

(S9-P10)

PROJETO DE CAIXAS DE MADEIRA PARA MANGA**BÁRBARA JANET TERUEL MEDEROS⁽¹⁾, NEIL FERNANDO SALAZAR CHACÓN⁽¹⁾ e ROBERTO FUNES ABRAHÃO⁽¹⁾**

⁽¹⁾Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 13083-970, Campinas-SP.
E-mail: barbarat@agr.unicamp.br; neilsalazar@hotmail.com; roberto@agr.unicamp.br

Palavras chave: *Mangifera Indica* L. - otimização estrutural - área efetiva de aberturas - sistema de ar forçado - tempo de resfriamento - vibração

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 ($38,00 \pm 1,70 \text{ min}$), no entanto na comparação com as caixas de papelão a diferença foi significativa ($82,74 \pm 29,58 \text{ min}$). 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.

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.

INTRODUÇÃO

A produção mundial de manga foi de 24 milhões de toneladas, em 2004, enquanto no Brasil a produção anual foi de cerca 842 mil toneladas. A manga é a segunda fruta tropical mais produzida no mundo, superada apenas pela banana. Brasil é o nono produtor mundial, e a manga é comercializada quase que exclusivamente *in natura*, embora também possa ser encontrada nas formas de suco e polpa congelada (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, garantindo 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. Dentre os principais fatores responsáveis por essas perdas citam-se o uso de caixas inadequadas, de madeira e/ou papelão, a falta de critérios de engenharia na concepção deles dificultando os processos de resfriamento e problemas no acabamento, danificando o fruto além de propiciar o acúmulo de umidade e formação de fungos. Por outro lado, aberturas mal dimensionadas em caixas de papelão, favorecem a perda de resistência estrutural das caixas quando submetidas ao empilhamento e armazenamento refrigerado, provocada pela alta umidade relativa do ar (Almeida, 2004).

A definição de caixas para transporte aponta as funções de contenção e proteção. O primeiro atributo refere-se ao agrupamento das unidades, de forma conveniente à manipulação e distribuição, o segundo refere-se à capacidade da caixa de absorver as solicitações mecânicas comumente encontradas no transporte e armazenamento dos produtos. Pode-se agregar mais um atributo desejável para as caixas de transporte de produtos hortícolas: a facilitação de tratamentos específicos de pós-colheita, em particular o resfriamento dos produtos (Vigneault et al., 2002). Com o uso de caixas 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 (CEAGESP, 2006).

A área efetiva de abertura de uma caixa é um elemento imprescindível para um eficiente processo de resfriamento, considerando que o resfriamento é um processo de transferência de calor, cuja eficiência depende do contato do meio de resfriamento com o produto a resfriar, permitindo além da rápida diminuição da temperatura durante o resfriamento rápido, a manutenção da mesma durante o armazenamento e transporte frigorificado (Kader, 2002; Cortez et al., 2002). Segundo Talbot e Chau (1991) a área de abertura deve ser no mínimo de 14%, para resfriamento em sistemas com ar forçado.

Os custos de resfriamento também têm uma relação direta com a área efetiva de abertura, como mostram vários trabalhos, sendo possível que estes diminuam consideravelmente quando a área de abertura seja adequada para garantir um resfriamento eficiente (Baird et al., 1988; Teruel et al., 2002). As caixas 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, diminuindo o consumo de energia elétrica no processo (Brosnan e Sun, 2001; Teruel et al., 2001; Vigneault et al., 2006).

Ainda no Brasil é amplamente difundido o emprego da madeira na construção de caixas para manga para o mercado interno no Brasil. As principais vantagens dessas caixas são o preço e a elevada resistência. Devido às características de resistência, as caixas de madeira são geralmente reutilizadas, porém, estas caixas não possibilitam os processos de limpeza ou desinfecção, tornando-se um importante veículo de contaminação. Possuem também problemas com acabamento sendo responsáveis pela maioria das injúrias mecânicas provocadas nas frutas.

O projeto e desenvolvimento de caixas de madeira, otimizadas do ponto de vista geométrico, estrutural, e que atendam as necessidades do processo de resfriamento é uma iniciativa que contribui para a redução de perdas pós-colheita e aumento da vida útil de produtos hortícolas. Apresenta-se um estudo de caso mostrando a aplicabilidade do Método dos Elementos Finitos para a modelagem e otimização estrutural de caixas de madeira para manga (*Mangifera Indica* L.). Após a concepção as caixas foram construídas e as frutas submetidas ensaios de resfriamento com ar forçado, posterior otimização estrutural para minimização do volume de material e ensaios de vibração.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente se fez um estudo das caixas utilizadas no mercado interno para transporte e comercialização das mangas, comprovando que na maioria dos casos as frutas são comercializadas em caixas de madeira e de papelão, encontrando várias dificuldades que afetam a qualidade vida útil e comercialização das frutas. Para isto, visitou-se em as dependências da Central de Abastecimento de Campinas (CEASA), fazendo um levantamento de informações com produtores e atacadistas (Figura 1).

As caixas de madeira utilizadas são do tipo M e K, são fabricadas em madeira bruta, sem nenhum tipo de tratamento, provocando danos mecânicos nos frutos. Tanto nas caixas de madeira como de papelão a área efetiva de abertura é insuficiente ou inexistente, impedindo a ventilação e o resfriamento adequado. Para frutas climatéricas, como a manga, a falta ou insuficiência de aberturas torna-se um fator de aceleração do amadurecimento e perda de qualidade (Figura 1a e 1b). Contatou-se também, que embora as caixas de papelão tenham orifícios, muitas vezes estes se mantêm impedidos, não sendo retirados os cortes dos orifícios antes do uso, o que se traduz em área efetiva de abertura nula (Figura 1c). Por outro lado, foi observado numa grande quantidade de caixas de papelão, devido a um projeto de engenharia

inadequado, a perda de resistência estrutural durante o empilhamento, provocando amassamentos e danos mecânicos nos frutos.

As caixas de madeira por ser de material com alta resistência estrutural são reusadas várias vezes, sem higienização adequada, provocando a formação de fungos e bacterias. Foi observado também que as caixas não são ergonômicamente adequadas, como falta de alças ou de dimensões inadequadas, afetando o manuseio por parte dos funcionários (Figura 1a e 1b).

