

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

Project of wooden boxes for mangoes (*Mangifera Indica* L.)

Bárbara Janet Teruel¹, Neil Fernando Salazar Chacón², Roberto Funes Abrahão³

RESUMO

As perdas de produtos hortícolas no Brasil são significativas e dentre as causas cita-se o uso de caixas inadequadas e ausência da cadeia do frio. Propõe-se um método de projeto de caixas, baseado em simulação computacional, otimização e validação experimental, minimizando o volume de madeira, associado a aspectos estruturais, ergonômicos e distribuição da área de aberturas. Foram projetados e construídos três protótipos de caixas (ripas retas com diferentes configurações e área efetiva de abertura de 54% e 36%). A eficiência do resfriamento de mangas variedade Tommy Atkins (*Mangifera Indica* L.), foi avaliada determinando o tempo de resfriamento, acondicionando as frutas nas caixas de madeira desenvolvidas e de papelão usadas comercialmente, resfriadas com ar forçado à temperatura de 6°C e umidade relativa média de 85,4±2,1%. Foi aplicado o Método de Elementos Finitos, para dimensionamento e otimização estrutural do modelo com melhor comportamento durante o resfriamento. Todas as caixas de madeira foram submetidas a ensaios de vibração, por duas horas (frequência de 20 Hz). Não houve diferença significativa no tempo de resfriamento das frutas nas caixas de madeira (38,00±1,70 min), no entanto houve diferença significativa nas caixas de papelão (82,74±29,58 min). O modelo submetido à otimização estrutural (6% área efetiva e duas ripas laterais) teve diminuição de volume de 60% e 83% de redução da seção transversal das colunas, com relação às condições iniciais. Não houve incidência de danos de mecânicos nas frutas após a vibração. A simulação computacional e estrutural pode ser ferramenta de apoio para desenvolver projetos de caixas, com grande aproximação, atendendo a critérios geométricos, ergonômicos e térmicos.

Termos para indexação: Otimização estrutural, área de aberturas, ar forçado, tempo de resfriamento, vibração.

ABSTRACT

Losses of horticulture product in Brazil are significant and among the main causes are the use of inappropriate boxes and the absence of a cold chain. A project for boxes is proposed, based on computer simulations, optimization and experimental validation, trying to minimize the amount of wood associated with structural and ergonomic aspects and the effective area of the openings. Three box prototypes were designed and built using straight laths with different configurations and areas of openings (54% and 36%). The cooling efficiency of Tommy Atkins mango (*Mangifera Indica* L.) was evaluated by determining the cooling time for fruit packed in the wood models and packed in the commercially used cardboard boxes, submitted to cooling in a forced-air system, at a temperature of 6°C and average relative humidity of 85.4±2.1%. The Finite Element Method was applied, 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 two hours (20 Hz). There was no significant difference in average cooling time 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). In the model chosen for structural optimization (36% effective area of openings and two side laths), the reduction in total volume of material was 60% and 83% in the cross section of the columns. There was no indication of mechanical damage in the fruit after undergoing the vibration test. Computer simulations and structural study may be used as a support tool for developing projects for boxes, with geometric, ergonomic and thermal criteria.

Index terms: Structural optimization, effective area of openings, forced-air cooling, cooling time, vibration.

(Recebido em 10 de abril de 2007 e aprovado em 6 de agosto de 2008)

INTRODUÇÃO

Foram produzidas no mundo, em 2004, 24 milhões de toneladas de manga, enquanto o Brasil produziu cerca 842 mil toneladas, sendo o nono produtor mundial (Araújo, 2006) tornando a manga a segunda fruta tropical mais produzida no mundo, superada apenas pela banana. Com

relação à exportação do Brasil, tem havido incremento significativo, passando de 4 mil toneladas, em 1991, para quase 111 mil toneladas em 2004, garantindo o segundo lugar entre os maiores exportadores, sendo superado apenas pelo México (Lima et al., 2006).

