

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS PARA BANANAS¹

ROBERTO FUNES ABRAHÃO², ELTON CORREIA³, BÁRBARA JANET TERUEL⁴

RESUMO - Este trabalho propõe um método de projeto de embalagem para produtos hortícolas, buscando uma otimização integrada dos aspectos geométricos, estruturais e térmicos, ligados à facilitação do resfriamento e armazenamento refrigerado. Para o dimensionamento e otimização estrutural, foi utilizado o Método dos Elementos Finitos implementado pelo programa ANSYS, obtendo-se oito modelos virtuais de embalagens, com 10% e 14% de área efetiva de aberturas e geometria quadrada, retangular e circular. Para o desenvolvimento dos experimentos, que avaliaram a relação da área de aberturas com o tempo de sete-oitavos de resfriamento, foram construídos protótipos de tábuas de madeira (*Pinnus elliotti*) de reflorestamento. Nas embalagens, foram acondicionados aproximadamente 13 kg de banana variedade Nanica (*Musa cavendishii*, cultivar nanica), resfriada num túnel de ar forçado (vazão de ar de $0,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, temperatura de $8,0 \pm 1,2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $84,5 \pm 2,6\%$). O tempo de resfriamento também foi comparado com aquele obtido quando a mesma quantidade de frutas foi resfriada em embalagens de papelão (2,5% de área efetiva de abertura) e madeira (18% de área efetiva de abertura). Os resultados demonstraram que, entre os protótipos propostos, não houve diferença significativa no tempo de resfriamento dos frutos acondicionados nas embalagens desenvolvidas, sendo o tempo médio de resfriamento de $40,71 \pm 2,81$ min. Na comparação com as embalagens de papelão e madeira, houve diferenças significativas, sendo que as embalagens comerciais tiveram tempos de resfriamento de 1,25 e 2 vezes maiores. Concluiu-se que a simulação estrutural computacional, aliada a algoritmos de otimização, além de procedimentos experimentais ligados à cadeia do frio, são recursos promissores no auxílio de projetos para embalagens de transporte de produtos hortícolas.

Termos para Indexação: *Musa cavendishii*, otimização estrutural, madeira, tempo de resfriamento, ar forçado, área efetiva de aberturas, ensaio de compressão.

COMPUTATIONAL SIMULATION FOR THE DEVELOPMENT OF PACKAGES FOR BANANAS

ABSTRACT- This study proposes a methodology for designing boxes for agricultural products based on computational simulation and experimental validation, seeking the integrated optimization of geometric, structural and thermal aspects associated with cooling and refrigerated storage. The Finite Element Method was used for structural dimensioning and optimization. It was implemented using the ANSYS program, obtaining eight virtual models with 10% and 14% of effective opening area with square, rectangular or circular geometry. In order to develop the experiments that evaluated the relation between effective opening area and seven-eighths cooling time, the prototypes were built using reforestation wood (*Pinnus elliotti*). Approximately 13 kg of bananas (*Musa cavendishii* cultivar nanica) were packed in the boxes and cooled in a forced-air tunnel (air flow of $0.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, temperature of $8.0 \pm 1.2^\circ\text{C}$ and relative humidity of $84.5 \pm 2.6\%$). Cooling time was also compared with the one obtained when the same amount of bananas was cooled in the boxes used to transport and store bananas commercially (cardboard box with 2% of effective opening area and a wooden box called “torito” with 18% of effective opening area). The results showed no significant differences in cooling time of bananas packed in boxes with circular, square and rectangular opening, with average cooling time of 40.71 ± 2.81 min. However, when compared with cardboard and torito boxes, there was a significant difference in cooling time of 1.25 to 2 times the time obtained with wooden boxes. In the structural optimization of the EC-60 box (twelve 60 mm in diameter side orifices and 10% of effective opening area); material volume was reduced in 67.3% in relation to the project initial conditions. In compression tests, the box rupture occurred at loads between 5.4 kN and 8.1 kN, values 3 to 4 times heavier than the imposed project condition (2.0 kN). The computational simulation with optimization algorithms associated with cooling time experiments are promising resources to help in the box design for transporting products.

Index Terms: *Musa Cavendishii*, structural optimization, wood, cooling time, forced-air cooling, effective opening area, compression test.

¹(Trabalho 030-07). Recebido em 23-01-2007. Aceito para publicação em: 29-09-2007. Parte da dissertação de mestrado, para obtenção de título de Mestre em Engenharia Agrícola, na FEAGRI/UNICAMP.

²Professor Doutor, Conselho de Infra-Estrutura Rural da FEAGRI/UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas. CP. 6011. CEP. 13083-970, Campinas-SP. E-mail: roberto@agr.unicamp.br.

³Mestre em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP. E-mail: elton.correia@agr.unicamp.br

⁴Professora Doutora, Conselho de Infra-Estrutura Rural da FEAGRI/UNICAMP. E-mail: barbarat@agr.unicamp.br

INTRODUÇÃO

A banana é a principal fruta destinada ao consumo *in natura*. Segundo a FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação), a Índia é o maior produtor mundial de banana, enquanto o Brasil ocupa o 2º lugar, com cerca de 9% do que é produzido mundialmente. A bananicultura ocorre em todos os Estados brasileiros e é prática comum entre os agricultores familiares. Em 2005, o País produziu 6.703.400 t de banana; 1,8% a mais que em 2004.

O Estado de São Paulo continua sendo o primeiro produtor, com 1.178.140 t (17,6% da produção nacional), seguido da Bahia, que detém a segunda maior produção do Brasil (975.620 t, ou 14,6% do total), e Santa Catarina, terceiro maior produtor (668.003 t ou 10,0% do total) (IBGE, 2006).