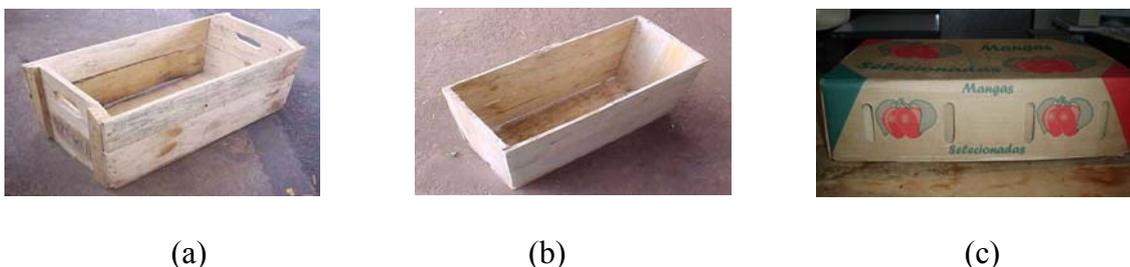


Figura 1. (a) Caixas de transporte para mangas, tipo M, com alças de dimensões inadequadas e falta de aberturas laterais; (b) Caixa, tipo K, sem aberturas para ventilação e sem alças; (c) Caixa de papelão com orifícios impedidos (Chacón, 2006).

No entanto o problema da impermeabilização das caixas poderia ser resolvido aplicando resina derivada de óleo de mamona. Estudos desenvolvidos por Gonçalves e Barros Costa (2006), que impermeabilizaram tábuas de *Pinus Elliott* com esta resina, mostrou-se foi eficiente na redução da absorção de água nas tábuas. As tábuas foram submersas totalmente em água, simulando uma condição crítica, e Após dois dias submetidas a esta condição o retardamento da absorção foi de 16%, com relação às tábuas não submergidas e de 30% após quinze dias. Segundo os autores, estes resultados tornam a resina derivada de óleo de mamona uma solução promissora, para a impermeabilização da madeira utilizada na construção de caixas de produtos hortícolas.

Constatou-se também que as caixas de madeira acondicionam entre 20 a 25 kg de manga, o que significa um arranjo com 4 a 5 camadas de manga. Este tipo de arranjo prejudica a qualidade das frutas, por serem muito perecíveis e frágeis, pois o peso que as ultimas camadas têm que suportar provoca amassamentos e danos mecânicos nas mesmas, durante o armazenamento e transporte.

Metodologia para o projeto de caixas de transporte: inclui várias etapas, dentre elas: estudo e definições iniciais, projeto e construção do protótipo. A etapa de estudo e definições iniciais contempla a definição dos fatores que não podem ser alterados durante o processo iterativo no projeto, como a capacidade volumétrica e altura do empilhamento, o agrupamento das características do produto, tratamentos pós-colheita, distribuição física dos produtos na caixa e material construtivo. No projeto contemplam-se os aspectos geométricos, estruturais e ergonômicos, procedendo-se ao dimensionamento das caixas. Após estas etapas o protótipo é construído e deve ser submetido a ensaios de campo ou de laboratório, dependendo das características do projeto (Vigneault et al., 2002). A seguir são apresentados os dados, condições e considerações feitas neste trabalho em cada uma das etapas do projeto.

- **Características do produto:** manga variedade Tommy Atkins, temperatura de armazenamento de 12-13°C e umidade relativa 85%, recomendando-se no máximo tempo de armazenamento de 3 semanas.

- **Tratamentos pós-colheita:** as frutas foram submetidas a resfriamento rápido com ar forçado.

- **Distribuição física do produto:** as frutas foram acondicionadas em arranjo quadrado, sendo 12 frutas por caixa (6 kg) em uma única camada.

- **Material construtivo:** foi determinado que as caixas seriam construídas com tábuas de madeira de reflorestamento, da espécie *Pinnus Elliotti*. (0,01 m de espessura). Propõe-se madeira, atendendo às propriedades de resistência e baixa absorção de umidade quando submetidas ao armazenamento refrigerado, podendo desenvolver o projeto com maior área de aberturas nas laterais, sem comprometer a resistência estrutural. As tábuas foram faqueadas para evitar ou reduzir os danos mecânicos nas frutas. Adotaram-se os valores de resistência e rigidez da madeira *Pinnus Elliotti* para caracterizar os modelos de caixas (Tabela 1).

Tabela 1. Propriedades de rigidez e resistência do *Pinnus Elliotti*

Propriedades	
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	11.889,0 MPa

Fonte: NBR 7190/97

- **Aspecto geométrico:** definiu-se que o desenho das caixas contemplaria ripas retas, atendendo à facilidade construtiva e minimização de danos mecânicos. A distribuição das ripas obedeceu à área disponível na lateral da caixa. As dimensões das caixas foram definidas atendendo as dimensões do palete, seguindo a norma IN009/2000, vigente no Brasil, para caixas de produtos hortícolas para transporte. Esta norma define que as dimensões do palete padrão de 1 m x 1,2 m e especifica que as caixas devem ter dimensões paletizáveis. As dimensões das caixas foram fixadas em: largura - 0,3 m, comprimento - 0,5 m e altura - 0,13 m. Considerou-se que o palete teria uma altura correspondente a 10 caixas empilhadas, considerando a altura da coluna, a altura do palete de caixas seria de aproximadamente 1,45 m.

Após a definição das dimensões externas das caixas procedeu-se a definir a quantidade de ripas e espaçamento entre estas, que foi de 0,05 m (5 cm), 0,04 (4 cm) e 0,02 cm (2 cm),

para desenvolver caixas com dois e três ripas e um e dois espaçamentos entre estas. Com esta distribuição foi possível obter três configurações e duas áreas efetivas de abertura (54% e 36%, com relação à área lateral das caixas) (Figura 2a). As dimensões da espessura do fundo (EF), espessura das laterais (EL), espessura das testeiras (ET), altura da seção transversal (H) e base da seção transversal (B), foram definidas na etapa de otimização (Figura 2a e 2b).

