otimização do projeto de silo para armazenamento de laranjas, visou solucionar as deficiências encontradas nos modelos existentes na indústria e propor a sua instalação nas fazendas em função da produção.

O modelo aqui desenvolvido foi idealizado para atender aos seguintes pré-requisitos:

1- Custo de construção e instalação: sendo construído com madeira de reflorestamento, a disponibilidade do material é grande, tornando a construção economicamente viável.

2- Capacidade útil: foram admitidas perdas na ocupação do silo. Com isso a disposição das rampas foi projetada com inclinações que permitissem a redução dessas perdas.

3- Ocorrência de danos nas frutas: os danos freqüentemente ocorridos na fruta se devem às quedas entre as rampas e o impacto contra as paredes do silo. A colocação de superfícies amortecedoras também é necessária, conforme citado anteriormente. A utilização de rampas de madeira da espécie pinus, não é condição suficiente para que os danos sejam diminuídos, pois a altura de queda entre rampas é um fator limitante, dada a inclinação das mesmas.

## 6.2- DEFINIÇÃO DO MODELO A SER ADOTADO

A partir dos ensaios em modelos reduzidos para a determinação da capacidade real, verificou-se que o modelo de silo com rampas dispostas alternadamente, apresentou melhor resultado quanto ao volume de ocupação, conforme citado no capítulo 5.

O modelo analisado é mostrado na figura 31, onde pode-se verificar o posicionamento das rampas e a disposição das colunas externas e internas do módulo do silo, com capacidade de 40 toneladas. A análise estrutural foi realizada assumindo a condição crítica de carregamento.

## 6.3- DADOS PARA A ANÁLISE ESTRUTURAL

### 6.3.1- ALTURA MÁXIMA DE ARMAZENAMENTO

Foi definida em função da disposição das rampas, admitindo uma perda de 15% na capacidade real dos silos e considerando também o período de armazenamento de 48 horas.

### 6.3.2- MATERIAL A SER UTILIZADO

O modelo proposto foi avaliado com a utilização de eucalipto para a execução da superestrutura e pinus para a execução das rampas defletoras. As ligações entre as peças serão executadas com parafusos e pregos. A cobertura é composta com telhas de fibro-cimento e sua estrutura em madeira de eucalipto (tesoura).

As características de elasticidade e de resistência mecânica das madeiras adotadas estão relacionadas no capítulo 4.

### 6.3.3- CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO ARMAZENADO

Tipo - Laranja-pêra, variedade *citrus sinensis*

Ângulo de repouso - 35 a 37 graus.

Massa específica - 700 Kg/m<sup>3</sup>

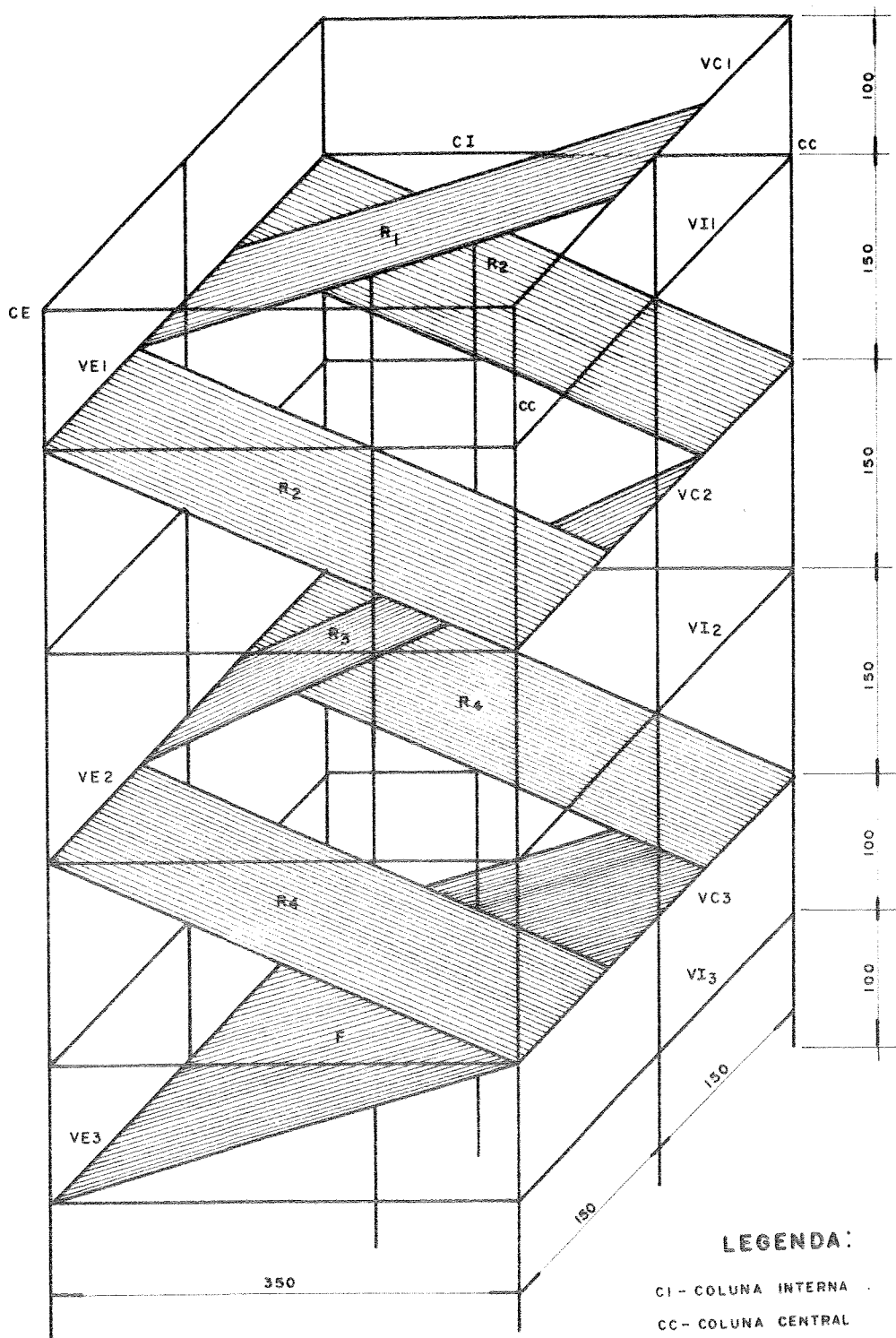


FIGURA 31- Esquema do modelo de silo adotado

## 6.4- CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Foi adotada a NBR-7190/82, (Cálculo e execução de Estruturas de Madeira), para o dimensionamento das peças e das ligações da estrutura. Para o cálculo dos deslocamentos foi utilizada a norma DIN-1052, considerando a necessidade de peças mais esbeltas na flexão, devido ao impacto das laranjas.

### 6.4.1- RAMPAS DEFLETORAS

As rampas defletoras foram definidas, conforme mostrado na figura 32, com a utilização de duas vigas longitudinais de eucalipto de seção 6cm x 12cm para o apoio de tábuas de madeira de pinus com espessura de 2,54 cm. As tábuas são pregadas sobre vigas transversais de seção 5cm x 6cm. As rampas são apoiadas sobre as vigas externas (VE), e vigas centrais (VC), o que possibilitou a diminuição do vão teórico para o cálculo da flecha máxima. Na figuras 32 e 33 são mostrados os detalhes das rampas defletoras, incluindo o posicionamento das colunas centrais de sustentação.