Apesar da grande quantidade de frutas produzida no País, destaca-se que uma parcela considerável é descartada, podendo chegar até 15 milhões de toneladas por ano. Dentre as diversas causas que provocam essas perdas, destacam-se o uso de embalagens inadequadas e a não-utilização da cadeia do frio durante as etapas de transporte, armazenamento e comercialização (AGRIANUAL, 2004).

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

A literatura aponta a importância das aberturas laterais e da área de abertura efetiva nas embalagens de produtos hortícolas, os quais são resfriados, transportados e armazenados em paletes. A área de abertura das embalagens também tem uma relação direta com os custos de resfriamento, como mostram vários trabalhos, sendo possível que estes diminuam consideravelmente quando as aberturas são adequadas, garantido um resfriamento eficiente. As embalagens de produtos com altas taxas de respiração precisam de maior fluxo de ar e maior área efetiva de abertura para retirar o calor de respiração, diminuindo o consumo de energia elétrica no processo (Brosnan & Wen, 2001; Teruel et al., 2001; Vigneault et al., 2006). Arifin & Chau (1987) apontam a importância da distribuição adequada das aberturas para que o resfriamento se dê de forma homogênea.

No projeto de embalagens para produtos hortícolas, auxiliado por ferramentas computacionais, espera-se obter um projeto ótimo em um curto espaço de tempo, reduzir o custo da embalagem pela redução da quantidade de material utilizado (volume da embalagem), prever as solicitações impostas às embalagens durante as condições de uso, melhorar a eficiência do resfriamento, diminuindo o tempo de resfriamento dos produtos ao aumentar-se a área de abertura sem comprometer estruturalmente as embalagens, além de poder estudar a distribuição das tensões às quais as embalagens são submetidas.

O projeto e desenvolvimento de embalagens otimizadas, do ponto de vista geométrico e estrutural, e que atendam às exigências de refrigeração, é uma iniciativa que contribui para a redução de perdas e manutenção da qualidade do produto, durante o armazenamento e transporte. Para exemplificar a aplicação do método projetual proposto, apresenta-se a modelagem e otimização estrutural de embalagens de madeira para bananas (*Musa cavendishii*). Após o projeto e otimização, as embalagens foram construídas e submetidas a ensaios de resfriamento com ar forçado e ensaios mecânicos de compressão.

MATERIAL E MÉTODOS

Método de projeto

A Figura 1 apresenta uma proposta metodológica para o projeto de embalagens de transporte de produtos hortícolas. Nas definições iniciais, procede-se ao levantamento dos dados do problema, definindo claramente os fatores que não podem ser alterados durante o processo iterativo do projeto, como, por exemplo, a capacidade volumétrica e a altura de empilhamento.

Na etapa de estudos iniciais, deve ser feito o levantamento de dados que permitirão que o projeto da embalagem atenda às exigências e necessidades de manutenção da qualidade dos produtos até o consumidor final. São estes dados relativos a:

- características do produto (geometria, peso, resistência mecânica a impactos, compressão e vibração);
- tratamentos pós-colheita adotados;
- distribuição física dos produtos (arranjo dentro da embalagem, movimentação, transporte e armazenamento);
- propriedades do material construtivo selecionado.

Na etapa do projeto, procede-se ao dimensionamento da embalagem, levando-se em conta os aspectos geométricos, estruturais e ergonômicos. Estes últimos são importantes, já que, ao menos, parte da movimentação do produto se dará por manuseio. Questões como a magnitude da carga a ser manuseada, o desenho de interfaces adequadas para as mãos e questões de segurança, como arestas perfurantes, são tratadas nesta etapa.

Análise e otimização estrutural

Aplicou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), implementado através do programa computacional Ansys 5.4, no dimensionamento e otimização estrutural dos modelos de embalagens 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.

A aplicação do MEF, segundo Cook et al. (1989), consiste na busca de uma solução aproximada u para a formulação diferencial que descreve o fenômeno físico de interesse (Equação 1):

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

onde: μ_j - valores de u nos nós; Ψ_j - 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. O sistema de equações algébricas lineares resultantes foi resolvido utilizando-se dos métodos numéricos usuais (Equação 2):

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

onde: $[K]$ é a matriz de rigidez global; $\{f\}$ é o vetor de carga global; $\{a\}$ é 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 (Arora, 1989): as variáveis de projeto, independentes, que assumem valores numéricos alterados a cada ciclo de otimização; variáveis de estado ou restrições, que determinam os limites de variação das variáveis de projeto em função de critérios predefinidos; função objetivo, ou custo, variável dependente que deve ser maximizada ou minimizada em função dos objetivos do projeto.

A formulação matemática de um problema de otimização estrutural pode ser feita determinando-se o vetor de n componentes $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ de variáveis de projeto que minimize a função objetivo $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sujeita a p restrições de igualdade:

$$h_j(x) \equiv h_j(x_1, x_2, \dots, x_n); j = 1 \text{ a } p \text{ e } m \text{ restrições de desigualdade}$$

$$g_i(x) \equiv g_i(x_1, x_2, \dots, x_n); i = 1 \text{ a } m.$$

Estudo de caso: modelagem estrutural de embalagens de madeira para transporte de banana

Atualmente, dezenas de diferentes tipos de embalagens são utilizadas na distribuição e comercialização de banana no Brasil. Encontram-se no mercado nacional embalagens para 10; 13; 15; 18; 20; 23 e 25 kg de produto, confeccionadas em madeira, plástico ou papelão. As dimensões das embalagens variam muito, praticamente cada local ou cada fabricante utiliza tamanho e formato diferentes (Lichtemberg, 1999).