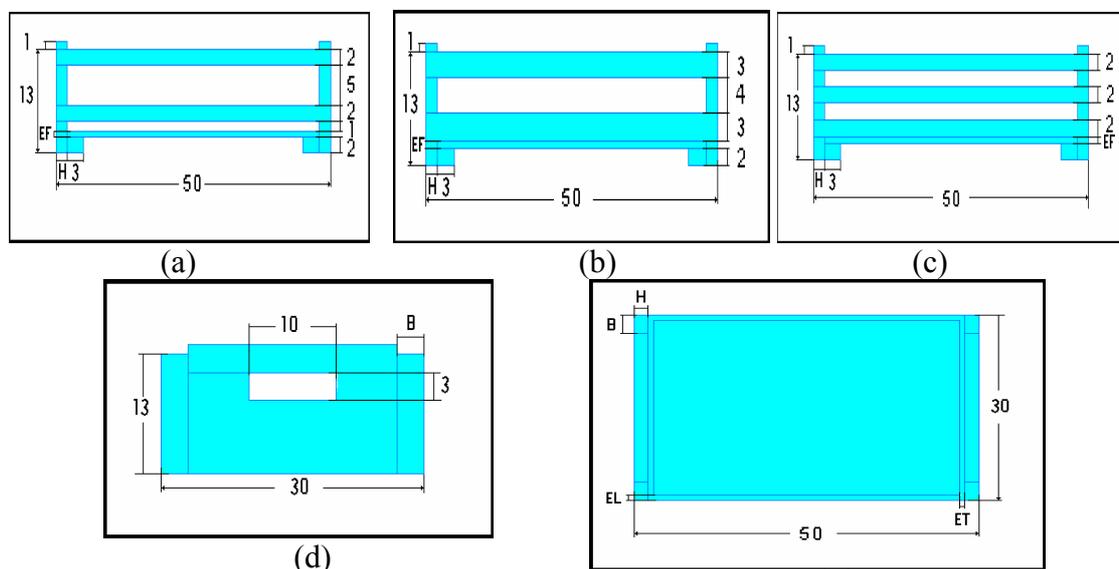


Figura 2. Modelos de caixas de madeira (50x30x13 cm); (a) Modelo A (54% de área efetiva de abertura); (b) Modelo B (36% de área efetiva de abertura); (c) Modelo C (36% de área efetiva de abertura); (d) Vista lateral; (e) Vista em planta (Chacón, 2006).

A área efetiva de abertura é definida como a área de orifícios por onde efetivamente o ar de resfriamento entra na embalagem para escoar pelo leito de produtos. Esta foi calculada relacionando a área de abertura na face lateral voltada para a passagem de ar, com a área total da lateral da embalagem, em percentagem. Com as três distribuições de ripas obtidas foi possível obter duas áreas efetivas de abertura nas caixas, de 54% e 36%, com relação à área da face lateral das caixas. Esta área também pode ser determinada com relação à área total da embalagem, neste caso a área seria de 27% e 18%.

- **Aspecto ergonômico:** recomenda para as alças uma abertura de 0,04 m x 0,115 m (40 x 115 mm), 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 (Abrahão e Fonseca, 2002). Foram determinadas as dimensões das alças 0,03 m x 0,11 m (30 x 110 mm), atendendo às dimensões das caixas projetadas, tomando em consideração o aspecto da segurança e evitando arestas perfurantes.

- **Aspecto estrutural:** considerou-se o critério de coluna no projeto das caixas, que permite que o peso das caixas e os efeitos da compressão sejam absorvidos por estas, liberando as laterais, evitando assim falhas na resistência estrutural e danos mecânicos aos produtos.

Para a otimização foram consideradas as cargas aplicadas nas condições estáticas e dinâmicas que a caixa pode ser submetida. A condição estática corresponde às cargas de empilhamento na sua condição mais crítica, ou seja, a carga recebida pela última caixa do palete, o peso das caixas, acrescentando uma carga extra, relativa a uma sobrecarga no empilhamento de 17%, perfazendo 648 N, recebendo então cada coluna a carga de 162 N. O projeto de caixas para transporte deve ser feito sempre considerando as condições a que estará submetida a última caixa da coluna no palete (Figura 3a).

Para levar em conta o aspecto dinâmico, considerou-se uma situação transiente na qual os frutos são subitamente acelerados com 2 vezes a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), durante o levantamento da caixa, também, distribuindo-se 120 N no fundo da caixa. Outra situação transiente considerada foi que todo o peso dos frutos é suportado pelas laterais da caixa. Nesse caso, distribuíram-se 60 N nas paredes laterais e nas testeiras (Figura 3b).

Estudou-se o comportamento estrutural da caixa simulando as condições de carregamento, 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 colunas, que satisfizerem as condições estabelecidas. O projeto de otimização também visou reduzir o volume de material da caixa, garantindo a resistência estrutural e a distribuição adequada das aberturas para manter a eficiência do resfriamento.

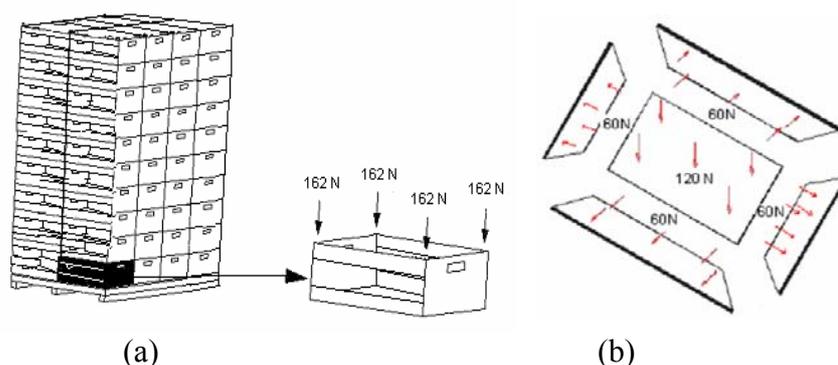


Figura 3. a) Desenho do palete e distribuição de cargas; (b) Cargas laterais provenientes do manuseio (Chacón, 2006).

Após as definições iniciais e a etapa do projeto, foram construídos três protótipos de caixas de madeira de reflorestamento *Pinnus Elliotti*.

- **Protótipos desenvolvidos:** foram desenvolvidos e construídos três modelos de caixas, com três distribuições de ripas e área efetiva de 54% (Figura 4a) e 36% (Figura 4b e 4c). Os protótipos, contendo 6 kg de manga cada um, foram submetidos a ensaios de resfriamento, e escolhido o melhor modelo com relação ao tempo de resfriamento. O modelo escolhido foi submetido a otimização estrutural, para minimizar as dimensões das colunas e o volume de material. Todos os protótipos, contendo as frutas, foram submetidos a ensaios de vibração.

A avaliação dos custos também é uma etapa importante do projeto, mas em dependência do projeto e das informações disponíveis, esta se torna de difícil determinação. Neste trabalho não foi possível completar os cálculos devido à dificuldade em encontrar dados que permitissem gerar um valor de custo próximo da realidade. Após os resultados obtidos com os protótipos, o fluxograma de projeto pode ser realimentado e modificar parâmetros de algumas das etapas, para gerar um novo projeto de caixas.