Para os cálculos de flecha máxima foram adotados os seguintes dados:

L - vão teórico = 175 cm

E - módulo de elasticidade = 165000 daN/cm<sup>2</sup>

I - momento de inércia = 864 cm<sup>4</sup> (seção 6cmx12 cm)

$f_{adm}$  - (flecha admissível) = L/200 = 0,875 cm

Com os dados acima, foi adotada a seção de 6cm x 12cm para as vigas de sustentação das rampas, considerando uma carga de 9,0 daN/cm. Adotando a eq.(20), chegou-se ao valor de flecha máxima de 0,32 cm, para a viga contínua de três tramos.

$$f_{\max} = \frac{qL^4}{185EI} \quad (20)$$

### 6.4.2- VIGAS DE APOIO DAS RAMPAS

Com a utilização das colunas centrais para fixação das rampas defletoras, as vigas externas (VE) e as vigas centrais (VC) puderam ser dimensionadas com uma redução de suas seções devido a diminuição dos esforços atuantes sobre as mesmas.

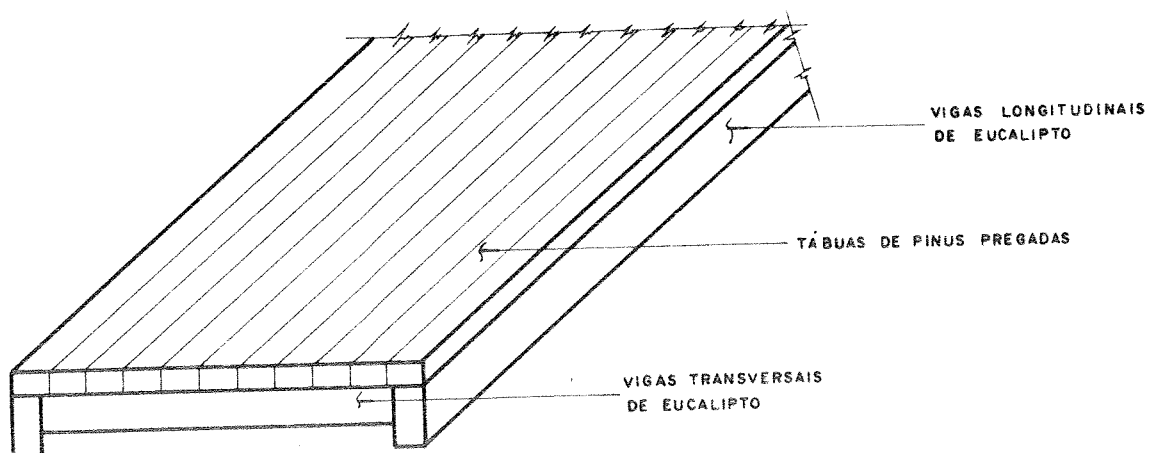


FIGURA 32- Detalhe da rampa

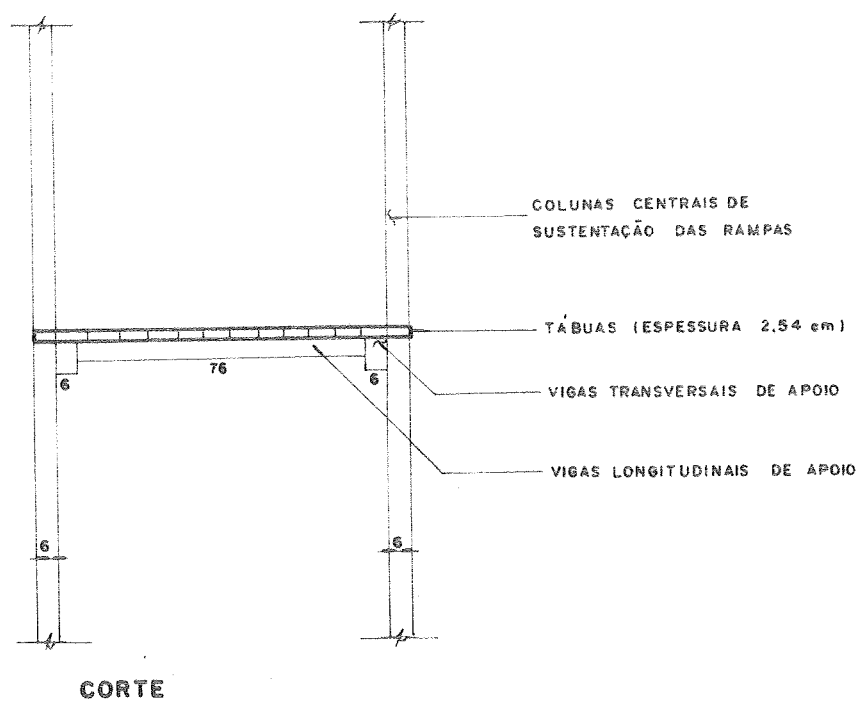


FIGURA 33- Detalhe da posição das colunas nas rampas.

Considerando as vigas mais solicitadas, VC<sub>3</sub> e considerando ainda as reações devido ao peso próprio das peças e o peso do material armazenado, a flecha máxima foi calculada para uma carga de 15,5 daN/cm, resultando em 0,72 cm, ficando abaixo da flecha admissível igual a 0,75 cm. A seção da peça adotada é de 6cmx12cm. A escolha da viga VC<sub>3</sub>, se deve ao fato de que esta viga está submetida às cargas das rampas R4 e do fundo dos dois módulos, conforme é mostrado na figura 34. Para os cálculos das flechas máximas utilizou-se a eq. (21), admitindo-se as cargas distribuídas uniformemente nas vigas.