As embalagens de madeira tipo 1/2 caixa, muito utilizadas, são fabricadas em madeira bruta, geralmente da espécie *Pinnus ellioti*, sem nenhum tipo de tratamento, sendo reutilizadas, em média, em 7 a 10 viagens. Apresentam frestas laterais que permitem a circulação do ar em seu interior; porém, encontram-se mal distribuídas, não sendo eficientes no processo de resfriamento, e ainda recebem uma forração de plástico entre os frutos e as paredes, a fim de minimizar os danos mecânicos, dificultando ainda mais o escoamento do ar frio pelo leito de frutas (Figura 2).

Critérios de projeto

- **Características do produto:** banana variedade Nanica (*Musa cavendishii*), arranjo de 12 pencas por caixa, distribuídas em duas fileiras, temperatura de armazenamento de 13-18°C e umidade relativa entre 85-95% (ASHRAE, 1994).

- **Tratamento pós-colheita:** resfriamento com ar forçado.

- **Dimensões externas das embalagens:** embalagem para 13 kg de frutas com dimensões de 500 x 400 x 200 mm, atendendo às dimensões do palete-padrão utilizado no Brasil (1.000 x 1.200 mm). Considerou-se que o palete teria uma altura correspondente a 10 embalagens empilhadas, i.é., aproximadamente 2.000 mm.

- **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 e pode ser determinada com relação à área total da embalagem ou à maior área da face. Neste trabalho, foi calculada com relação à maior face lateral, que, na montagem experimental, estava posicionada no sentido da entrada do ar (Equação 3).

$$Ae = \frac{A_f}{A_t} \times 100 \quad (3)$$

onde: Ae - área efetiva de abertura (%); A_f - área de abertura na face da embalagem voltada para o fluxo de ar (m^2); A_t - área total da embalagem (m^2).

- **Considerações estruturais:** adotou-se como critério construtivo a presença das colunas nos vértices, que permite que o peso das embalagens e os efeitos da compressão sejam absorvidos por estas, liberando as laterais, evitando, assim, falhas na resistência estrutural e danos mecânicos aos produtos.

- **Considerações ergonômicas:** alças com uma abertura de 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).

- **Material construtivo:** madeira, sendo utilizadas tábuas de madeira (*Pinnus ellioti*), de reflorestamento, faqueadas, de modo a evitar ou reduzir os danos mecânicos nas frutas. Adotaram-se os valores de resistência e rigidez da madeira *Pinnus Elliotti*: a)- massa específica aparente (12% umidade) de 560,0 $kg\ m^{-3}$; b)- resistência à compressão paralela às fibras 40,4 MPa; c)- resistência à tração paralela e normal às fibras de 66,0 MPa; d)- resistência ao cisalhamento de 7,4 MPa; e)- módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras 11.889,0 MPa (Fonte: NBR 7190/97).

- **Protótipos:** foram gerados oito modelos virtuais de embalagens, concebidos variando-se a percentagem de área de aberturas (10 e 14%) e a geometria das aberturas (retangular, quadrada e circular).

- **Cargas aplicadas:** considerou-se uma carga estática de 2.000 N aplicada nas colunas, para um empilhamento de 10 embalagens; este valor levou em conta uma carga extra, relativa ao peso das embalagens de madeira e uma sobrecarga no empilhamento, de 35%. Considerou-se uma situação transiente na qual os frutos foram subitamente acelerados com 2 vezes a aceleração da gravidade ($9,81\ m\ s^{-2}$), durante o levantamento da caixa, também, distribuindo-se 300 N no fundo da embalagem.

Outra situação transiente considerada foi aquela na qual todo o peso dos frutos é suportado pelas laterais da embalagem. Neste caso, distribuíram-se 180 N nas paredes laterais e nas testeiras (Figura 3).

- **Modelos de rigidez adotados:** para a modelagem das paredes laterais e do fundo das embalagens, adotou-se um elemento de placa (SHELL 93), com oito nós e 6 graus de liberdade por nó; para a modelagem das colunas, adotou-se um elemento de viga (BEAM 4), com 2 nós e 6 graus de liberdade por nó. Ambos os elementos são da biblioteca do programa de elementos finitos ANSYS 5.4.

- **Variáveis de projeto, restrições e função objetivo:** os valores iniciais das variáveis de projeto adotados foram de 10 mm de espessura para as paredes laterais (EL) e fundo (EF) da embalagem; 30 mm de altura da seção triangular das colunas (B) e base da seção triangular das colunas (H). Impôs-se o limite de 5 MPa para o valor das tensões equivalentes exibidas pelos modelos. 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 coeficiente de segurança igual a 8. Impuseram-se, também, limites inferiores e superiores para as variáveis de projeto. Como função objetivo a ser minimizada, adotou-se o volume total de material construtivo dos modelos.

Após a análise estrutural e otimização, as embalagens foram construídas com tábuas de *Pinnus elliotti*, com as dimensões obtidas na otimização, sendo posteriormente submetidas a ensaios de resfriamento e mecânicos, contendo bananas.

Deve-se ressaltar que a modelagem aqui apresentada, mais do que representar com precisão os comportamentos estruturais da embalagem, objetiva ilustrar a aplicação do MEF e a otimização estrutural aplicada ao projeto de embalagens. Dessa forma, os pontos de ligação, representados fisicamente por pregos ou grampos, não foram modelados – essas ligações são assumidas como contínuas pelo modelo. Os esforços dinâmicos típicos da movimentação durante o ciclo de distribuição e armazenamento são considerados aproximados, considerando-se uma sobrecarga estática na estrutura de 35%. Também não se levaram em conta os esforços horizontais oriundos da movimentação por empilhadeiras ou paleteiras, por considerá-los desprezíveis.