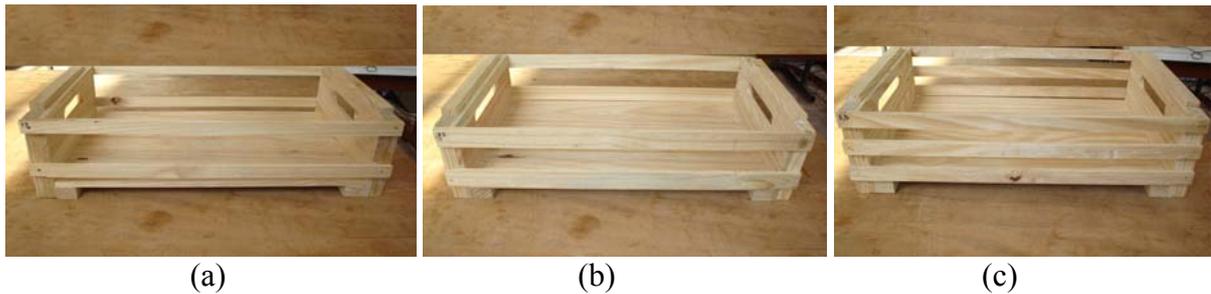


Figura 4. Modelos de caixas de madeira. (a) Modelo A (54% área efetiva abertura); (b) Modelo B (36% área abertura); (c) Modelo C (36% área abertura) (Chacon, 2006).

Otimização estrutural: para a análise e otimização estrutural aplicou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), implementado através do programa computacional ANSYS 9.0, para o dimensionamento e otimização estrutural dos modelos de caixas propostos. Quando aplicado à análise estrutural, o MEF tem como objetivo obter uma aproximação do comportamento do meio elástico contínuo através da sua discretização em um número finito de elementos. O domínio do problema é representado por uma série de subdomínios simples, chamados elementos finitos, que se interconectam em pontos discretos da estrutura, denominados nós. 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.

A aplicação do MEF consiste na busca de uma solução aproximada u para a formulação diferencial que descreve o fenômeno físico de interesse (Cook et al., 1989):

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

onde μ_j são os valores de u em cada nós e Ψ_j as funções de interpolação (adimensional).

Na análise estrutural, u corresponde, via de regra, aos deslocamentos nodais induzidos pela deformação da estrutura. Sobre cada elemento finito, o processo físico é aproximado por funções do tipo polinomial. São desenvolvidas equações algébricas relacionando quantidades físicas em pontos selecionados do elemento, os nós. As equações dos elementos são reunidas, usualmente pelas propriedades da continuidade do fenômeno. O sistema de equações algébricas lineares resultantes foi:

$$\{f\} = [K]\{a\} \quad (2)$$

onde $[K]$ é a matriz de rigidez global; $\{f\}$ o vetor de carga global e $\{a\}$ a matriz coluna dos deslocamentos nodais do meio elástico discretizado.

A otimização estrutural do projeto corresponde à integração e automatização do ciclo clássico de análise - avaliação - modificação. Na procura do projeto ótimo, utilizam-se três tipos de variáveis: i- variáveis de projeto, independentes, que assumem valores numéricos alterados a cada ciclo de otimização; ii- variáveis de estado ou restrições, que determinam os limites de variação das variáveis de projeto em função de critérios pré-definidos e iii- função objetivo, variável dependente que deve ser maximizada ou minimizada em função dos objetivos do projeto (Arora, 1989).

A formulação matemática de um problema de otimização estrutural pode ser feita determinando o vetor de n componentes $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, de variáveis de projeto (espessura das laterais, testeiras, do fundo, altura e base da seção transversal das colunas) que minimize a função objetivo $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sujeita a p restrições de igualdade: $h_j(x) \equiv h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, $j = 1$ à p e m restrições de desigualdade: $g_i(x) \equiv g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$, $i = 1$ à m . Neste trabalho estabeleceram-se apenas restrições de desigualdade (tensão máxima, flexões nas laterais e fundo das caixas e espessuras das laterais e testeiras).

- **Modelos de rigidez adotados:** para a modelagem das paredes laterais e do fundo das embalagens, adotou-se um elemento de placa, com oito nós e 6 graus de liberdade por nó (SHELL 93); para a modelagem das colunas, adotou-se um elemento de viga, com 2 nós e 6 graus de liberdade por nó (BEAM 4). Ambos os elementos são da biblioteca do programa de elementos finitos ANSYS 9.0.

- **Variáveis de projeto, restrições e função objetivo:** Os valores iniciais das variáveis de projeto adotadas foram: espessura das laterais, do fundo e das testeiras de 10 mm; base da seção transversal das colunas de 30 mm e altura da seção transversal das colunas de 20 mm.

Impôs-se o limite de 10 MPa para o valor das tensões equivalentes nos modelos e considerando-se que a resistência à compressão paralela às fibras da madeira selecionada é de 40,4 MPa, a tensão admissível adotada leva em conta um fator de segurança de 4. Impuseram-se, também, limites inferiores e superiores para as variáveis de projeto. Como função objetivo adotou-se a minimização do volume total do material construtivo e dimensões.

Os limites das variáveis de estado (restrições), para a deflexão máxima nas laterais e no fundo da caixa foi fixada em 3×10^{-3} m (3 mm), e 10 MPa de tensão máxima equivalente, que foi calculada como a relação entre a resistência à compressão paralela as fibras e o fator de segurança estabelecido. A tensão máxima equivalente foi obtida segundo o critério da tensão composta de *Von Misses*, a qual foi calculada aplicando a equação 3:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

onde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as tensões principais em MPa.

Destaca-se que a modelagem apresentada no trabalho, mais do que representar com precisão o comportamento estrutural das caixas; têm como objetivo ilustrar a aplicação do MEF e da otimização estrutural aplicada ao projeto de caixas para produtos hortícolas. Os pontos de ligação, representados fisicamente por pregos ou grampos, não foram modelados, considerando essas ligações contínuas no modelo. Os esforços dinâmicos típicos da movimentação, durante o ciclo de distribuição e armazenamento, foram considerados aproximados, incluindo uma sobrecarga estática na estrutura, como apresentado no item das condições estruturais. Os esforços horizontais oriundos da movimentação por empilhadeiras ou paletes foram considerados desprezíveis.

Resfriamento com ar forçado: foi utilizado um túnel de madeira, acoplado a um ventilador centrífugo (potência de 3,75 kW; vazão nominal de ar de $1,10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e rotação de 3.600 rpm). O túnel de resfriamento, sobre uma estrutura metálica de rodas, foi instalado dentro de uma câmara frigorífica, no Laboratório de Termodinâmica e Energia da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. O ar resfriado que sai do evaporador, succionado pelo ventilador acoplado ao túnel, atravessa o leito de frutas passando através dos orifícios das caixas, retornando pela parte posterior ao evaporador, onde novamente é resfriado. A estrutura encima de rodas permitia fazer toda a montagem experimental fora da câmara e apenas introduzir o túnel após esta, quando já a temperatura da câmara estava estabilizada em 6°C (UR= $85\% \pm 2,1\%$) (Figura 4a e 4b). Embora a temperatura recomendada para o armazenamento refrigerado de mangas seja de $12\text{-}13^\circ\text{C}$, optou-se por fazer o resfriamento das frutas com a câmara à temperatura de 6°C , pois as frutas foram resfriadas apenas até o meio tempo de resfriamento, que aproximadamente seria atingido a uma temperatura da ordem de $13,46 \pm 0,17^\circ\text{C}$.

