

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJETO RACIONAL DE CAIXA DE MADEIRA
PARA MANGA (*Mangifera Indica* L.)**

NEIL FERNANDO SALAZAR CHACÓN

CAMPINAS
NOVEMBRO DE 2006



PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por **NEIL FERNANDO SALAZAR CHACÓN**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de novembro de 2006.

Campinas, 03 de março de 2007.


Prof^ª. Dr^ª. **BÁRBARA JANET TERUEL MEDEROS**
Presidenta

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJETO RACIONAL DE CAIXA DE MADEIRA
PARA MANGA (*Mangifera Indica* L.)**

Dissertação de Mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola, na área de
concentração de Tecnologia Pós-Colheita.

NEIL FERNANDO SALAZAR CHACÓN

Orientadora: Prof^a. Dr^a. BÁRBARA JANET TERUEL MEDEROS

Co-Orientador: Prof. Dr. ROBERTO FUNES ABRAHÃO

CAMPINAS
NOVEMBRO DE 2006

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

Sa31p Salazar Chacón, Neil Fernando
Projeto racional de caixa de madeira para manga
(*Mangifera Indica L.*) / Neil Fernando Salazar Chacón. -
-Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientadores: Bárbara Janet Teruel Mederos, Roberto
Funes Abrahão.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Manga. 2. Otimização estrutural. 3. Vibração. 4.
Resfriamento. I. Teruel Medeiros, Bárbara Janet. II.
Abrahão, Roberto Funes. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV.
Título.

Título em Inglês: Rational project of wooden boxes for mangoes (*Mangifera
Indica L.*)

Palavras-chave em Inglês: Mango, Optimization structural, Vibration, Cooling
Área de concentração: Concentração de Tecnologia Pós-Colheita.

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: José de Assis Fonseca Faria e Antonio Carlos de Oliveira
Ferraz.

Data da defesa: 27/11/2006.

*A Raquel, minha mãe;
A Brenda, minha esposa.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram de alguma forma à realização deste trabalho:

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Bárbara Janet Teruel Mederos, pela oportunidade a mim oferecida e pelo apoio no desenvolvimento do trabalho assim como os conselhos, a amizade e a confiança.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Roberto Funes Abrahão, pela colaboração e os ensinamentos recebidos.

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz, pela colaboração no meu trabalho.

À minha esposa, minha alma gêmea, pela amizade, companheirismo e amor, por me incentivar sempre e me dar forças para enfrentar todas as dificuldades, te amo.

À minha mãe, meu anjo da guarda.

À minha família, pelo apoio incondicional, obrigado.

Aos colegas do Laboratório de Termodinâmica e Energia, Ricardo Baldassin Jr., Rodrigo Aparecido Jordan e especialmente ao técnico Pedro Luis Magna Fonte, obrigado pela ajuda e a amizade.

Aos meus colegas da FEAGRI, Roger Mestas, Cristina Nascimento, Daniel Gomes, pelo companheirismo e um agradecimento especial ao Daniel Albiero, pela colaboração no meu trabalho.

Aos meus amigos, Fany Ticoná, Alex Elguera e Victor Garcia, que sempre me ofereceram amizade nos bons e não tão bons momentos que vivi na minha estada no Brasil.

A Deus, pela vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	4
3.1. Manga: aspectos gerais	4
3.2. Aspectos fisiológicos	4
3.3. Cuidados pós-colheita	5
3.4. Refrigeração	7
3.4.1. Resfriamento rápido	8
3.5. Exigências para embalagens de produtos hortícolas	8
3.5.1. Normas vigentes para embalagens	9
3.5.2. Importância da área de abertura das caixas na cadeia do frio	10
3.5.3. Uso de madeira como material de embalagem	11
3.6. Embalagens de papelão para manga	12
3.7. Propriedades de resistência e rigidez da madeira	13
3.7.1. Compressão	14
3.7.2. Tração	15
3.7.3. Cisalhamento	15
3.7.4. Flexão simples	16
3.7.5. Propriedades elásticas	17
3.8. Projeto estrutural otimizado	18
3.8.1. Formulação do problema	19
3.8.2. Modelo matemático geral para problemas de otimização	20
3.9. Análise estrutural pelo modelo de elementos finitos (MEF)	21

4. MATERIAL E METODOS	30
4.1. Fluxograma de projeto para embalagens de produtos hortícolas	30
4.1.1. Definições iniciais	30
4.1.2. Estudos iniciais	30
4.1.3. Projeto	32
4.1.3.1. Estruturais	32
4.1.3.2. Geométricos	33
4.1.3.3. Ergonômicos	33
4.2. Restrições e carregamentos	34
4.3. Programa computacional ANSYS	35
4.4. Implementação do modelo no Programa ANSYS e otimização estrutural	36
4.5. Material construtivo das caixas	37
4.6. Validação de metodologia	37
4.7. Análise experimental no sistema de resfriamento rápido com ar forçado	40
4.7.1. Sistema de resfriamento rápido com ar forçado	40
4.7.2. Monitoramento da temperatura	43
4.7.3. Sistema de aquisição de dados	44
4.7.4. Medição da velocidade do ar	45
4.7.5. Produto	45
4.7.6. Análise dos resultados	46
4.7.7. Delineamento experimental	47
4.8. Ensaio de vibração	47
4.9. Estimativa preliminar da economia de energia durante o resfriamento usando a caixa proposta	49
4.10. Avaliação preliminar do custo do protótipo desenvolvido	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1. Resultados do experimento de resfriamento rápido com ar forçado	51
5.2. Resultados relativos da velocidade do ar em pontos específicos	55
5.3. Resultados da análise estrutural utilizando ferramentas computacionais	56
5.3.1. Análise dos resultados obtidos na otimização	57
5.4. Resultados do ensaio de vibração	62

5.5. Estimativa da economia de energia durante o resfriamento usando a caixa proposta	63
5.6. Estimativa do custo do protótipo desenvolvido	64
6. CONCLUSÕES	66
7. SUGESTÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO 1	73
ANEXO 2	76

LISTA DE FIGURAS

3.1	Danos por compressão	5
3.2	Tipos de caixas de madeira de 25 kg usadas na CEASA / Campinas para manga	11
3.3	Caixa de papelão ondulado	12
3.4	Principais eixos da madeira orientados pela direção das fibras	13
3.5	Compressão na madeira	14
3.6	Tração na madeira	15
3.7	Cisalhamento na madeira	16
3.8	Flexão simples na madeira	16
4.1	Fluxograma geral para o desenvolvimento de caixas	31
4.2	Caixa modelo do IPT	32
4.3	Caixas de ripas retas	33
4.4	Carga assumida pela embalagem durante o empilhamento	34
4.5	Cargas aplicadas no projeto da embalagem para produtos hortícolas	35
4.6	Caixa modelo A	38
4.7	Vista lateral do modelo A	38
4.8	Caixa modelo B	38
4.9	Vista lateral do modelo B	38
4.10	Caixa modelo C	38
4.11	Vista lateral do modelo C	38
4.12	Vista frontal	39
4.13	Vista em planta	39
4.14	Caixa de papelão (Caixa D)	39
4.15	Vista lateral da caixa de papelão	39
4.16	Túnel de resfriamento com ar forçado instalado dentro da câmara frigorífica	42
4.17	Vista do túnel de resfriamento	42
4.18	Esquema da secção transversal do fruto onde foram inseridos os termopares	43
4.19	Distribuição dos frutos instrumentados dentro da caixa	44
4.20	Sistema de aquisição de dados	44

4.21	Posição nos pontos onde foram medidas as velocidades de entrada na caixa	45
4.22	Embalagem preparada para o experimentos de resfriamento rápido	46
4.23	Embalagens de manga sobre a mesa vibratória	49
5.1	Curvas de resfriamento rápido com uma vazão de $0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de ar por kg de manga	52
5.2	Curvas de resfriamento rápido com uma vazão de $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de ar por kg de manga	53
5.3	Resultados da rotina de otimização para a caixa B-36	59
5.4	Deflexão nas paredes laterais da caixa B-36 [m]	60
5.5	Deflexão no fundo da caixa B-36 [m]	61
5.6	Tensão equivalente de Von Misses para a caixa B-36 [MPa]	62

LISTA DE TABELAS

3.1	Características e recomendações para manga em armazenamento	7
4.1	Estudos iniciais para a caixa de manga	32
4.2	Propriedades de rigidez e resistência do <i>Pinnus Elliotti</i>	37
4.3	Área efetiva e total das caixas	40
4.4	Vazão de ar no túnel	42
5.1	Modelos propostos e caixa de papelão	51
5.2	Tempo de resfriamento da manga	53
5.3	Comparação pelo teste de Tukey para $\frac{1}{2}$ tempo de resfriamento ($p < 0,05$)	54
5.4	Média de velocidades no ar na entrada nos três modelos propostos com vazão de $0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga	55
5.5	Média de velocidades no ar na entrada nos três modelos propostos com vazão de $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga	55
5.6	Parâmetros da caixa B-36 inicial e otimizado pelo algoritmo do ANSYS	57
5.7	Conjunto de projeto adotado para construção dos modelos de caixas	59
5.8	Custos de resfriamento das mangas	64

LISTA DE SÍMBOLOS

1. Latinos

a	aceleração	[m s ⁻²]
B	base da coluna da embalagem	[m]
CE	consumo de energia	[R\$ ano ⁻¹]
C _{F+MO}	custo fabril de mão de obra	[R\$]
C _{kl}	matriz de constantes elásticas do material	[-]
C _M	custo do material	[R\$]
CPE	custo do protótipo de embalagem	[R\$]
CT	custo do kW-h	[R\$]
d ₁	diâmetro longitudinal	[m]
d ₂	diâmetro transversal	[m]
DMAXF	deflexão máxima do fundo	[m]
DMAXL	deflexão máxima das laterais	[m]
E	módulo de elasticidade	[MPa]
EF	espessura do fundo	[m]
E _L	módulo de elasticidade longitudinal	[MPa]
EL	espessura das laterais	[m]
E _R	módulo de elasticidade radial	[MPa]
E _T	módulo de elasticidade tangencial	[MPa]
ET	espessura das testeiras	[m]
f	frequência	[Hz]
G	módulo de rigidez	[MPa]
G _{LR}	módulo de rigidez perpendicular ao eixo tangencial	[MPa]
G _{LT}	módulo de rigidez perpendicular ao eixo radial	[MPa]
G _{RT}	módulo de rigidez perpendicular ao eixo longitudinal	[MPa]
h	número de horas de uso por ano	[h ano ⁻¹]
H	altura da coluna da embalagem	[m]
N ₁	rotação nominal do ventilador	[rpm]

N_2	rotação do ventilador	[rpm]
np	número de pólos	[-]
P	potência	[kW]
Q_1	vazão de ar nominal	[m ³ s ⁻¹]
Q_2	vazão de ar	[m ³ s ⁻¹]
T	temperatura	[°C]
$t_{1/2}$	tempo de meio resfriamento	[min]
$t_{7/8}$	tempo de meio resfriamento	[min]
T_a	temperatura do meio de resfriamento	[°C]
TAT	taxa adimensional de temperatura	[-]
T_f	temperatura inicial da polpa do fruto	[°C]
t_f	tempo de resfriamento	[min]
T_i	temperatura inicial da polpa do fruto	[°C]
$TMAX$	tensão máxima equivalente	[MPa]
T_p	temperatura da polpa do fruto	[°C]
TR	taxa de resfriamento	[min ⁻¹]
u	deslocamento genérico	[m]
UR	umidade relativa	[%]
$VOLCAIXA$	volume da caixa	[m ⁻³]
X_{max}	amplitude de vibração	[mm]

2. Gregos

ϵ_L	deformação longitudinal	[mm/mm]
ϵ_R	deformação radial	[mm/mm]
ϵ_T	deformação tangencial	[mm/mm]
γ_{LR}	distorção angular no plano perpendicular ao eixo tangencial	[-]
γ_{TL}	distorção angular no plano perpendicular ao eixo radial	[-]
γ_{RT}	distorção angular no plano perpendicular ao eixo longitudinal	[-]
σ_L	tensão normal longitudinal	[MPa]

σ_R	tensão normal radial	[MPa]
σ_T	tensão normal tangencial	[MPa]
σ_{LR}	tensão de cisalhamento perpendicular ao eixo tangencial	[MPa]
σ_{RT}	tensão de cisalhamento perpendicular ao eixo longitudinal	[MPa]
σ_{TL}	tensão de cisalhamento perpendicular ao eixo radial	[MPa]
ν_{LT}	coeficiente de Poisson no eixo longitudinal causada por uma tensão ao longo do eixo tangencial	[-]
ν_{LR}	coeficiente de Poisson no eixo longitudinal causada por uma tensão ao longo do eixo radial	[-]
ν_{RL}	coeficiente de Poisson no eixo radial causada por uma tensão ao longo do eixo tangencial	[-]
ν_{RT}	coeficiente de Poisson no eixo radial causada por uma tensão ao longo do eixo longitudinal	[-]
ν_{TL}	coeficiente de Poisson no eixo tangencial causada por uma tensão ao longo do eixo radial	[-]
ν_{TR}	coeficiente de Poisson no eixo tangencial causada por uma tensão ao longo do eixo longitudinal	[-]
ψ_j	função de interpolação	[-]

RESUMO

No Brasil as perdas de produtos hortícolas são significativas e dentre as principais causas cita-se o uso de caixas inadequadas e a ausência da cadeia do frio. As caixas para produtos hortícolas disponíveis no mercado, em sua maioria, são desenvolvidas de forma empírica, sem atender às exigências estruturais e área efetiva de aberturas, para facilitar a troca de calor e ventilação. Este trabalho propõe um método de projeto de caixas para mangas (*Mangifera Indica* L.), baseado em simulação computacional, otimização e validação experimental, buscando minimizar o volume de material construtivo das caixas (madeira de reflorestamento *Pinnus Elliotti*), associado a aspectos estruturais, ergonômicos e distribuição da área efetiva de aberturas. Foram projetados e construídos três protótipos de caixas, de ripas retas com diferentes configurações e área efetiva de aberturas (54% e 36%). A eficiência do resfriamento das mangas (variedade Tommy Atkins) foi avaliada através da determinação do tempo de resfriamento de 6 kg de frutas, acondicionadas nos três modelos desenvolvidos, e submetidas ao resfriamento rápido num sistema com ar forçado e duas vazões de ar ($0,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $0,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), a uma temperatura de 6°C e umidade relativa média de $85 \pm 2,1\%$. O tempo de resfriamento das frutas também foi determinado quando a mesma quantidade foi condicionada nas caixas de papelão usadas comercialmente (7% e 0% de área efetiva de abertura). Foi aplicado o Método dos Elementos Finitos implementado no programa ANSYS, para o dimensionamento e otimização estrutural do modelo com o melhor comportamento com relação ao resfriamento. Todas caixas de madeira contendo frutas foram submetidas a ensaios de vibração, por um período de duas horas e uma frequência de 20 Hz. Não houve diferença significativa no meio tempo de resfriamento dos frutos acondicionados nas caixas de madeira ($38,00 \pm 1,70$ min), no entanto na comparação com as caixas de papelão a diferença foi significativa ($82,74 \pm 29,58$ min). O modelo escolhido para a otimização estrutural possuía 36% de área efetiva de aberturas e duas ripas laterais. Após a otimização a diminuição de volume total de material foi de 60% e a redução da seção transversal das colunas da ordem de 83%, com relação às condições iniciais de projeto. Não houve indícios de danos mecânicos nas frutas depois de submetidas à vibração. A simulação computacional para o estudo estrutural, acoplada a algoritmos de otimização, pode ser usada como ferramenta de apoio para desenvolver projetos de caixas de madeira, com grande aproximação, atendendo a critérios geométricos, ergonômicos e térmicos.

Palavras-chave: manga, otimização estrutural, área efetiva de aberturas, sistema de ar forçado, tempo de resfriamento, vibração.

ABSTRACT

Horticulture product losses in Brazil are significant and among the main causes for this are the use of inappropriate boxes and the absence of the cold chain. Most of the boxes available in the market for horticulture products are developed empirically without satisfying structural demands and the openings effective area for to facilitate the exchange of heat and ventilation. This study proposes a project method for mango boxes (*Mangifera Indica* L.) based on computer simulations, optimization and experimental validation, seeking to minimize the amount of construction material for the boxes (reforestation wood - *Pinnus Elliotti*) associated with structural and ergonomic aspects and the openings effective area. Three box prototypes were designed and built using straight laths with different configurations and openings effective area (54% and 36%). The cooling efficiency the mango (Tommy Atkins variety) was evaluated by determining the cooling time for 6 kg of fruit packed in the three different models and submitted to cooling in a forced-air system and two air flows ($0.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and $0.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), at a temperature of 6°C and average relative humidity of $85\pm 2.1\%$. Fruit cooling time was also determined when the same amount was packed in the commercially used cardboard boxes (7% and 0% of openings effective area). The Finite Element Method was applied, implemented in the ANSYS program, for the dimensioning and structural optimization of the model with the best behavior in relation to cooling. All wooden boxes with fruit underwent vibration testing for a two hour period at a frequency of 20 Hz. There was no significant difference in average cooling time for fruit packed in the wooden boxes (36.08 ± 1.44 min); however, the difference was significant in comparison to the cardboard boxes (82.63 ± 29.64 min). The model chosen for structural optimization had a 36% openings effective area and two side laths. After optimization, the reduction in total volume of material was 60% and the reduction in the cross section for columns was about 83% compared to the project's initial conditions. There was no indication of mechanical damage in the fruit after it underwent vibration testing. Computer simulations for the structural study, together with optimization algorithms, can be used as an effective support tool to develop projects for wooden boxes, with geometric, ergonomic and thermal criteria.

Key words: mango, structural optimization, openings effective area, forced-air cooling, cooling time, vibration.

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de manga em 2004 foi de 24 milhões de toneladas, enquanto no Brasil a produção anual foi de cerca 842 mil toneladas. A manga é a segunda fruta tropical mais produzida no mundo, sendo superada apenas pela banana. Do total produzido mais de 50% provem da Índia, cerca de 10% da China, seguidos do México, Tailândia e Filipinas. Brasil é o nono produtor mundial com uma participação de 3,4% no volume total ofertado (ARAÚJO, 2006).

Com relação à exportação, tem sido registrado incremento significativo, passando de 4 mil toneladas, em 1991, para quase 111 mil toneladas, em 2004, o que garantiu o segundo lugar entre os maiores exportadores de manga, sendo superado apenas pelo México (COELHO DE LIMA et al., 2006).

Entretanto, a falta de cuidados, principalmente na pós-colheita, resulta em perdas consideráveis, as quais chegam a ser de 40%. Dentre os principais fatores responsáveis por essas perdas estão o uso de embalagens inadequadas, de madeira e papelão, assim como a falta de critérios de engenharia na concepção deles, apresentando problemas no acabamento o que danifica o fruto além de propiciar o acúmulo de umidade e formação de fungos, dificultando também os processos de resfriamento. Por outro lado as caixas de papelão apresentam áreas efetivas de abertura insuficiente (até 7%), o que provoca um processo de resfriamento inadequado. Em outros casos as aberturas mal dimensionadas, favorecem a perda de resistência estrutural quando submetidas ao armazenamento, provocada pela alta umidade relativa do ar (ALMEIDA, 2004).

Com o uso de embalagens adequadas que atendam às exigências de refrigeração e de proteção dos frutos, podem-se oferecer produtos de melhor qualidade e reduzir significativamente as perdas pós-colheita.

Uma boa embalagem deve ainda suportar o peso do produto e das outras embalagens da coluna, não permitindo a compressão do produto por outra caixa, deve permitir a troca de calor com o ambiente e a renovação do ar, assim como restringir o manuseio e permitir rastrear o produto (CEAGESP, 2006).

No mercado nacional, a manga é comercializada quase que exclusivamente na forma *in natura*, embora também possa ser encontrada nas formas de suco integral e polpa congelada.

A polpa pode ser empregada na elaboração de doces, geléias, sucos e néctares, além de poder ser adicionada a sorvetes, misturas de sucos, licores e outros produtos. Com relação ao volume de manga comercializado no mercado interno, a tendência é de um aumento, principalmente porque, dos 25 mil hectares plantados na região do Vale do São Francisco, 18 mil estarão em produção plena nos próximos dois anos. Essa produção deverá provocar um acréscimo no volume de manga ofertado no mercado nacional de cerca de 280 mil toneladas (ARAÚJO, 2006).

A proposta deste trabalho visa à utilização de conceitos de projeto de engenharia, auxiliado por ferramentas computacionais, para concepção de caixas de madeira para manga (*mangifera indica* L), atendendo às exigências estruturais, térmicas, geométricas e ergonômicas.

2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

O volume de manga comercializado no mercado interno experimentou um aumento das áreas de cultivo na região do Vale do São Francisco, onde 18 mil hectares estarão em produção plena nos próximos dois anos. Essa produção deverá provocar um acréscimo no volume de manga ofertado no mercado nacional de cerca de 280 mil toneladas.

O incremento da produção da manga no mercado interno e externo apresenta um futuro promissor no desenvolvimento de pesquisas nesta cultura, motivo pelo qual foi desenvolvido o presente trabalho.