Experimentos de resfriamento

Para realizar os experimentos de resfriamento com ar forçado, foi construído um protótipo experimental de resfriamento com ar forçado, em forma de túnel, dentro de uma câmara frigorífica. O sistema contava com um ventilador centrífugo, com três jogos de polias, para a variação da rotação e vazão de ar (potência de 2,5 kW, vazão nominal de ar 0,80 m³s⁻¹ e rotação de 1.730 rpm).

O ar resfriado que sai do evaporador, succionado pelo ventilador acoplado ao túnel de resfriamento, atravessa o leito de frutas, passando através dos orifícios das embalagens, retornando pela parte posterior ao evaporador, onde novamente é resfriado. A estrutura foi montada sobre rodas, facilitando a montagem experimental fora da câmara, e introduzindo o túnel

após esta, quando a temperatura da câmara estava estabilizada em 8±1,2°C (UR= 84,5%±2,6%). A câmara era ligada com antecedência, e a temperatura do ar de resfriamento, estabilizada antes do início dos experimentos.

Foram resfriados, em cada experimento, aproximadamente 13 kg de banana, variedade Nanica (*Musa Cavendishii*), com uma taxa de ar de 0,024 m³s⁻¹kg⁻¹ e velocidade em torno de 0,8 m s⁻¹. A taxa de ar correspondeu à menor vazão que pode ser obtida no ventilador do sistema de ar forçado onde foram realizados os experimentos (0,32 m³s⁻¹ e rotação de 692 rpm).

Aproximadamente 35 caixas, contendo 13 kg de banana cada uma, foram adquiridas na Central de Abastecimento de Campinas (CEASA). As frutas foram transportadas e mantidas nas condições ambientes, e selecionadas em função de seu tamanho e do grau de maturação (grau 2 - verdes com traços amarelos), buscando homogeneidade das amostras utilizadas nos experimentos de resfriamento. Após a seleção, os frutos foram acondicionados na embalagem submetida ao resfriamento, respeitando o mesmo arranjo e distribuição que trouxeram do produtor. Em seguida, foram inseridos termopares, e a embalagem recebeu uma cobertura plástica na parte superior e na inferior, para garantir que o ar resfriado apenas passasse através das laterais da embalagem.

Para a medição da temperatura das bananas, foram inseridos, na polpa das frutas, termopares tipo T (Cobre-Constantan), calibrados previamente (±0,3°C) e acoplados a um sistema de aquisição de dados por computador. Os termopares foram numerados de acordo com a saída do sistema de aquisição de sinais, permitindo a identificação quando introduzidos nas frutas.

Foi escolhida uma amostra, de aproximadamente vinte bananas de cada experimento, para a determinação da dimensão média das frutas. A medição foi feita com um paquímetro digital, determinando-se o comprimento, pelo lado côncavo e convexo, e o diâmetro das frutas. Com essas medições, foi determinado o valor médio, sendo o comprimento de 9,52±0,43 cm e diâmetro de 4,52±0,04 cm.

Foram inseridos seis termopares em diferentes posições dentro das embalagens. Devido à geometria das frutas, quantidade variável de frutos por penca e distribuição das mesmas dentro da embalagem inseriram-se termopares em frutos que estavam, aproximadamente, no meio da penca, em pontos que coincidiam com a entrada e a saída do ar da embalagem, determinando-se, assim, a temperatura média do leito de frutas. As temperaturas do ar dentro da câmara e do túnel também foram monitoradas e medidas, com termopares posicionados na entrada e saída do ar do túnel, e no meio da câmara frigorífica.

O tempo de sete-oitavos de resfriamento ($t_{7/8}$) foi o parâmetro usado para quantificar a eficiência do resfriamento e foi determinado através do cálculo da Taxa de Resfriamento (TR) (Equações 4 e 5), com os dados de temperatura da polpa das frutas e do ar de resfriamento (Mohsenin, 1980):

$$t_{7/8} \equiv \frac{\ln 8}{TR} \quad (4)$$

$$TR \equiv \frac{\frac{T_i - T_f}{t_f}}{(T_i - T_a) - (T_f - T_a)} \cdot \ln \frac{T_i - T_a}{T_f - T_a} \quad (5)$$

onde: $t_{7/8}$ é o tempo de sete-oitavos de resfriamento (min); TR é a taxa de resfriamento (min^{-1}); T_i é temperatura inicial da polpa da fruta ($^{\circ}\text{C}$); T_f é temperatura final da polpa da fruta ($^{\circ}\text{C}$); t_f é o tempo de final do processo de resfriamento (min); T_a é a temperatura do ar de resfriamento ($^{\circ}\text{C}$).

Embora a temperatura do ar recomendada para o armazenamento refrigerado de bananas seja de 13-18 $^{\circ}\text{C}$, optou-se por fazer o resfriamento com a câmara a 8 $^{\circ}\text{C}$, para obter as respostas de forma mais rápida, em função da quantidade de experimentos a serem realizados. As frutas apresentaram uma temperatura média inicial de 26,2 \pm 2,1 $^{\circ}\text{C}$, atingindo o tempo médio de sete-oitavos de resfriamento, em média, à temperatura de 10,01 \pm 1,3 $^{\circ}\text{C}$.

O tempo de resfriamento também foi determinado acondicionando 13 kg de frutas nos modelos comerciais, madeira tipo 1/2 caixa (13 kg) (500 x 400 x 200 mm e 21% de área efetiva de aberturas) e papelão (480 x 370 x 180 mm e 7% de área efetiva de aberturas), comparando-se o tempo de resfriamento obtido nestes ensaios com aquele obtido nas embalagens de madeira desenvolvidas.

Planejamento experimental

Foi aplicado um delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 8x1, com três repetições, perfazendo 24 tratamentos, sendo aleatorizada a ordem de execução dos experimentos. A variável de resposta foi o tempo de sete-oitavos do resfriamento, aplicando-se a análise de variância (ANOVA), para um nível de significância de 95% ($p < 0,05$), para testar a influência da área efetiva de abertura das embalagens sobre o tempo de resfriamento. A comparação das médias foi feita através do teste de Tukey.