A literatura recomenda taxas de ar entre $0,001$ a $0,006 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de produto a resfriar, mas neste trabalho por se tratar do resfriamento de uma quantidade muito pequena de frutos (6 kg por caixa), escolheu-se taxas de ar de $0,018$ e $0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por kg de manga,

visando obter uma resposta mais rápida dos frutos ao processo de resfriamento. A velocidade do ar na entrada das caixas foi em média de $0,94 \pm 0,36$ e de $1,5 \pm 0,43 \text{ m s}^{-1}$, para as duas vazões de ar.

O ventilador do sistema está acoplado a um inversor de frequência (220-330V; 28,8 A e frequência de 0-170 Hz.), permitindo trabalhar com vazões de ar variáveis. Após calcular cada valor de vazão de ar ($0,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $0,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), calculou-se o valor da velocidade de rotação do eixo do motor do ventilador (motor de 2 pólos), e a frequência correspondente a esta rotação, para programar o inversor de frequência. Para tal aplicaram-se às equações 4 e 5:

$$N_2 = N_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \quad (4)$$

$$f = \frac{(np)(N_2)}{120} \quad (5)$$

onde N_1 é a rotação nominal do ventilador em rpm; Q_1 é a vazão de ar nominal em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$; Q_2 é a vazão de ar para cada nova condição em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$; N_2 a rotação do ventilador para cada nova condição, em rpm; f é a frequência em Hz; n_p é o número de pólos do motor (adimensional).



(a) (b)
Figura 5 – (a) Túnel de resfriamento com caixa desenvolvida contendo as frutas; (b) Sentido do fluxo de ar atravessando o leito de frutas (Chacón, 2006).

Foram adquiridas 32 caixas de manga da variedade Tommy Atkins (*Mangifera Indica* L), contendo cada uma 6 kg de frutas, diretamente de um produtor na CEASA de Campinas. As mangas foram transportadas até o laboratório nas caixas de papelão, onde foram mantidas à temperatura ambiente. As frutas foram selecionadas por tamanho e grau de maturação (cor vermelho-amarelo). Estas eram retiradas das caixas e acondicionadas nas caixas de madeira, respeitando o mesmo arranjo e distribuição que trouxeram do produtor (12 frutos por caixa, numa única camada). Em seguida eram inseridos os termopares nas mangas de duas caixas, do mesmo modelo, as quais eram resfriadas por vez, cobertas com um plástico, na parte superior e fechando também as aberturas existentes entre a caixa e o túnel. Com esta montagem a passagem do ar pelo leito ficava restrita apenas às aberturas da caixa.

Também foram feitos experimentos acondicionando as 6 kg de frutas em caixas de papelão, onde originalmente elas estavam sendo comercializadas na CEASA/Campinas, com dimensões de 0,45 x 0,26 x 0,11 m (muito próximas das dimensões das caixas de madeira) e quatro orifícios ovais nas duas laterais da caixa (Figura 1c). Os ensaios com esta caixa foram feitos para duas condições: para caixas com 7% de área efetiva de abertura (orifícios desimpedidos) e para 0% de área efetiva de abertura (orifícios impedidos).

Para facilitar a apresentação e discussão dos resultados foi estabelecida a seguinte nomenclatura para todas as caixas:

- **Caixa A - 54**: caixa modelo A com 54% de área efetiva de abertura; - **Caixa B - 36**: caixa modelo B com 36% de área efetiva de abertura; - **Caixa C - 36**: caixa modelo C com 36% de área efetiva de abertura; - **Caixa D - 0**: caixa de papelão com 0% de área efetiva de abertura; - **Caixa D - 7**: caixa de papelão com 7% de área efetiva de abertura.

A medição das dimensões das mangas foi feita com paquímetro digital, determinando o diâmetro dos frutos no sentido transversal (d_1) e longitudinal (d_2), próximo ao caroço, o que permitiu selecionar as mangas com o diâmetro mais próximo ao valor médio. Foi medida a profundidade no diâmetro transversal até a região do centro das frutas, antes do caroço, para

inserir os termopares. O diâmetro médio das frutas foi de $83 \pm 3,67$ cm (Figura 6a).

Para determinar a temperatura durante o processo de resfriamento, foram inseridos na polpa das mangas, aproximadamente no centro, termopares do tipo T (Cobre-Constantan, AWG 24), previamente calibrados ($0,15^\circ\text{C}$), ligados a um sistema de aquisição de dados por computador. O sistema está constituído por uma placa de condicionamento de sinais analógicos, conversor de sinais com 32 canais de entrada e um *software* de aquisição e monitoramento de sinais. O sistema de aquisição foi programado para gravar as leituras de temperatura a cada um minuto. Este *software* permite o monitoramento em tempo real do processo de resfriamento através de gráficos, gerando um arquivo de dados para posterior processamento.

A temperatura do ar de resfriamento também foi monitorada, através de dois termopares colocados na entrada e na saída do túnel de ar forçado. Foi monitorada a temperatura em seis frutas por caixas, em posições que coincidiam com a entrada e saída do ar de resfriamento da caixa, três frutas em cada posição, determinando-se posteriormente o tempo médio de resfriamento das frutas (Figura 6b).

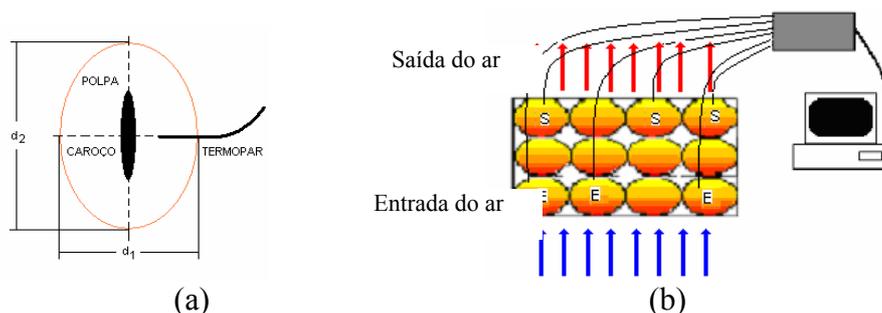


Figura 6. (a) Esquema da seção transversal do fruto onde foram inseridos os termopares (d_1 - diâmetro longitudinal; d_2 - diâmetro transversal); (b) Sistema de aquisição de dados e posicionamento dos termopares dentro da caixa (Chacón, 2006).