Entretanto, a falta de cuidados, principalmente na pós-colheita, resulta em perdas consideráveis. Dentre os

¹Engenheira Mecânica, Doutora – Conselho Integrado de Infra Estrutura Rural/CIIR – Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP – Av. Candido Rondon, 501, Barão Geraldo, Cidade Universitária Zeferino Vaz – Cx. P. 6011 – 13083-875 – Campinas, SP – barbarat@feagri.unicamp.br.

²Engenheiro Industrial, Mestre em Engenharia Agrícola – Faculdade de Ciências e Engenharia – Pontifícia Universidade Católica Del Perú – Av. Universitária 1801 San Miguel, Lima 32 – Peru – neilsalazar@hotmail.com.

³Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Mecânica – Conselho Integrado de Infra Estrutura Rural/CIIR – Universidade Estadual de Campinas/ UNICAMP – Av. Candido Rondon, 501, Barão Geraldo, Cidade Universitária Zeferino Vaz – Cx. P. 6011 – 13083-875 – Campinas, SP – roberto@feagri.unicamp.br.

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 delas, dificultando o processo 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, provocada pela alta umidade relativa do ar, quando submetidas ao empilhamento e armazenamento refrigerado (Almeida, 2004).

Além das funções de contenção e proteção das frutas durante o transporte, pode-se agregar um atributo desejável, a facilitação de tratamentos específicos de pós-colheita, em particular o resfriamento do produto (Vigneault et al., 2002). Com o cumprimento destas premissas, 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 imprescindível para a eficiência do resfriamento, sendo esse 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, a manutenção da mesma, durante o armazenamento e transporte frigorificado (Cortez et al., 2002; Kader, 2002).

Os custos de resfriamento também têm uma relação direta com a área efetiva de abertura das caixas, diminuindo consideravelmente quando a área de abertura é adequada para garantir um resfriamento eficiente, tanto pela retirada do calor de respiração como o contido nas frutas ao início do processo (Baird et al., 1988; Brosnan & Sun, 2001; Teruel et al., 2001, 2002; Vigneault et al., 2006).

Ainda no Brasil é amplamente difundido o emprego de madeira na construção de caixas para manga no mercado interno. As principais vantagens são o preço baixo e elevada resistência. Em razão das características de resistência, as caixas de madeira são geralmente reutilizadas, porém, elas não possibilitam os processos de limpeza ou desinfecção, tornando-se um importante veículo de contaminação. Possuem também problemas com acabamento, sendo responsáveis pela maioria dos danos mecânicos provocadas nas frutas.

O projeto e desenvolvimento de caixas de madeira, otimizadas do ponto de vista geométrico, estrutural e térmico, é uma iniciativa que contribui para a redução de perdas pós-colheita e aumento da vida útil de produtos hortícolas. Apresenta-se um estudo mostrando a aplicabilidade do Método dos Elementos Finitos para a otimização de caixas de madeira para manga. As caixas foram construídas e as frutas submetidas a ensaios de resfriamento com ar forçado, otimização estrutural para minimização do volume de material e ensaios de vibração.

MATERIAL E MÉTODOS

Caixas para transporte de mangas

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 papelão, encontrando-se dificuldades que afetam a qualidade, vida útil e comercialização das frutas. Visitaram-se as dependências da Central de Abastecimento de Campinas (CEASA), fazendo um levantamento de informações com produtores e atacadistas.

As caixas de madeira utilizadas são do tipo M e K, fabricadas em madeira bruta, sem tratamento, provocando danos mecânicos aos frutos. Tanto nas caixas de madeira como de papelão, a área de abertura é insuficiente ou inexistente, impedindo a ventilação e resfriamento eficiente. Para frutas climatéricas, como a manga, a falta ou insuficiência de aberturas torna-se um fator de aceleração do amadurecimento e perda de qualidade, já que, no mínimo, a área efetiva de abertura deve ser de 5% (Kader, 2002).