$$f_{\text{máx}} = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (21)$$

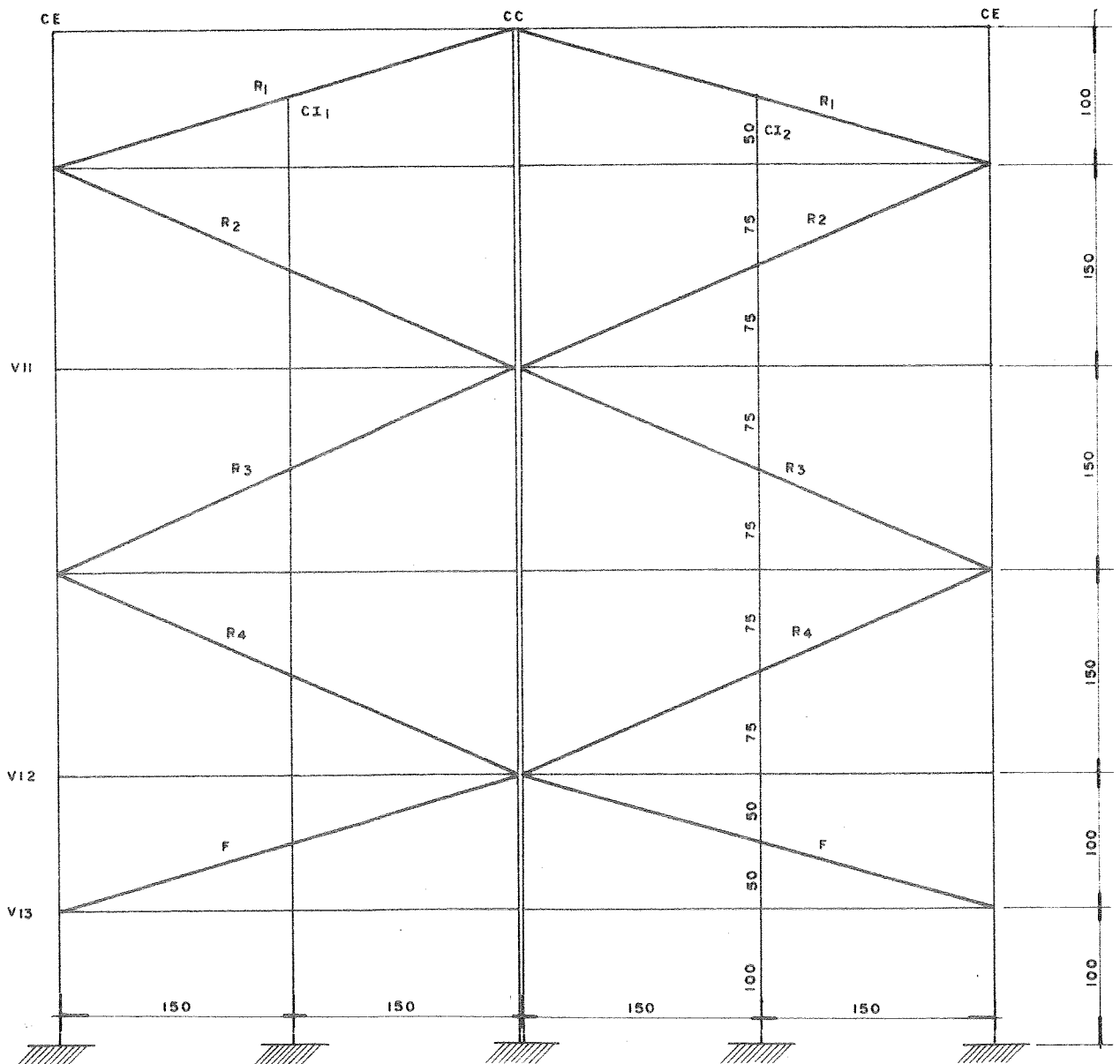


FIGURA 34- Módulos centrais dos silos para laranjas

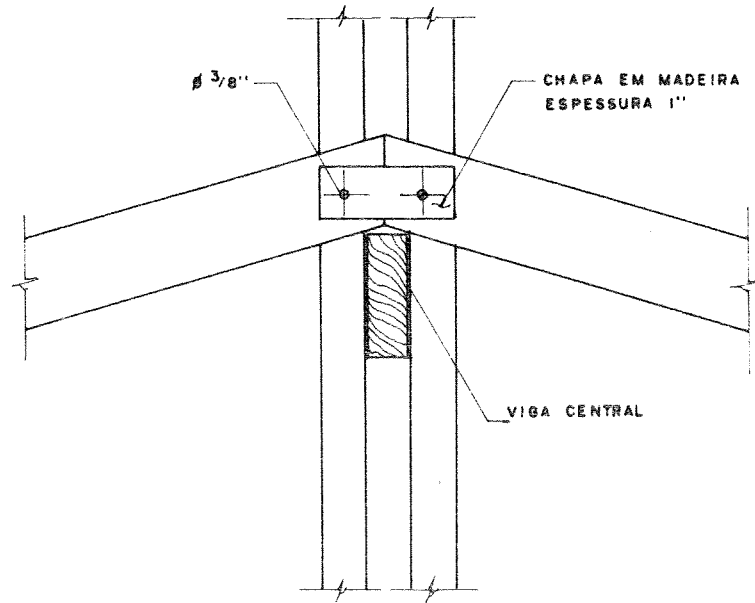


FIGURA 35- Detalhe da ligação entre rampas

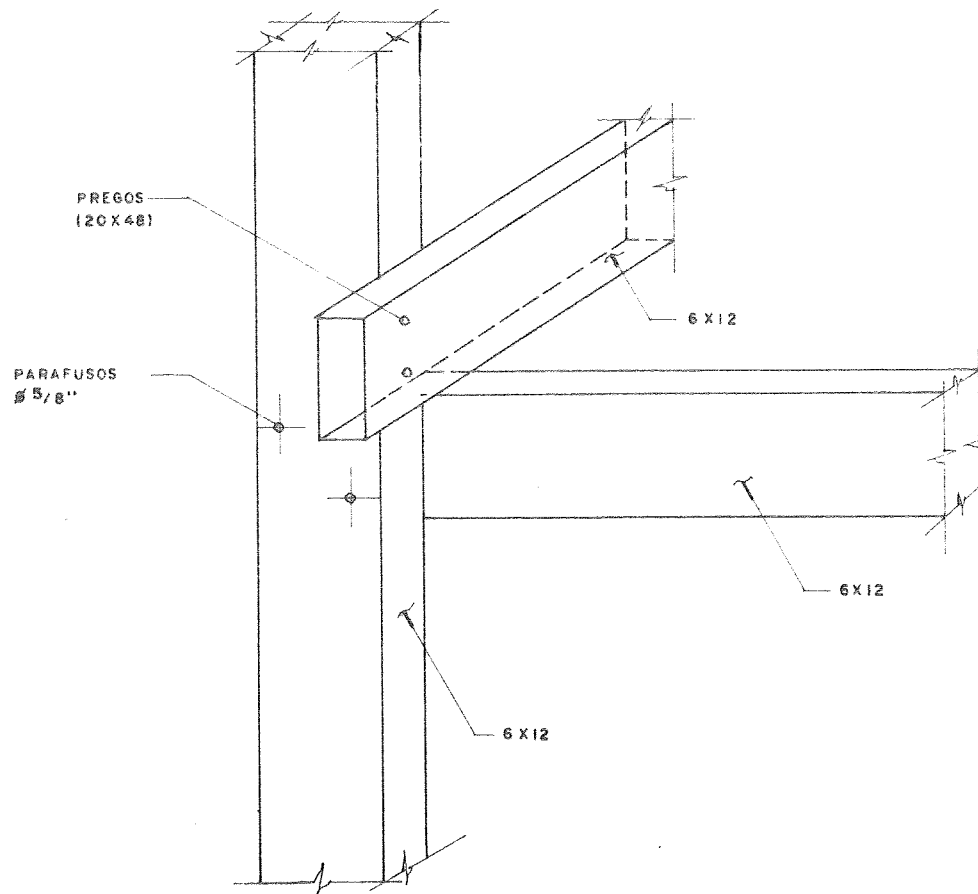


FIGURA 36- Ligação entre vigas e colunas externas

### 6.4.3- COLUNAS DE APOIO DAS RAMPAS

As colunas centrais , CI, foram dimensionadas para receber as cargas das rampas devido à sua fixação, conforme mostrada nas figuras 33 e 34. Foram adotadas colunas de seção 6cm x 12cm.

Para o cálculo das colunas foram adotadas as equações de cálculo de flambagem.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{3\pi^2 E}{8\sigma_c}} \quad (22)$$

$$\bar{\sigma}_n = \bar{\sigma}_c \left( 1 - \frac{1}{3} \frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right) \quad (23)$$

$$\sigma_{at} = \frac{N}{S} \quad (24)$$

Adotando uma peça de seção 6cmx12cm para um comprimento de flambagem de 100 cm, considerando a distancia de travamento das colunas, chega-se a um valor de  $\lambda_0 = 68$  e uma tensão de flambagem  $\bar{\sigma}_n = 106 \text{ daN/cm}^2$ . Para uma carga atuante de 7300 daN, a tensão é de 101 daN/cm<sup>2</sup>.

### 6.4.4- COLUNAS CENTRAIS

Foram dimensionadas com as reações das vigas de apoio das rampas. De acordo com critério construtivo, foram adotadas 2 colunas com a fixação entre elas, das vigas VC (figura 35). Em função das cargas atuantes de 9100 daN e com a mesma seqüência de cálculos do item anterior 6.4.3, adotou-se para estas peças a seção de 6cm x12cm.

### 6.4.5- COLUNAS EXTERNAS

Devido a carga atuante de 4600 daN, a seção da peça adotada é também de 6cm x 12cm, utilizando-se uma única coluna. No dimensionamento destas colunas, são consideradas apenas as parcelas de reações das cargas nas rampas R2, R4 e do fundo do silo, o que não acontece para as colunas centrais, VC.