O tempo de meio resfriamento foi determinado através do cálculo da Taxa de Resfriamento (TR) (Equações 6 e 7), com os dados de temperatura da polpa dos frutos e do meio tempo de resfriamento (Moshenin, 1980).

$$t_{1/2} \equiv \frac{\ln 2}{TR} \quad (6)$$

$$TR \equiv \frac{\frac{T_i - T_f}{t_f}}{\ln \frac{T_i - T_a}{T_f - T_a}} \quad (7)$$

onde $t_{1/2}$ é o tempo de meio resfriamento em min; TR é a taxa de resfriamento em min^{-1} ; T_i é a temperatura inicial da polpa do fruto em $^{\circ}\text{C}$; T_f é a temperatura final da polpa do fruto em $^{\circ}\text{C}$; t_f é o tempo do processo de resfriamento em min e T_a é a temperatura do ar de resfriamento em $^{\circ}\text{C}$.

Após os ensaios de resfriamento as caixas foram acondicionadas sob uma mesa vibratória com deslocamento vertical de $\pm 10^{-3}$ m (1 mm), com o objetivo de aplicar um esforço mecânico para simular o efeito da vibração, produzida pelos desníveis das estradas no país durante o transporte. A frequência estabelecida foi de 20 Hz, equivalente a 2 vezes o valor da aceleração da gravidade.

Nove caixas de madeira, contendo 6 kg de frutas cada uma, foram empilhadas e fixadas com cordas nos extremos, da mesma forma que são colocadas nas carretas, ligando o sistema por um período de duas horas. Após a vibração as caixas com as frutas foram armazenadas por sete dias à temperatura e umidade ambiente no laboratório.

A avaliação das frutas foi feita visualmente, observando e comparando todas elas a cada dia, com as frutas contidas numa caixa que não foi submetida à vibração. A comparação foi feita com relação ao aparecimento de danos mecânicos visíveis, como cortes, vincos e amassamentos, provocados pelo atrito e encostamento das frutas nas ripas. Após cada avaliação todas as frutas eram pesadas numa balança mecânica (precisão de 5 g), determinando-se as perdas de peso das mangas após os sete dias de armazenamento com relação ao peso inicial.

Foi aplicado um delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5×2 , com três repetições, perfazendo 30 tratamentos, para testar o efeito da área efetiva de aberturas e da vazão do ar, sobre o tempo de meio resfriamento (variável de resposta). Foram submetidas aos ensaios de resfriamento frutas condicionadas nas três caixas de madeira, duas de papelão (A-54, B-36, C-36, D-7, D-0) e duas vazões de ar ($0,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $0,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). A ordem de realização dos experimentos foi aleatorizada. Foi aplicada a análise

de variância (ANOVA) e teste Tukey para a comparação das médias, para 5% de probabilidade estatística. Os dados foram analisados usando o programa estatístico *Statgraphics*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios da taxa e do tempo de meio resfriamento para todos os modelos de todos os experimentos. As frutas partiram de uma temperatura inicial de $20,97 \pm 0,35^\circ\text{C}$ e atingiram o meio resfriamento quando a temperatura, nas seis frutas monitoradas, foi em média de $13,46 \pm 0,17^\circ\text{C}$. A análise estatística do meio tempo de resfriamento das frutas acondicionadas nas caixas de madeira (A-54, B-36 e C-36), não revelou diferença significativa (diferença média no tempo de resfriamento de 7% entre os três modelos) (Tabela 3).

A não existência de diferença no tempo de resfriamento entre os modelos desenvolvidos deve ter sido influenciada pelo fato de que nas caixas possuíam um arranjo de apenas uma camada de frutas. A distribuição das ripas deve ter contribuído para que uma grande parcela da vazão de ar atravessa-se o leito de frutas e banha-se de forma homogênea o mesmo, pois as configurações das caixas foram muito semelhantes.

Já entre os modelos de madeira e as caixas de papelão (D-7 e D-0), a diferença foi significativa, com tempo de resfriamento de 1,7 a 2,7 vezes maiores, representando diferença de 39 a 63% com relação às caixas de madeira (Tabela 3). Estes resultados mostram o quanto ineficiente são as caixas de papelão com relação ao resfriamento e a importância de que os orifícios sejam desimpedidos, pelo pessoal responsável de montar as caixas.

Tabela 2. Taxa de resfriamento e meio tempo de resfriamento das mangas acondicionadas nos diferentes modelos de caixas.

Modelo de	I*	II**	I*	II**
	TR (min^{-1})	$t_{1/2}$ (min)		
A-54	0,0161	0,0203	43,05	34,15
B-36	0,0177	0,0210	39,16	33,01
C-36	0,0157	0,0201	44,15	34,49
D-7	0,0103	0,0123	67,30	56,35
D-0	0,0061	0,0074	113,63	93,67

* $0,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e ** $0,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

A análise estatística mostrou que a vazão de ar e a área de abertura exercem influência significativa no tempo de resfriamento, (modelos de madeira comparados com papelão, e modelos de madeira comparados entre si), sendo o tempo menor quando a vazão de ar foi maior. A distribuição das aberturas assim como a percentagem deve estar de acordo com o tipo de produto a resfriar, a vazão de ar aplicada e tipo de material construtivo, como discutido em outros trabalhos (Baird et al., 1988; Émond et al., 1996; Teruel et al., 2002; Vigneault et al., 2006).

Tabela 3. Valores da análise estatística pelo Teste de Tukey de todos os experimentos.

Modelo de caixa	Tempo médio de resfriamento (min)
A-54	38,60 a*
B-36	36,08 a
C-36	39,32 a

D-7	61,82	b
D-0	103,65	c

*Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey (5% de probabilidade).

Embora entre as três caixas de madeira não houve diferença significativa no tempo de resfriamento, optou-se por escolher para o estudo estrutural e de otimização o modelo B-36, com 36% de área efetiva de abertura, e duas ripas retas de 0,03 m de largura e separadas uma da outra em 0,04 m. Neste modelo as frutas atingiram o meio de tempo de resfriamento, em média, em $38,0 \pm 1,70$ min. Do ponto de vista construtivo, o fato de possuir apenas duas ripas facilita a construção, favorece a resistência estrutural e ainda garante uma adequada área de abertura para resfriamento e ventilação.