Ensaio mecânicos

A embalagem submetida aos ensaios mecânicos foi escolhida atendendo aos critérios de desempenho nos ensaios de resfriamento e critérios construtivos. Os ensaios de resistência à compressão dinamométrica foram desenvolvidos no Laboratório de Embalagem e Acondicionamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), seguindo a norma IPT-NEA 25, a norma internacional ASTM D 642 e AFNOR NF H-00-046-81. Foi determinada a resistência da embalagem à compressão dinamométrica, que é a principal força que atua durante a paletização das embalagens para produtos hortícolas (IPT, 1991).

Foi utilizada uma prensa de placas paralelas horizontais do tipo A, com velocidade de aproximação de 0,20 \pm 0,02 mm s^{-1} . As forças de compressão do sistema foram obtidas com um registrador gráfico (erro máximo de 1% para as forças e 10% para

as deformações). Foram utilizados como corpos de prova 10 unidades do modelo de embalagem escolhido.

As embalagens vazias foram superpostas, representando a condição de empilhamento real, colocadas na prensa e alinhadas com o centro geométrico do sistema de teste. Foram realizadas cinco repetições e obtidas as curvas de força *versus* deformação até a ruptura dos corpos de prova.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os desenhos dos oito modelos virtuais de embalagens desenvolvidos com simulação computacional no ANSYS, com diferentes áreas efetivas de abertura e configuração de aberturas circular, quadrada e retangular, e que foram construídos após a otimização (Figura 4). Para facilitar a apresentação e a discussão dos resultados, foi estabelecida a seguinte simbologia:

1)- **EC 25**: aberturas circulares (48 orifícios com $d = 25$ mm) e área efetiva de aberturas (A_e) de 10%; 2)- **EC 30**: aberturas circulares (48 orifícios com $d = 30$ mm) e A_e de 14%; 3)- **EC 50**: aberturas circulares (12 orifícios com $d = 50$ mm) e A_e de 10%; 4)- **EC 60**: aberturas circulares (12 orifícios com $d = 60$ mm) e A_e de 10%; 5)- **EQ 10**: aberturas quadradas (27 aberturas de 30 mm de lado) e A_e de 10%; 6)- **EQ 14**: aberturas quadradas (21 aberturas de 40 mm) e A_e de 14%; 7)- **ER 10**: aberturas retangulares (12 aberturas de 15 mm de base e 140 mm de altura) e A_e de 10%; 8)- **ER 14**: aberturas retangulares (12 aberturas de 20 mm de base e 150 mm de altura) e A_e de 14%.

Otimização estrutural

A otimização estrutural foi feita para todos os modelos gerados, mas como todos foram submetidos às mesmas condições de contorno e carregamento, com o mesmo material construtivo, nas rotinas de otimização estrutural, os valores das dimensões das embalagens foram muito próximos para todos os modelos. Dessa forma, neste trabalho, apresentam-se os resultados dos ciclos de otimização para o modelo EC-60 ($A_e = 10\%$), pois o formato circular das aberturas facilita a construção, se comparado com o modelo EQ-14 (aberturas quadradas).

A tensão calculada no conjunto inicial de projeto (Ciclo 1) foi de 0,96 MPa nas laterais; 1,13 MPa no fundo, e -1,11 MPa nas colunas. Como o limite imposto às tensões foi de 5 MPa, a rotina de otimização buscou reduzir os valores iniciais das variáveis de projeto até que as tensões desenvolvidas se aproximassem da restrição adotada. A análise convergiu na sexta iteração, onde as tensões não ultrapassaram o valor de 5 MPa (Tabela 1).

A espessura da parede lateral que, no conjunto inicial de projeto, era de 10 mm, no conjunto ótimo de projeto foi reduzida para 4,01 mm (60% de redução). A espessura do fundo da embalagem reduziu-se de 10 mm para 4,74 mm (53% de redução). Nas colunas, as dimensões iniciais foram reduzidas de 30 mm para 13,07 mm e 13,49 mm (56% de redução), para a base e altura da seção transversal das colunas, respectivamente.

A função objetivo foi satisfeita, ou seja, houve redução do volume de material (madeira). A redução do volume de material contribuiu para a diminuição do custo das embalagens e a diminuição do peso, melhorando também os aspectos ergonômicos, facilitando o manuseio por parte dos trabalhadores. No modelo EC-60, a redução do volume de material foi de, aproximadamente, 67,3%.

Com os resultados obtidos, foram adotados, como dimensões para a construção das embalagens, os seguintes valores: espessura das laterais (EL) de 4 mm; espessura do fundo (EF) de 5 mm; seção triangular das colunas de 20 mm para a base da seção (B) e altura da seção triangular (H). Esses valores também foram adotados seguindo como critério a possibilidade de obtenção das tábuas de madeira.

A Figura 5 ilustra a distribuição das tensões no modelo otimizado bem como as suas deformações. Os valores de tensão foram obtidos segundo o critério da tensão composta de *Von Misses*, onde a tensão equivalente é formada a partir da seguinte expressão (Equação 6):

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6)$$

onde: σ_e é a Tensão equivalente de *Von Misses* (MPa) e $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são os valores das tensões principais (MPa).

Cada tonalidade de cor corresponde a uma região de isotensão, cujo valor é exibido na tabela ao lado do modelo, em MPa (Figura 5). Os valores mais elevados de tensão encontram-se na região de descontinuidade das colunas e paredes laterais, e na junção das paredes laterais com o fundo da embalagem (cores laranja e vermelha). Observa-se que as laterais da embalagem, região crítica devido às aberturas, se encontra descarregada, demonstrando que a carga de empilhamento é totalmente assumida pelas colunas, que apresentam maior valor de resistência, devido à orientação das fibras. Na concepção da embalagem, a resistência estrutural destas não foi limitada pelas configurações de aberturas.