A utilização de 6 colunas para cada módulo foi definida em função do pré-dimensionamento, considerados os pesos atuantes na estrutura (cobertura, rampas defletoras, vigas, fechamento lateral e peso do produto ensilado). As ações permanentes foram constituídas pelo peso próprio da estrutura suposta de madeira verde e por todas as sobrecargas fixas (equipamentos instalados).

#### 6.4.6- FECHAMENTOS LATERAIS

Foram adotadas tábuas de 2,54 cm de espessura, pregadas nas vigas intermediárias  $VI_n$ . O fechamento lateral confere estabilidade e rigidez à estrutura, sendo as tábuas fixadas através de pregos, com espaçamento para permitir ventilação no interior dos silos. Para os cálculos das tábuas foi adotado o vão de 150 cm, que é a distância entre as vigas intermediárias.

#### 6.4.7- FUNDO DO SILO

A montagem do fundo do silo foi idealizada com a utilização de tábuas de madeira com espessura de 2,54 cm apoiadas sobre vigas de seção 6cm x 12cm sendo a viga central fixada nas colunas centrais dos módulos (CI), por meio de parafusos. A definição da estrutura do fundo do silo é justificada pela carga atuante. Foi considerada a parcela do peso do material armazenado, desconsiderados os pesos sobre as demais rampas, não atuantes no fundo do silo.

#### 6.4.8- LIGAÇÕES

As ligações adotadas para este tipo de estrutura são as de parafuso e por meio de pregos segundo os critérios da NBR-7190/82. Nas figuras 35, 36, 37 e 38, são ilustrados os detalhes das ligações entre as peças: rampas-coluna, rampa-viga, vigas-colunas e entre colunas.

As ligações entre as rampas de dois módulos centrais são mostradas na figura 35, com o detalhe da ligação entre elas, apoiadas na viga central  $VC_3$ . Na figura 36 é mostrada a ligação entre as vigas externas e as colunas externas.

Em função da altura dos módulos dos silos, as peças das colunas devem apresentar emendas de topo, de acordo com a figura 37, que apresenta detalhes da posição e tipo de parafusos utilizados.

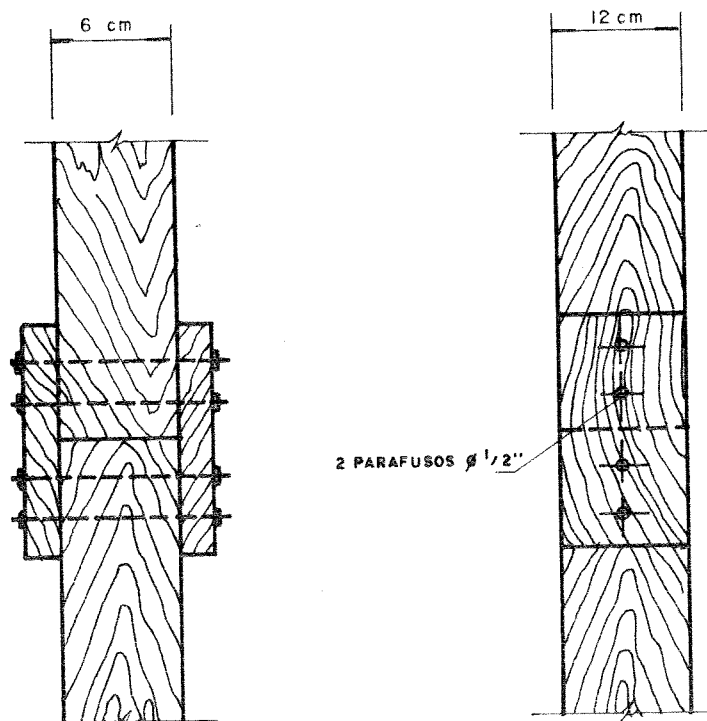


FIGURA 37- Ligações das colunas com parafusos.

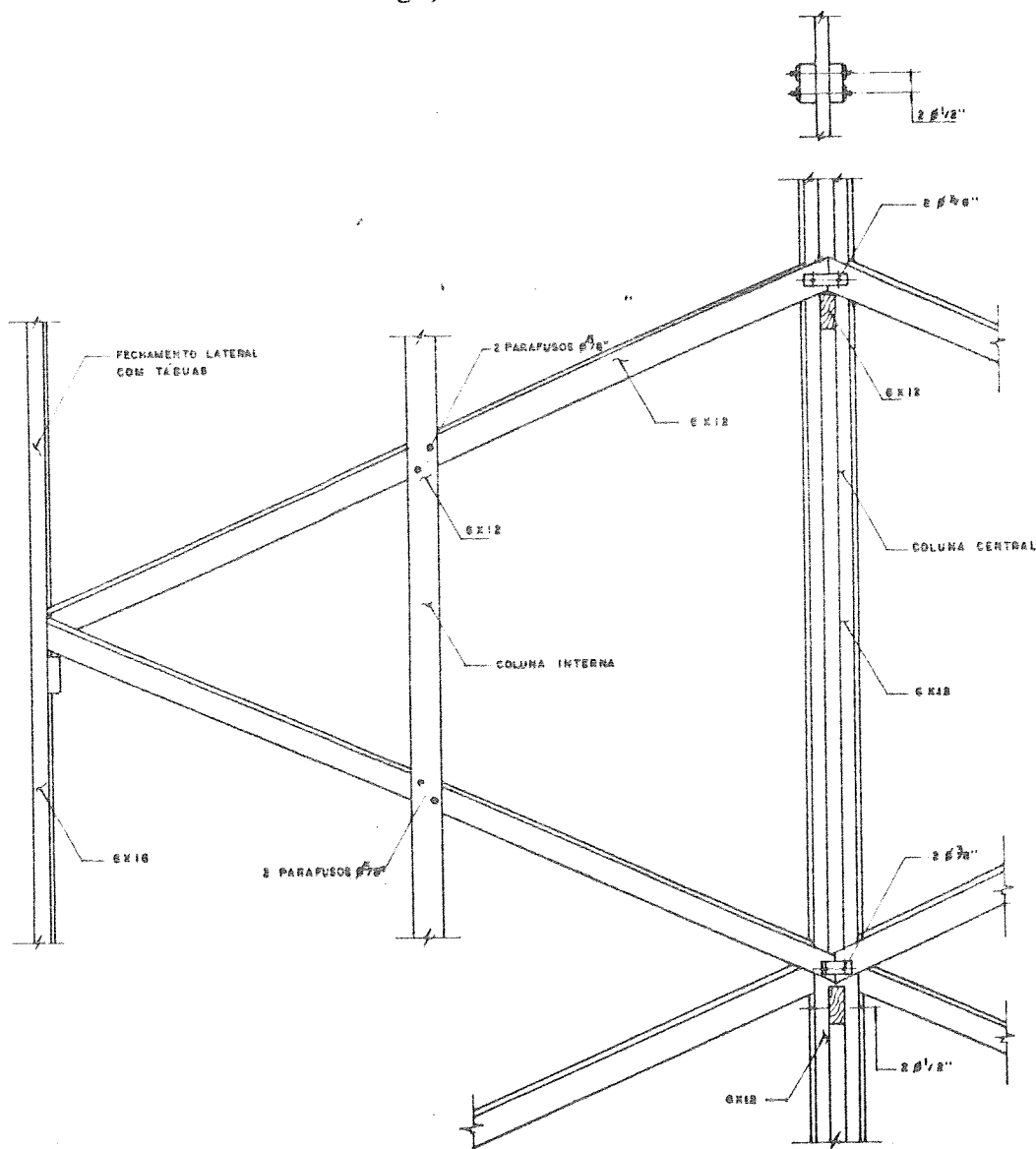


FIGURA 38- Detalhes das ligações entre - rampa-colunas, rampa-viga, viga-coluna.