O tempo de resfriamento tem relação direta com os custos finais. Gaffney e Bowman, (1971) determinaram o custo de resfriamento das caixas de laranjas (de 38 kg), resfriadas num sistema com ar forçado. O custo por caixa oscilou entre US\$ 0,53 e US\$ 0,62 dependendo da forma em que foram acondicionadas as caixas no interior da câmara.

Baird et al., (1988), obtiveram valores por caixa, de R\$ 0,38 e R\$ 0,75, para caixas com 5% até 1% de área efetiva de abertura. O tempo de resfriamento, num sistema de ar forçado, variou de 3,5 a 6 horas.

Teruel et al., (2002), mostraram que o custo de resfriamento de laranjas Valência, resfriadas em caixas de papelão (3% de área efetiva de abertura) e em caixas plásticas (40% de área efetiva de abertura), foi de R\$ 0,27 e R\$ 0,41, por caixa, diferença de 52%.

Ao final da rotina de otimização no nível de pós-processamento, visualizaram-se os resultados obtidos em cada *loop*. Na Tabela 4 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, onde o conjunto convergiu, obtendo os valores otimizados da função objetivo e das variáveis de projeto, atendendo às restrições impostas no item 2.4. Como o limite imposto às tensões foi de 10 MPa, a rotina de otimização buscou reduzir os valores iniciais das variáveis de projeto até que as tensões se aproximassem da restrição adotada como no caso das espessuras das paredes e no fundo da caixa estabelecidas em 3×10^{-3} m.

Tabela 4. Parâmetros de otimização da caixa B-36.

Caixa B-36	Condição inicial	Condição otimizada
Volume (m ³)	$2,88 \times 10^{-3}$	$1,16 \times 10^{-3}$
Espessura das laterais (m)	0,01	$8,54 \times 10^{-3}$
Espessura do fundo (m)	0,01	$3,00 \times 10^{-3}$
Espessura da testeira (m)	0,01	$3,00 \times 10^{-3}$
Base da seção transversal das colunas (m)	0,03	0,01
Altura da seção transversal das colunas (m)	0,03	0,01
Deflexão máxima das laterais (m)	$6,4 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-3}$
Deflexão máxima do fundo (m)	$-7,0 \times 10^{-5}$	$-9,9 \times 10^{-4}$
Tensão máxima equivalente (MPa)	11,33	9,76

As dimensões otimizadas permitiram uma redução significativa das variáveis de projeto: espessura da parede lateral da caixa, espessura do fundo das caixas, espessura das testeiras das caixas, base da seção transversal das colunas, altura da seção transversal das colunas e da função objetivo (volume de material).

A espessura da parede lateral, que no conjunto inicial de projeto foi atribuído o valor de 0,01 m (10 mm), no conjunto ótimo foi obtido o valor de $8,54 \times 10^{-3}$ m (8,54 mm), uma redução na espessura de aproximadamente 15%. A espessura do fundo e da testeira da caixa, ao qual foi atribuído inicialmente de 0,01 m (10 mm), após a rotina de otimização obteve-se o valor de 3×10^{-3} m (3 mm), uma redução de 70 %. As dimensões da altura e da base da seção transversal das colunas reduziram-se, de 0,02 m (20 mm) e 0,03 m (30 mm), para 0,01 m (10 mm), uma redução nas dimensões de seção das colunas de 50 e 67%, respectivamente e uma redução de 83% da área da seção transversal.

A redução do volume de material 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 em 60 %, com relação ao volume inicial.

Na Figura 7a apresenta-se a deflexão nas paredes laterais, como resultado das condições impostas, considerando a provável pressão exercida pelos frutos numa condição crítica. Através do código de cores (cada tonalidade de cor corresponde a regiões de isotensão, expresso em metros), podem-se visualizar as regiões de máxima deflexão, observando-se que há uma zona crítica nas ripas superiores, à diferença das ripas inferiores, que não apresentaram deflexão considerável, encontrando-se relativamente descarregadas. As colunas absorvem a maior parte das tensões de empilhamento, aliviando as laterais, já que disposição das fibras de madeira das colunas, que trabalham sob compressão paralela, é favorável à absorção das tensões.

A deflexão nas ripas superiores foi da ordem de $1,8 \times 10^{-3}$ m (1,8 mm), valor pequeno considerando que a maior parte do comprimento das ripas superiores mantém-se descarregadas, confirmando a eficiência da concepção estrutural e do uso da ferramenta computacional, para simular os comportamentos aproximados das caixas, atendendo às restrições impostas no projeto.

A deflexão máxima do fundo foi de $9,9 \times 10^{-4}$ (0,99 mm), um valor 67% menor que o limite imposto nas restrições (3×10^{-3} m) e $9,2 \times 10^{-4}$ m maior que a condição inicial ($7,0 \times 10^{-5}$). Este aumento deveu-se à diminuição da espessura do fundo da caixa, que na otimização foi de 0,01 m para 3×10^{-3} m.

Na Figura 7b podem ser visualizadas as tensões calculadas (tensão equivalente de “Von Misses”) e as regiões críticas, que tiveram tensões máximas da ordem de 9,76 MPa, não ultrapassando o valor limite imposto nas restrições (10 MPa). Estas zonas estão localizadas nos cantos superiores da caixa, coincidindo na região de junção das colunas com as paredes laterais. Estas regiões críticas devem-se à descontinuidade do material construtivo, em função da transição das laterais para as testeiras.

Castro et al. (2004), desenvolveram um projeto de caixas de madeira para 13 kg de bananas, utilizando também o conceito de coluna. As caixas foram construídas de *Pinnus Elliotti*, e após a otimização estrutural (aplicando MEF e um programa implementado no ANSYS 5.4), a redução de material foi da ordem de 68%, para uma tensão limite imposta de 5 MPa. Posteriormente as caixas foram submetidas a ensaios de compressão dinamométrica, seguindo as normas vigentes, e a ruptura das caixas aconteceu para cargas entre 5400 N e 8100 N, valores 3 a 4 vezes maiores que a condição imposta no projeto de otimização (2000 N). Estes resultados mostram que mesmo com a redução do volume de material as caixas são capazes de suportar grandes cargas de empilhamento.

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 de $50 \pm 10,1$ % (mês de setembro de 2006), com temperaturas de ordem de $25 \pm 5,5$ °C.