Constatou-se que, embora as caixas de papelão tenham orifícios, muitas vezes eles se mantêm impedidos, sem retirar os cortes dos orifícios antes do uso, o que se traduz em área efetiva de abertura nula. Foi observada a perda de resistência estrutural durante o empilhamento de caixas de papelão, provocando amassamentos e danos mecânicos nos frutos. Por outro lado, as caixas de madeira, não são ergonomicamente adequadas, com falta de alças e/ou dimensões inadequadas, afetando o manuseio.

Projeto de caixas para transporte para produtos hortícolas

Na metodologia de projeto de caixas de transporte, incluem-se várias etapas, dentre elas: a)- estudo e definições iniciais que contemplam a definição dos fatores que não podem ser alterados durante o processo iterativo no projeto; b)- projeto das caixas, contemplando os aspectos geométricos, estruturais e ergonômicos, e dimensionamento das caixas; c)- construção, onde os protótipos são construídos e devem ser submetidos a ensaios de campo ou de laboratório (Vigneault et al., 2002). A seguir são apresentados os dados, condições e considerações feitas neste trabalho em cada uma das etapas do projeto.

a) Estudos iniciais

- **Características do produto:** manga variedade Tommy Atkins, temperatura de armazenamento de 12-13°C e umidade relativa 85%, recomendando-se o tempo máximo de armazenamento de três 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 fossem construídas com tábuas de madeira de reflorestamento, da espécie *Pinus elliottii* Engelman. (0,01 m de espessura). Propõe-se este material, 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 (processo de corte com facas especiais), para reduzir os danos mecânicos nas frutas. Adotaram-se os valores de resistência e rigidez da madeira *Pinus elliottii* para caracterizar os modelos de caixas. Os valores adotados foram: a)- massa específica aparente (12% umidade) de 560 kg m⁻³; b)- resistência à compressão paralela às fibras de 40,4 MPa; resistência à tração paralela e normal às fibras de 66,0 MPa; c)- Resistência ao cisalhamento de 7,4 MPa; d)- módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras de 11.889,0 MPa (ABNT, 1997).

b) Projeto

- **Aspecto geométrico:** definiu-se o desenho das caixas com 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 (dimensões do paletão padrão de 1 m x 1,2 m). As dimensões das caixas foram fixadas em: a)- largura - 0,3 m; b)- comprimento - 0,5 m e c)- altura - 0,13 m. Considerou-se que o paletão teria uma altura correspondente a 10 caixas empilhadas, com altura total de 1,45 m.

Procedeu-se então, a definição da quantidade de ripas e espaçamento entre elas, definido como: 0,05 m (5 cm); 0,04 (4 cm) e 0,02 cm (2 cm), desenvolvendo caixas com dois e três ripas e um e dois espaçamentos entre estas. Foram obtidas três configurações com duas áreas efetivas de abertura (54 e 36%, com relação à área das faces laterais das caixas) 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. 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 do produto. A área efetiva de aberturas 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. Essa área também pode ser determinada com relação à área total da embalagem, neste caso a área seria de 27 e 18%.

- **Aspecto ergonômico:** Abrahão & Fonseca (2002) recomendam para alças abertura de 0,4 m x 1,15 m (40 x 115 mm), que sejam 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. Foram determinadas as dimensões das alças (30 mm 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, permitindo que o peso das caixas e efeitos da compressão sejam absorvidos por estas, liberando as laterais, evitando assim falhas na resistência estrutural e danos mecânicos ao produto.

Para a otimização foram consideradas as cargas aplicadas na condição estática e dinâmica às quais 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 paletão, 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 (Figura 1a). Para levar em conta o aspecto dinâmico, foram consideradas duas situações: uma primeira situação na qual os frutos são subitamente acelerados com 2 vezes a aceleração da gravidade (9,81 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 1b).

Estudou-se o comportamento estrutural da caixa simulando as condições de carregamento produzidas pelas mangas, assim como a carga das caixas aplicada nas colunas da caixa crítica (localizada na base do paletão), 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 a reduzir o volume de material da caixa, garantindo a resistência estrutural e a distribuição adequada das aberturas para manter a eficiência do resfriamento.

