

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Paulo Roberto Abreu*
de Figueiredo APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *01/12/2004*

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

Modelagem de uma embalagem de papelo ondulado para produtos hortícolas

Autor: Paulo Roberto Abreu de Figueiredo
Orientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães
Co-Orientador: Franco Giuseppe Dedini

12/04

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Modelagem de uma embalagem de papelão ondulado para produtos hortícolas

Autor: Paulo Roberto Abreu de Figueiredo

Orientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães

Co-Orientador: Franco Giuseppe Dedini

Curso : Engenharia Mecânica

Área de Concentração : Projeto Mecânico

Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2004
São Paulo – Brasil

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

CHAMADA UNICAMP
F469m
EX
IMBO BCI 64850
ROC 16.100.86.05
REÇO 11.00
DATA 21/04/05
nº CPD 358020

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

F469m Figueiredo, Paulo Roberto Abreu de
Modelagem de uma embalagem de papelão ondulado
para produtos hortícolas / Paulo Roberto Abreu de
Figueiredo. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientadores: Paulo Sérgio Graziano Magalhães, Franco
Giuseppe Dedini.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Papelão - Embalagens. 2. Métodos de elementos
finitos. 3. Hortaliças. 4. Produtos hortigranjeiros. 5.
Produtos vegetais. I. Magalhães, Paulo Sérgio Graziano. II.
Dedini, Franco Giuseppe. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**Modelagem de uma embalagem de
papelão ondulado para produtos hortícolas**

Autor: Paulo Roberto Abreu de Figueiredo

Orientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães

Co-Orientador: Franco Giuseppe Dedini

Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Robson Pederiva
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Renato Pavanello
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Alberto Rodrigues Anjos
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. José Fernando Durigan
Universidade Estadual Paulista - UNESP

The image shows five handwritten signatures in black ink. From top to bottom: 1. A signature that appears to be 'P. R. A. de Figueiredo'. 2. A signature that appears to be 'P. S. G. Magalhães'. 3. A signature that appears to be 'R. Pederiva'. 4. A signature that appears to be 'R. Pavanello'. 5. A signature that appears to be 'C. A. R. Anjos'. The signature of 'José Fernando Durigan' is not clearly visible but is implied by the text.

Campinas, dezembro de 2004.

Dedicatória:

À Sarah Gerusah, minha filha mui amada;

Dedico.

Agradecimentos:

A DEUS.

Ao Prof. Paulo Sérgio Graziano Magalhães, pela orientação, pelo apoio e amizade.

Ao Prof. Franco Giuseppe Dedini, co-orientador, pela sua colaboração, sugestões e incentivo.

Ao Prof. Roberto Funes Abrahão pelas sugestões valiosas e incentivo.

Ao Instituto Agrônomo do Paraná /Iapar, pela oportunidade de realizar este treinamento.

A Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), que me acolheu e propiciou este treinamento.

A pesquisadora Ana Lúcia Mourad do Centro de Tecnologia de Embalagens CETEA, pela inestimável colaboração durante os ensaios de laboratório e da literatura.

A Indústria de Papel e Celulose KLABIN de Jundiaí – SP pela imprescindível colaboração ao desenvolvimento da tese na cessão de todo o material necessário aos ensaios de laboratório.

Ao pesquisador Ernesto Pichler do Instituto de Tecnologia de São Paulo/IPT pela colaboração e cessão do laboratório para ensaios práticos.

A pesquisadora Elizabeth de Fátima Gazeta Ardito do Centro de Tecnologia de Embalagens CETEA, pelas sugestões.

A Engenheiro Assis Eusébio Garcia diretor do Centro de Tecnologia de Embalagens CETEA pela cessão do laboratório de embalagens que permitiu a realização dos ensaios práticos.

A Associação Brasileira de Papelão Ondulado/ABPO pelo importante elo com o setor produtivo através do seu assessor técnico Juarez Pereira.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos.

Aos colegas da Área e Engenharia Agrícola do Iapar pelo apoio incentivo.

Aos técnicos do laboratório de embalagens Fábio e Juliana pela colaboração e ambiente descontraído.

Aos primos Tânia e Eldberto pelo amor à Sarah e a mim.

Aos meus amigos de Gilberto Volpato, Nereu e Beto Casagrande de Cascavel – Pr pelo apoio, incentivo e amizade em todas as horas.

Aos meus irmãos Cláudio, Maria Thaís e Valéria pelo apoio e incentivo.