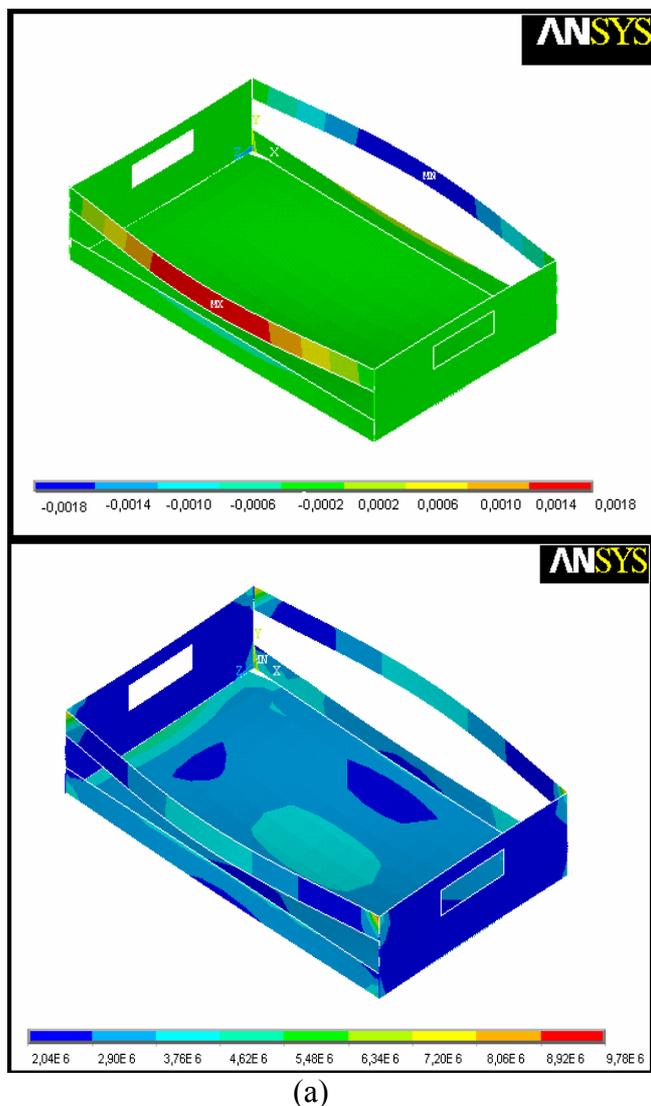


Figura 7. (a) Deflexão nas paredes laterais da caixa B-36 (m); (b) Tensão equivalente de “Von Misses” (Pa).

Algumas das mangas apresentaram apodrecimento na zona em torno dos orifícios provocados pela inserção dos termopares, produto da degradação dos tecidos nessa região. 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).

CONCLUSÕES

A metodologia de projeto para caixas de madeira, com auxílio de ferramentas computacionais, mostrou-se adequada, permitindo grande flexibilidade na escolha das variáveis do projeto, assim como o estudo estrutural e otimização das caixas, com grande aproximação às condições reais.

Apresenta-se um protótipo de caixa de madeira para manga, paletizável, adequada à cadeia do frio, com volume e dimensões otimizadas, desenho com ripas retas e resistência estrutural adequada para suportar a paletização, o armazenamento e as pressões laterais provenientes da movimentação.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa (Processo no. no.504454/2003-0).

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahão, R. F.; Fonseca, E. Metodologia para o projeto otimizado de embalagens de frutas e hortaliças. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 31, 2002, Salvador-BH. Anais. 2002.
- Almeida, C. O. Uso de embalagem e rotulagem em frutas e hortaliças: agora é lei!. Bahia Agrícola, Bahia, v.6, n.2, p. 17-18, 2004.
- Araújo, J. L. P. Mercado e Comercialização da Manga. Cultivo da Manga. Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Manga/CultivodaMangueira/mercado.html>> Acesso em jun. de 2006.
- Arora, J.S. Introduction to optimum design. 1 Ed. New York: Mc Graw-Hill, 1989. 625 p.
- 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. Design criteria for efficient and cost effective forced-air cooling systems for fruits and vegetables. ASHRAE Transactions, v.94, p.1434-1453, 1988.
- Brosnan, T.; Sun, D.W. Precooling techniques and applications for horticultural products- a review. International Journal of Refrigeration. v.24, p.154-170, 2001.
- Castro, E. C.; Abrahão, R. F. ; Teruel, B. J. Projeto estrutural otimizado de embalagens de produtos hortícolas adequadas ao resfriamento com ar forçado. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 2004, São Pedro-SP. Anais. 2004.
- CEAGESP. A embalagem de manga: um exemplo de desrespeito ao mercado interno. Disponível: www.ceagesp.gov.br/qualidade/tecnicas/estudos/anexos/a_embalagem_de_manga_pdf/download> Acesso em ago. 2006.
- Chacón, F. Z. Projeto de caixas de madeira para manga (*Magifera Indica* L.). 2006. 98p. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Coelho 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.
- Cook, R.D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E. Concepts and applications of finite element analysis. 3^a. ed. University of Wisconsin, Madison, 1989. 629p.
- Cortez, L. A. B; Sylvio L. Honório; Neves Fo., L. C. 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. 428 p.
- Émond, J.P., Mercier, F., Sadfa, S.O., Bourr'E, M., Gakwaya, A. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced-air precooling of strawberry. Transactions of ASAE, v.39, n.6, p. 2185–2191, 1996.

- 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 of Agriculture. 1971.
- Gonçalves R., de Barros, C. F. Impermeabilização da madeira com resina derivada de óleo de mamona visando sua utilização em embalagens. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA-CONBEA, 2006, João Pessoa-PB. Anais. 2006.
- Kader, A. A. Postharvest technology of horticultural crops. 3.ed. Division of Agriculture and Natural Resources. Davis: University of California, n. 3311, 2002. 295p.
- Mohsenin, N. N. Thermal properties of foods and agricultural materials. New York. USA. 1980.405 p.
- Talbot, M. T.; Chau, K. V. Precooling strawberries. Institute o Food and Agricultural Sciences. University of Florida. Circular 942. 1991. 8 p.
- Teruel, M. B.; Cortez, L. B.; Leal, P.; Lima, A. G. Estudo teórico do resfriamento com ar forçado de frutas de geometrias diferentes. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, SP, v.21, n.2, p.228 – 235, 2001.
- Teruel, M. B. ; Cortez, L. A.; Leal, P. M.; Neves Fo. L.C. Avaliação preliminar dos custos de resfriamento de laranja *in natura*. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, SP, v.24, p. 86 – 90, 2002.
- Vigneault, C.; Bordin, M.R; Abrahão, R.F. Embalagem para Frutas e Hortaliças. In: Resfriamento de Frutas e Hortaliças, Embrapa Hortaliças, Brasília-DF, 2002. 428 p.
- 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.