Para o desenvolvimento do trabalho foi considerado como objetivo geral a aplicação da metodologia de projeto para o desenvolvimento de embalagens de madeira para manga. Para alcançar tal objetivo, propuseram-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma embalagem de madeira, usando recursos computacionais, para satisfazer as exigências de tipo estruturais térmicos geométricos e ergonômicos.
- Desenvolver protótipos de madeira, aplicando o conceito construtivo de ripas.
- Otimizar o projeto de embalagem de madeira relacionando resistência estrutural com área efetiva de abertura, visando à diminuição do tempo de resfriamento dos produtos.
- Avaliar a adequação da embalagem desenvolvida através de ensaios de resfriamento com ar forçado e de vibração simulando as condições de transporte.
- Apresentar valores preliminares da economia de energia no resfriamento e custo da embalagem proposta.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Manga: aspectos gerais

De acordo com DONADIO et al. (1996), a manga (*Mangifera indica* L) da família da Anarcadiaceae. é um fruto originário do sul da Ásia (Índia). A semente é mono-embriônica, pequena e ocupa de 6 a 8 % do fruto. A maturação é precoce à meia-estação. A árvore é vigorosa, de densa folhagem e porte de médio a alto. A manga é riquíssima em vitamina A (sobretudo quando madura) e contém quantidades razoáveis de vitaminas do complexo B e vitamina C, além de alguns sais minerais, principalmente ferro. Também tem propriedades diuréticas, o que a torna aconselhável para as pessoas que tendem a reter líquidos no organismo. No Brasil, há cerca de quinhentas variedades de manga, entre as quais as mais conhecidas são: Manga-Aden, Manga-Rosa, Manga-Coquinho, Manga-Coração-de-Boi, Manga-Bourbon, Tommy Atkins, Haden, Keitt, Kent, Van Dyke, Surpresa.

3.2 Aspectos fisiológicos

Segundo DONADIO et al. (1996), os frutos da mangueira caracterizam-se por ter casca grossa, bastante cerosa e resistente ao transporte e ao armazenamento, muito aderente à polpa.

Conforme VILLAS BOAS et al. (2001), as quatro fases seqüenciais de desenvolvimento são: crescimento, maturação, amadurecimento e senescência. O crescimento é marcado por um período de rápida divisão e alongamento celular. A maturação é caracterizada por mudanças físicas e químicas que afetam a qualidade sensorial do fruto, sobrepondo parte do estágio de crescimento e culminando com o amadurecimento do fruto, período no qual o fruto se torna apto para o consumo em virtude das alterações desejáveis na aparência, no sabor, no aroma e na textura. A senescência é a fase final do desenvolvimento, após a maturação, onde os processos degradativos aumentam, levando o fruto à perda das qualidades sensoriais de consumo e por fim à morte dos tecidos.

Segundo HONÓRIO e MORETTI (2002), após a colheita, os frutos sofrem diversas transformações químicas resultantes dos processos normais de respiração e transpiração. A manga apresenta padrão respiratório climatérico, caracterizado pela ascensão da taxa

respiratória e de etileno no início do amadurecimento. Deste modo, a embalagem e o ambiente de armazenamento devem permitir uma boa ventilação, auxiliando na remoção dos gases produzidos pela respiração dos tecidos vegetais.

O teor de água nos frutos varia de 85 a 90%, parte dessa água é perdida pelo processo de transpiração, através de estômatos presentes na casca da manga, ocorrendo principalmente em consequência da diferença de pressão de vapor entre os espaços intracelulares do fruto e o ar circundante. A transpiração provoca no produto, as mudanças na aparência, textura e perdas de peso, reduzindo conseqüentemente a sua qualidade e o seu potencial comercial. Para reduzir as perdas por transpiração recomenda-se: elevar a umidade do ar ambiente, reduzir a temperatura do produto até os níveis recomendados (HONÓRIO & MORETTI, 2002).

3.3 Cuidados pós-colheita

Os danos mecânicos podem ser definidos como deformações plásticas, rupturas superficiais e, em alguns casos mais extremos, destruição dos tecidos vegetais, provocadas por forças externas, causando alterações fisiológicas, químicas e bioquímicas de cor, aroma, sabor e textura, Mohsenin (citado por HONÓRIO e MORETTI, 2002).

Segundo SILVA e CALBO (1992), o dano por compressão pode ser fator significativa na caixa com carga acima de sua capacidade (Figura 3.1).

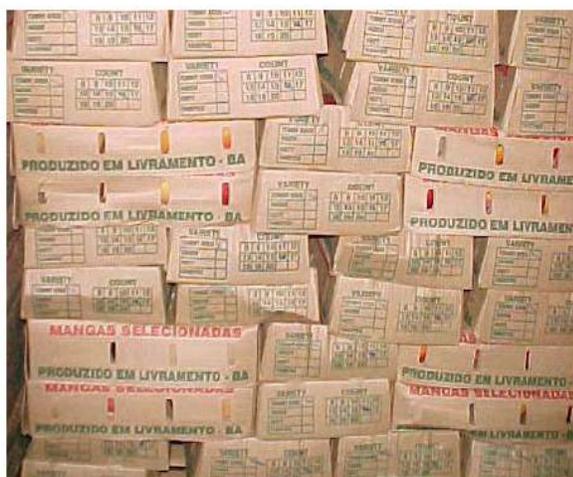


Figura 3.1: Danos por compressão

Fonte: CEAGESP 2004

Para HONÓRIO e MORETTI (2002), o dano por impacto é geralmente provocado pela colisão do fruto contra superfícies sólidas ou outros frutos durante as etapas de colheita, manuseio e transporte, podendo resultar na ruptura dos tecidos vegetais, na formação de lesões e no amolecimento precoce do fruto.

Para HONÓRIO (1998), a vibração durante o transporte pode lesionar as camadas celulares mais superficiais dos frutos, escurecendo o tecido rapidamente. Os danos por impacto, vibração e compressão aceleram o processo de deterioração dos frutos, aumentando a liberação de etileno e taxa respiratória, além de outras reações químicas que podem modificar cor, sabor, aroma e textura, e desenvolvimento de microrganismos que provocam o apodrecimento do produto. Segundo SIGRIST et al. (2002), a qualidade, no momento da colheita, é de vital importância, uma vez que ela não poderá ser melhorada, somente preservada.

JACOBI et al. (2000), mostraram que danos por tratamento com água quente foram reduzidos, e em alguns casos eliminados por acondicionamento prévio da fruta num tratamento de ar quente a 40°C por um período de 8h.

PHAKAWATMONGKOL et al. (2004) armazenou mangas de seis variedades a 4, 8 e 12°C e 85-90% de umidade relativa, observando pelo efeito do frio da aparição de manchas cinza e marrom seguida de mudanças de cor na polpa e na semente.

ORTEGA-ZALETA e YAHIA (2000) mostraram que mangas, variedade Manila, expostas à atmosfera controlada a 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 e 49°C por 160 minutos, resfriadas em água a temperatura ambiente, e armazenadas a 10°C e 80% de umidade relativa por 20 dias, não mostraram nenhum dano externo ou interno, enquanto que mangas da mesma variedade expostas à atmosfera controlada a 44°C apresentaram dano ligeiro após 10 dias e danos severos após 20 dias. As mangas que foram aquecidas a 45°C apresentaram danos severos após o armazenamento por 10 dias aumentando muito após 20 dias. As que foram submetidas ao aquecimento a 49°C e armazenadas por 20 dias tiveram 100% de danos. A perda do peso foi similar no tratamento de atmosfera controlada como no tratamento em calor. Dependendo da extensão do dano da fruta, a atmosfera controlada é tolerada por mangas Manila a temperatura menor de 44°C, mas não a 44°C ou mais.

PESIS et al. (2000) submeteu mangas a atmosfera modificada (5% CO₂ e 10% O₂), a qual foi criada com filme micro-perfurado de polietileno (PE) ou Xtend filme (XF), também

foi usada a atmosfera controlada. Depois de 3 semanas de armazenamento a 12°C mais 1 semana a 20°C, os tratamentos com atmosfera controlada e modificada apresentaram reduções de injúrias pelo frio. A redução mais efetiva foi obtida no tratamento em que foi usado o filme de XF. A segunda vantagem do uso do filme XF foi da redução no nível de viscosidade dentro do pacote devido à umidade relativa mais baixa na película de XF (90%) comparada com a aquela de PE (99%).

3.4 Refrigeração

Para BOTREL et al. (2001), o armazenamento a baixas temperaturas é um dos mais efetivos e práticos métodos utilizados para o prolongamento da vida útil de frutos frescos. A temperatura de armazenamento é, portanto um dos fatores mais importantes, uma vez que afeta diretamente os processos fisiológicos e bioquímicos dos vegetais.

Segundo ASHRAE (1994) a manga é classificada como um fruto muito perecível, cuja longevidade sob refrigeração é aproximadamente de três semanas. Esta alta perecibilidade está associada às altas taxas respiratórias.

Na Tabela 3.1, mostra-se as recomendações para armazenamento refrigerado e os valores de taxa respiratória.

Tabela 3.1: Características e recomendações para manga em armazenamento.

Características e recomendações para a manga em armazenamento		
Umidade Relativa	90 –95 %	(UC DAVIS)
	85 –90 %	(ASHRAE, 1994)
Temperatura de Armazenamento	10 –13°C	(UC DAVIS)
	10 –13°C	(ASHRAE, 1994)
Tempo de Armazenamento	2 –3 semanas	(UC DAVIS)
	2 –3 semanas	(ASHRAE, 1994)
Taxa de Produção de Etileno	A 13°C 0,2-1,0 µL C ₂ H ₄ /kg-h	(UC DAVIS)
	A 15°C 0,3-4,0 µL C ₂ H ₄ /kg-h	
	A 20°C 0,5-8,0 µL C ₂ H ₄ /kg-h	
Taxa Respiratória	A 13°C 15-22 mLCO ₂ /kg-h	(UC DAVIS)
	A 15°C 19-28 mLCO ₂ /kg-h	
	A 20°C 35-80 mLCO ₂ /kg-h	

3.4.1 Resfriamento rápido

Segundo ASHRAE (1994) o resfriamento rápido consiste em retirar rapidamente o calor do produto, sendo importante para a manutenção da qualidade durante o armazenamento e comercialização. O resfriamento rápido deve ser o primeiro passo para a conservação de frutas *in natura*. Um atraso entre a colheita e o resfriamento pode provocar uma deterioração prematura do produto e traz consigo a perda de qualidade dos mesmos.

Segundo KADER (2002), existem quatro métodos de resfriamento rápido para produtos hortícolas: resfriamento com água gelada, resfriamento com gelo, resfriamento a vácuo e resfriamento com ar forçado.

Os sistemas com ar forçado destacam-se por serem eficientes e de fácil operação. Diversos são os fatores que têm influência sobre a eficiência do resfriamento nestes sistemas, destacando-se, entre eles: o tipo de caixa, a vazão e velocidade do ar de resfriamento e a altura do leito de frutos dispostos no interior da embalagem, (ARIFIN E CHAU, 1987).

3.5 Exigências para embalagens de produtos hortícolas

De acordo com KADER (2002), as embalagens são unidades importantes para a comercialização e distribuição de produtos hortícolas, possuindo muitos requerimentos especiais. Elas devem proteger o produto contra danos durante a distribuição e devem manter sua forma por longos períodos a uma umidade relativa próxima da saturação. Muitas devem ser projetadas para facilitar o resfriamento rápido dos frutos da temperatura ambiente para a temperatura de armazenamento ou transporte, permitindo também a remoção contínua do calor produzido pelo produto. Além de todos estes requisitos, é obrigatório que as caixas continham informação sobre o produto.

Segundo GUEDES e MADI (1983), uma embalagem adequada para frutas e hortaliças é aquela capaz de preservar as características de qualidade do produto até o consumo final.

Segundo MITCHELL (1992) para projetos destas embalagens é imprescindível o conhecimento das características e propriedades do produto. De maneira geral, as frutas e hortaliças são produtos que continuam seus processos metabólicos após a colheita,

apresentando susceptibilidade variada a danos mecânicos. Devido à fragilidade dos produtos hortícolas, as embalagens devem assumir todas as cargas de empilhamento.

Com isso, podem-se citar alguns requisitos básicos para o desenvolvimento de embalagens adequadas para frutas e hortaliças, tais como:

- Oferecer resistência mecânica suficiente para a proteção do produto durante o transporte e comercialização;
- Não provocar danos mecânicos ao produto;
- Permitir a paletização, agilizando as operações de carregamento e descarregamento;
- Facilitar os tratamentos de pós-colheita (refrigeração);
- Ser descartável ou retornável, sendo que as retornáveis devem possibilitar a higienização;
- Facilitar a reciclagem ou reuso;
- Conter informações relativas ao produto ou rotulagem.

Sabe-se que, no Brasil, a maior parte da produção agrícola ainda é comercializada em embalagens inadequadas, prejudicando a manutenção da qualidade, diminuindo a vida útil elevando significativamente os índices de perdas, além de constituir um importante veículo de transmissão de pragas e doenças para produtos ou até mesmo para os consumidores.

3.5.1 Normas vigentes para embalagens

No Brasil está vigente a norma IN009/2000 para embalagens (caixas), a qual recomenda as dimensões dos paletes (1,00 m x 1,20 m). Expõe também que as caixas devem ser higienizáveis, retornáveis ou recicláveis, devem oferecer resistência ao manuseio e rotuladas com todas as informações sobre o produto.

Sobre as informações obrigatórias de marcação ou rotulagem, na maioria dos centros comercializadores não cumprem já que podemos observar nos atacadistas e varejistas que tem muitas embalagens que ainda não tem nenhum tipo de rotulagem.

Esta norma vigente não contém nenhuma exigência relacionada à área efetiva de aberturas, nem quanto ao tipo de material. A falta deste tipo de recomendação deixa uma oportunidade muito ampla para o projeto e construção de embalagens, o qual acaba afetando

processos pós-colheita como os relacionados com a cadeia de frio, pois a deficiência na área efetiva de abertura afeta os processos de transferência de calor e, por consequência, aumenta o tempo de resfriamento.

3.5.2 Importância da área efetiva de aberturas das caixas na cadeia do frio

Segundo CORTEZ et al. (2002) a área de aberturas de uma embalagem é um elemento imprescindível para um eficiente processo de resfriamento tomando em consideração que durante o resfriamento se estabelece um processo de transferência de calor. É importante que as embalagens apresentem um percentual de aberturas mínimo de 5% a 10% da área lateral, no sentido da entrada do fluxo de ar.

De acordo com TERUEL (2000), de nada adianta um eficiente sistema de refrigeração, se as embalagens forem inadequadas para este tratamento.

Segundo MITCHELL (1992) as caixas devem permitir a circulação do ar frio entre os leitos e possibilitar a redução da temperatura durante o armazenamento, transporte e comercialização dos mesmos.

Para VIGNEAULT et al. (2006) as embalagens de produtos com altas taxas de respiração, precisam de maior fluxo de ar e maior área efetiva de abertura para retirar o calor de respiração aumentando a eficiência da energia usada.

Segundo DE CASTRO (2004) a área, número e posição dos orifícios tiveram efeito significativo na eficiência do processo de resfriamento rápido do produto, assim como também o aumento da vazão de ar gera maior velocidade e com isto homogeneidade do resfriamento. Sendo assim, maior vazão de ar combinado com maior área de aberturas, condições que oferecem menor resistência à passagem do ar, seriam vantajosos para acelerar o resfriamento do produto, sobretudo aqueles de alta taxa respiratória.

Para ARIFIN e CHAU (1987) a geometria de aberturas pode ser circular, retangular ou oval, sendo que a área efetiva de abertura tem influência direta nos custos de resfriamento.

Como mostra TERUEL (2000), laranjas resfriadas em caixas plásticas com 40% de área efetiva de abertura tiveram um custo de resfriamento de R\$ 0,27 por caixa, no entanto laranjas resfriadas em caixas de papelão com 3% de área efetiva de abertura tiveram um custo de resfriamento de R\$ 0,41 por caixa.

3.5.3 Uso de madeira como material de embalagem

Os produtos hortícolas são geralmente acondicionados em embalagens do tipo caixa, de diferentes materiais, sendo a escolha do material determinada em função das necessidades do produto, métodos de embalagem, resistência, custo, disponibilidade de matéria-prima e principalmente a adequabilidade aos tratamentos de pós-colheita. Deste modo, as embalagens são principalmente confeccionadas com madeira, produtos celulósicos (papelão ondulado) e plástico.

Segundo VIGNEAULT et al. (2002), as caixas de madeira, geralmente, confeccionadas com tábuas de reflorestamento, tais como *Pinnus* e eucalipto, oferecem algumas vantagens e desvantagens. Dentre das vantagens podem-se citar a alta resistência estrutural aliada ao baixo custo. Entretanto, o processo de obtenção de tábuas resulta em uma superfície áspera, intensificando os danos mecânicos durante o transporte. Devido às características de resistência, as embalagens de madeira são geralmente reutilizadas; porém, a madeira da embalagem deve ser tratada para permitir sua reutilização.

É amplamente difundido o emprego da madeira na construção de embalagens para manga. As embalagens usadas na Central Estadual de Abastecimentos S.A. de Campinas (CEASA) são as caixas, M, K, para 25 kg de manga (Figura 3.2) e suas principais vantagens são o preço e elevada resistência. Porém essas vantagens acabaram se tornando problemas, pois o acabamento superficial provoca danos mecânicos.



Tipo M



Tipo K

Figura 3.2- Tipos de caixas de madeira de 25 kg usadas na CEASA / Campinas para manga.

Adicionalmente a questão de resfriamento do produto nestas embalagens não está adequadamente resolvida, pois estes tipos de caixas não apresentam área suficiente de aberturas. Além disso, a falta de tratamento na madeira facilita o acúmulo de umidade servindo de habitat para diversos microorganismos, aumentando a incidência e a intensidade das podridões, diminuindo a qualidade e a vida útil dos produtos.

Segundo GONÇALVES e BARROS COSTA (2006) a impermeabilização com resina derivada de óleo de mamona foi eficiente, tanto na redução da absorção de água nas tábuas de *pinus* quanto no retardamento dessa absorção. A utilização de uma camada foi suficiente para garantir os efeitos de impermeabilização, embora a utilização de duas capas retarde, ainda mais, a absorção de água.

3.6. Embalagens de papelão para manga

No Brasil, são utilizadas no mercado embalagens de papelão para 6 kg de fruta com apenas 7% de área efetiva de abertura (Figura 3.3).

Mas por outro lado o projeto de caixas de papelão deve ser feito de forma adequada segundo critérios de engenharia, pois as aberturas mal dimensionadas podem debilitar a estrutura da embalagem, diminuindo a resistência do empilhamento o que provocaria que os produtos absorvam estas forças provocando danos mecânicos. Neste sentido a madeira se torna um material com grande potencial para o projeto de embalagens de transporte desde que sejam, adequadamente resolvidas, as questões ligadas ao acabamento e impermeabilização.



Figura 3.3: Caixa de papelão ondulado.

3.7 Propriedades de resistência e rigidez da madeira

Segundo CALIL et al. (2003) as propriedades de resistência e elasticidade são influenciadas pela disposição dos elementos anatômicos responsáveis pela resistência mecânica, que são, sobretudo as fibras. A madeira é considerada um material ortotrópico, ou seja, possui propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos eixos perpendiculares, sendo o eixo longitudinal paralelo às fibras, o eixo radial perpendicular às fibras na direção radial e o eixo tangencial perpendicular às fibras e tangente aos anéis de crescimento (Figura 3.4).

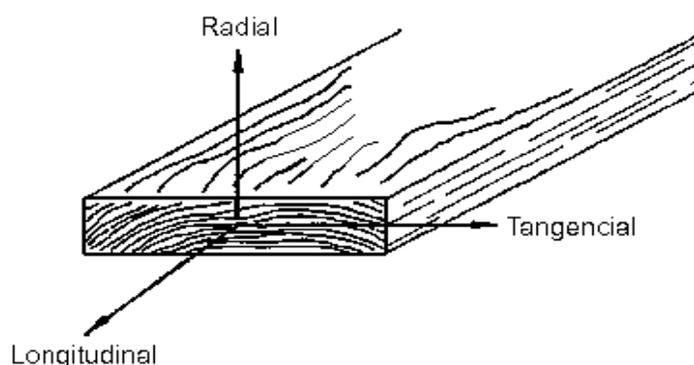


Figura 3.4: Principais eixos da madeira orientados pela direção das fibras.

Fonte: Calil et al. (2003).

Segundo CALIL et al. (2003) a direção longitudinal das peças coincide com a orientação das fibras, sendo denominada direção paralela às fibras, apresentando maiores valores de resistência e de rigidez.

De acordo com JERNKVIST (2001) devido a essas grandes diferenças de resistência entre os planos da madeira, as quebras ocorrem preferencialmente em determinadas direções. Por exemplo, a propagação de quebra perpendicular às fibras, dificilmente ocorre espontaneamente em madeira. Em alguns casos, mesmo quando a estrutura é carregada com tensão normal às fibras, as quebras tendem a ocorrer ao longo das fibras.

Para CALIL et al. (2003), no dimensionamento estrutural de peças de madeira devem ser consideradas quatro propriedades: resistência, rigidez, densidade e umidade.