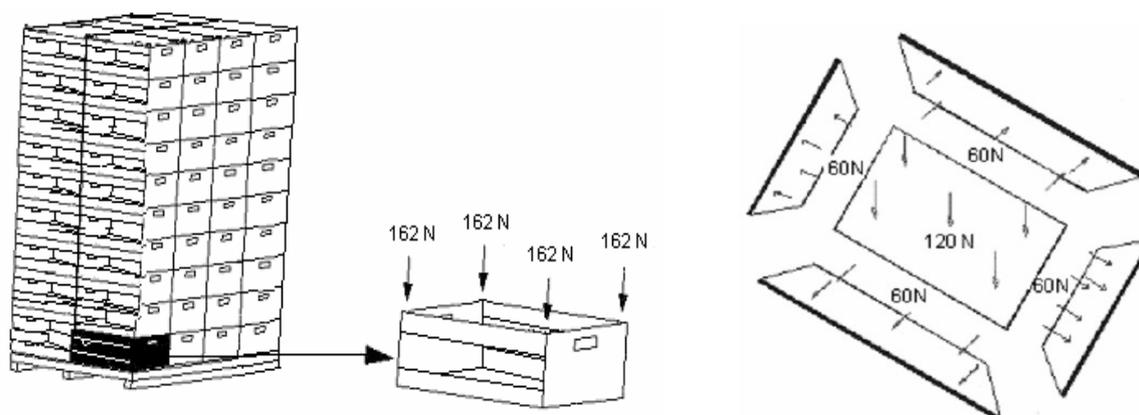


Figura 1 – (a) Desenho do palete com distribuição de cargas; (b) Cargas laterais na caixa provenientes do manuseio.

c) Construção dos protótipos

Após as definições iniciais e etapa do projeto, foram construídos três protótipos de caixas de madeira de reflorestamento *Pinus elliottii*. 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 em razão da 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 pôde ser realimentado e modificar parâmetros de algumas das etapas, para gerar um novo projeto de caixas.

Análise e otimização estrutural

Aplicou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), implementado por meio do programa computacional ANSYS 9.0, para dimensionamento e otimização estrutural do modelo escolhido. A aplicação do MEF tem como objetivo obter uma aproximação do comportamento do meio elástico contínuo, por meio 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 da 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 (adimensional) e Ψ_j as funções de interpolação.

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.

A diferença entre um projeto convencional e um projeto otimizado, é que no primeiro, após verificar se o projeto é satisfatório, este é modificado atendendo à experiência do projetista, sendo que no otimizado após a verificação dos critérios de desempenho, verifica-se se o projeto satisfaz os critérios de convergência, alterando-se o projeto utilizando um método de otimização.

Variáveis de projeto, restrições e função-objetivo

Os valores iniciais das variáveis de projeto adotadas foram: espessura das laterais, do fundo e das testeiças de 10 mm; base da seção transversal das colunas de 30 mm e altura da seção transversal das colunas de 20 mm.

Foi imposto 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 foram

fixados em 3×10^{-3} m 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 Mises*, a qual foi calculada aplicando a equação 2:

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

onde σ_1 , σ_2 , σ_3 são as tensões principais [MPa].

Destaca-se que a modelagem apresentada no trabalho, mais do que representar com precisão o comportamento estrutural das caixas, tem 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 paleteiras foram considerados desprezíveis.

Ensaios de resfriamento com ar forçado

Foi utilizado um túnel de ar forçado com 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), acoplado a um inversor de frequência. O sistema de resfriamento com ar forçado foi instalado dentro de uma câmara frigorífica, no Laboratório de Termodinâmica e Energia da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. O ar resfriado que sai do evaporador, succionado pelo ventilador acoplado ao túnel, atravessa o leito de frutas passando por meio dos orifícios das caixas, retornando pela parte posterior ao evaporador, onde novamente é resfriado. Embora a temperatura recomendada para o armazenamento refrigerado de mangas seja de 12-13°C, optou-se por fazer o resfriamento das frutas com a câmara à temperatura de 6°C (umidade relativa de $85,4\% \pm 2,1\%$), pois as frutas foram resfriadas apenas até o meio tempo de resfriamento, que aproximadamente seria atingido a uma temperatura da ordem de $13,46 \pm 0,17$ °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 a obter uma resposta mais rápida dos frutos ao processo de resfriamento. A velocidade do ar na entrada do túnel 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, medida com um anemômetro digital de fio quente.