O projeto do protótipo é mostrado na figura 39, ilustrando a composição final do silo, indicando a instalação de quatro módulos do silo com capacidade individual de 40 toneladas. O aumento da capacidade pode ser feito com a instalação de módulos no sentido longitudinal de acordo com a necessidade de armazenamento.

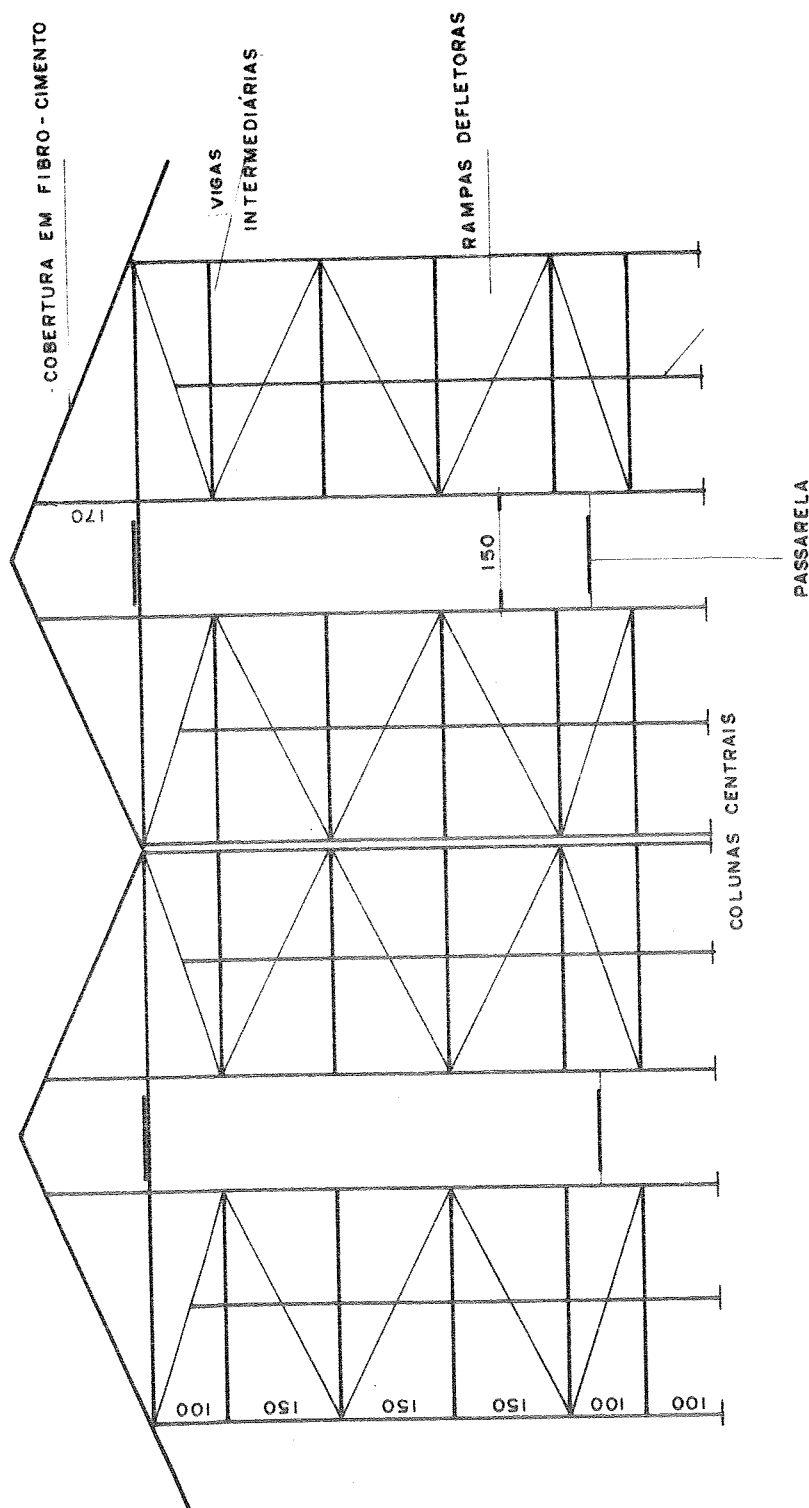


FIGURA 39- Esquema do protótipo do silo

## 7 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O conhecimento das características mecânicas dos produtos agrícolas quando armazenados é de fundamental importância na aplicação de projetos de silos.

No estudo do comportamento mecânico das laranjas, a utilização do modelo reológico de Burgers na determinação dos parâmetros de viscosidade e de elasticidade, nos ensaios de carregamento estático, é adequada. Os parâmetros levantados informam ao projetista as solicitações e condições de armazenamento e o comportamento do produto no período em que permanecerá nos silos.

O comportamento do produto nos ensaios dinâmicos (impacto), permitiu concluir que, é necessária a aplicação de materiais amortecedores nas superfícies onde as frutas se chocam. As mantas de borracha utilizadas pela indústria para revestimento das rampas defletoras, no interior dos silos, não são eficientes. A proposta de utilização de tábuas de madeira de pinus na confecção das rampas é vista como uma solução, desde que a altura de queda na descarga das frutas não ultrapasse a 1,0 metro, quando estas não forem revestidas.

A utilização da madeira como material amortecedor, comparada com as chapas metálicas, é colocada como uma solução para a diminuição dos danos nas frutas, solução esta, que pode ser bem aceita pela indústria, devido ao seu baixo custo, o que não se pode afirmar, sobre a aplicação de alguns polímeros. Quanto aos silos metálicos a colocação dos materiais amortecedores, deve ser ainda mais criteriosa, pois a aplicação destes, pode acarretar grandes problemas de corrosão, entre a superfície metálica e a parte inferior do material amortecedor, devido as altas concentrações de umidade no local. Este fato, já observado em diversos silos com aplicação de mantas de borracha (SBR-50), não apresentou bons resultados quanto ao amortecimento. Um fator que compromete a sua utilização é também o desgaste ocorrido devido ao impacto das frutas com sua superfície, requerendo uma manutenção semestral nos períodos de entre-safra, com a substituição desse material.

Quanto a avaliação das pressões pode-se afirmar que a aplicação das equações da Norma Canadense, para silos baixos são adequadas para a estimativa dos esforços nas paredes laterais e no fundo do silo. A utilização de silos baixos é vista como uma solução mais acessível em função dos custos de instalação e construção. Os painéis laterais de fechamento podem ser mais leves devido as pressões laterais atuantes serem pequenas. Através da análise estrutural do silo, pode-se afirmar que a opção por silos baixos viabiliza o uso de madeiras de reflorestamento, como o eucalipto, nos elementos estruturais. A madeira da espécie pinus, pode ser usada nas rampas defletoras, considerando efeito de amortecimento e o menor desgaste, durante o escoamento do produto no interior do silo.

Entre os modelos de silos avaliados, em função do fluxo e capacidade útil, pode-se concluir que o silo com rampas dispostas alternadamente apresentam maior ocupação do volume útil calculado. A inclinação de suas rampas com ângulos mais próximos do valor do ângulo de repouso da laranja permite um melhor escoamento do produto, com aumento de sua capacidade real.

Utilizando os parâmetros levantados nesta pesquisa, verificou-se que são atendidas as exigências de armazenamento quanto ao comportamento mecânico do produto, sendo viável a instalação do protótipo desenvolvido. Nas indústrias a opção seria a instalação de silos com maior número de módulos e nas fazendas seriam usados silos unimodulares, atendendo a demanda da produção, tornando-se uma opção a baixo custo devido as vantagens já apresentadas com a utilização da madeira tratada de reflorestamento.