Ao meu amigo Alípio Martins Ramos de Melo de Alvorada do Sul - Pr, pelo auxílio nos desenhos e amizade.

Resumo

FIGUEIREDO, Paulo Roberto Abreu de Figueiredo, Modelagem de uma embalagem de papelão ondulado para produtos hortícolas, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 190 p. Tese de Doutorado.

Este estudo procurou reunir as informações e metodologias utilizadas na modelagem do papelão ondulado pelo método dos elementos finitos com o objetivo de realizar sua modelagem usando-se o programa de elementos finitos ANSYS, assim como identificar as vantagens e restrições encontradas em cada forma de modelagem, com a finalidade de se obter um modelo de embalagem, com aberturas, destinadas aos produtos hortícolas. Das informações existentes na literatura foram identificadas três formas de representação das estruturas pelo método dos elementos finitos, ou sejam: o modelo de papelão ondulado com miolo estrutural (M_E); o modelo de placa ortotrópica homogênea em camadas com miolo como forma de sanduíche (M_S); e o modelo de placas ortotrópicas homogêneas de camada única idealizada (M_I). Os resultados mostraram que as estruturas modeladas na forma M_E tiveram os valores correspondentes aos ensaios práticos quando se acrescentou aos miolos uma camada adesiva. Para os modelos de elementos finitos em forma de camadas tipo sanduíche (M_S), a aproximação aos valores obtidos nos ensaios experimentais foi possível obter um ajuste muito bom, desde que os valores atribuídos para os módulos de cisalhamento e torcionais tivessem uma redução que os aproximasse dos valores reais. Seguindo este mesmo procedimento, para os módulos de cisalhamento e torcionais, foram ajustados os modelos de placas ortotrópicas homogêneas de camada única idealizada (M_I).

Palavras – chave

Embalagem, Papelão Ondulado, Método dos Elementos Finitos, Produtos hortícolas

Abstract

FIGUEIREDO, Paulo Roberto Abreu de Figueiredo, Modeling of the corrugated paperboard packaging for horticultural products, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 190 p. Tese de Doutorado.

This work tried to assembled the informations and the methodologies for the modeling of the corrugated paperboard by the finite element method with the objective of realize the modeling in the program ANSYS and identify the advantages and restrictions of this method. Get a package modeling with opening destined for horticultural products. Of extant information in literature were identify three shapes of structures representing by the finite element method, they were: The corrugated paperboard with structural crumb modeling (M_E); The homogenize orthotropic plaque in layers with crumb as sandwich shape modeling (M_S) and The homogenize orthotropic plaque in unique idealized layer modeling (M_I). The results showed that the structures modeled in M_E shape had the practice rehearsal corresponding values when were added in the crumbs a sticker layer. For the finite element method in shape of sandwich layer (M_S), the approximation of the obtained values in the experimental rehearsal was possible to get a real good adjust, since the assign values for the chiseling and twisting modules had a reduce that approach then with the real values. Following this same procedure, for the chiseling and twisting modules, were adjusts the homogenize orthotropic plaque in unique idealized layer modeling (M_I).

Key words

Packaging, Corrugated Paperboard, Finite Element Method, Horticultural Products.

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	viii
Nomenclatura	xii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Diagnóstico e estado da arte	3
1.3 Hipóteses	7
1.4 Objetivos	8
Capítulo 2	10
Revisão de Literatura	10
2.1 Definição e características principais	10
2.2 Relações constitutivas	12
2.3 Propriedades mecânicas dos componentes do papelão ondulado	14
2.4 Avaliação do desempenho do papelão ondulado a partir dos seus componentes	17
2.5 Dimensionamento de embalagens de papelão ondulado	19
2.6 Análise de flambagem com o cálculo da carga crítica	19
2.7 Modelagem do papelão ondulado pelo método dos elementos finitos	22
2.8 Modelagem de embalagens de papelão ondulado para produtos hortícolas pelo método dos elementos finitos considerando a cadeia do frio.	26
2.9 Conclusão	31
Capítulo 3	32
Fundamentos Teóricos	32
3.1 Introdução	32