Após calcular o 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 ventilador (motor de 2 pólos), e frequência correspondente a esta rotação, para programar o inversor de frequência. Para tal aplicaram-se às equações 3 e 4:

$$N_2 = N_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \quad (3)$$

$$f = \frac{(np)(N_2)}{120} \quad (4)$$

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

Para os ensaios foram adquiridas 32 caixas de manga da variedade Tommy Atkins, 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 dentro do laboratório. As frutas foram selecionadas por tamanho e grau de maturação (cor vermelho-amarelo), 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.

Foram feitos experimentos acondicionando as frutas em caixas de papelão, comercializadas na CEASA, com dimensões de 450 x 260 x 110 e quatro orifícios ovais nas duas laterais da caixa. 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).

A medição das dimensões das mangas foi feita com paquímetro digital, determinando o diâmetro dos frutos no sentido transversal e longitudinal, próximo do caroço,

selecionando mangas com diâmetro mais próximo do valor médio. Foi medida a profundidade na altura do diâmetro equatorial, até o caroço, para a inserção dos termopares, no centro do fruto. O diâmetro médio das frutas foi de $83 \pm 3,67$ cm.

Para determinar a temperatura durante o processo de resfriamento, foram inseridos na polpa das mangas, 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.

A temperatura do ar de resfriamento foi monitorada, por meio 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.

O tempo de meio resfriamento foi determinado por meio do cálculo da Taxa de Resfriamento (TR) (Equações 5 e 6), com os dados de temperatura da polpa dos frutos e do meio tempo de resfriamento (Moshenin, 1980).

$$t_{1/2} \equiv \frac{\ln 2}{\text{TR}} \quad (5)$$

$$\text{TR} \equiv \frac{\frac{T_i - T_f}{t_f}}{\frac{(T_i - T_a) - (T_f - T_a)}{\ln \frac{T_i - T_a}{T_f - T_a}}} \quad (6)$$

Onde: $t_{1/2}$ é o tempo de meio resfriamento, [min]; \ln é o logaritmo de 2; T_a é a temperatura do ar de resfriamento, [$^\circ\text{C}$]; T_f é a temperatura final da polpa do fruto, [$^\circ\text{C}$]; t_f é o tempo do processo de resfriamento, [min]; T_i é a temperatura inicial da polpa do fruto, [$^\circ\text{C}$]; TR é a taxa de resfriamento [min^{-1}].

Ensaio de vibração

Após os ensaios de resfriamento, as caixas foram acondicionadas sob uma mesa vibratória, com deslocamento vertical de $1,0 \pm 10^{-3}$ m (1 mm), para aplicar um esforço mecânico simulando 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.

Seis 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 todas as frutas, 72 ao todo, a cada dia, com as frutas contidas numa caixa que não foi submetida à vibração. A avaliação 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 digital (precisão de 5 g), determinando-se as perdas de peso das mangas após os sete dias de armazenamento com relação ao peso inicial.

Delineamento experimental

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 e duas vazões de ar ($0,22$ e $0,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). A ordem de realização dos tratamentos 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

Protótipos desenvolvidos

Foram construídos três modelos de caixas, com três distribuições de ripas e área efetiva de 54% (Figura 2a) e 36% (Figura 2b e 2c). Os protótipos, contendo cada um 6 kg de manga, foram submetidos a ensaios de resfriamento, e escolhido o melhor modelo com relação ao tempo de resfriamento, para a otimização estrutural, minimizando as dimensões das colunas e volume de material. 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.