A densidade é utilizada na determinação do peso próprio das estruturas, quanto maior a densidade, maior a resistência. Entretanto, a presença de nós, resinas e extratos podem aumentar a densidade sem contribuir para uma melhora na resistência. A umidade também interfere aumentando a densidade da madeira e reduzindo a resistência mecânica. O mesmo autor ainda cita que as solicitações mecânicas que a madeira sofre são: compressão, tração, cisalhamento e flexão.

3.7.1. Compressão

Para CALIL et al. (2003) quando a solicitação da peça é por compressão na direção das fibras (Figura 3.5), as forças agem na direção dos elementos responsáveis pela resistência, conferindo grande resistência à madeira.

Para compressão perpendicular às fibras, a madeira apresenta valores de resistência menores, pois a força é aplicada na direção perpendicular ao comprimento das fibras, provocando seu esmagamento.

Os valores de resistência à compressão perpendicular as fibras são da ordem de $\frac{1}{4}$ dos valores apresentados pela madeira na compressão paralela.

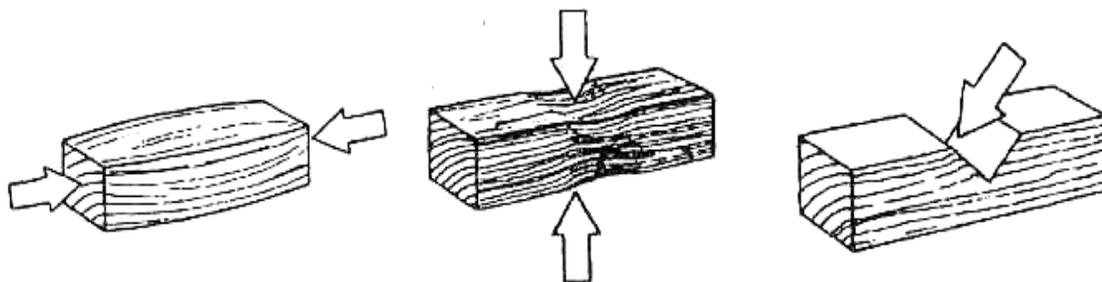


Figura 3.5: Compressão na madeira.

Fonte: Calil et al. (2003).

3.7.2. Tração

Segundo CALIL et al. (2003) em peças de madeira a tração pode ser paralela às fibras ou perpendicular, entretanto, as propriedades para estas solicitações diferem significativamente.

A ruptura por tração paralela pode ocorrer por deslizamento entre as fibras ou por ruptura de suas paredes, apresentando nos dois casos baixos valores de deformação e elevados valores de resistência.

Já na ruptura por tração perpendicular, a madeira apresenta baixos valores de resistência, pois os esforços atuam na direção perpendicular às fibras tendendo a separá-las, com baixos valores de deformação.

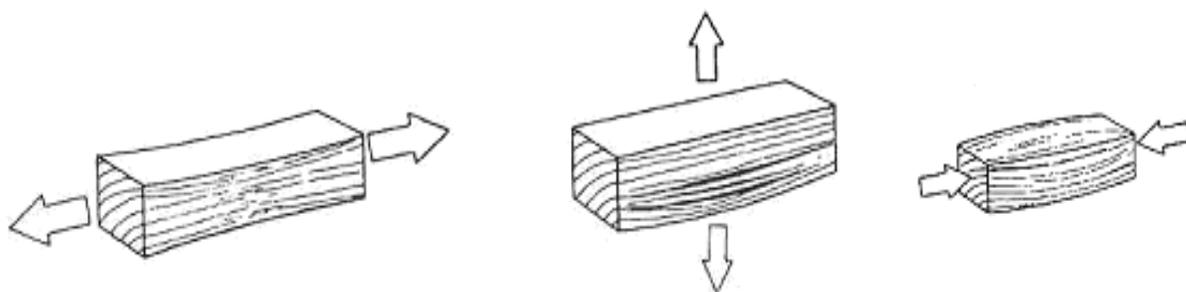


Figura 3.6: Tração na madeira.

Fonte: Calil et al. (2003).

3.7.3. Cisalhamento

Segundo CALIL et al. (2003) a direção do plano de atuação das tensões de cisalhamento tem influência direta na resistência da madeira, para este tipo de solicitação.

Quando o plano de atuação é perpendicular à direção das fibras, a madeira apresenta alta resistência pelo fato da ruptura cisalhar esses elementos. Antes de romper por cisalhamento, a peça apresentará problemas de resistência na compressão normal.

Quando o plano de atuação é paralelo às fibras, podem ocorrer duas situações distintas. Se a direção das tensões é na direção das fibras, ocorre o cisalhamento horizontal. Se a direção

das tensões é perpendicular à direção das fibras, existe a tendência desses elementos rolarem uns sobre os outros (cisalhamento *rolling*).

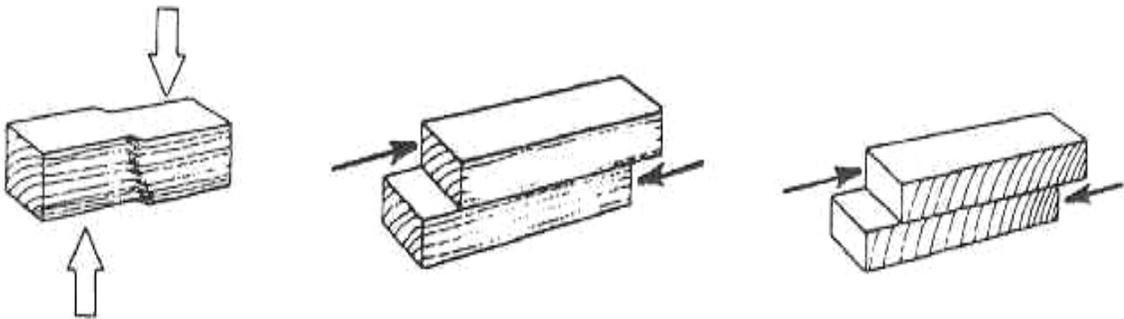


Figura 3.7: Cisalhamento na madeira.

Fonte: Calil et al. (2003).

3.7.4. Flexão simples

Segundo CALIL et al. (2003) quando a madeira é solicitada por flexão simples, ocorrem as tensões de compressão, tração paralelas às fibras, cisalhamento horizontal e, nas regiões de apoio, compressão perpendicular às fibras.

A ruptura de peças de madeira solicitadas à flexão ocorre pela formação de minúsculas falhas de compressão seguidas pelo desenvolvimento de enrugamentos de compressão macroscópicos. Este fenômeno gera aumento da área comprimida na seção e a redução da área tracionada, podendo eventualmente, romper por tração.

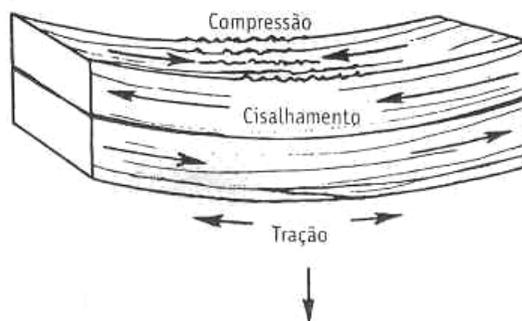


Figura 3.8: Flexão simples na madeira.

Fonte: Calil et al. (2003).

3.7.5. Propriedades elásticas

Para GREEN et al. (1999) o comportamento elástico da madeira é definido por doze componentes: três módulos de elasticidade (E), três módulos de rigidez (G), e seis coeficientes de Poisson.

A elasticidade da madeira permite que as deformações produzidas através de baixa tensão, sejam recuperadas após o afastamento das cargas. Os três módulos de elasticidade da madeira são representados por E_L , E_R , e E_T , respectivamente, módulos de elasticidade longitudinal, radial e tangencial aos eixos da madeira.

O módulo de rigidez indica a resistência à distorção de um componente, causada pelas tensões de cisalhamento, sendo denotados por G_{LR} , G_{LT} , e G_{RT} nos respectivos planos.

Quando ocorre um carregamento axial, a deformação específica transversal é proporcional à deformação específica longitudinal para a direção da carga. Esta relação de proporcionalidade é denominada coeficiente de Poisson, sendo denotados por ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{LT} , ν_{TL} , ν_{RT} , e ν_{TR} . A primeira letra da subscrição corresponde à direção da tensão aplicada e a segunda letra à direção da deformação transversal. Por exemplo, ν_{LR} é o coeficiente de Poisson para deformação ao longo do eixo radial causada por uma tensão ao longo do eixo longitudinal. As relações constitutivas do material podem ser descritas resumidamente como:

$$\varepsilon_k = C_{kl} \sigma_l \quad (3,1)$$

ou, representado na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_L & -\nu_{RL}/E_R & -\nu_{TL}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR}/E_L & 1/E_R & -\nu_{TR}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & -\nu_{RT}/E_R & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{TL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \end{pmatrix}$$

3.8 Projeto estrutural otimizado

Segundo Timoshenko (citado por SILVA, 1997) o conceito de otimização estrutural é antigo, já no século XVII Galileu Galilei discutiu a forma ótima de uma viga e Lagrange formulou o problema da coluna elástica de menor peso. Durante toda a década de 60, muitas pesquisas foram realizadas na tentativa de desenvolver um método de síntese estrutural baseados em métodos de programação matemática. Entretanto, os primeiros resultados desses esforços demonstravam poucos resultados práticos fora da esfera acadêmica, devido à limitação dos computadores da época. Assim, os esforços passaram a se concentrar na determinação de formas mais eficientes de formular o problema.

Para SILVA (1997) no início da década de 80, a metodologia de otimização havia evoluído o suficiente para fornecer uma ferramenta prática de projeto. Esse período também corresponde ao início da utilização da otimização estrutural por grandes corporações industriais fora da área aeroespacial, convertendo a teoria de otimização em benefícios concretos para o projeto.

Segundo ABRAHÃO e FONSECA (2002) até então, o projeto de engenharia era considerado um processo baseado quase unicamente na experiência da equipe envolvida. Com isso, o progresso nos diversos campos era caracterizado por uma lenta evolução, os novos projetos eram constituídos de pequenas alterações e melhorias contínuas de projetos preexistentes, pelo procedimento de tentativa e erro, onde, de fato a experiência do projetista era de fundamental importância.

Atualmente, a forte e agressiva competição tecnológica requerem reduções no tempo do ciclo do projeto e no custo dos produtos. O mercado demanda alta qualidade e funcionabilidade, economia de energia e matérias-primas, além da preocupação com o meio ambiente, envolvendo a criação de novos produtos para os quais inexistia experiência anterior.

Nesse contexto, o uso de técnicas de otimização estrutural torna-se indispensável para o projeto. Pacotes comerciais de recursos de análise estrutural por elementos finitos, como, por exemplo, o programa *Ansys*, pode ser utilizado como uma importante ferramenta de auxílio ao projeto otimizado.

O termo otimização se relaciona às atividades de obtenção de soluções mais eficientes e adequadas ou ainda a utilização mais racional de recursos, permitindo tratar problemas originais ou não de maneira semelhante.

A metodologia de projeto baseada em otimização, busca a sistematização das atividades de projeto, consistindo numa abordagem sistemática de modelagem em busca da melhor solução direcionada por critérios anteriormente definidos, onde a experiência e os conhecimentos do projetista são aplicados na formulação do problema.

Em resumo, a otimização estrutural do projeto corresponde à integração e automatização do ciclo de projeto, o conhecido ciclo de *análise - avaliação - modificação*, onde cada ciclo de otimização equivale a um *loop* de otimização.

3.8.1 Formulação do problema

A formulação do problema representa uma das etapas mais importantes do projeto otimizado para a obtenção de um resultado satisfatório. Implica na transcrição das descrições verbais em declarações matemáticas bem definidas.

Na busca do projeto ótimo, utilizam-se três tipos de variáveis:

- *Variáveis de Projeto* - variáveis independentes, que assumem valores numéricos, alterados a cada ciclo de otimização.
- *Variáveis de Estado (Restrições)* – determinam restrições diretas as variáveis de projeto visando à obtenção da melhor solução.
- *Função Objetivo* – é uma variável dependente do problema, expressa em termos das variáveis de projeto. Devendo ser maximizada ou minimizada por um conjunto de valores ótimos de variáveis de projeto.

3.8.2 Modelo matemático geral para problemas de otimização

Segundo ABRAHÃO e FONSECA (2002) apesar da forma bastante geral em que se pode apresentar um problema de otimização, define-se um modelo matemático geral da seguinte forma:

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.2)$$

onde x é o vetor das variáveis de projeto com n componentes, sendo cada componente restringido por limite inferior e superior:

onde:

$$\underline{x}_n \leq x_n \leq \bar{x}_n \quad (3.3)$$

Busca-se minimizar: $f = f(x)$

Sujeita $\boxed{h_i \leq h_i(x)}$

$$\boxed{g_i(x) \leq \bar{g}_i}$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m_1) \quad (3.4)$$

$$\boxed{w_i \leq w_i(x) \leq w_i}$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m_2) \quad (3.5)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m_3) \quad (3.6)$$

onde:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 \quad (3.7)$$

Sendo que $f(x)$ é a *função objetivo* do problema, e as inequações 3.4, 3.5 e 3.6 são as *restrições de desigualdade*, podendo ter um número m qualquer de restrições.

Para se obter um projeto ótimo (x^*), todas as restrições devem ter sido satisfeitas. Dessa forma, resolver um problema de otimização significa determinar o ponto x^* no qual a *função objetivo* tenha um valor mínimo.

3.9 Análise estrutural pelo método de elementos finitos (MEF)

A análise estrutural pode ser realizada por métodos analíticos ou métodos numéricos. Na prática, devido à complexidade dos problemas de engenharia, devido, principalmente, à geometria e as condições de contorno a que estão submetidos, são empregados, preferencialmente na resolução, métodos numéricos.

Dentre os métodos numéricos de análise, o mais utilizado é sem duvida o método de elementos finitos, tanto por sua precisão quanto pela versatilidade, permitindo a execução de cálculos que na prática seriam difíceis ou mesmo impossíveis.

Neste método, o domínio do problema é representado por uma série de subdomínios simples, chamados elementos finitos. O conjunto de elementos finitos é chamado malha de elementos finitos (CASTRO, 2004).

Sobre cada elemento finito, o processo físico é aproximado por funções do tipo polinômios. São desenvolvidas também equações algébricas relacionando quantidades físicas em pontos selecionados do elemento (nós). As equações dos elementos são reunidas, usualmente pelas propriedades da continuidade do fenômeno.

No MEF, em geral, procura uma solução aproximada u para uma equação diferencial, que tem a seguinte forma:

$$\mu \approx \sum_{j=1}^n \mu_j \Psi_j \quad (3.8)$$

onde μ_j , são os valores de u nos nós, e Ψ_j , são as funções de interpolação.

Quando aplicado à análise estrutural, o MEF tem como objetivo obter uma aproximação do comportamento mecânico do meio elástico contínuo através da sua discretização em um número finito de elementos.

Cada elemento é obtido pela divisão do meio elástico contínuo, através de linhas e superfícies imaginárias.

Estes elementos são imaginados interconectados através de pontos nodais, situados em suas fronteiras. Sendo o deslocamento (u, v, w) desses pontos parâmetros conhecidos do problema.

Escolhe-se um conjunto de funções para definir de maneira única o campo de deslocamento dentro de cada elemento em termos dos deslocamentos nodais. Desta forma, se u_i, v_i e w_i são os deslocamentos apresentados pelo nó i genérico do elemento, os deslocamentos u, v e w dos pontos no interior do elemento podem ser interpolados a partir dos deslocamentos nodais, através das seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z)u_i \\ v(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z)v_i \\ w(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z)w_i \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.9) \\ (3.10) \\ (3.11) \end{array}$$

Onde n é o número total de nós do elemento e $N_i(x, y, z)$ é a função de interpolação associada ao nó i do elemento. A função de interpolação denomina-se também função de forma e têm a seguinte característica:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_i(x_i, y_i, z_i) = 1 \\ N_i(x_i, y_i, z_i) = 0 \quad i \neq j \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.12) \\ (3.13) \end{array}$$

Por exemplo:

$$u(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^8 N_j(x, y, z) u_j = N_1(x_i, y_i, z_i)u_1 + N_2(x_i, y_i, z_i)u_2 + \dots + N_8(x_i, y_i, z_i)u_8 = u_i \quad (3.14)$$

se $\{a_i\}$ é uma matriz coluna constituída dos deslocamentos nodais apresentados pelo nó i :

$$\{a_i\} = \left\{ \begin{array}{l} u_i \\ v_i \\ w_i \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} (3.15) \\ (3.16) \\ (3.17) \end{array}$$

se $[u(x,y,z)]$ é uma matriz coluna constituída dos deslocamentos apresentados por um ponto genérico do interior do elemento:

$$\{u(x, y, z)\} = \begin{cases} u = (x, y, z) \\ v = (x, y, z) \\ w = (x, y, z) \end{cases} \quad \begin{matrix} (3.18) \\ (3.19) \\ (3.20) \end{matrix}$$

e se $[N_i(x,y,z)]$ é uma matriz quadrada, 3X3, constituída das funções de interpolação associadas ao nó i genérico:

$$[N_i(x, y, z)] = \begin{bmatrix} N_i(x, y, z) & O & O \\ O & N_i(x, y, z) & O \\ O & O & N_i(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

as equações anteriores podem ser dadas na seguinte forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} N_i(x, y, z) & O & O \\ O & N_i(x, y, z) & O \\ O & O & N_i(x, y, z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad (3.22)$$

Na forma compacta temos:

$$\{u\} = [N]\{a\} \quad (3.23)$$

Essa equação permite interpolar o campo de deslocamento dentro do elemento a partir dos deslocamentos nodais e das funções de forma associadas a cada um dos nós do elemento.

Sendo o estado de deformação específica dentro de cada elemento é definido pelo campo de deslocamento:

$$\{\varepsilon\} = [L]\{u\} \quad (3.24)$$

onde:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\{\varepsilon\} = [L]\{u\} = [L][N]\{a\} \rightarrow \{\varepsilon\} = [B]\{a\} \quad (3.28)$$

Sendo a matriz $[B]$ constituída das derivadas das funções de forma e relaciona o estado de deformação específica com os deslocamentos nodais.

E o estado de tensão dentro do elemento definido pelo estado de deformação específica:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.29)$$

onde:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad (3.30)$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

portanto:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{a\} \quad (3.32)$$

Têm-se, assim, as tensões atuantes no interior do elemento como função dos deslocamentos nodais:

$$\begin{cases} \{u\} = [N]\{a\} & (3.33) \\ \{\varepsilon\} = [B]\{a\} & (3.34) \\ \{\sigma\} = [D][B]\{a\} & (3.35) \end{cases}$$

A partir daí, através da aplicação do **Princípio dos Trabalhos Virtuais**, pode-se obter as propriedades características do elemento: a matriz de rigidez e o vetor de carga.

Se um corpo está em equilíbrio, o trabalho virtual realizado pelo carregamento externo é igual à energia de deformação virtual armazenada pelo corpo.

$$\delta W = \delta U \quad (3.36)$$

O carregamento externo são as forças de superfície $\{q\}$ e as forças de corpo $\{b\}$

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix}; \quad \{b\} = \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{Bmatrix} \quad (3.37)$$

sendo o trabalho virtual realizado pelo carregamento externo:

$$\delta W = \int_A (q_x \delta U + q_y \delta V + q_z \delta W) dA + \int_B (b_x \delta U + b_y \delta V + b_z \delta W) dV \quad (3.38)$$

e a energia de deformação armazenada pelo corpo:

$$\delta U = \int_V (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_x + \sigma_{yy} \delta \varepsilon_y + \sigma_{zz} \delta \varepsilon_z + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) \quad (3.39)$$

fazendo agora:

$$\{\delta U\} = \begin{Bmatrix} \delta u \\ \delta v \\ \delta w \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

$$[\sigma] = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\{\delta \varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \delta \varepsilon_x \\ \delta \varepsilon_y \\ \delta \varepsilon_z \\ \delta \gamma_{xy} \\ \delta \gamma_{yz} \\ \delta \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\delta W = \int_A \{\delta U\}^T \{q\} dA + \int_V \{\delta U\}^T \{b\} dV \quad e \quad \delta U = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (3.43)$$

$$\therefore \int_A \{\delta U\}^T \{q\} dA + \int_V \{\delta U\}^T \{b\} dV = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (3.44)$$

se os deslocamentos nodais $\{a\}$ sofrerem um incremento $\{\delta a\}$, o campo de deslocamento $\{u\}$ dentro do elemento sofrerá um incremento $\{\delta u\}$ que será dado por:

$$\{\delta U\} = [N] \{\delta a\} \quad (3.45)$$

o estado de deformação específica sofrerá um incremento dado por:

$$\{\delta \varepsilon\} = [B] \{\delta a\} \quad (3.46)$$

substituindo estas equações na equação do trabalho virtual temos:

$$\int_A \{\delta a\}^T [N]^T \{q\} dA + \int_V \{\delta a\}^T [N]^T \{b\} dV = \int_V \{\delta a\}^T [B]^T [D][B] \{a\} dV \quad (3.47)$$

como $\{\delta a\}$ e $\{a\}$ são constantes para a integração na área e no volume:

$$\int_A [N]^T \{q\} dA + \int_V [N]^T \{b\} dV = \left(\int_V [B]^T [D][B] d \right) \{a\} \quad (3.48)$$

Nessa expressão,

$$\{f^e q\} = \int_A [N]^T \{q\} dA \quad (3.49)$$

é o vetor de carga do elemento, correspondente às forças de superfície;

$$\{f^e b\} = \int_V [N]^T \{b\} dV \quad (3.50)$$

é o vetor de carga do elemento, correspondente às forças de corpo;

$$[K^e] = \int_V [B]^T [D][B] dV \quad (3.51)$$

é a matriz quadrada e simétrica denominada matriz de rigidez do elemento.