As propostas para os trabalhos futuros são decorrentes das indagações ocorridas no desenvolvimento desta pesquisa.

No estudo do comportamento mecânico das laranjas, a análise das condições de impacto deve ser aprofundada, devido ao grande número de variáveis envolvidas. A determinação das deformações ocorridas na fruta e o tempo de impacto são fatores importantes a serem considerados. Dessa forma a otimização do modelo de impacto proposto é imprescindível. Juntamente com esta análise, o estudo de materiais amortecedores e sua aplicação no estudo de impacto de corpos viscoelásticos, torna-se necessário. O estudo de impregnação de polímeros em madeira pode ser considerado como um ponto de partida para este campo, configurando um compósito leve e que absorva a energia de impacto durante o carregamento e descarga dos silos.

O estudo de ligações cavilhadas é visto como uma solução plausível, com a substituição de todas as peças metálicas de ligações sujeitas a corrosão. O que acarretaria menores gastos com manutenção em toda a estrutura.

## ANEXOS

TABELA 16- Deslocamentos médios em mm, obtidos no ensaio de carregamento estático na posição equatorial.(x 0,01)- Carga em Kgf.

tempo.min.	carga.2	carga.3	carga.4	carga.5	carga.6	carga.7
0	362	444	598	755	814	920
5	374	459	622	786	845	965
10	387	470	639	812	870	997
15	397	483	653	827	885	1023
25	408	495	665	842	906	1053
35	414	504	678	857	924	1076
45	421	510	712	868	935	1089
60	430	519	727	880	953	1113
120	488	527	747	908	991	1158
180	540	556	761	932	1020	1195
300	573	586	789	949	1061	1245
420	602	609	824	978	1094	1279
540	638	639	865	1029	1131	1313
720	719	675	914	1094	1166	1347
1260	912	744	1034	1217	1263	1445
1800	975	774	1105	1254	1294	1472
2340	1020	795	1163	1325	1349	1534
2880	1030	825	1200	1330	1360	1561
2880	705	748	1012	1181	1166	1300
2885	695	733	981	1162	1131	1271
2890	683	721	968	1152	1118	1257
2895	667	703	962	1141	1111	1245
2905	662	696	953	1130	1100	1233
2915	658	690	945	1119	1090	1224
2925	653	682	941	1100	1084	1217
2940	641	678	934	992	1002	1208
3000	635	675	925	874	937	1009
3060	590	655	910	853	886	980
3120	520	621	870	840	824	913
3180	485	587	823	835	786	897
3300	440	543	789	827	727	805
4000	247	328	675	715	700	786

TABELA 17- Deslocamentos médios em mm, obtidos nos ensaios de carregamento estático na posição axial.(x 0,01)- Carga em Kgf.

TEMPO.min.	carga.2	carga.3	carga.4	carga.5	carga.6	carga.7
0	280	303	369	475	703	745
5	294	320	389	499	727	784
10	302	338	399	511	746	797
15	312	348	406	521	758	809
25	320	356	417	536	779	825
35	326	367	426	546	793	845
45	337	378	440	562	812	851
60	347	417	452	575	829	864
120	420	431	540	680	898	906
180	432	489	553	691	954	922
300	450	513	578	712	1001	969
420	469	534	601	732	1041	1004
540	504	569	622	750	1075	1035
720	531	692	668	788	1122	1080
1260	630	714	792	816	1221	1186
1800	647	822	839	883	1304	1297
2340	731	827	951	966	1404	1435
2880	738	830	960	981	1430	1452
2880	671	772	781	811	1098	1070
2885	664	762	773	798	1081	1056
2890	656	754	767	786	1064	1050
2895	653	746	750	780	1058	1042
2905	640	732	744	774	1047	1029
2915	636	728	738	767	1040	1024
2925	631	721	731	759	1032	1015
2940	624	713	722	748	1028	1003
3000	601	673	685	706	985	925
3060	545	615	638	659	899	869
3120	507	587	598	613	813	802
3180	412	521	563	589	763	776
3240	325	489	524	507	724	735
3300	286	415	473	496	665	682
3480	201	330	401	423	621	638
4000	160	285	387	415	580	607

TABELA 18-Resultados de pressões obtidos no ensaio do modelo 1- S= 0,3025m2  
(Kgf/m2)

ALTURA.CM	PVEnsaio	PVNorma	PHEnsaio	PHNorma
209	8308	14352	2077	3588
198	7644	13597	1911	3400
187	7533	12841	1833	3210
176	6868	12086	1717	3021
165	6550	11331	1579	2833
154	6423	10575	1408	2644
143	5800	9819	1382	2455
132	5435	9064	1357	2266
121	5100	8390	1332	2077
110	5027	7554	1257	1888
99	4725	6798	1181	1700
88	4524	6043	1131	1511
77	4021	5288	1005	1322
66	3519	4532	880	1133
55	3016	3778	754	944
44	2513	3021	628	755
33	2011	2266	503	567
22	1407	1511	352	378
11	691	755	173	189
0	0	0	0	0



TABELA 19-Resultados de pressões obtidos no ensaio de modelo- 2-  $S=0,605 \text{ m}^2$   
(Kgf/m<sup>2</sup>)

ALTURA CM	PVEnsaio	PVNorma	PHEnsaio	PHNorma
209	9400	14352	2350	3588
198	9048	13597	2262	3400
187	8646	12841	2162	3210
176	8445	12086	2111	3021
165	8043	11331	2011	2833
154	7590	10575	1898	2644
143	7289	9819	1822	2455
132	6786	9064	1697	2266
121	6434	8390	1608	2077
110	6032	7554	1508	1888
99	5529	6798	1382	1700
88	5077	6043	1269	1511
77	4725	5288	1181	1322
66	4273	4532	1068	1133
55	3770	3778	943	944
44	3063	3021	766	755
33	2340	2266	585	567
22	1600	1511	400	378
11	792	755	198	189
0	0	0	0	0

TABELA 20- Resultados de pressões obtidos no ensaio de modelo 3- S=1,21 m<sup>2</sup>  
(Kgf/m<sup>2</sup>).

ALTURA.CM.	PVEnsaio	PVNorma	PHNorma	PHEnsaio
223,2	9048	15327	3832	2262
210,8	8922	14476	3619	2231
198,4	8721	13624	3406	2180
186	8168	12773	3193	2042
173,6	7615	11921	2980	1904
161,2	7163	11070	2768	1791
148,8	6660	10218	2555	1665
136,4	6283	9367	2342	1571
124	5906	8516	2129	1477
111,6	5504	7664	1916	1376
99,2	4901	6812	1703	1225
86,8	4398	5907	1477	1100
74,4	4046	5109	1277	1012
62	3433	4258	1056	858
49,6	2890	3406	852	723
37,2	2236	2555	639	559
24,8	1550	1703	426	386
12,4	792	852	213	198
0	0	0	0	0