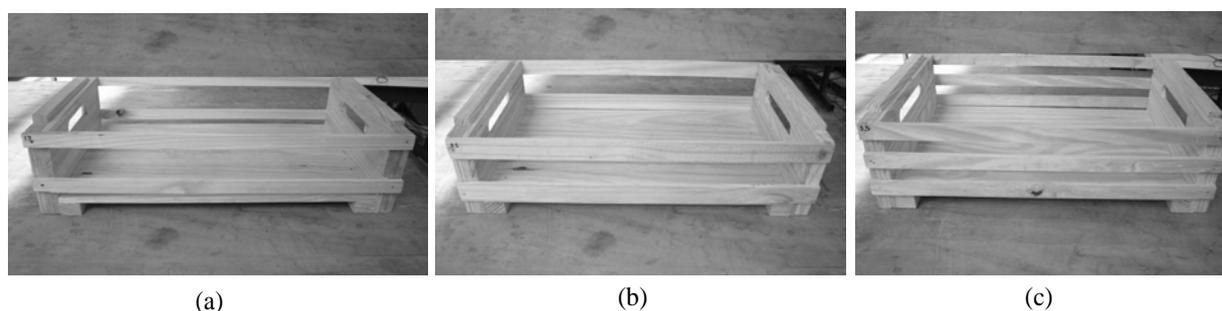


Figura 2 – Modelos de caixas de madeira. (a) modelo A (54% área efetiva abertura); (b) modelo B (36% área abertura); (c) modelo C (36% área abertura).

Resfriamento com ar forçado

Na Tabela 1, apresentam-se os valores médios da taxa e do tempo de meio resfriamento. As frutas partiram de uma temperatura inicial de $20,97 \pm 0,35^\circ\text{C}$ e atingiram o tempo de meio resfriamento quando a temperatura, nas seis frutas monitoradas, foi em média de $13,46 \pm 0,17^\circ\text{C}$. A análise estatística não revelou diferença significativa do tempo de resfriamento das frutas resfriadas nas caixas de madeira (A-54, B-36 e C-36) (Tabela 2).

A não existência de diferença no tempo de resfriamento entre os modelos desenvolvidos deve ter sido influenciada porque as frutas foram condicionadas em arranjo de uma camada, e a distribuição das ripas deve ter contribuído para que uma grande parcela de ar atravessasse o leito de frutas, escoando de forma homogênea o mesmo, pois as configurações das caixas foram muito semelhantes.

Tabela 1 – Taxa de resfriamento e meio tempo de resfriamento das mangas acondicionadas nos diferentes modelos de caixas.

Modelo de caixa	I*		II**	
	TR (min^{-1})	$t_{1/2}$ (min)	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 e ** 0,43 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

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 1,6 a 2,7 vezes maiores, representando diferença de 38 a 64% com relação às caixas de madeira (Tabela 2). Esses resultados mostram o quanto ineficiente são as caixas de papelão com relação ao resfriamento e a

importância de que os orifícios estejam desimpedidos, na montagem das caixas.

A análise estatística mostrou que a vazão de ar e 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 aumentou. A distribuição das aberturas, assim como 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 2 – Valores da análise estatística pelo Teste de Tukey.

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 tenha havido 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, 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, por 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 o custo final, como relatado em alguns trabalhos, realizados nos Estados Unidos, por Gaffney & Bowman (1971) e Baird et al. (1988). Gaffney & 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%.

Otimização estrutural

Após a otimização, visualizaram-se os resultados obtidos em cada *loop*. Na Tabela 3, 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. 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, à qual, 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, uma redução na espessura de aproximadamente 15%. A espessura do fundo e da testeira da caixa, à qual foi atribuído inicialmente de 0,01 m, após a rotina de otimização obteve-se o valor de 3×10^{-3} m, uma redução de 70%. As dimensões da altura e da base da seção transversal das colunas reduziram-se, de 0,02 m e 0,03 m, para 0,01 m, uma redução nas dimensões de seção das colunas de 50 e 67%.