Têm-se, portanto, a partir da equação do PTV:

$$\{f^e q\} + \{f^e b\} = [K^e] \{a\} \Rightarrow \{f^e\} = [K^e] \{a\} \quad (3.52)$$

Tendo sido encontradas as características de cada elemento do meio elástico discretizado, o próximo passo é combiná-las para formar um conjunto de equações que governe a reunião de todos os elementos. Este procedimento é denominado superposição e implica na obtenção da matriz de rigidez global, [K], e do vetor de carga global, {f}, do meio elástico discretizado. Assim, têm-se que:

$$\{f\} = [K] \{a\} \quad (3.53)$$

onde, {a} é a matriz coluna dos deslocamentos nodais do meio elástico discretizado.

Segundo ABRAHÃO e FONSECA (2002) tendo sido encontradas as características do meio elástico discretizado, [K] e {f}, deve-se, a seguir, resolver o sistema de equações lineares, obtido a partir da equação anterior. Entretanto, esse sistema só pode ser resolvido para os deslocamentos nodais, {a}, após a imposição das condições de contorno. Este procedimento é efetuado por ocasião da determinação das matrizes [K] e {f}, onde, para

condição de contorno (vínculo), deve-se eliminar na matriz de rigidez global a linha e a coluna equivalente, e no vetor de carga global, a linha equivalente. O sistema de equações resultante pode, então, ser resolvido por qualquer método numérico.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos o trabalho foi dividido em três etapas:

- Aplicar a metodologia de projeto para caixas de produtos hortícolas, auxiliado por ferramentas computacionais.
- Validação da metodologia através da projeção e construção de uma embalagem de madeira para manga.
- Verificação da metodologia através de ensaios de resfriamento rápido e de vibração.

4.1. Fluxograma de projeto para caixas de produtos hortícolas

Foi aplicada a metodologia descrita no fluxograma geral para o desenvolvimento de caixas segundo Abrahão & Fonseca, na Figura 4.1.

4.1.1. Definições iniciais

Pela metodologia aplicada, foi feito um levantamento de fatores tais como: dimensões da embalagem, altura de empilhamento e capacidade volumétrica, os quais não foram alterados durante a rotina de projeto. Esta etapa do projeto é denominada definições iniciais.

4.1.2. Estudos iniciais

Consiste no levantamento das características do produto (peso e variedade de manga utilizada), tratamentos pós-colheita, os quais serão submetidos, tipo de arranjo, quantidade de frutos por caixa assim como a definição do material construtivo. Os valores das definições iniciais são mostrados na Tabela 4.1.

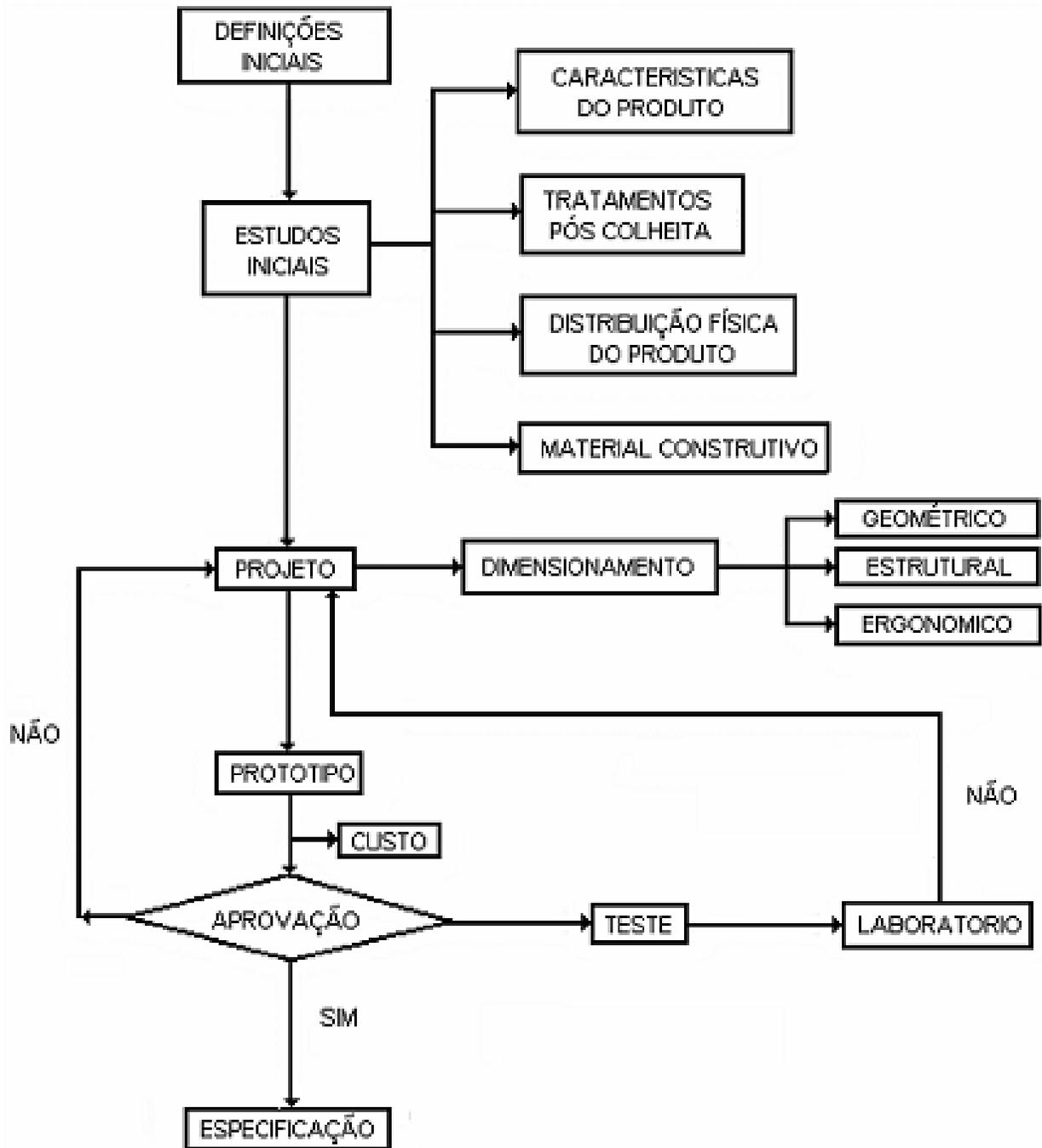


Figura 4.1 – Fluxograma geral para o desenvolvimento de caixas.

Fonte: Adaptado de Abrahão & Fonseca (2002).

Tabela 4.1: Estudos iniciais para a caixa de manga.

Estudos Iniciais	
Peso do produto por caixa	6 kg
Quantidade de frutos na caixa	12 unidades
Tipo de arranjo	Quadrado
Material construtivo	Pinus

4.1.3. Projeto

Foram considerados aspectos estruturais, geométricos e ergonômicos que deram as diretrizes no desenvolvimento do projeto e que permitiram desenhar as características das caixas a serem projetadas. A seguir os critérios a serem considerados:

4.1.3.1. Estruturais: Baseados na caixa desenvolvida pelo Instituto de Pesquisa Tecnológico do Estado de São Paulo (IPT) (Figura 4.2), foram feitas algumas adaptações, como a altura, a geometria das paredes laterais e o material construtivo, respeitando a disposição externa das colunas, o que permitiu, receber totalmente a carga de empilhamento assim como permitir uma maior estabilidade do palete. Segundo MITCHELL (1992), devido à fragilidade dos produtos hortícolas, as caixas devem assumir todas as tensões de empilhamento, para evitar danos por compressão aos frutos.

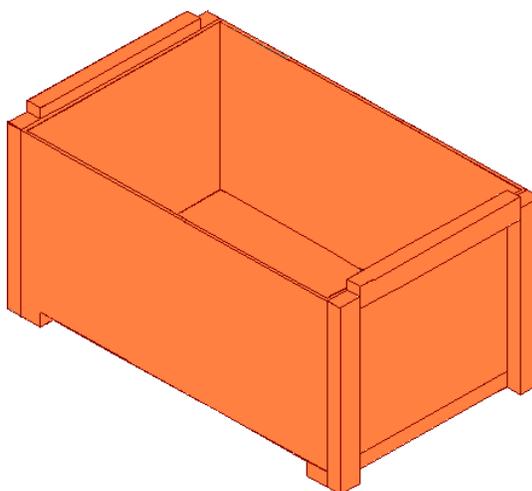


Figura 4.2: Caixa modelo do IPT

4.1.3.2. Geométricos: Inicialmente foram concebidos dois tipos de geometria. A primeira foi feita de orifícios circulares nas laterais, a qual foi desconsiderada por aspectos econômicos, já que a perfuração poderia elevar o custo e dificultar a construção.

O segundo protótipo foi projetado considerando ripas retas, três tipos de distribuição e duas áreas efetivas de abertura, 54 e 36 %, como será mostrado a seguir (Figura 4.3).

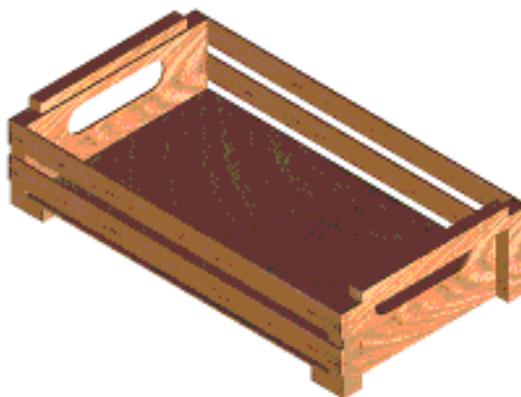


Figura 4.3: Caixa de ripas retas.

As dimensões da caixa foram: de 500 mm de comprimento, 300mm de largura e 130 mm de altura.

Estas dimensões foram definidas atendendo às dimensões padronizadas dos paletes e das caixas de manga existentes no mercado. As caixas foram dimensionadas para suportar uma altura de empilhamento equivalente a 10 caixas (1300mm).

4.1.3.3. Ergonômicos: Segundo ABRAHÃO, 2002, a empunhadura de uma embalagem corresponde a um manejo grosseiro e a pega com os dedos deve ser evitada. Ainda, segundo o mesmo autor, as alças devem ser arredondadas e posicionadas de modo a evitar que as cargas girem quando forem erguidas. Além disso, a carga deve ser distribuída na maior área possível das mãos e dedos, evitando picos de pressão.

O mesmo autor recomenda para as alças uma abertura de: 40 x 115 mm e posição tal que evite o desequilíbrio da carga e conseqüentemente o giro.

Foram determinadas as dimensões das alças como de 30 x 110 mm, devido às dimensões da caixa consideravelmente menores, resultando mais apropriadas às dimensões usadas para o projeto, considerando que da alça permite ser manuseada comodamente.

4.2. Restrições e Carregamentos

Para impedir o movimento do corpo rígido, aplicaram-se restrições de translação ao longo dos eixos x , y e z , em todos os nós do fundo da embalagem que tocam a superfície de apoio, ou seja, todos os nós situados na base das montantes. Para a otimização, foram consideradas condições estáticas e dinâmicas que a caixa pode ser submetida, descritos a seguir (Figura 4.4).

A condição estática corresponde às cargas de empilhamento na sua condição mais crítica, a carga recebida pela caixa situada na base do palete. Nesta posição as colunas assumem todas as cargas de empilhamento para um empilhamento máximo de 10 caixas. Foi atribuída ao projeto uma carga de empilhamento da ordem de 648 N, recebendo cada coluna uma carga de 162 N. Esta carga foi determinada devido ao fato da embalagem conter 6 kg de manga, ou seja, nove caixas totalizariam 540 N, que seriam suportados pelas quatro colunas da última caixa do palete. Assim, consideraram-se os 648 N e admitindo o peso das caixas e a possibilidade de haver uma carga extra no empilhamento (20% de margem de segurança).

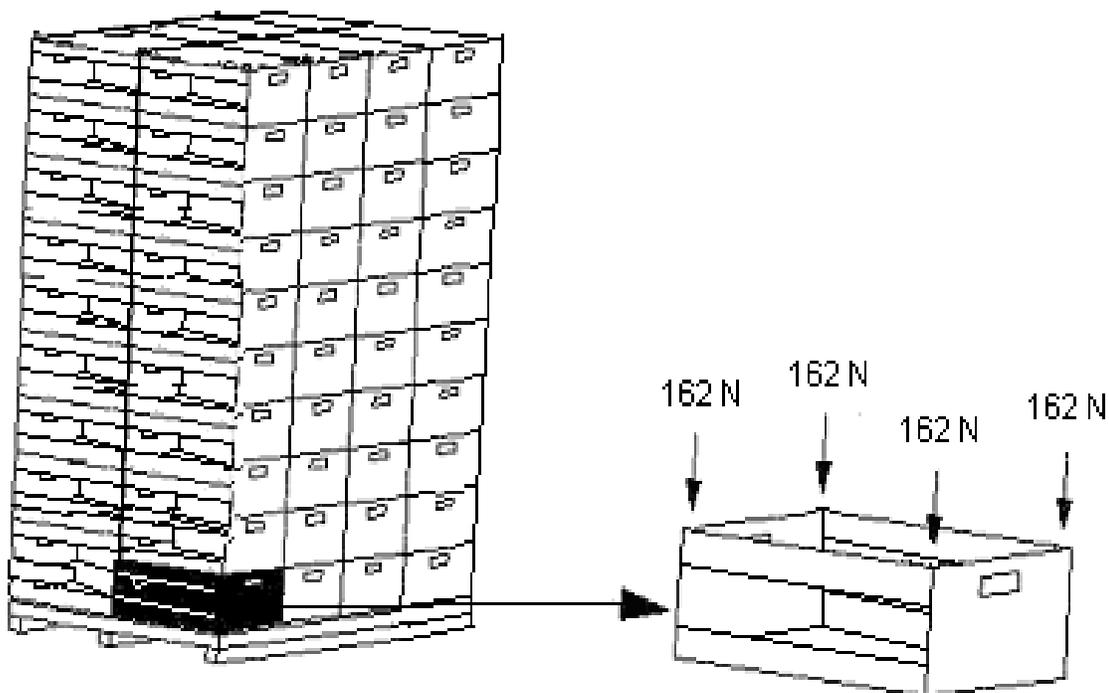


Figura 4.4: Carga assumida pela embalagem durante o empilhamento

Para levar em conta o aspecto dinâmico, dobrou-se o peso estático das frutas sobre o fundo da embalagem, considerando-se uma situação transiente no levantamento da caixa, equivalente a duas vezes o valor da aceleração da gravidade para o fundo (120 N) e uma vez o valor da aceleração da gravidade para as laterais e as testeiras (60 N) (Figura 4.5).

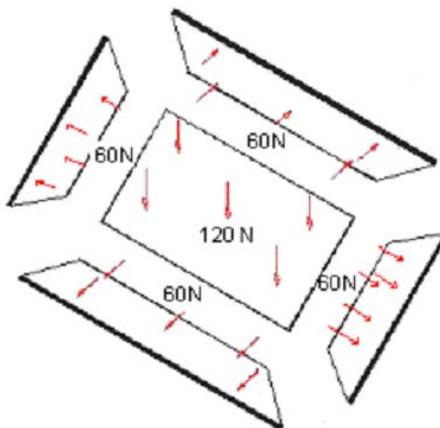


Figura 4.5: Cargas aplicadas no projeto da embalagem para produtos hortícolas

4.3. Programa computacional ANSYS

O programa ANSYS é um *software* que utiliza o MEF (método dos elementos finitos) para análise de projetos, permitindo análises: estrutural, térmica, fluidodinâmica e eletromagnética, pela simulação do comportamento do protótipo virtual sob condições de operação.

O ANSYS foi utilizado para estudar o comportamento estrutural das caixas, simulando condições reais de operação. Para isso, serão gerados modelos virtuais otimizados, relacionando a resistência estrutural com a área de aberturas para o resfriamento.

O programa dispõe de algoritmos de otimização, permitindo automatizar a busca do projeto ótimo, a partir da definição das variáveis de projeto, variáveis de estado e da função objetivo.

As análises no ANSYS foram divididas em três níveis:

- Modelagem (pré-processamento): construção dos modelos, discretização do domínio através de uma malha de elementos finitos, definição do tipo de elemento

- e das propriedades do mesmo, aplicação das condições de contorno estabelecidas;
- Solução: o algoritmo para a solução foi escolhido em função do tipo de análise a ser realizada, resolvendo-se o problema;
 - Visualização dos resultados (pós-processamento) - para a análise dos resultados utilizou-se os recursos de pós-processamento do *ANSYS*® .

4.4. Implementação do modelo no programa ANSYS e otimização estrutural

O pacote que permitiu modelar o desenho e a otimização do projeto foi o ANSYS versão 9.0. Os modelos das caixas foram gerados primeiramente como “modelo sólido”, no nível de pré-processamento, para logo ser discretizado mediante a seguinte seqüência:

a)- Definiram-se os tipos de elementos utilizados na análise. As caixas foram modeladas a partir de elementos da biblioteca do programa, para modelagem das laterais e do fundo foi utilizado o elemento Shell 93. Este elemento foi escolhido por ser um elemento de placa com oito nós e seis graus de liberdade por nó, e pelo fato de apresentar interpolação quadrática, prestando-se bem para a modelagem de placa com aberturas. Para a modelagem das colunas, foi utilizado o elemento de viga Beam 4, este elemento foi escolhido por ser um elemento uniaxial com tração, compressão, flexão e torção, que possui também seis graus de liberdade por nó.

b)- Definiram-se as constantes reais de cada elemento e identificaram-se as propriedades mecânicas do material construtivo tais como o Módulo de Elasticidade e o Coeficiente de Poisson.

c)- Foram criados virtualmente os modelos sólidos de caixas, através das entidades geométricas (*keypoint, lines, áreas, volumes*), descrevendo a geometria do modelo.

d)- Foi gerada a malha de elementos finitos, composta por nós e elementos, finalizando o nível de pré-processamento.

e)- Ao nível de solução (*solution*), especificou-se as condições de carregamento do modelo, simulando as forças que atuam na embalagem durante o transporte e armazenamento do produto e as condições de apoio.

f)- Os resultados foram demonstrados no nível de pós-processamento, sendo expressos pelas tensões e deslocamento, que foram comparados com as tensões admissíveis do material.

Para implementar a rotina de otimização do ANSYS, foram definidas as variáveis de projeto (espessura das superfícies e comprimento e largura das seções transversais das colunas), valores iniciais aos parâmetros associados a estas variáveis foram atribuídos, também foram definidas as variáveis de estado ou restrições (tensões e deslocamentos ao longo da estrutura), e a função objetivo (menor volume), definiu-se o algoritmo de otimização e iniciou-se a otimização.

4.5. Material construtivo das caixas

Foi determinado que as caixas seriam construídas com tábuas de madeira, da espécie *Pinnus Elliotti*. Os valores de resistência e rigidez são apresentados na Tabela 4.2. Estes valores foram utilizados na etapa de pré-processamento da análise estrutural.

Tabela 4.2: Propriedades de rigidez e resistência do *Pinnus Elliotti*

Propriedades de rigidez e resistencia do <i>Pinnus Elliotti</i>	
Massa específica aparente (12% umidade)	560 kg.m ⁻³
Resistência à compressão paralela às fibras	40,4 MPa
Resistência à tração paralela às fibras	66,0 MPa
Resistência à tração normal às fibras	66,0 MPa
Resistência ao cisalhamento	7,4 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras	11.889 MPa

Fonte: NBR 7190/97.

4.6. Validação da metodologia

Foram desenvolvidos três modelos de caixas para armazenamento e transporte de mangas. Nove protótipos de caixas foram construídos, sendo três de cada modelo. Os protótipos desenvolvidos e as dimensões assim como a caixa do papelão que foi usada como testemunha nos ensaios de resfriamento, são mostradas nas figuras 4.6 a 4.15.