As maiores tensões foram observadas na região de descontinuidade das colunas. Nessa região ocorre uma transferência de tensões das colunas para as paredes laterais, apresentando menor resistência e, portanto, mais propensa a rupturas. Outra região que merece destaque é a da junção das paredes laterais com o fundo, devido à concentração das tensões em função das cargas aplicadas nas paredes laterais e no fundo. Entretanto, em nenhum modelo estudado, ocorreu a violação das variáveis de restrição, que foi de 5 MPa, portanto o conjunto de projeto adotado mostrou-se adequado quanto à resistência estrutural.

Ensaio de resfriamento

Entre os modelos EQ-14, EC-60, EQ-10, ER-10, EC-30, EC-50, ER-14 e EC-25 não houve diferença significativa no tempo de resfriamento das frutas. O tempo de sete-oitavos do resfriamento foi, em média, de $40,80 \pm 2,97$ min ($TR = 0,0511 \pm 0,0036 \text{ min}^{-1}$), representando uma diferença entre as caixas de madeira de 7% (Tabela 2). Esses resultados devem-se, provavelmente, à proximidade da área efetiva de aberturas entre as embalagens (10% e 14%), assim como a distribuição das aberturas, que ocupa

toda a área lateral das embalagens, permitindo uma distribuição do ar mais homogênea. Os resultados mostraram que a geometria das aberturas não exerce influência significativa sobre o tempo de resfriamento (Tabela 2).

No entanto, as embalagens em que as frutas tiveram o menor tempo de resfriamento, foram a EQ-14 e EC-60 (com 14% e 10% de Ae), com relação às outras seis embalagens. O menor tempo de resfriamento foi obtido para a embalagem EQ-14, com 14% de Ae ($37,05 \pm 0,99$ min), seguido da embalagem EC-60 e 10% de Ae ($37,87 \pm 1,01$ min), uma diferença da ordem de 2% equivalente a, aproximadamente, 52 segundos, valor que não é representativo.

Arifin & Chau (1988) resfriaram morangos em embalagens com área de abertura entre 13 e 18%, obtendo tempos de resfriamento que variaram entre 32 min (18% de Ae) e 50 min (13% Ae), com velocidade do ar de aproximadamente $1,3 \text{ m s}^{-1}$.

Teruel et al. (2002a) compararam o efeito de diferentes embalagens sobre o tempo de resfriamento de bananas resfriadas com ar forçado, utilizando embalagens de papelão e plásticas, com área efetiva de aberturas de 3,5% e 20%, respectivamente. Concluíram que o tempo de resfriamento foi em torno de 40% menor para as embalagens plásticas com 20% de área de abertura (tempo médio de 45 min), quando comparado aplicando-se as embalagens de papelão (tempo médio de 75 min).

Entre as embalagens geradas, as comerciais de papelão e madeira tipo 1/2 caixa, apresentaram diferença significativa no tempo de resfriamento. Na embalagem de madeira tipo 1/2 caixa e papelão, o tempo de resfriamento foi, em média, 38% ($TR = 0,0420 \text{ min}^{-1}$) e 54%, respectivamente, maior ($TR = 0,0258 \text{ min}^{-1}$) que o obtido com as embalagens de madeira, que tiveram o menor tempo de resfriamento (EQ-14 e EC-60) (Tabela 2).

Observa-se que, para as frutas acondicionadas na embalagem de madeira tipo 1/2 caixa, mesmo tendo uma área de abertura quase 2 vezes maior que a área efetiva das embalagens de madeira desenvolvidas, o tempo de sete-oitavos do resfriamento foi atingido, aproximadamente, aos 50 min, um valor 1,30 vezes maior que aquele obtido nas embalagens EQ-14 e EC-60 (10% e 14% de Ae). Este resultado denota a influência da distribuição das aberturas na embalagem no processo de resfriamento, demonstrando que um projeto de embalagem adequado aos sistemas de resfriamento com ar forçado não deve ter, apenas área de abertura suficiente, como, também, distribuição equitativa das aberturas, para permitir uma distribuição homogênea do ar no leito (Castro et al., 2004).

Sanchez et al. (2003) comprovaram que, durante o resfriamento e o armazenamento refrigerado de bananas da variedade 'Nanicão', a diminuição da quantidade de frutas por embalagem (papelão, madeira torito para 18 kg e madeira tipo 1/2 caixa para 13 kg) garantiu melhor ventilação, diminuição dos danos mecânicos e aumento da vida útil das frutas, recomendando a de madeira tipo 1/2 caixa como a mais adequada para armazenagem de bananas da variedade estudada.

Os resultados obtidos nos experimentos com as embalagens de papelão (tempo de resfriamento de $80,25 \pm 2,2$ min e Ae = 2,5%) denotam a importância da área efetiva de abertura na eficiência do resfriamento, o que também tem relação direta com os custos finais.

Baird et al. (1988) obtiveram valores de custo de resfriamento, por caixa, de R\$ 0,38 e R\$ 0,75 (caixas com 5% até 1% de Ae). O tempo de resfriamento variou de 3h30 a 6 horas.

Teruel et al. (2002b) relataram que o custo de resfriamento de laranjas Valência em caixas de papelão (3% de Ae) e em caixas plásticas (20% de Ae) foi de R\$ 0,27 e R\$ 0,41, por caixa, respectivamente, uma diferença de 52%.