A redução do volume de material da caixa contribui a um só tempo para a redução do custo da caixa, pela

Tabela 3 – 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

redução da quantidade de material utilizado, reduzindo significativamente o peso das caixas. Esse é um fator importante, ao considerarmos os aspectos ergonômicos. Nesse modelo o volume de material utilizado nas caixas foi reduzido aproximadamente em 60 %, com relação ao volume inicial.

Na Figura 3a, apresenta-se a deflexão nas paredes laterais, como resultado das condições impostas, considerando a provável pressão exercida pelos frutos numa condição crítica. Por meio 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, 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.

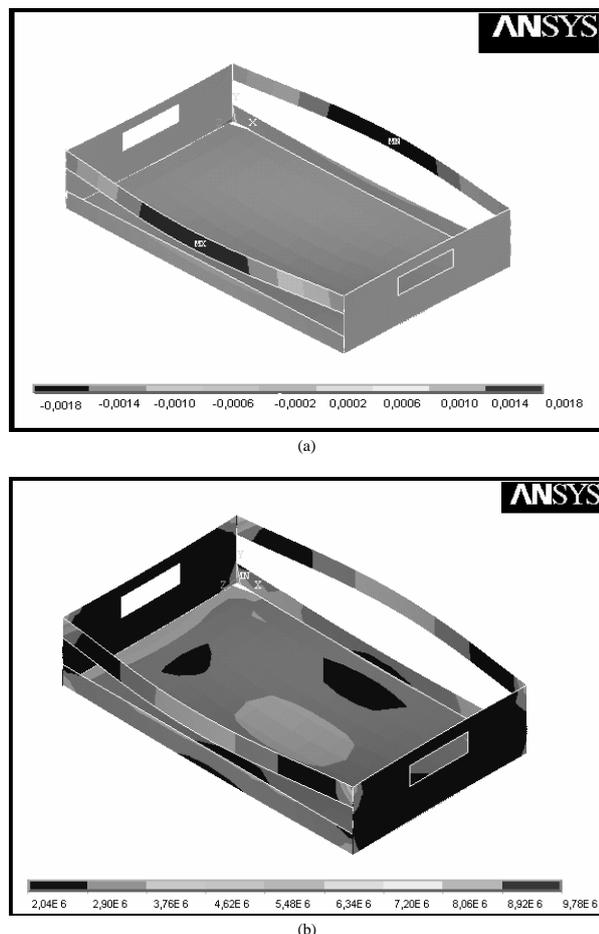


Figura 3 – (a) Deflexão nas paredes laterais da caixa B-36 (m); (b) Tensão equivalente de *Von Misses* (Pa).

A deflexão máxima do fundo foi de $9,9 \times 10^{-4}$, valor 35% menor que o limite imposto nas restrições (3×10^{-3} m) e 7% maior que as condições iniciais de otimização; $7,0 \times 10^{-5}$. Esse 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 3b, 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). Essas zonas estão localizadas nos cantos superiores da caixa, coincidindo na região de junção das colunas com as paredes laterais. Essas 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 15 kg de bananas, utilizando também o conceito de coluna. As caixas foram construídas de *Pinus elliottii*, e após a otimização estrutural (aplicando MEF e

um programa implementado no ANSYS 9.0), 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 dinâmométrica, seguindo as normas internacionais 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). Esses resultados mostram que mesmo com a redução do volume de material, as caixas são capazes de suportar grandes cargas de empilhamento.

As caixas de madeira ainda têm a limitação relacionada como a impermeabilização, mas esse inconveniente poderia ser resolvido, aplicando resina derivada de óleo de mamona. Estudos desenvolvidos por Gonçalves & Costa (2006), que impermeabilizaram tábuas de *Pinus elliottii* com esta resina, mostraram-se 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.