Figura 4.6: Caixa modelo A

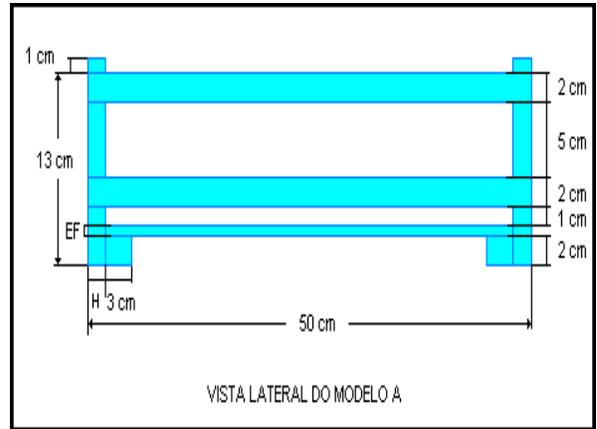


Figura 4.7: Vista lateral do modelo A



Figura 4.8: Caixa modelo B

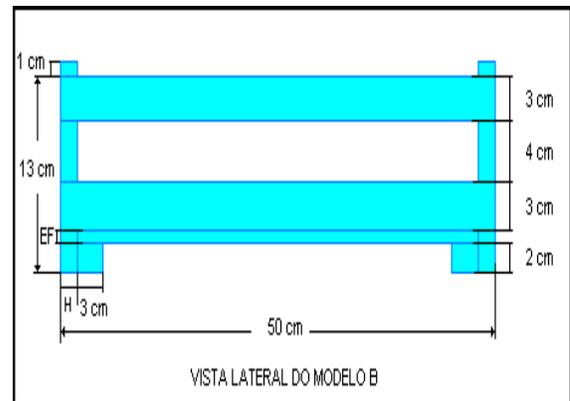


Figura 4.9: Vista lateral do modelo B



Figura 4.10: Caixa modelo C

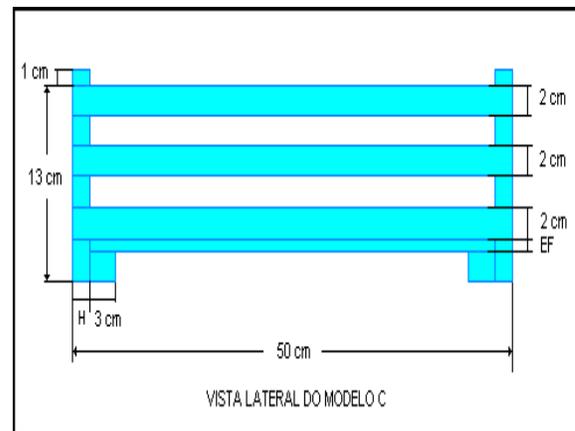


Figura 4.11: Vista lateral do modelo C

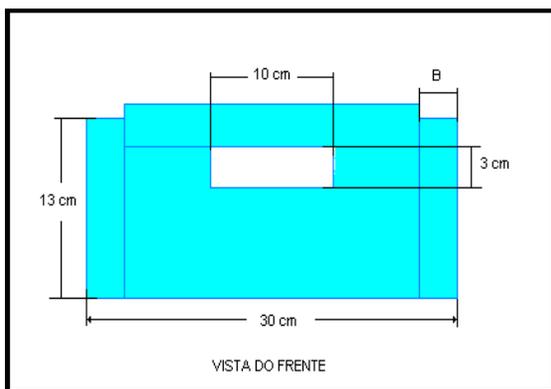


Figura 4.12: Vista frontal

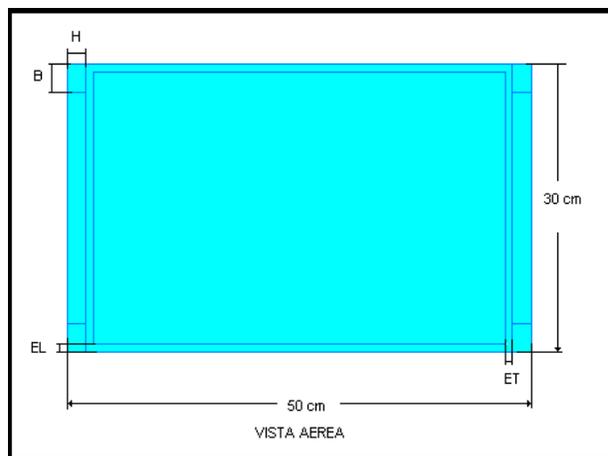


Figura 4.13: Vista em planta



Figura 4.14: Caixa de papelão (Caixa D)

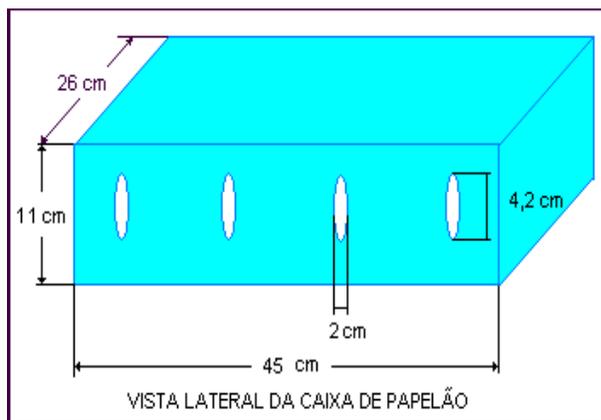


Figura 4.15: Vista lateral da caixa de papelão

Na Tabela 4.3 mostram-se as dimensões das caixas desenvolvidas (A, B, C), da embalagem de papelão ondulado com as aberturas livres (D1) e a mesma caixa de papelão com as aberturas impedidas (D2).

Esta condição foi observada na maioria das caixas trazidas da CEASA, que apesar de existir o corte dos orifícios para a ventilação, estes não são retirados, permanecendo esta parte da embalagem fechada, condição que foi estudada para comparar o efeito da área de abertura, quando esta está realmente aberta e quando se encontram fechadas.

Tabela 4.3: Área efetiva e total das caixas

4.	CAIXA A	CAIXA B	CAIXA C	CAIXA D1	CAIXA D2
Dimensões (m)	0,50 x 0,30 x 0,10			0,45 x 0,26 x 0,11	
Area lateral caixa (m ²)	0,05	0,05	0,05	0,0495	0,0495
Area aberturas (m ²)	0,0267	0,0178	0,0178	$3,36 \times 10^{-3}$	0
Area efetiva lateral (%)	54	36	36	7	0
Area efectiva total (%)	17	11	11	2	0

Onde:

Área lateral caixa: o valor da área de uma das laterais.

Área abertura: o valor da área dos orifícios, frestas ou aberturas de uma das laterais.

Área efetiva lateral: o valor percentual da área abertura com respeito à área lateral caixa.

Área efetiva total: o valor percentual da área abertura com respeito à área total da caixa (laterais, testeiras e o fundo).

4.7. Análise experimental no sistema de resfriamento rápido com ar forçado

Para o experimento de resfriamento rápido com ar forçado foi construído um túnel de madeira acoplado a um ventilador centrífugo, instalado dentro de uma câmara frigorífica, onde foram realizados os experimentos com os três modelos de caixas desenvolvidos e com a embalagem de papelão ondulado.

4.7.1. Sistema de resfriamento rápido com ar forçado

O sistema de resfriamento rápido com ar forçado foi instalado na câmara frigorífica do Laboratório de Termodinâmica e Energia da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. A câmara frigorífica tem as seguintes características:

- Dimensões: 3,06 x 3,06 x 2,30 m;
- Isolamento térmico de poliuretano com densidade de 35 kg.m^{-3} ;
- Paredes de painéis modulados revestidos com chapas de aço galvanizado;
- Compressor modelo Fk-3, R-22 com potência frigorífica de $4.200 \text{ kcal h}^{-1}$;

- Condensador modelo Recrosul 24-06-36-0790, condensação a ar;
- Evaporador modelo Recrosul 16-06-74-0600, a ar, com desgelos automático ($Q = 4,88$ kW);

O ventilador tem as seguintes características:

- Ventilador centrífugo Articom modelo EC4-TPR.
- Potência de 3,75 kW.
- A vazão nominal de ar de $3.960 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (3600 rpm).
- Inversor de frequência (marca WEG, modelo CFW 09-0024T2223), 220 V-330V, 28,8 A e frequência na faixa de 0-170 Hz.

Para o experimento o sistema foi programado para operar com temperatura do ar a 6°C , ($UR \pm 85\%$). A literatura recomenda vazões de ar entre $0,001$ a $0,006 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de produto (ARIFIN, 1988). Neste trabalho, por se tratar do resfriamento de uma quantidade muito pequena de frutos, escolheu-se vazões de ar de $0,018$ e $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de fruta ($0,216$ e $0,432 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), visando obter uma resposta mais rápida dos frutos ao resfriamento.

Foi necessário então calcular o valor da rotação do eixo do motor do ventilador e a frequência correspondente a esta rotação, para as promover as duas vazões de ar. Para tal aplicaram-se às equações (4.1) e (4.2).

$$N_2 = N_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \quad (4.1)$$

$$f = \frac{(np)(N_2)}{120} \quad (4.2)$$

onde:

N_1 : rotação nominal do ventilador.

N_2 : rotação do ventilador.

Q_1 : vazão de ar nominal.

Q_2 : vazão de ar.

f: frequência.

np: número de pólos do motor.

Na Tabela 4.4 mostram-se os valores calculados de rotação e frequência para cada vazão de ar aplicado.

Tabela 4.4: Vazão de ar no túnel.

Vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Rotação (rpm)	Frequência (Hz)
0,216	707	12
0,432	1414	24

No sistema de resfriamento rápido com ar forçado o ar resfriado saiu do evaporador (setas azuis), sendo direcionado a passar através do leito de frutos dispostos transversalmente dentro das caixas no interior do túnel. O ar foi succionado pelo ventilador, depois da troca de calor com os frutos e é descarregado até o evaporador (setas vermelhas), onde é resfriado novamente (Figura 4.16 e 4.17).

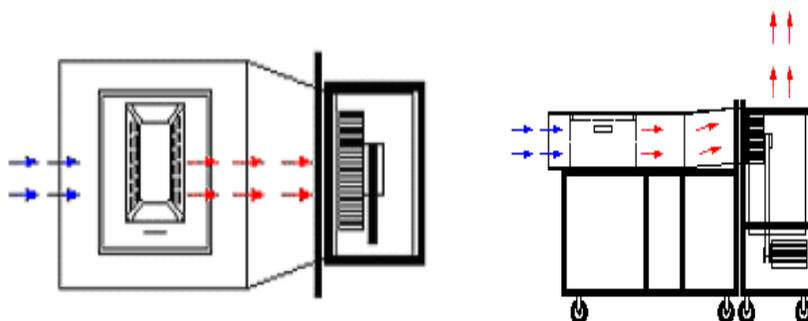


Figura 4.16: Túnel de resfriamento com ar forçado instalado dentro da câmara frigorífica



Figura 4.17: Vista do túnel de resfriamento.

4.7.2. Monitoramento da temperatura

Para obter os registros de temperatura durante o processo de resfriamento, foram inseridos na polpa dos frutos termopares do tipo T (cobre-constantan), calibrados previamente ($\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), ligados a um sistema de aquisição de dados por computador. Os termopares foram numerados e identificados, de acordo com a saída do canal do conversor de sinais, permitindo a identificação quando introduzidos nos frutos, para o posterior processamento.

A medição das dimensões das mangas foi feita com paquímetro digital (Marca Mitotoyo, modelo 500-144B), determinando o diâmetro médio dos frutos no sentido longitudinal (d_2) e transversal (d_1), próximo do caroço, o que permitiu selecionar as mangas com o diâmetro mais próximo ao valor médio.

Foi medida a profundidade na altura do diâmetro equatorial (d_1) até o caroço para logo inserir o termopar onde se encontra localizado o centro térmico do fruto (Figura 4.18). A temperatura do ar dentro do sistema também foi monitorada, através de dois termopares colocados na entrada e na saída do túnel de ar forçado. Foram monitorados seis frutos, três na entrada e três na saída da caixa (Figura 4.19).

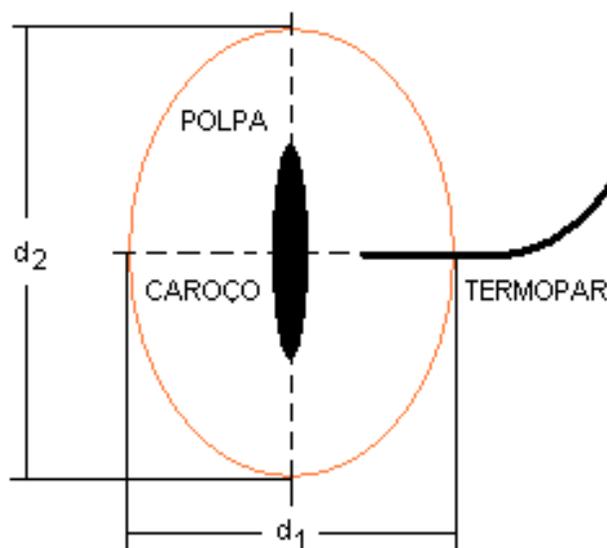


Figura 4.18: Esquema da secção transversal do fruto onde foram inseridos os termopares.

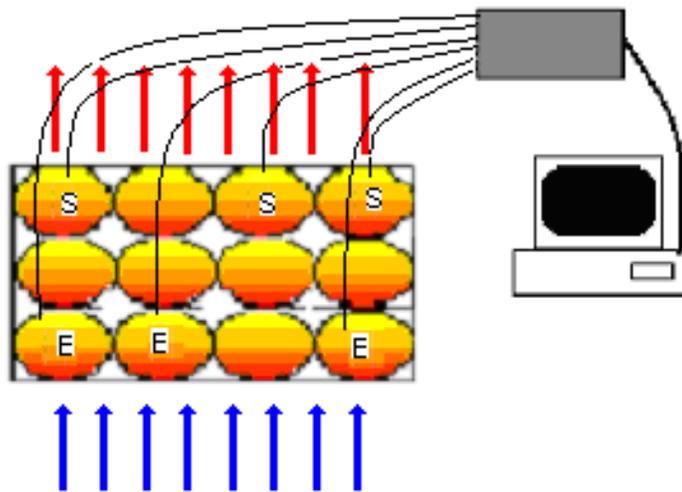


Figura 4.19: Distribuição dos frutos instrumentados dentro da caixa

4.7.3. Sistema de aquisição de dados

Para a obtenção da temperatura em cada um dos pontos foi utilizado um sistema de aquisição de dados por computador, constituído por uma placa de condicionamento de sinais analógicos, conversor de sinais com 32 canais de entrada e pelo *software* **AQDADOS**. Este software permitiu o monitoramento em tempo real do processo de resfriamento através dos gráficos (Figura 4.20), gerando um arquivo de dados para posterior processamento. O sistema de aquisição foi programado para registrar as leituras de temperatura a cada minuto.



Figura 4.20: Sistema de aquisição de dados

4.7.4. Medição da velocidade do ar

A velocidade do ar foi medida com um anemômetro de fio quente (marca Lutron e velocidades de 0-20 m s⁻¹) na entrada das caixas em oito pontos equidistantes, quatro na parte superior (S) e quatro na parte inferior (I), com a finalidade de analisar a variação das velocidades nos diferentes pontos, para ter um elemento a mais de comparação com o tempo de resfriamento (Figura 4.21)

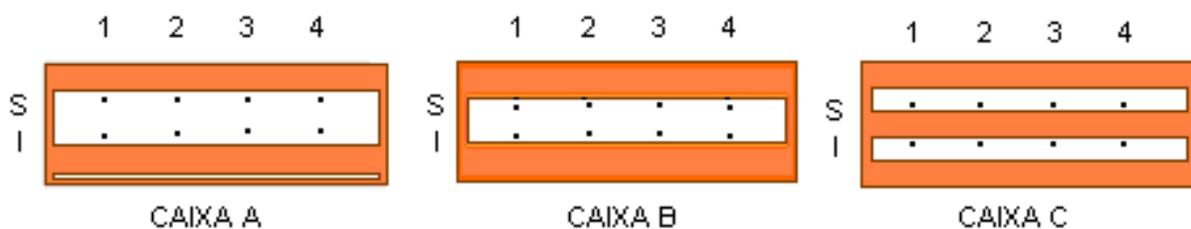


Figura 4.21: Posição nos pontos onde foram medidas as velocidades de entrada na caixa

4.7.5. Produto

Nos ensaios foram usadas 30 caixas com 6 kg de mangas da variedade Tommy Atkins (*Mangifera indica* L), adquiridas diretamente de um distribuidor na CEASA / Campinas. As mangas foram transportadas até o Laboratório de Termodinâmica e Energia nas caixas de papelão, onde foram mantidas a temperatura ambiente. Foram escolhidas para estes ensaios mangas de tamanho e grau de maturação similares (cor vermelho-amarelo).

Depois da chegada dos frutos ao laboratório, estes eram retirados das caixas e acondicionados nas caixas de madeira, respeitando o mesmo das caixas de papelão que trazerem do CEASA.

Em seguida foram inseridos os termopares e a caixa foi coberta com um plástico na parte superior, sendo fechadas as aberturas existentes entre a caixa e o túnel. Com esta montagem a passagem de ar ficou restringida as aberturas da caixa, percorrendo o leito de frutas (Figura 4.22).



Figura 4.22: Embalagem preparada para o experimento de resfriamento rápido.

4.7.6- Análise dos resultados

A variável de resposta estudada foi o tempo de meio e de sete oitavos de resfriamento, o qual foi determinado através do cálculo da Taxa de Resfriamento (TR), usando para isto a equação 4.3. A través da TR foi possível determinar o tempo necessário para os produtos atingirem o tempo de resfriamento (Moshenin,1980). A determinação experimental do tempo de resfriamento foi feita com o cálculo da Taxa Adimensional de Temperatura (TAT) (Equação 4.5) e a partir dos valores obtidos (de 0 a 1) foram obtidos as curvas de resfriamento.

$$TR \equiv \frac{\frac{T_i - T_f}{t_f}}{\frac{(T_i - T_a) - (T_f - T_a)}{\ln \frac{T_i - T_a}{T_f - T_a}}} \quad (4.3)$$

$$t_{1/2} \equiv \frac{\ln 2}{TR} \quad t_{7/8} \equiv \frac{\ln 8}{TR} \quad (4.4)$$

$$TAT \equiv \frac{T_p - T_a}{T_i - T_a} \quad (4.5)$$

No instante em que TAT foi igual a 0,5 atingiu-se o meio tempo de resfriamento e quando foi igual a 0,125 o produto atingiu o tempo de sete oitavos de resfriamento, ou seja, o tempo necessário para reduzir a 1/8 a diferença entre a temperatura inicial do produto e a temperatura recomendada para o armazenamento.

4.7.7. Delineamento experimental

Foi utilizado um delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5x2, com três repetições, para testar o efeito da área efetiva e a vazão do ar no tempo de resfriamento. Os fatores foram as três caixas de madeira e as duas caixas de papelão (A,B,C,D1,D2), e os dois níveis as taxas de ar escolhidos (0,018 e 0,036 m³ s⁻¹ por kg de manga)

A ordem de execução dos tratamentos foi aleatorizada. Para testar o efeito da área efetiva de abertura e da vazão de ar no tempo de resfriamento, foi aplicada a análise de variância (ANOVA) e teste Tukey, para um nível de significância de 95%. Os dados foram analisados usando o programa estatístico *Statgraphics* (BARROS NETO et al., 1995).

4.8. Ensaio de vibração

As caixas foram acondicionadas sob uma mesa vibratória no Laboratório UNIMAC - FEAGRI Unidade Móvel de Auxílio à Colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola. A mesa de vibração possui as seguintes características: dimensões: 1,44 x 1,38 x 0,85 m., amplitude de vibração: 1 mm., frequência de trabalho: de 10 a 36 Hz., potência do motor de 0,746 kW, com ventilação forçada e o sistema de transmissão do movimento.

O ensaio de vibração teve como objetivo a aplicação de esforço mecânico em excesso, acima do que acontece no transporte rodoviário. Para isto foi determinada a aceleração média de vibração mediante a seguinte equação.

$$f \equiv \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sqrt{a/X_{\max}} \quad (4.6)$$

A aceleração média resultante foi de 1,6 vezes à gravidade para 20 Hz, valor assumido empiricamente, permitindo simular os casos críticos de vibração nas carretas produzidos pelos desníveis das estradas no país.

As caixas foram dispostas como mostrada na Figura 4.23, em 3 camadas e 3 colunas, fixados com cordas nos extremos, da mesma forma que são colocadas nas carretas, depois a mesa foi ligada por um período de duas horas.

Após o período de vibração as caixas, foram colocadas por 7 dias à temperatura e umidade ambiente dentro do laboratório. A temperatura e a umidade relativa foram medidas durante o tempo de permanência dos frutos no laboratório com um termohigrógrafo (CMR do Brasil, tipo NG 5538). Os valores médios de temperatura e umidade relativa oscilaram na faixa de $25 \pm 5,5$ °C e $50 \pm 10,1$ %, respectivamente.

A cada dois dias foram feitas avaliações do estado das frutas. A avaliação dos frutos foi feita visualmente, observando e comparando o estado inicial com o aparecimento de danos visíveis no tempo de armazenamento. Visou-se detectar os possíveis danos mecânicos (cortes, vincos e amassamentos), provocados pelo atrito e o encostamento nas ripas nos frutos durante o período de vibração e também determinada o peso destes, comparando o peso inicial (início do armazenamento) com o peso final após sete dias. O peso foi determinado com uma balança mecânica (Vicris N° 45161 / 06, com precisão de 5 g).



Figura 4.23: Caixas de manga sobre a mesa vibratória

4.9. Estimativa preliminar da economia de energia durante o resfriamento usando a caixa proposta.

Para estimar a economia que a introdução da nova caixa poderia trazer, comparando com as caixas de papelão usados comercialmente, foi feito um cálculo preliminar comparando o tempo de resfriamento da caixa B-36 com o tempo de resfriamento para as caixas D-7 e D-0 (caixas de papelão com os orifícios desimpedidos e impedidos).