FIGURA 40- Vista interna dos módulos dos silos

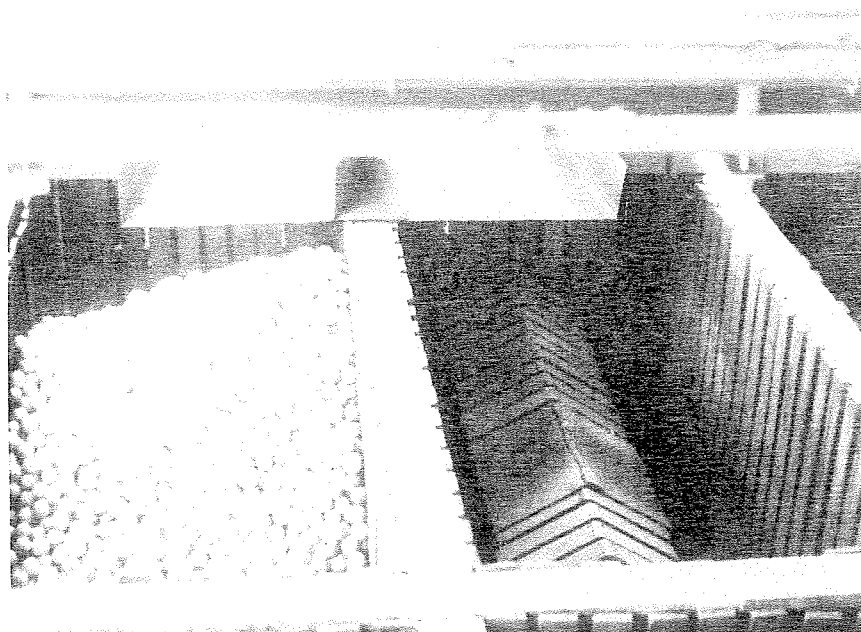


FIGURA 41- Modelo de rampas tipo tremonha

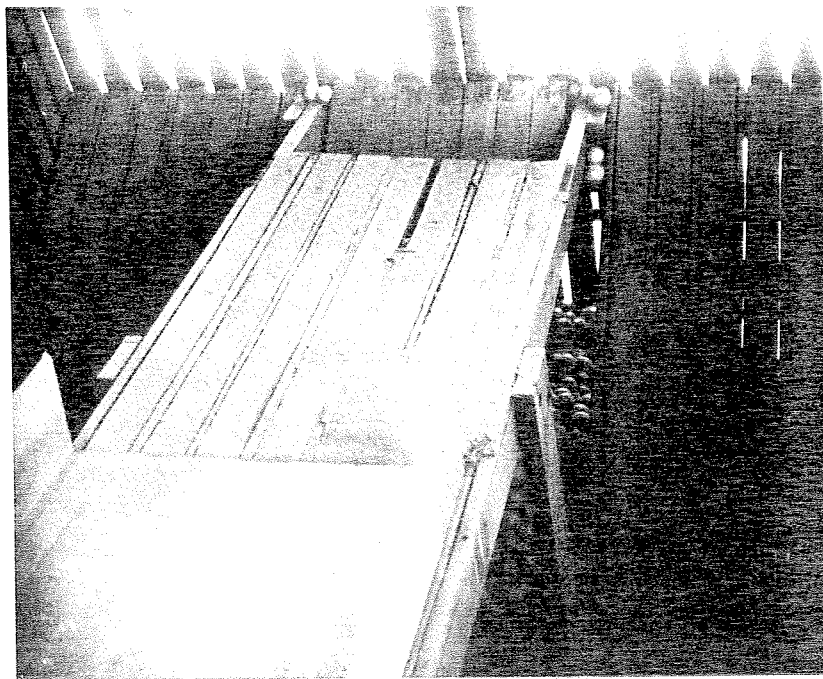


FIGURA 42- Modelo de rampas alternadas

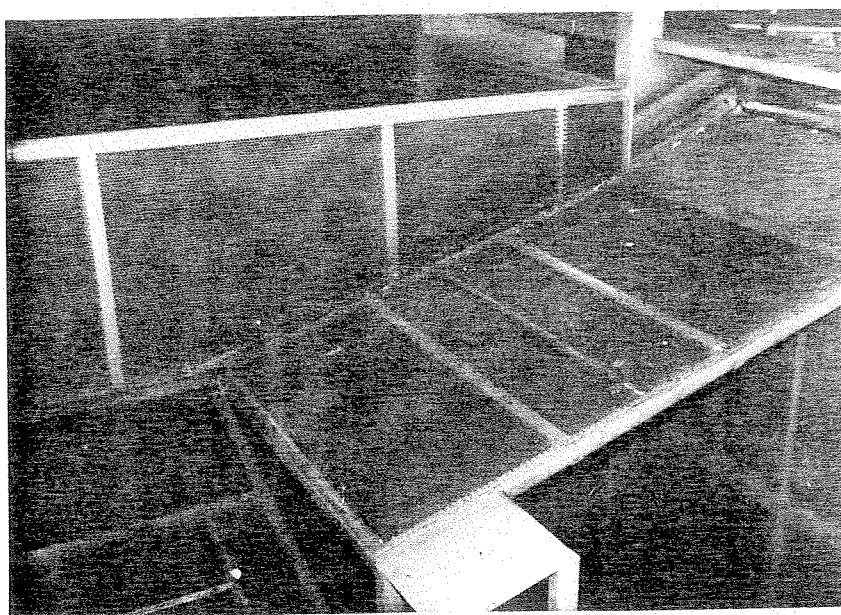


FIGURA 43 - Modelo de rampas perimetrais

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNOLD, P.C; MOHSENIN, N.N. (1971). Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. *Trans. of the ASAE*, vol.14, p. 78-84.
- ARRUDA VEIGA, A. (1981). Cultura de Pinus. *Boletim do Instituto Florestal*, vol.35, n.1, p. 1-23.
- ASAE. (1989). Compression test of food materials of convex shape. ASAE STANDARDS, ASAE S 3681, n.36, p. 368-71.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.(1982). *NBR 7190- Cálculo e execução de Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIATE COMMITTEE ON THE NATIONAL BUILDING CODE. (1983). Canadian Farm Buiding code . CFBC. National Research Council of Canadá. Ottawa. 25p.
- BITTNER, D.R.; NAMBECK, H.B.; NOHSENIN, N.N. (1967). Evaluation of cushioning and handling of fruits and vegetables. *Trans. of the ASAE*, Vol. 10, n.6, p. 711-714.
- BODIG, J. & JAYNE, B.A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites.* New York, N.Y. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 712p.
- BORTOLETTO JR., Geraldo. (1993). *Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de pinus na construção civil*. São Carlos. 106 p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Univerdade de São Paulo.

- BROWN, G.K.; SHERTZ C.E. (1967). Evaluation shake harvesting of oranges for the fresh market. *Trans.of the ASAE*, vol. 10, n.5, p.577-578 e 585.
- BRUSEWITZ, G.H.; BARTSCH, J.A. (1989). Impact parameters related to post harvest buising of apples. *Trans. of the ASAE*,vol. 32,n.3, p. 953-957.
- BURKNER, P.F.; CHESSON, J.H.; BROWN, G.K. (1972). Padded collecting surfaces for reducing citrus fruit injury. *Trans. of the ASAE*,vol.10, n.3, p.627-629.
- CALIL JR., C. (1982). *Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de produtos pulverulentos cohesivos*. Barcelona. 318p. Tese (Doutorado)- Escola Tec. Superior de Engenheiros Industriais de Barcelona, Universidade Politécnica de Barcelona.
- CALIL JR., C. (1978). *Silos de madeira*. São Carlos. 133p. Disserta o (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CALIL JR., C. (1985). Cargas para dimensionamento de silos. Proc. XXIII JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL. Colloquia 85. Argentina. 10p.
- CALIL JR., C. (1989). *Recomenda es de fluxos e de cargas para o projeto de silos verticais*. São Carlos. 200p. Tese (Livre Docência)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CHAPPELL, T.W.; HAMANN, D.D. (1968). Poisson's ratios and young's modulus of apple flesh under compressive loading. *Trans. Of the ASAE*, vol. 2, n.5, p. 608-610.
- CHEN, P. et al . (1987). Study of impact and compression damage on asian pears. *Trans. of the ASAE*, vol. 30, n.4, p.1193-1197.
- CHESSON, J.H. (1974). Parameters affecting selective shake harvest of citrus. *Trans. of The ASAE*, 73-1524, p.1085-1087.