Ensaio de vibração

Após sete dias, a superfície das mangas que estiveram em contato com as paredes laterais e fundos da caixa e em contato com outras mangas, não apresentou danos mecânicos, quando comparadas com as frutas testemunhas, podendo afirmar que os protótipos desenvolvidos não provocaram danos mecânicos visíveis nas frutas. As frutas apresentaram perda de peso equivalente a $6,91 \pm 0,18$ %, as quais devem ter sido provocadas pelas condições ambientais no laboratório, pois a umidade relativa no mesmo apresentou valores baixos, em média de $50 \pm 10,1$ % (setembro de 2006), com temperaturas de ordem de $25 \pm 5,5$ °C.

Algumas das mangas apresentaram apodrecimento na zona em torno dos orifícios, provocado 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. No entanto, comercialmente, as mangas são condicionadas em quatro ou cinco camadas em caixas de madeira tipo M e K, havendo efeito de compressão provocada pelo peso

das frutas e atrito entre as diferentes camadas, provocando maior incidência de danos mecânicos (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 resistências estruturais adequadas para suportar a paletização, o armazenamento e as pressões laterais provenientes da movimentação.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, R.F.; FONSECA, E. Metodologia para o projeto otimizado de embalagens de frutas e hortaliças. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA–CONBEA, 31., 2002, Salvador, BA. **Anais...** Salvador, 2002. p.10.
- ALMEIDA, C.O. Uso de embalagem e rotulagem em frutas e hortaliças: agora é lei! **Bahia Agrícola**, Salvador, v.6, n.2, p.17-18, jun. 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: 10 jun. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:** projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 15p.
- 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**, Washington, v.94, p.1434-1453, 1988.
- BROSNAN, T.; SUN, D.W. Precooling techniques and applications for horticultural products- a review. **International Journal of Refrigeration**, Washington, v.24, p.154-170, 2001.
- CASTRO, E.C.; ABRAHAO, R.F.; TERUEL, B.J. Projeto estrutural otimizado de embalagens de produtos hortícolas adequadas ao resfriamento com ar forçado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro, SP. **Anais...** São Pedro, 2004. p.43.
- CEAGESP. **A embalagem de manga:** um exemplo de desrespeito ao mercado interno. Disponível em: <www.ceagesp.gov.br/qualidade/tecnicas/estudos/anexos/a_embalagem_de_manga_pdf/download>. Acesso em: 10 ago. 2006.
- COOK, R.D.; MALKUS, D.S.; PLESHA, M.E. **Concepts and applications of finite element analysis**. 3.ed. Madison: University of Wisconsin, 1989. 629p.
- CORTEZ, L.A.B.; HONÓRIO, S.L.; NEVES, L.C. Importância das tecnologias de resfriamento para o setor de frutas e hortaliças no Brasil. In: _____. **Resfriamento de frutas e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2002. p.17-34.
- ÉMOND, J.P.; MERCIER, F.; SADFA, S.O.; BOURRÉ, M.; GAKWAYA, A. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced-air precooling of strawberry. **Transactions of ASAE**, Washington, 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**. Washington, DC: Department of Agriculture, 1971. 11p. (ASHRAE. Symposium bulletin).
- GONÇALVES, R.; COSTA, F.B. Impermeabilização da madeira com resina derivada de óleo de mamona visando sua utilização em embalagens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa, 2006. CD-ROM.
- KADER, A.A. **Postharvest technology of horticultural crops**. 3.ed. Davis: University of California, 2002. 295p.
- LIMA, M.A.C. de; SILVA, A.L. da; AZEVEDO, S.S.N.; SANTOS, P.A. de S. Tratamentos pós-colheita com 1-metilciclopropeno em manga Tommy Atkins: efeito de doses e número de aplicações. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v.28, n.1, p.33-38, 2006.

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

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, v.21, n.2, p.228-235, 2001.

TERUEL, M.B. et al. Avaliação preliminar dos custos de resfriamento de laranja *in natura*. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v.24, p.86-90, 2002.

VIGNEAULT, C.; BORDIN, M.R.; ABRAHÃO, R.F. Embalagem para frutas e hortaliças. In: CORTEZ, L.A.; HONÓRIO, S.L.; MORETTI, C.L. **Resfriamento de frutas e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2002. p.95-119.

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