Para o cálculo, considerou-se 20 dias de operação por mês, durante 12 meses ao ano e quatro ciclos de resfriamento por dia, para atingir o meio tempo de resfriamento.

Considerando que a potencia nominal do ventilador é de 3,75 kW, aplicou-se a seguinte equação:

$$CE = P \times h \times CT \quad (4.7)$$

Onde:

CE: Consumo de energia (R\$ ano⁻¹).

P: Potência mecânica útil no eixo do motor do ventilador (kW).

h: Horas de uso (h).

CT: Custo de kW-h (R\$)

Salienta-se que este cálculo teve como objetivo apenas fazer uma estimativa preliminar para destacar as vantagens da caixa proposta em função do tempo de resfriamento.

4.10. Avaliação preliminar do custo do protótipo desenvolvido

Foi considerado o custo do material e da mão de obra. Não foram encontrados trabalhos que relatem uma metodologia adequada para determinar este custo. Os valores apresentados foram calculados aplicando uma estimativa de 40% para o custo do material e 60% para o resto de fabril e de mão de obra (comunicação pessoal, Ivancko / 2004 / RIGESA).

Para fazer o cálculo, aplicou-se as seguintes formulas:

$$CPE = C_M + C_{F+MO} \quad (4.8)$$

$$C_{F+MO} = 1,5 C_M \quad (4.9)$$

Onde:

CPE : Custo do protótipo do caixa (R\$)

C_M : Custo do material. (R\$)

C_{F+MO} : Custo de fabricação (R\$)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados do experimento de resfriamento rápido com ar forçado

Na Tabela 5.1, apresentam-se os desenhos das laterais das caixas propostas e a percentagem da área de abertura de cada uma delas, além da caixa de papelão ondulado utilizada como testemunha do experimento.

Tabela 5.1: Modelos propostos e caixa de papelão

Modelo	Desenho	Área de Abertura
A-54		54 %
B-36		36 %

C-36		36 %
D-7		7 %
D-0		0 %

Durante o trabalho adotou-se a seguinte nomenclatura para identificar as caixas de forma rápida:

A-54: Caixa com abertura retangular formado por duas ripas e uma fresta no fundo da caixa com 10mm de altura. Considerando apenas a lateral que está efetivamente em contato com o ar durante o processo de resfriamento rápido, a caixa conta com área efetiva de abertura de 54%.

B-36: Caixa com abertura retangular formado por duas ripas. Considerando apenas a lateral que está efetivamente em contato com o ar durante o processo de resfriamento rápido, a caixa conta com área efetiva de abertura de 36%.

C-36: Caixa com duas aberturas retangulares, formado por três ripas. Considerando apenas a lateral que está efetivamente em contato com o ar durante o processo de resfriamento rápido, a caixa conta com área efetiva de abertura de 36%.

D-7: Caixa de papelão usada como testemunha, com área efetiva de abertura de 6,8%.

D-0: Caixa de papelão usada como testemunha, com área efetiva de abertura de 0%, como chega à CEASA, ou seja, com os orifícios impedidos.

Nas Figuras 5.1 e 5.2, apresentam-se as curvas de resfriamento obtidas em todos os tratamentos de resfriamento rápido com ar forçado, para 0,018 e 0,036 m³ s⁻¹ de ar por kg de manga. Os valores apresentados correspondem à medida da temperatura a cada um minuto, para todas as repetições.

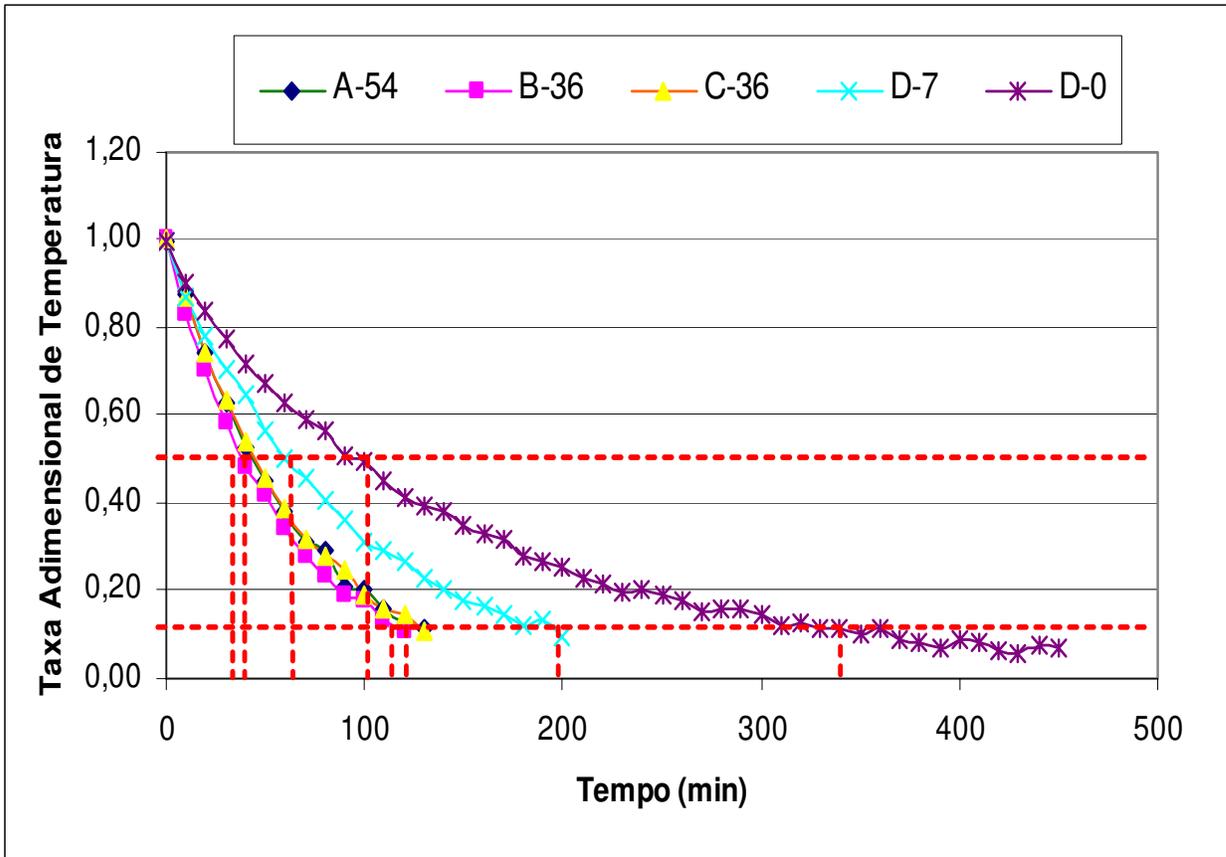


Figura 5.1: Curvas de resfriamento rápido com uma vazão de $0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de ar por kg de manga.

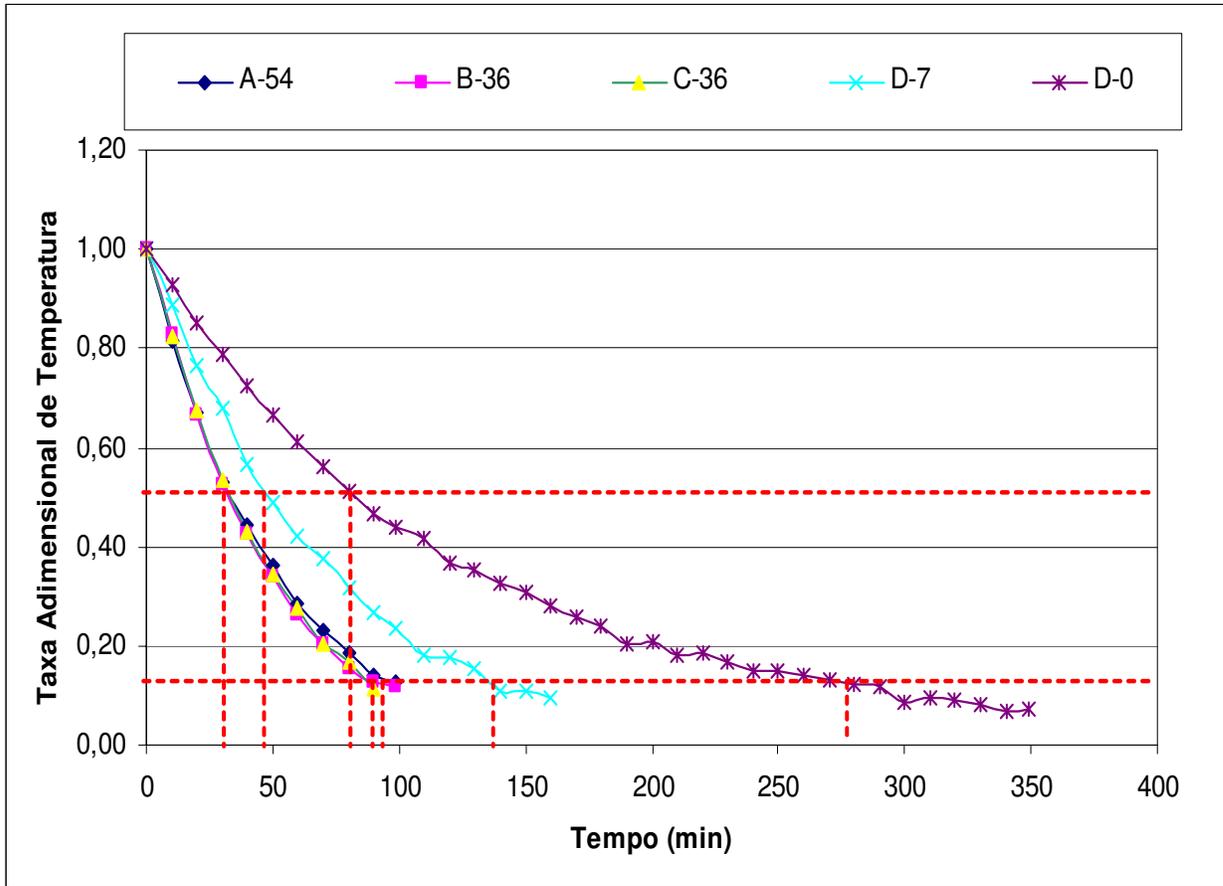


Figura 5.2: Curvas de resfriamento rápido com uma vazão de $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de ar por kg de manga.

Na Tabela 5.3, apresentam-se os valores para $t_{1/2}$ e $t_{7/8}$ para as vazões de $0,018$ e $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga.

Tabela 5.2: Tempo de resfriamento da manga.

MODELO	Tempo de Resfriamento (min)			
	$t_{1/2}$		$t_{7/8}$	
	$0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
CAIXA A-54	43	34	130	101
CAIXA B-36	39	33	117	99
CAIXA C-36	44	34	133	101
CAIXA D-7	67	56	201	169
CAIXA D-0	114	93	343	279

Como pode ser observado na Tabela 5.2, o tempo de resfriamento obtido nos modelos desenvolvidos foram próximos, apresentando uma diferença da ordem de 7% entre os modelos A-54 e C-36, comparado com o modelo B-36 que apresentou o melhor tempo de resfriamento.

Entre os modelos desenvolvidos (A-54, B-36 e C-36), a análise do meio tempo de resfriamento pelo teste de Tukey, para um nível de significância de 95%, não revelou diferença significativa o que indicaria que quaisquer dos protótipos propostos seria adequado termicamente, ou seja que quaisquer dos três modelos garantiria um resfriamento eficiente dos frutos, mas com respeito as caixas de papelão (D-7 e D-0), sim apresentou diferença, que foram de 41% com respeito ao modelo D-7 (com os orifícios desimpedidos) e de 65% com respeito ao modelo D-0 (sem os orifícios desimpedidos) (Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Comparação pelo teste de Tukey para ½ tempo de resfriamento ($p < 0,05$)

TIPO DE CAIXA	TEMPO DE RESFRIAMENTO (min)
A-54	38,43 a*
B-36	36,21 a
C-36	38,92 a
D-7	61,68 b
D-0	103,59 c

* Valores na mesma coluna seguidos da mesma letra não apresentaram diferença significativa para $P = 0,05$.

No entanto, pode-se afirmar que o modelo B-36 apresentou um melhor comportamento durante os experimentos de resfriamentos, com um tempo de 36,21 min. Já as caixas de papelão ondulado que apresentam os orifícios desimpedidos e não desimpedidos, apresentaram tempos de resfriamento de 2 a 3 vezes maiores.

A análise de variância amostrou diferença significativa ($p < 0,05$) no tempo de resfriamento entre as caixas e a vazão de ar aplicado, agora com respeito a distribuição dos resíduos eles, permaneceram em uma faixa proporcional do eixo zero e não obedece nenhuma configuração em específico que denote a dependência dos resíduos da ordem de coleta dos experimentos. Pode-se dizer então que a ordem da coleta dos experimentos foi adequada não existindo influência de fatores externos nas medições de temperatura o detalhamento da análise dos resíduos assim como a tabela das medias para todos os fatores são apresentados no Anexo 1.

A análise estatística da variável vazão de ar revelou a existência de diferença entre os dois níveis estudados ($0,018$ e $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga), com menores tempos de resfriamento para a maior vazão do ar, em todos os casos, como discutido em outros trabalhos (TERUEL, 2000 e VIGNEAULT et al., 2006).

5.2. Resultados relativos da velocidade do ar em pontos específicos

Os valores da velocidade do ar na entrada das caixas mostram-se nas tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4: Média de velocidades no ar na entrada nos três modelos propostos com vazão de $0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga.

MODELO	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	MEDIA	DIF(%)
A-54 (m/s)	0,86	0,61	1,01	1,22	0,92	48,0
	0,54	0,42	0,45	0,52	0,48	
B-36 (m/s)	1,08	0,74	0,63	0,53	0,75	14,0
	0,88	0,77	0,79	1,03	0,87	
C-36 (m/s)	1,68	1,66	1,25	1,73	1,58	34,0
	1,17	0,98	0,88	1,20	1,05	

Tabela 5.5: Média de velocidades no ar na entrada nos três modelos propostos com vazão de $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga.

MODELO	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	MEDIA	DIF(%)
A-54 (m/s)	1,70	1,53	1,52	1,62	1,59	43,0
	0,99	0,81	0,80	1,00	0,90	
B-36 (m/s)	2,01	1,66	1,27	1,25	1,54	23,0
	1,49	1,14	1,17	0,96	1,19	
C-36 (m/s)	2,10	2,21	2,30	2,14	2,18	28,0
	1,47	1,45	1,63	1,69	1,56	

Pode-se observar que a distribuição do ar é mais homogênea no modelo B-36 para as duas vazões de ar. A média no ponto superior foi de $0,75 \text{ m s}^{-1}$ e no ponto inferior foi de $0,87 \text{ m s}^{-1}$ para a vazão de ar de $0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga e de $1,54 \text{ m s}^{-1}$ e $1,19 \text{ m s}^{-1}$ para a vazão de ar de $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga, o que em termos percentuais representou uma diferença de 14% para a vazão menor e 23% para a vazão maior. Para os outros modelos, a diferença na velocidade entre a posição superior e inferior foi de 48% (modelo A-54) e 34% (modelo C-36) para a vazão menor e 43% (modelo A-54) e 28% (modelo C-36) para a vazão maior. Verifica-se, então, que a melhor distribuição do ar foi para o modelo B-36, o que reafirma os resultados obtidos nos ensaios de resfriamento.

5.3. Resultados da análise estrutural utilizando ferramentas computacionais

Para o estudo estrutural e de otimização usando ferramentas computacionais, foi escolhido o protótipo em que os frutos se resfriaram no menor tempo, ou seja, o modelo B-36.

Prosseguiu-se com a implementação da rotina de otimização no programa computacional ANSYS, como descrito no capítulo de Materiais e Métodos. Como restrições do processo de otimização (variáveis de estado) foram estabelecidos alguns parâmetros tais como: espessura mínima das paredes laterais das testeiras e do fundo da caixa em 3 mm, dimensões da seção transversal das colunas em 10mm para a base e a altura; flexão admissível das paredes laterais (DmaxL) e do fundo (DmaxF) em 3,0 mm; e a tensão máxima equivalente do material construtivo (TMAX) em 10 MPa, considerando a resistência à compressão paralela as fibras da madeira (tabela 4.2) e um fator de segurança igual a 4; para o calculo da tensão máxima equivalente foi obtida segundo o critério da tensão composta de Von Misses, a qual foi formada a partir da seguinte equação:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5.1)$$

onde σ_1 , σ_2 , σ_3 são as tensões principais.

Estudou-se o comportamento estrutural da caixa simulando as condições de carregamento nas superfícies da mesma, produzida pelas mangas, assim como a carga das caixas aplicada nas colunas da caixa crítica (localizada na base do palete), para encontrar o conjunto de dimensões ótimas para as laterais, testeiras, fundo e as colunas que satisfizeram as condições estabelecidas.

O projeto de otimização visou reduzir o volume de material construtivo da caixa, garantindo a resistência estrutural e a distribuição adequada das aberturas para manter a eficiência do resfriamento.

5.3.1. Análise dos resultados obtidos na otimização

O projeto da caixa foi desenvolvido com auxílio de recursos computacionais de desenho, cálculo estrutural e otimização, esperando-se obter como resultado final um conjunto de parâmetros que satisfizerem os objetivos do projeto.

O conjunto convergiu na trigésima iteração, permitindo obter os resultados otimizados da função objetivo e das variáveis de projeto.

Ao final da rotina de otimização, no nível de pós-processamento do ANSYS, foi possível visualizar os resultados obtidos em cada *loop*. Na Tabela 5.6, mostram-se os conjuntos de projeto inicial e final da otimização do modelo B-36, que corresponde às melhores condições obtidas na otimização na trigésima iteração.

Tabela 5.6: Parâmetros da caixa B-36 inicial e otimizado pelo algoritmo do ANSYS

CAIXA B-36		Condição Inicial	Otimizado
Volume	(m ³)	2,88x10 ⁻³	1,16x10 ⁻³
Espessura das laterais	(mm)	10,00	8,54
Espessura do fundo	(mm)	10,00	3,00
Espessura da testeira	(mm)	10,00	3,00
Base da seção transversal	(mm)	30,00	10,00
Altura da seção transversal	(mm)	20,00	10,00
Deflexão max das laterais	(mm)	0,64	1,80
Deflexão max do fundo	(mm)	-0,07	-0,99
Tensão Max equivalente	(MPa)	11,33	9,76

O ANSYS, além da apresentação numérica dos resultados obtidos em cada *loop* da rotina de otimização (Anexo 2), também permite visualizar uma representação gráfica da função objetivo (Figura 5.3).

As dimensões otimizadas permitiram uma redução significativa das variáveis de projeto, sendo elas: EL (espessura da parede lateral da caixa); EF (espessura do fundo das caixas); ET (espessura das testeiras das caixas); B (base da seção transversal das colunas); H (altura da seção transversal das colunas), e da função objetivo.

A variável B (base da seção transversal da coluna) convergiu na oitava iteração, enquanto que a diferença da variável H (altura da seção transversal da coluna) convergiu na terça iteração.

No caso das variáveis correspondentes as espessuras das laterais (EL), testeira (ET) e o fundo (EF), estes mantiveram os valores muito próximos dos valores iniciais até a quarta iteração, quando a ET experimentou um decréscimo leve até a undécima iteração onde se observou uma diminuição maior até o valor de convergência (3,00 mm) na duodécima iteração. No caso da EL, esta só experimentou uma pequena variação a partir da undécima iteração até o valor de convergência (8,54 mm) na trigésima iteração. Já para a EF a convergência aconteceu na décimoquinta iteração para o valor de 3,00 mm.

No caso das variáveis de estado (restrições), a deflexão do fundo (DmaxF) manteve o valor inicial (-0,07 mm) até a duodécima iteração onde experimentou um decréscimo, permitindo chegar ao valor de convergência (-0,99 mm), na décimo sexta iteração, o valor da deflexão do fundo aumento devido a diminuição da espessura do fundo no processo de otimização. Para a deflexão nas laterais (DmaxL) observou-se um aumento constante até a décimo terça iteração para logo experimentar uma leve queda até o valor de convergência (1,80 mm) na décima quinta iteração.

A espessura da parede lateral que no conjunto inicial de projeto foi atribuído o valor de 10 mm, no conjunto ótimo de projeto foi obtido o valor de 8,54 mm para esta mesma variável, isto significa uma redução na espessura de quase 15 %.

Para a espessura do fundo e da testeira da caixa, também foi atribuído um valor inicial de 10 mm, após a rotina de otimização obteve-se o valor de 3 mm, uma redução de 70 % na espessura da peça.

As dimensões da altura (H) e da base (B) das seções transversais das colunas, que para o conjunto inicial foram atribuídas em 20 mm e 30 mm respectivamente, no conjunto otimizado, observou-se que as mesmas foram reduzidas ambas para 10 mm, o que significou uma redução nas dimensões de seção das colunas de 50 e 67% respectivamente (83% da seção transversal).