Ensaio mecânicos

A embalagem escolhida para o desenvolvimento dos ensaios mecânicos foi a EC-60 (Ae = 10%), pois teve o melhor desempenho nos ensaios de resfriamento, e a geometria das aberturas facilitou a construção dos corpos de prova.

A ruptura da embalagem foi obtida pelo deslocamento lateral das colunas formadas entre as aberturas laterais da

assim, maior área de abertura, sem comprometer estruturalmente as embalagens.



FIGURA 2- Embalagem de madeira tipo 1/2 caixa para acondicionamento de banana (13 kg). Fonte: Abrahão & Fonseca, 2002.

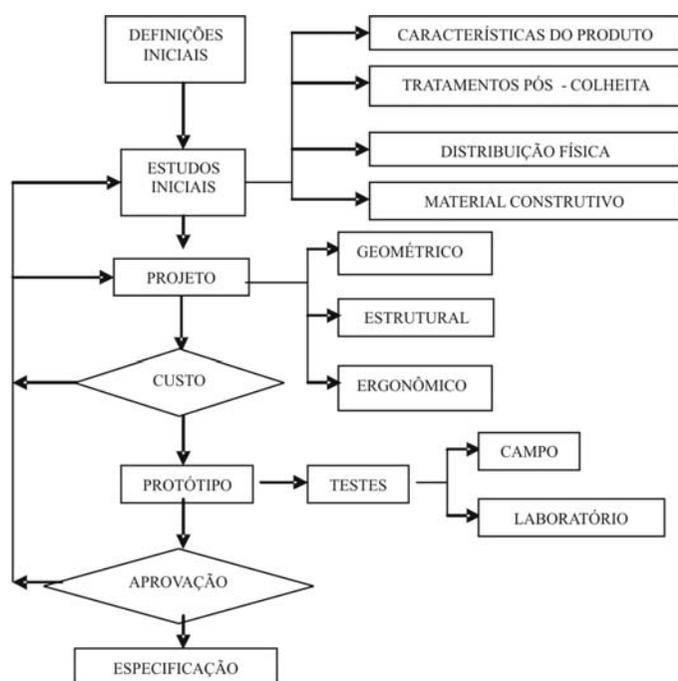


FIGURA 1- Metodologia para o projeto de embalagens. Fonte: Adaptado de Vigneault et al., 2002

embalagem, provocando uma deflexão perpendicular à lateral das embalagens, ou seja, a flambagem das colunas (Figura 6). Essa ruptura só foi observada quando a carga de compressão aplicada sobre as embalagens ultrapassou a carga aplicada nas condições do projeto estrutural (2 kN). A carga máxima suportada pelas embalagens variou entre 5,40 kN e 8,10 kN, um valor de 2 a 4 vezes maior que a carga considerada nas condições do projeto.

Essa resistência atribui-se, principalmente, à concepção das embalagens, compostas por colunas e paredes laterais, mostrando-se eficiente, mesmo com a redução das dimensões e volume de material, de forma que as colunas assumem a carga crítica de empilhamento, descarregando as laterais e permitindo,

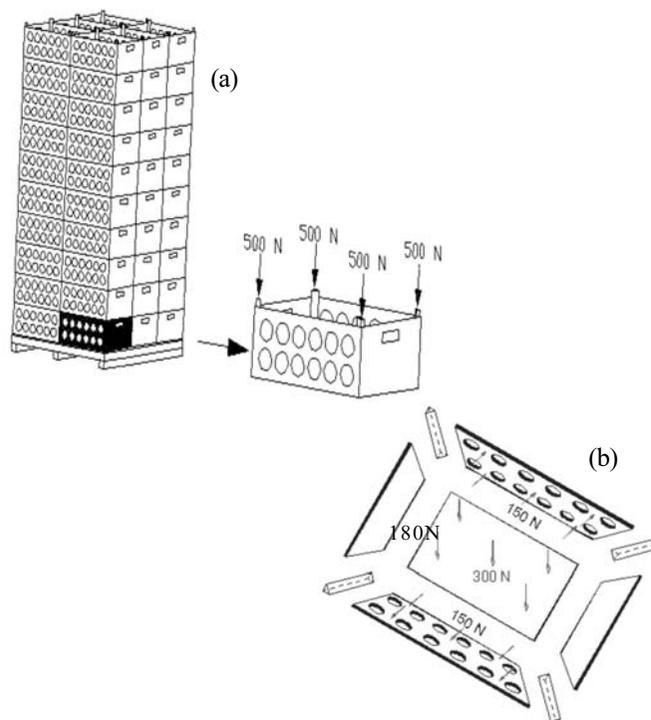


FIGURA 3-a) Carga assumida na última embalagem do palete durante o empilhamento. b) Cargas oriundas do manuseio.