- CHIARA, Márcia de. (1994). Indústria de suco tem nova associação. Folha de São Paulo, São Paulo, 2 fev. p.2-5.
- CHUMA, Y.; SHIGA, T. (1978). Mechanical properties of satsuma orange as related to the design of container for bulk transportation. *Journal of Texture Studies*, p. 461-479, setembro.
- CITROSUCO PAULISTA S.A. (1988). *Laranja & Cia.* Departamento de Comunicação Social. Matão. Boletim n.14, nov/dez, 48p.
- CLEVINGER, J.T.; HAMANN, D.D. (1968). The behavior of apple skin under tensile loading. *Trans. Of the ASAE*, vol. 2, n.1, p. 34-37.
- DAL FABBRO, Inácio M. (1979). *Failure theories for apple flesh.* E. Lansing, MI. Tese (doutorado). Michigan State University.
- DALLY, J.W.; RILEY, W.F.; McCONNELL, K.G. (1984). *Instrumentation for Engineering Measurements.* New York, John Wiley & Sons Inc. Cap.6: Force, Torque and Pressure Measurements.
- DELWICHE, Michael J. (1987). Theory of fruit firmness sorting by impact forces. *Trans. of the ASAE*, vol. 30, n. 4, p. 1160-1171.
- DIN-1052.(Deutsche Industrie Normem). (1969). *Holzbaunwerke, Berechnung und Ausfuhrung.*
- EAKS, F.L. (1961). Techniques to evaluate injury to citrus fruit from handling practices. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, n.78, p.190-196.
- FENTON, F.C. (1942). Plywood for grain bin construction. *Agricultural Engineering*, vol.23, n.7, p. 217-222.
- FINNEY, E.E.; NORRIS, K.S. (1968). Instrumentation dynamic mechanical properties of fruits and vegetables. *Trans. of the ASAE*, vol.11, n.1, p. 94-97.

- FINNEY, E.E.; MASSIE, D.R. (1975). Impact testing of fruits and vegetables. *Trans. of the ASAE*, vol.16, n.4, p. 660-666.
- FLETCHER, S.W. et al. (1965). Mechanical Behavior of selected fruit and vegetables under fast rates of loading. *Trans. of the ASAE*, vol.7, n.4, p.409-411.
- FLUCK, R.C.; AHMED, E.M. (1973). Impact Testing of fruit and vegetables. *Trans. Of the ASAE*, vol. 4, n.3, p.344-350.
- GAFFNEY, J.J. (1973a). Reflectance properties of citrus fruit. *Trans. of The ASAE*, vol.16, p.310-314.
- GAFFNEY, J.J. (1973b). Potentials for photoelastic grading equipment in the Flórida citrus industry. *Trans. Citrus Eng. Conf.*, vol.19, p.59-71.
- GESUALDO, FRANCISCO A.R. (1982). *Ligação de Peças Estruturais de Madeira através de Cavilhas Partidas de Eucalipto Citriodora*. São Carlos. 91p. Dissertação(Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GOLDSMITH,W. (1960). *Impact, theory and physical behavior of colliding solids*. London,Edward Arnold (Publishers) Ltd. 369p.
- GRIERSON,W.; PHILIPS, R.V. (1957). Cost Advantagens of Bulk handling citrus through the packhinhouse. *Am. Soc. Mech. Eng.*, n.70, p.171-177.
- HOLT, J.E.; SCHOORL, D. (1983). Mechanics of failure in fruits and vegetables. *Journal of Texture Studies*, vol.13, p.83-97.
- HORSFIELD,B.C.; FRIDLEY,R.B.; CLAYPOOL, L.L. (1972). Application of theory of elasticity to design of fruit harvesting and handling equipment for minizing bruising. *Trans. of the ASAE*, vol.15, n.4, p.746-750,753.
- KUMAR, L.; WANG, Jaw-Kai. (1971). Response of papaya fruit to dynammic loading. *Trans of the ASAE*, vol.14, n.2, p.263-267.



- JENIKE, A.W. (1964). *Storage an flow of solids*. Utah, Edt. Hake City, bulletin 123, p.197.
- JESUS, Laerce Lopes H. (1987). *Preservação da madeira de pinus spp para a construção civil*. São Carlos. 104 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LABORATÓRIO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRAS. (1987). *Madeira, Determinação de suas Características*. São Carlos, LaMEM- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 44p.
- LICHTENSTEIGER, M.J. et al. (1988). Impact parameters of spherical viscoelastic objects and tomatoes. *Trans. of The ASAE*, vol. 31, n.2, p. 595-602.
- MARTINS, Maurício Pires (1993). *Comportamento mecânico de laranja - pêra (Citrus Sineusis Osbeck)*. Campinas. 100p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- MOHSEENIN, N.N.; GÖHLICH. (1962). Techniques for determination of mechanical properties of fruits and vegetables as related to design and development of harvesting and processing machinery. *Journal Agricultural En. Research*, vol. 7, n.4, p.300-315.
- MOHSEENIN, N.N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials*. New York, Gordon and Beach Science Publishers Inc. Cap. 4,5,6 e 8. 739p.
- MYERS, L.H; GIERSON, W. (1978). World Citrus Production and Trade: Current Situation and future outlook. *Proc.Int.Soc. Citriculture*, p.1-6.
- NAHIR, D.; RONEN, B.; PRIGOJIN, I. (1989). Shelf -life prediction of citrus fruits. *Trans. ASAE*, 89-6024, 10p.
- NELSON, C.W.; NOHSEENIN, N.N. (1968). Maximum allowable static and dynamic loads and effect of temperature for mechanical injury in aples. *J. Agric. Eng. Res*, vol.13, n.4, p. 305-317.

- ORR, Paul H.; YAEGER, Earl C. (1971). Bin fronts for potato storages. *Agriculture Research Service*. United States Department of Agriculture. Marketing Research Report, n.893. 35p.
- PHILIPS, GRIERSON (1957). Cost advantages of bulk handling citrus through the packinhouse. *Am. Society. Mech. Eng. Am. Meeting*, n.57101, p.171-177.
- RAVENET, Juan (1992). *Silos*. 1ª ed. Barcelona, Edicion Laser Fotocomposicion. S.L., v.1, 508p.
- REIMBERT, M.L. & REIMBERT A.M. (1979). *Silos. Theory and Praticce*. Tucumã, Editorial Americalee S.R.L., 464p.
- SALES, Almir (1991). *Características de resistência mecânica de algumas espécies de eucalipto do Estado de São Paulo*. São Carlos. 203p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SANDSTROM, C.O. (1939). Building bins of wood and steel. *Chemical & Metallurgical Engineering*, vol.3, n.46, p. 166-169.
- SARIG, Y.; ORLOVSKY, S. (1974). Viscoelastic properties of shamouti oranges. *Journal of Texture Studies*. Rendel Publishing Company. Dordrecht.p. 339-349.
- SCHAPER, L.A.; YAEGER, E.C. (1992). Coefficients of friction of irish potatoes. *Trans. of The ASAE*, vol. 35, n.5, p.1647-1651.
- SCHAPER, L.A. et al. (1989). Mathematical Expressions for lateral potato pressures. *Trans. Of the ASAE*, vol.32, n.3, p. 1075-1080.
- SHAHABASI, Y. (1979). *Experimental and numerical techniques related to the maximum allowable depth of apples in a bulk storage*. Michigan. 131p. Tese (doutorado) - Michigan State University.
- SITKEY, Gyorgy (1986). *Mechanics of agricultural materials*. University of Forest and Science. Cap. 10, 487p.