E finalmente, pela rotina descrita acima, pode-se obter a minimização do volume de madeira utilizado na construção das caixas. A redução do volume da caixa contribui a um só tempo para a redução do custo da caixa, pela redução da quantidade de material utilizado, reduzindo significativamente o peso das caixas. Este é um fator importante ao considerarmos os aspectos ergonômicos. Neste modelo o volume de material utilizado nas caixas foi reduzido aproximadamente 60 %.

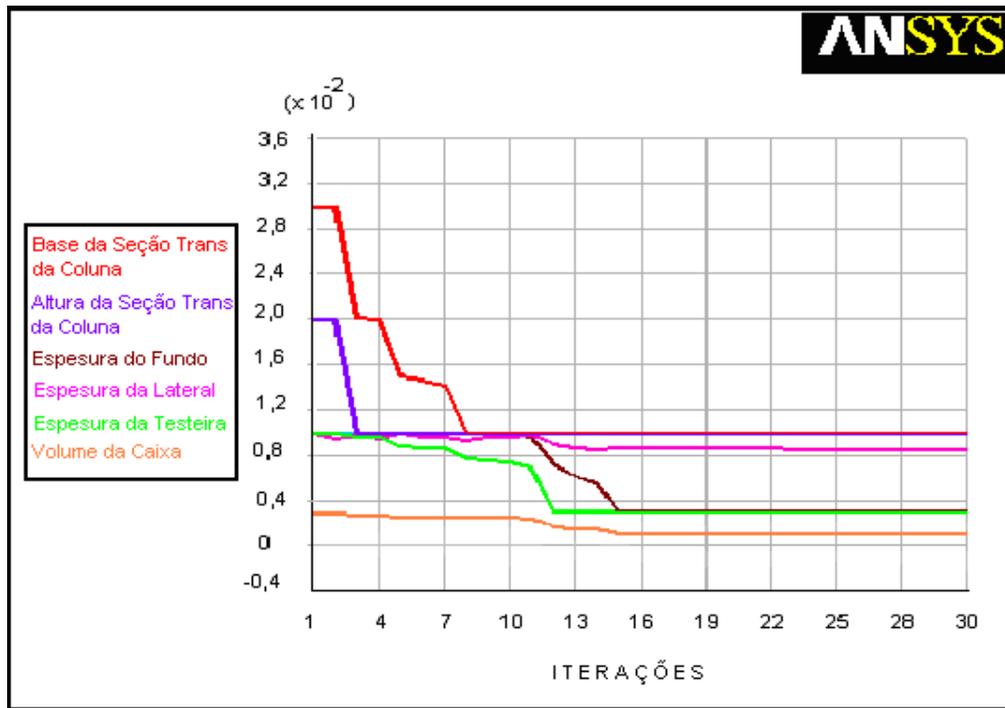


Figura 5.3: Resultados da rotina de otimização para a caixa B-36

Os valores obtidos na rotina de otimização e sua adequação das dimensões existentes para as peças de madeira no mercado são mostrados na Tabela 5.7.

A Tabela 5.7 apresenta os valores do projeto adotado para a construção do modelo B-36 para mangas.

Tabela 5.7: Conjunto de projeto adotado para construção dos modelos de caixas.

Espessura das paredes laterais da caixa (EL)	9 mm
Espessura do fundo da caixa (EF)	3 mm
Espessura das testeiras da caixa (ET)	3 mm
Altura da seção transversal das colunas (B)	10 mm
Base da seção transversal das colunas (H)	10 mm

Na Figura 5.4, apresenta-se a deflexão nas paredes laterais, produto da pressão exercida pelas mangas. Deflexão que, pelo código das cores, permitiu visualizar as regiões de máxima deflexão em cada zona das laterais, o que permitiu estabelecer uma zona crítica nas

ripas superiores com uma deflexão da ordem de 1,8 mm, a diferença das ripas inferiores, que não apresentaram deflexão considerável. Os valores numéricos apresentados nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6 estão expressos em metros.

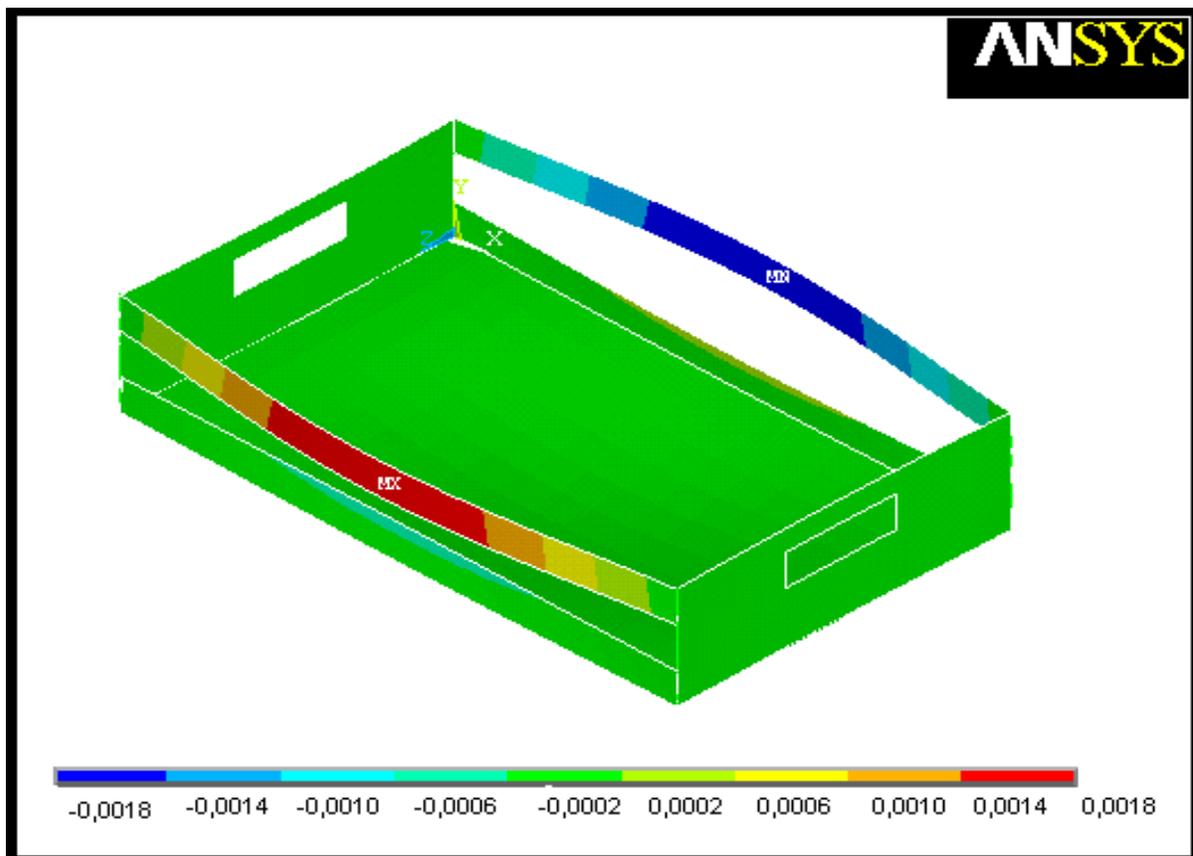


Figura 5.4: Deflexão nas paredes laterais da caixa B-36 [m].

Na Figura 5.5, apresenta-se à deflexão do fundo da caixa que pelo código, permitiu a visualização da região de máxima deformação assim como os valores de deflexão em cada ponto do fundo (representados por regiões da mesma cor, que representam zonas com mesmo valor de deflexão). No fundo, a zona crítica está localizada na parte central (cor azul), com uma deflexão de quase 1 mm (0,99 mm), ou seja, um valor bastante aceitável considerando que a deflexão das laterais foi quase o dobro.

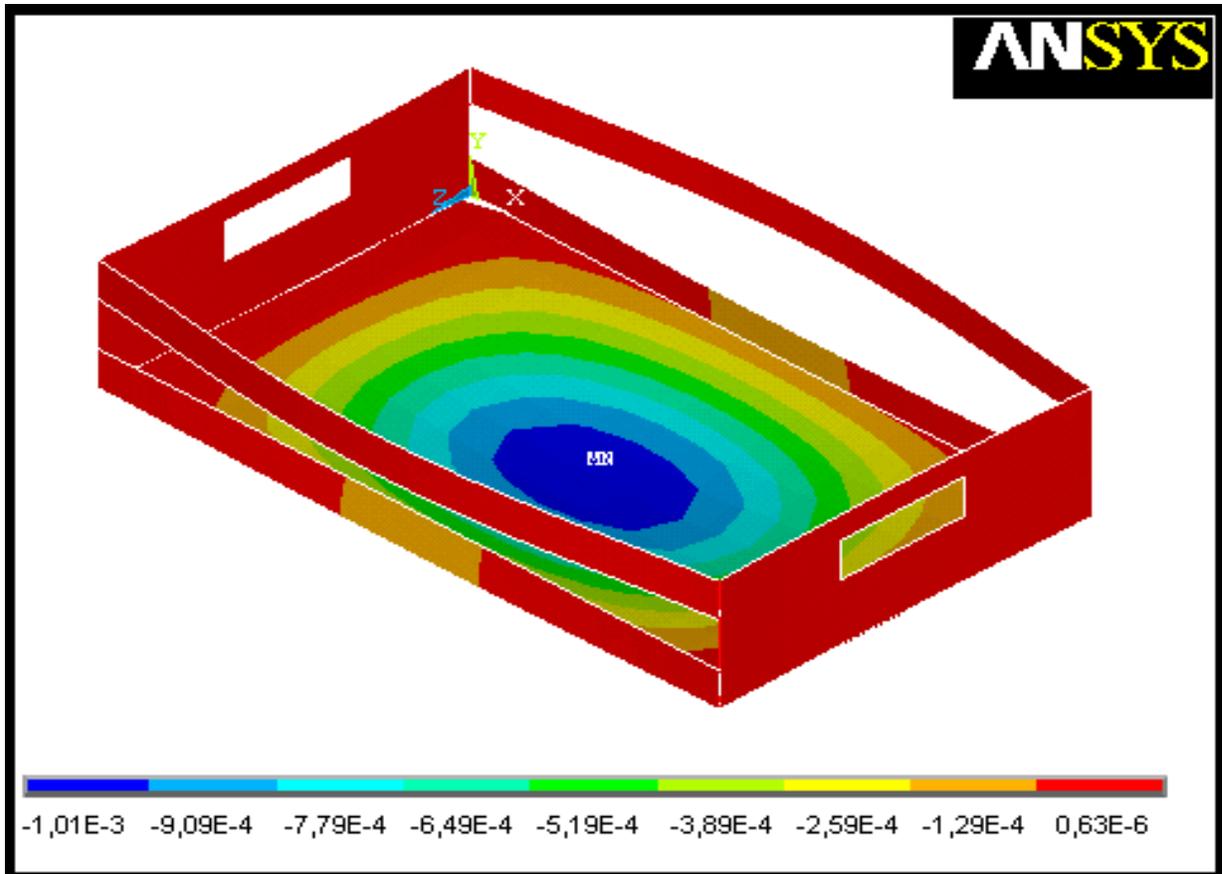


Figura 5.5: Deflexão no fundo da caixa B-36 [m].

A tensão equivalente de Von Mises permitiu visualizar, na Figura 5.6, as zonas críticas (cor vermelho), as quais estão localizadas nos cantos superiores da caixa, coincidindo na região de junção das colunas com as paredes laterais. Estas zonas críticas são devido à descontinuidade do material construtivo, em função da transição das laterais para as testeiras. A tensão no ponto crítico foi de 9,76 MPa, valor que não ultrapassa o valor limites estabelecidos de 10 MPa, pelo que se pode concluir que está dentro de um valor aceitável.

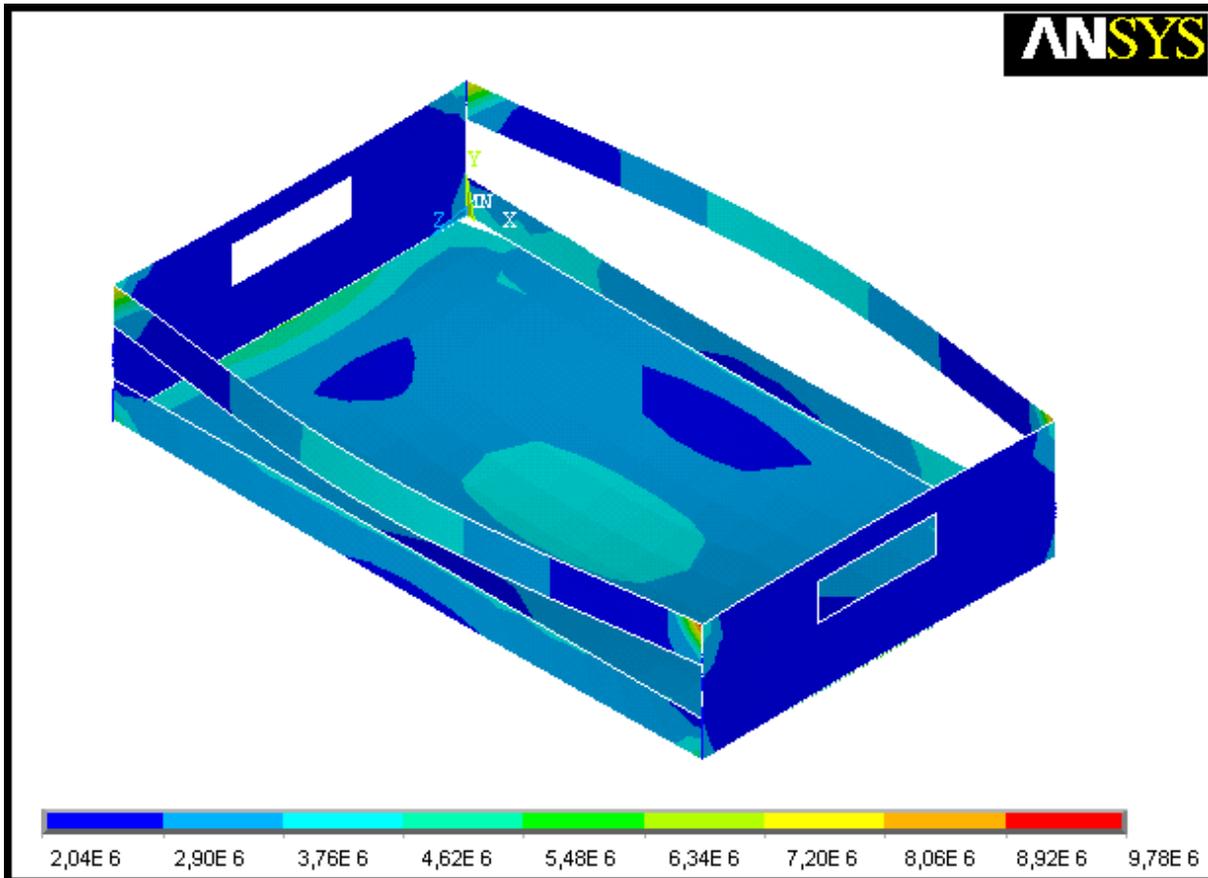


Figura 5.6: Tensão equivalente de Von Mises para a caixa B-36 [MPa].

5.4. Resultados do ensaio de vibração

Após sete dias, a superfície das mangas que estiveram em contato com as paredes laterais e fundos da caixa, assim como em contato com outras mangas, não apresentaram nenhum tipo de dano mecânico, quando comparadas com as frutas que serviram de testemunhas, podendo afirmar que os protótipos desenvolvidos não provocaram danos mecânicos visíveis nas frutas.

Foi constatado que após os sete dias de armazenamento as frutas apresentaram perda de peso equivalente a $6,91 \pm 0,18$ %. Estas perdas devem ter sido aceleradas pelas condições ambientais no laboratório, pois a umidade relativa no mesmo apresentou valores baixos, em média $50 \pm 10,1$ % (mês de setembro), com temperaturas de ordem de $25 \pm 5,5$ °C.

Algumas das mangas apresentaram apodrecimento na zona em torno dos orifícios

provocados pela inserção dos termopares, produto da degradação dos tecidos nessa região.

No entanto, a superfície das mangas que estiveram em contato com as paredes laterais e do fundo da caixa, assim como em contato com outras mangas, não apresentou nenhum tipo de dano mecânico, o que permite afirmar que os protótipos desenvolvidos não provocaram danos mecânicos visíveis às frutas.

Como as mangas estavam distribuídas em uma única camada com alta densidade, mantendo-se as frutas bastante estáveis durante o período de vibração, isto deve ter contribuído para o não aparecimento de danos mecânicos e amassamentos provocados pelo atrito entre as frutas.

A diferença do que acontece usualmente quando as mangas são condicionadas em caixas de madeira tipo M e K, onde a quantidade de camadas é de 4 a 5, havendo efeito da compressão provocada pelo próprio peso das frutas, assim como atrito entre as frutas das diferentes camadas, provocando danos mecânicos nas mesmas (Ceagesp, 2006).

5.5. Estimativa da economia de energia durante o resfriamento usando a caixas proposta.

Para fazer o cálculo da quantidade de horas de uso do sistema de resfriamento, foram considerados os tempos de resfriamento, como mostrado a seguir:

$$\text{Caixa B-54: } 36,62 \times 4 \times 20 \times 12 / 60 = 586 \text{ h ano}^{-1}.$$

$$\text{Caixa D-7 : } 62,12 \times 4 \times 20 \times 12 / 60 = 994 \text{ h ano}^{-1}.$$

$$\text{Caixa D-0 : } 109,87 \times 4 \times 20 \times 12 / 60 = 1758 \text{ h ano}^{-1}.$$

Na Tabela 5.9, apresentam-se os valores obtidos de custo, considerando uma tarifa de energia elétrica de R\$ 0,30 kW⁻¹h⁻¹.

Baseado nestas hipóteses observou-se que com a caixa B-36, a economia de energia com respeito à caixa D-7 (caixa de papelão com orifícios desimpedidos) foi de 41%, e com respeito à caixa D-0 (caixa de papelão com os orifícios impedidos) foi de 65%.

Estes resultados corroboram os resultados apresentados em outros trabalhos desenvolvidos por pesquisadores, que estudaram a influência da área efetiva de aberturas para a passagem do ar nas caixas, como um dos principais fatores que afetam o custo do resfriamento.

GAFFNEY e BOWMAN (1971), determinaram o custo de resfriamento das caixas de

laranjas (de 38 kg), resfriadas num sistema de ar forçado, sendo que o custo, por caixa oscilou entre, R\$ 0,92 caixa à R\$ 1,08 por caixa (US\$ 0,53 por caixa à US\$ 0,62 por caixa), dependendo da forma em que foram acondicionadas as caixas, no interior da câmara.

BAIRD et al. (1988), obtiveram valores entre R\$ 0,38 por caixa à R\$ 0,75 por caixa, para caixas com 5% até 1% de área efetiva de aberturas e tempos de resfriamento que variaram de 3½ até 6 horas, respectivamente, resfriadas num sistema com ar forçado.

TERUEL et al (2002), mostraram que o custo de resfriamento de laranjas Valência, resfriadas em caixas de papelão (3% de área de abertura) e caixas plásticas (40% de área de abertura), foi de R\$ 0,27 por caixa e de R\$ 0,41 por caixa, respectivamente. Estes valores representam uma diferença de 52% no tempo de resfriamento, mostrando a influência significativa do tempo de resfriamento nos custos finais.

Tabela 5.8: Custos de resfriamento das mangas.

MODELO	Tempo (h)	Custo (R\$ ano⁻¹)
B-36	586	659,00
D-7	994	1118,18
E-0	1758	1978,00

5.6. Estimativa do custo do protótipo desenvolvido

O volume de -madeira empregada para uma caixa foi de $1,16 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ que é o valor otimizado no projeto. Considerando este volume, então com 1 m^3 de madeira *Pinnus Elliotti* poderão ser construídas 862 caixas.

O custo do metro cúbico de esta madeira atualmente está na faixa de R\$ 320,00, valor comercial em 2006.

Para os dados e condições apresentados, o custo da caixa seria de R\$ 1,05 por caixa, e considerando uma margem de segurança de 5%, o custo seria de R\$ 1,10 por caixa.

Também foi feito contato com Rovi Madeira fabrica de caixas de madeira, quem informaram que para implementar um novo modelo de produção, eles têm que fazer variações na linha de produção o que eleva consideravelmente os custos de fabricação o qual diminui com o tempo.

Uma produção sob 10.000 unidades em um fluxo contínuo, teria o custo de fabricação

de aproximadamente R\$ 4,00.

Atualmente o custo de uma caixa de madeira, tipo M, está em torno de R\$ 1,70 e R\$ 2,00.

Vale ressaltar que a caixa proposta possui as seguintes características:

- Paletizável;
- Resistente estruturalmente às condições críticas de empilhamento;
- Volume de material otimizado;
- Adequados à cadeia do frio;
- Possibilidade de impermeabilização com óleo de mamona;
- Permite a economia de energia elétrica;
- Adequada ao armazenamento, não provocando danos mecânicos aos frutos.

Por tanto a nova caixa mostra-se promissora para ser implementada comercialmente.

Não foram encontrados trabalhos específicos que relatem uma metodologia adequada para este fim, por tanto os valores apresentados são resultados de considerações feitas e informações obtidas por consultas pessoais.

6. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho, pode-se concluir que:

- A metodologia de projeto para caixas com auxílio de ferramentas computacionais mostrou-se adequada, permitindo uma grande flexibilidade na escolha das variáveis do projeto.
- Apresenta-se um protótipo de caixa de madeira para manga com 36% de área efetiva de abertura e ripas retas, volume de madeira otimizado, termicamente eficiente e com resistência estrutural para suportar a paletização e as pressões laterais oriundas da movimentação.
- A redução no consumo de energia elétrica relacionada à diminuição do tempo de resfriamento, é significativa, comparando o protótipo proposto com as caixas de papelão usadas comercialmente, o que tem benefícios do ponto de vista da economia de energia e diminuição dos custos de resfriamento.

7. SUGESTÕES

- Aplicar a metodologia de projeto de caixas utilizando recursos computacionais em projeto de caixas de papelão.
- Desenvolver um projeto de caixas em que os recursos computacionais auxiliem no desenvolvimento das configurações de abertura quando à localização, forma, tamanho e distribuição.
- Considerar o uso de resina de mamona nas caixas de madeira devido às suas qualidades impermeabilizantes que ela possui.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, R. F; FONSECA, E. **Metodologia para o projeto otimizado de embalagens de frutas e hortaliças.** Anais: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA 2002, Salvador-BA, 29 de julho a 02 de agosto de 2002.

ALMEIDA, C. O. Uso de embalagem e rotulagem em frutas e hortaliças: agora é lei!. **Bahia Agricultura.**, v.6, n.2, junho 2004.

ARAÚJO, J. L. P. Mercado e Comercialização da Manga. **Cultivo da Manga**, Embrapa Semi-Árido, 2004. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Manga/CultivodaMangueira/mercado.html> > Acesso em: junho 2006.

ARIFIN, B. B; CHAU, K. V. Forced air cooling of strawberries. **American Society of Agricultural Engineers (ASAE)**, Paper nº. 87-6004, St. Joseph, USA, 1987.

ASHRAE. Commodity Storage Requeriments. **Refrigeration Systems and Applications Handbook.** Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BAIRD, C. D., GAFFNEY, J. J., TALBOT, M. T. Desing criteria for efficient and cost effective forced-air cooling systems for fruits and vegetables. **ASHRAE Transactions.** v. 94, p. 1434-1453, 1988.

BARROS NETO, B.; DE SCARMINO, I.S.; BRUNS, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Universidade Estadual de Campinas, 1995, 299p.

BOTREL, N.; SILVA, O.F.; BITTENCOURT, A. M. Procedimento de colheita. **In: Banana Pós-colheita**. Embrapa-CNPMF, Cruz das Almas - BA, 2001. p.32 –39.

CALIL, C. J; LAHR, F. A. R., DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. São Paulo, 2003. p. 152.

CASTRO, E. C. **Projeto Estrutural Otimizado de Embalagens de Produtos Hortícolas Adequadas à Cadeia do Frio**, Dissertação (Mestrado em Tecnologia Pós-Colheita)- Faculdade Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

CEAGESP, A embalagem de manga. Um exemplo de desrespeito ao mercado interno, 2006. Disponível em: www.ceagesp.gov.br/qualidade/tecnicas/estudos/anexos/a_embalagem_de_manga_pdf/download> Acesso em: Agosto 2006.

COÊLHO DE LIMA, M. A.; DA SILVA, A. L.; NUNES AZEVEDO, S. S.; DE SÁ SANTOS, P. Tratamentos pós-colheita com 1-metilciclopropeno em manga 'Tommy Atkins': efeito de doses e número de aplicações. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.28 n 1, 2006.

CORTEZ, L. A. B; SYLVIO L. HONÓRIO;. LINCOLN DE CAMARGO NEVES FILHO. Importância das Tecnologias de Resfriamento para o setor de Frutas e Hortaliças no Brasil. **In: Resfriamento de Frutas e Hortaliças**, Embrapa Hortaliças, Brasília – DF, 2002. p.231 – 272.

DE CASTRO, L. R. **Análise dos Parâmetros Relacionados ao resfriamento a ar forçado em Embalagens para Produtos Hortícolas**, Tese (Doutorado em Tecnologia Pós-Colheita)- Faculdade Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

DONADIO, L. C.; FERREIRA, F. R.; SOARES, N. B.; RIBEIRO, I. J. **Variedades brasileiras de manga**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1996. 74 p.

GAFFNEY, J.J., BOWMAN, E. K. An engineering/economic evaluation of different concepts for precooling citrus fruits. ASHRAE. Symposium Bulletin. SF. 4-70. USA: Department Agriculture. 1971

GONÇALVES R., DE BARROS COSTA F. Impermeabilização da Madeira com Resina derivada de Óleo de Mamona visando sua utilização em Embalagens. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA-COMBEA 2006, João Pessoa – PB, 31 de julho a 4 de agosto de 2006.

GREEN, D.W; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. **Wood Handbook- Wood as an engineering material**. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999. 463 p. Disponível em: < www.fpl.fs.fed.us/documents/FPLGTR/fplgtr113/Front.pdf> Acesso em: fevereiro 2003

GUEDES, L.B.R.; MADI, L.F.C. **In: Curso de transporte refrigerado de frutas e hortaliças**, Campinas: ITAL, 1983. p. 90-106.

HONÓRIO, S. L. Fisiologia pós-colheita de frutas e hortaliças. In: **II Curso de Atualização em Tecnologia de Resfriamento de Frutas e Hortaliças**. UNICAMP. Campinas, SP. p.161. 1998.

HONÓRIO, S. L; MORETTI, C. L. Fisiologia pós-colheita de frutas e hortaliças. In: **Resfriamento de Frutas e Hortaliças**, Embrapa Hortaliças, Brasília –DF, 2002. p. 59-81.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Embalagem: Determinação da resistência à compressão dinamométrica**. Laboratório de Embalagem e Acondicionamento. São Paulo, 1991. 4 p.

JACOBI, K. K; MACRAE, E. A; HETHERINGTON, S. E. Effects of hot air conditioning of ‘Kensington’ mango fruit on the response to hot water treatment, **Postharvest Biology and Technology**, v.21 p. 39–49, 2000.

JERNKVIST, L. O. Fracture of wood under mixed mode loading. **Engineering Fracture Mechanics**. n. 68, 2001. p. 549 – 563.

KADER A.A. (Ed.) **Postharvest technology of horticultural crops**, 3. ed. Publication n. 3311. Oakland: Cooperative Extension of University of California. Division of Agriculture and Natural Resources, 2002, 535p.

MITCHELL, F. G. Packages for horticultural crops. In: KADER, A. A. **Postharvest technology of horticultural crops**. 2 ed. Oakland: University of California, p. 45-53, 1992.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York. USA. 1980, 405 p.

ORTEGA-ZALETA, D; YAHIA, E. M. Tolerance and quality of mango fruit exposed to controlled atmospheres at high temperatures, **Postharvest Biology and Technology** ,v20 p 195–201,2000.

PESIS, E; AHARONI, D; AHARON, Z; BEN-ARIE, R; AHARONI, N; FUCHS, Y. Modified atmosphere and modified humidity packaging alleviates chilling injury symptoms in mango fruit, **Postharvest Biology and Technology**, v19 p 93–101, 2000.

PHAKAWATMONGKOL, W; KETSA, S; G. VAN DOORN, W. Variation in fruit chilling injury among mango cultivars, **Postharvest Biology and Technology**,v32 p. 115–118, 2004.

SIGRIST, J. M. M; BLEINROTH, E. W.; MORETTI, C.L. Manuseio pós-colheita de frutas e hortaliças. **In: Resfriamento de Frutas e Hortaliças**, Embrapa Hortaliças, Brasília – DF, 2002. p.83 – 94.

SILVA, C. A. C. **Otimização estrutural e análise de sensibilidade orientada por objetos**. Campinas, SP. Unicamp – Dissertação de Mestrado, 1997. p.128.

SILVA, J.L.; CALBO, A.G. An apparatus to study compression stress in fruits and vegetables. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n.5, p. 737 – 742, 1992.

TERUEL, B. J. M. **Estudo teórico-experimental do resfriamento de laranja e banana com ar forçado**, Campinas, SP. Unicamp – Tese de doutorado, 2000. p 289.

TERUEL, B. J. M.; CORTEZ, L. A. B; LEAL, P. A. M.; NEVES FILHO, L. C. Resfriamento de banana-prata com ar forçado. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.1, p.142-146, 2002.

VIGNEAULT, C.; BORDINT, M.R; ABRAHÃO, R.F. Embalagem para Frutas e Hortaliças. In: **Resfriamento de frutas e hortaliças**, Embrapa Hortaliças, Brasília - DF, 2002. p.428.

VIGNEAULT, C.; GOYETTE, B.; CASTRO, L.R. Maximum slat width for cooling efficiency of horticultural produce in wooden crates. **Postharvest Biology and Technology**, v.40 p. 308–313, 2006.

VILLAS BOAS, E.V.B.; ALVES, R.E.; FILGUEIRAS, H.A.C.; MENEZES, J. B. Características da fruta. In: **Banana Pós-colheita**. Embrapa-CNPMF, Cruz das Almas-BA, 2001. p. 15 – 22.

ANEXO 1

Valores médios de meio tempo de resfriamento para todos os fatores e níveis

Table of Least Squares Means for Tempo Resf.
with 95,0 Percent Confidence Intervals

Level	Count	Mean	Std. Error	Lower Limit	Upper Limit
GRAND MEAN	20	55,759			
Caixa					
A	4	38,4225	4,77008	28,1917	48,6533
B	4	36,205	4,77008	25,9742	46,4358
C	4	38,9125	4,77008	28,6817	49,1433
D	4	61,6725	4,77008	51,4417	71,9033
E	4	103,583	4,77008	93,3517	113,813
Vazao					
1	10	61,564	3,01686	55,0935	68,0345
2	10	49,954	3,01686	43,4835	56,4245

Multiple Range Tests for TR by Caixa

Method: 95,0 percent LSD

Caixa	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
B	4	36,205	X
A	4	38,4225	X
C	4	38,9125	X
D	4	61,6725	X
E	4	103,583	X

Contrast	Difference	+/- Limits
A - B	2,2175	14,4686
A - C	-0,49	14,4686
A - D	*-23,25	14,4686
A - E	*-65,16	14,4686
B - C	-2,7075	14,4686
B - D	*-25,4675	14,4686
B - E	*-67,3775	14,4686
C - D	*-22,76	14,4686
C - E	*-64,67	14,4686
D - E	*-41,91	14,4686

* denotes a statistically significant difference.

Multiple Range Tests for Tempo Resf. by Vazao

Method: 95,0 percent LSD

Vazao	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
2	10	49,954	X
1	10	61,564	X

Contrast	Difference	+/- Limits
1 - 2	*11,61	9,15073

* denotes a statistically significant difference.

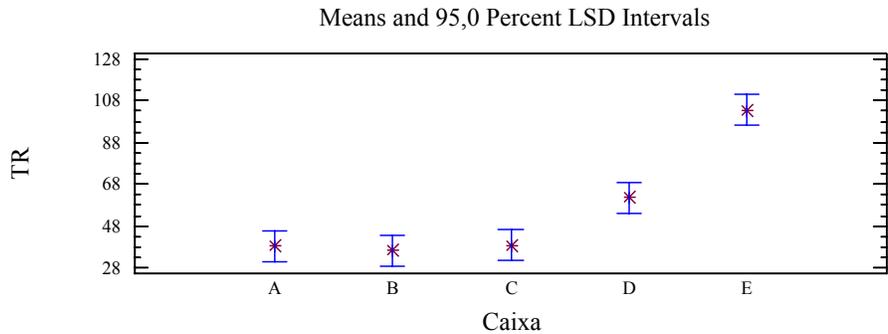
Análise de variância para o tempo de resfriamento

Analysis of Variance for Tempo Resf. - Type III Sums of Squares

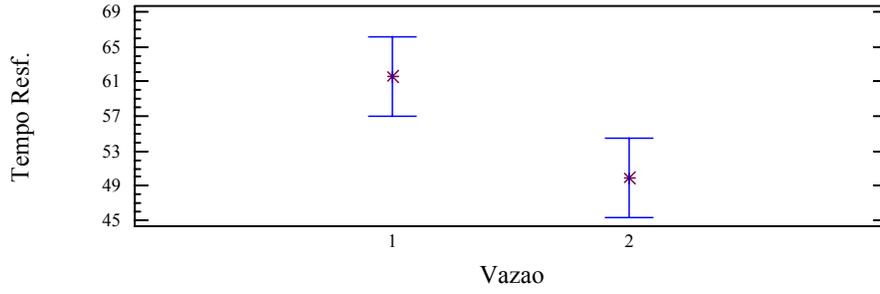
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Caixa	13155,1	4	3288,77	36,13	0,0000
B:Vazao	673,96	1	673,96	7,40	0,0166
RESIDUAL	1274,21	14	91,0147		
TOTAL (CORRECTED)	15103,3	19			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

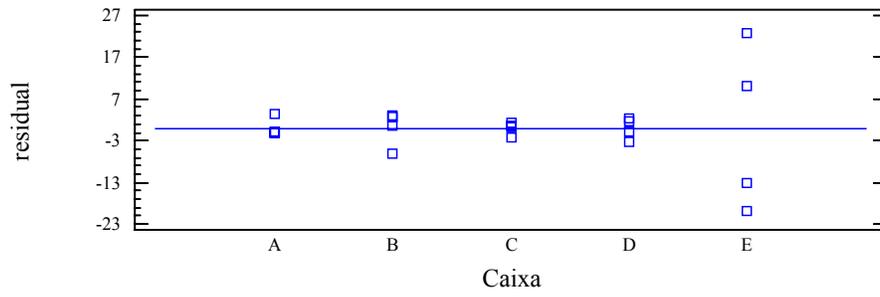
Análise dos resíduos para todos os níveis e fatores



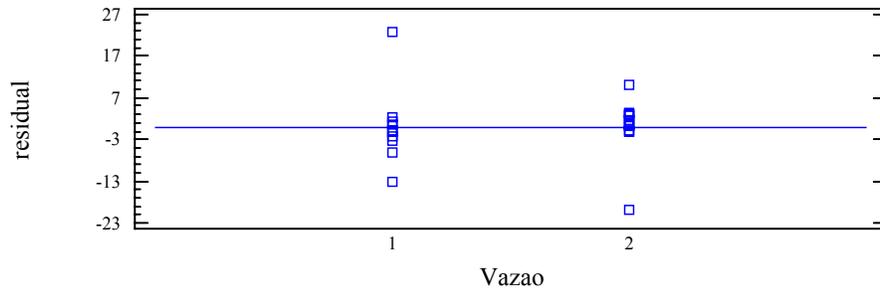
Means and 95,0 Percent LSD Intervals



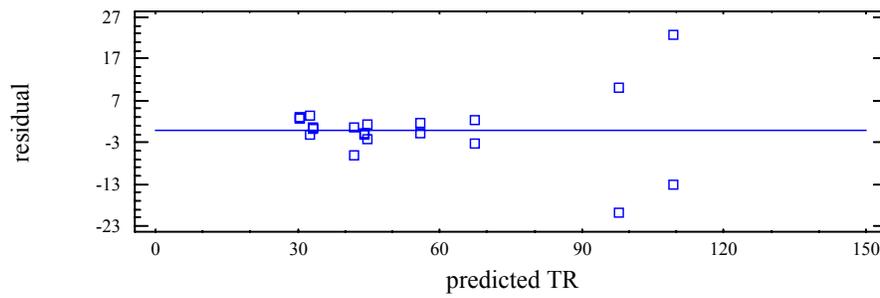
Residual Plot for TR



Residual Plot for Tempo Resf.



Residual Plot for TR



ANEXO 2

Resultados da Otimização

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 31 AND SHOW ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS. (A "*" SYMBOL IS USED TO INDICATE THE BEST LISTED SET)

	SET 1 (INFEASIBLE)	SET 2 (INFEASIBLE)	SET 3 (INFEASIBLE)	SET 4 (INFEASIBLE)
DNX (SV)	> 0.63683E-03	> 0.73726E-03	> 0.81524E-03	> 0.85863E-03
SMAX (SV)	> 0.11334E+08	> 0.12555E+08	> 0.10876E+08	> 0.11370E+08
B (DV)	0.30000E-01	0.29941E-01	0.20116E-01	0.20009E-01
H (DV)	0.20000E-01	0.19940E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EL (DV)	0.10000E-01	0.94845E-02	0.97410E-02	0.95405E-02
ET (DV)	0.10000E-01	0.99978E-02	0.96269E-02	0.96104E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.28800E-02	0.28478E-02	0.26848E-02	0.26714E-02

	SET 5 (INFEASIBLE)	SET 6 (INFEASIBLE)	SET 7 (INFEASIBLE)	SET 8 (INFEASIBLE)
DNX (SV)	> 0.85876E-03	> 0.95252E-03	> 0.94402E-03	> 0.11987E-02
SMAX (SV)	> 0.95056E+07	> 0.10461E+08	> 0.10108E+08	> 0.10163E+08
B (DV)	0.14981E-01	0.14669E-01	0.14188E-01	0.10000E-01
H (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF (DV)	0.99997E-02	0.99997E-02	0.99993E-02	0.99956E-02
EL (DV)	0.10000E-01	0.95836E-02	0.96819E-02	0.92531E-02
ET (DV)	0.88189E-02	0.87511E-02	0.86406E-02	0.76762E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.26361E-02	0.26062E-02	0.26042E-02	0.25090E-02

	SET 9 (FEASIBLE)	SET 10 (FEASIBLE)	SET 11 (FEASIBLE)	SET 12 (FEASIBLE)
DNX (SV)	0.10976E-02	0.11285E-02	0.10981E-02	0.15810E-02
SMAX (SV)	0.90057E+07	0.91320E+07	0.81916E+07	0.81051E+07
B (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
H (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF (DV)	0.99946E-02	0.99082E-02	0.96316E-02	0.72519E-02
EL (DV)	0.96690E-02	0.95853E-02	0.98534E-02	0.90766E-02
ET (DV)	0.75962E-02	0.74385E-02	0.69341E-02	0.30000E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.25295E-02	0.25030E-02	0.24504E-02	0.18344E-02

	SET 13 (FEASIBLE)	SET 14 (FEASIBLE)	SET 15 (FEASIBLE)	SET 16 (FEASIBLE)
DNX (SV)	0.17437E-02	0.17741E-02	0.17564E-02	0.17387E-02
SMAX (SV)	0.93543E+07	0.95898E+07	0.94529E+07	0.93160E+07
B (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
H (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF (DV)	0.61949E-02	0.56533E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
EL (DV)	0.86638E-02	0.85927E-02	0.86338E-02	0.86755E-02
ET (DV)	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.16511E-02	0.15656E-02	0.11700E-02	0.11725E-02

	SET 17 (FEASIBLE)	SET 18 (FEASIBLE)	SET 19 (FEASIBLE)	SET 20 (FEASIBLE)
DNX (SV)	0.17405E-02	0.17387E-02	0.17404E-02	0.17387E-02
SMAX (SV)	0.93295E+07	0.93156E+07	0.93291E+07	0.93156E+07
B (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
H (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF (DV)	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
EL (DV)	0.86714E-02	0.86756E-02	0.86715E-02	0.86756E-02
ET (DV)	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.11723E-02	0.11725E-02	0.11723E-02	0.11725E-02

	SET 21 (FEASIBLE)	SET 22 (FEASIBLE)	SET 23 (FEASIBLE)	SET 24 (FEASIBLE)
DNX (SV)	0.17404E-02	0.17387E-02	0.17809E-02	0.17826E-02
SMAX (SV)	0.93292E+07	0.93156E+07	0.96425E+07	0.96563E+07
B (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
H (DV)	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF (DV)	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
EL (DV)	0.86715E-02	0.86756E-02	0.85770E-02	0.85730E-02
ET (DV)	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.11723E-02	0.11725E-02	0.11666E-02	0.11664E-02

	SET 25	SET 26	SET 27	SET 28
	(FEASI BLE)	(FEASI BLE)	(FEASI BLE)	(FEASI BLE)
DNX	(SV) 0.17809E-02	0.17827E-02	0.17809E-02	0.17827E-02
SMAX	(SV) 0.96429E+07	0.96567E+07	0.96429E+07	0.96567E+07
B	(DV) 0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
H	(DV) 0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF	(DV) 0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
EL	(DV) 0.85769E-02	0.85729E-02	0.85769E-02	0.85729E-02
ET	(DV) 0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.11666E-02	0.11664E-02	0.11666E-02	0.11664E-02

	SET 29	* SET 30*	SET 31
	(FEASI BLE)	(FEASI BLE)	(FEASI BLE)
DNX	(SV) 0.17951E-02	0.17969E-02	0.17950E-02
SMAX	(SV) 0.97531E+07	0.97670E+07	0.97521E+07
B	(DV) 0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
H	(DV) 0.10000E-01	0.10000E-01	0.10000E-01
EF	(DV) 0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
EL	(DV) 0.85445E-02	0.85405E-02	0.85448E-02
ET	(DV) 0.30000E-02	0.30000E-02	0.30000E-02
VOLCAI XA(OBJ)	0.11647E-02	0.11644E-02	0.11647E-02