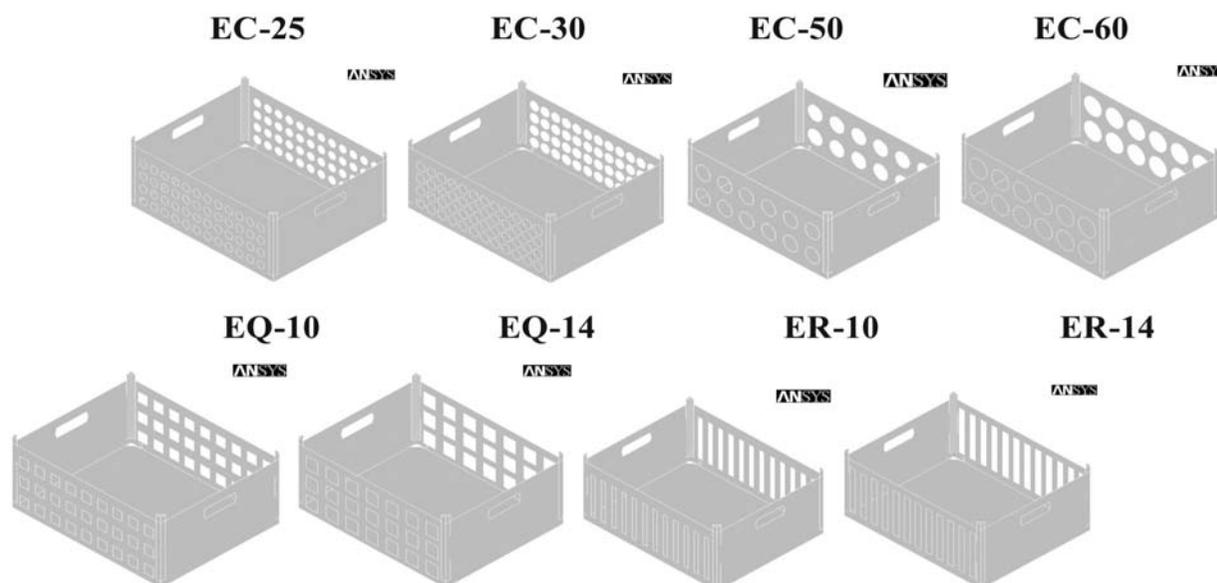


FIGURA 4- Modelos virtuais com aberturas circulares, quadradas e retangulares, gerados com simulação computacional no ANSYS.

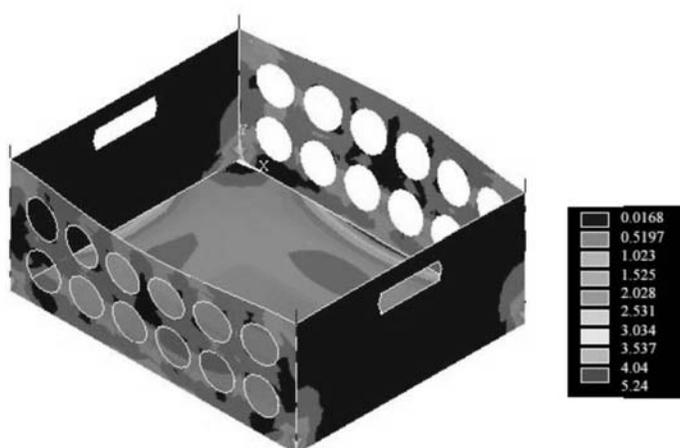


FIGURA 5 – Distribuição das tensões no modelo EC-60 (MPa).

AGRADECIMENTOS

Ao Eng. Ernesto Pichler, responsável pelo Laboratório de Embalagens do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pela realização dos ensaios de compressão. À CAPES e ao Fundo de Apoio ao Ensino e à Pesquisa da Universidade Estadual de Campinas, pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

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...**

AGRIANUAL. **anúário estatístico da agricultura brasileira**. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2004. 536p.

ARIFIN, B. B.; CHAU, K. V. Cooling of strawberries in cartons with new vent hole designs. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v.94, n.1, p. 1415-1426, 1988.

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

ARORA, J.S. **Introduction to optimum design**. New York: Mc Graw-Hill, 1989. 625p.

CONCLUSÃO

O método de projeto de embalagens para banana apresentado mostrou-se efetivo para o desenvolvimento de embalagens otimizadas, aliando a economia de material construtivo ao desempenho estrutural e eficiência do resfriamento, aproximando-se às condições a que as embalagens para produtos hortícolas são submetidas, reduzindo também o tempo de projeto.

- ASHRAE. **Handbook refrigeration**: systems and applications. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1994. p. 25.3.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 5p.
- BAIRD, C.D.; GAFFENEY, J.J.; TALBOT, M.T. Design criteria for efficient and cost effective forced-air cooling systems for fruits and vegetables. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 94, p. 1434-1453, 1988.
- BROSNAN, T.; WEN, S. D. Precooling techniques and applications for horticultural products- a review. **International Journal of Refrigeration**, Amsterdam, 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 – CONBEA, 33., 2004, São Pedro-SP. **Anais...**
- COOK, R.D.; MALKUS, D.S.; PLESHA, M.E. **Concepts and applications of finite element analysis**. 3rd ed. Madison: University of Wisconsin, 1989. 629 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=740&id_pagina=1>. Acesso em: nov. 2006.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Embalagem**: determinação da resistência à compressão dinâmométrica. São Paulo: Laboratório de Embalagem e Acondicionamento, 1991. 4 p.
- LICHTEMBERG, L. A. Colheita e pós-colheita da banana. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.20, n.196, p.73-90, 1999.
- MOHSEIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1980. 405 p.
- SANCHES, J.; LEAL, P.A.M.; SARAVALI, J.H.; ANTONIALI, S. Principal components analysis for quality evaluation of cooled banana ‘Nanicão’ in different packing. **Revista Brasileira Fruticultura**, Jaboticabal, v.25 n.2, p. 220–223, 2003.
- TERUEL, B. J. M.; CORTEZ, L. A. B.; LEAL, P. A. M.; NEVES FILHO, L. C. Resfriamento de banana-prata ar forçado. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.142-146, 2002a.
- TERUEL, M. B. et al. Avaliação preliminar dos custos de resfriamento de laranja *in natura*. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.24, p. 86–90, 2002b.
- 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, n. 2, p. 228-235, 2001.
- VIGNEAULT, C.; BORDIN, M.R.; ABRAHÃO, R.F. Embalagens para frutas e hortaliças. In: CORTEZ, L.A.B.; HONÓRIO, S.L.; MORETTI, C.L. **Resfriamento de frutas e hortaliças**: Embalagens para frutas e hortaliças. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002. p.95-122.
- 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, 2006, p.308–313.