3.2 Teoria de placa	32
3.3 Teoria da modelagem do papelão ondulado	35
3.3.1 Teoria da modelagem com miolo ortotrópico homogêneo em forma de sanduíche	38
3.4 Conclusões	42
Capítulo 4	44
Material e Métodos	44
4.1 Apresentação	44
4.2 Características do material utilizado	44
4.3 Composição das estruturas de papelão ondulado utilizadas	45
4.4 Embalagens utilizadas no ensaio de compressão.	46
4.5 Determinação da gramatura dos componentes e das estruturas do papelão ondulado.	46
4.6 Determinação da espessura dos componentes e das estruturas do papelão ondulado	47
4.7 Determinação da rigidez à flexão dos componentes da estrutura do papelão	47
4.8 Determinação da resistência à tração e porcentagem de alongamento do papel.	48
4.9 Determinação da resistência ao esmagamento do anel do papel (RCT).	
4.10 Determinação da resistência à compressão do papel ondulado em aparelho Concora (CCT).	50
4.11 Determinação da resistência à compressão do papel do papel (SCT).	51
4.13 Determinação da espessura total da estrutura do papelão ondulado.	52
4.14 Cálculo estimado da resistência à compressão de coluna estrutura do papelão ondulado a partir da resistência á compressão dos componentes.	52
4.15 Determinação da resistência à compressão da estrutura do papelão ondulado.	53
4.16 Determinação da rigidez à flexão da estrutura do papelão ondulado	54
4.17 Determinação da rigidez à flexão da estrutura do papelão ondulado em aparelho de dois pontos	54
4.18 Determinação da resistência à compressão das caixas de papelão ondulado.	55
4.19 Cálculo da rigidez em flexão das estruturas de papelão ondulado pelo método analítico proposto por CARLSSON et al. (1985).	56
4.20 Cálculo da resistência à compressão do papelão ondulado utilizado o procedimento empírico proposto por MCKEE et al. (1963).	59
4.21 Relações encontradas por BAUM et al. (1981) para o papelão ondulado	60
4.22 Relações encontradas por NORDSTRAND et al. (1994) especificamente para papelão ondulado para o coeficiente de Poison e o módulo de cisalhamento.	61
4.23 Cálculo da carga crítica pelo procedimento de LEKHNITSKII (1968)	62

4.24 Procedimento proposto por POMMIER e POUSTIS (1989) para estimar a resistência à compressão de embalagens de papelão ondulado a partir da resistência das placas	63
4.25 Elemento de placa selecionado Shell 91.	67
4.25.1 Hipóteses e Restrições.	69
4.25.2 Relação Tensão – Deformação	69
4.25.3 Cálculo das Tensões , Forças e dos Momentos.	70
4.25.4 Critério de ruptura para tensão máxima	76
4.26.1 Análise Estática	77
4.26.2 O método reduzido	79
4.27 Propriedades das placas	80
4.28 Análise estatística	81
4.29 Considerações finais do capítulo	81
Capítulo 5	82
Resultados	82
5.1 Introdução	82
5.2 Características dos papéis capa e miolo	82
5.4 Dimensões das embalagens e as propriedades das placas	96
5.5 Desempenho das embalagens de papelão ondulado	98
5.5 Conclusões	101
Capítulo 6	103
Modelagem do Papelão Ondulado pelo Método dos Elementos Finitos	103
6.1 Introdução	103
6.2 Modelagem por elementos finitos com programa ANSYS	104
6.3 As três formas para a modelagem pelo método dos elementos finitos	104
6.4 Modelagem com miolo estrutural (ME)	106
6.5 Modelo de papelão com miolo estrutural e onda com forma trapezoidal (M_{ET}).	106
6.6 Modelo de placa ortotrópica homogênea sanduíche de ondas C (MS_C) e BC ($MSBC$)	110
6.7 Modelo idealizado de placa ortotrópica homogênea de única camada ondas C (MI_C) e BC ($MIBC$) .	114
6.8 As vantagens e restrições identificadas para a modelagem das estruturas de papelão ondulado analisadas e as condições de contorno das embalagens	116
6.9 Recomendações e conclusões	117
Capítulo 7	121
Verificação dos modelos de Papelão Ondulado pelo Método dos Elementos Finitos	121

7.1 Introdução	121
7.2 Rigidez de quatro pontos	122
7.3 Modelos de elementos finitos das placas Testeira e Lateral que formam as embalagens de papelão avaliadas no ensaio de compressão.	125
7.3.1 Placas modelo M_{ET} (Modelo Estrutural Trapezoidal)	125
7.3.2 Modelos de elementos finitos das placas Testeira e Lateral (MS_C) e (MI_C).	126
7.3.3 Modelos de elementos finitos das placas Testeira e Lateral com aberturas para produtos hortícolas (MSC).	128
7.8 Estimativa da carga de compressão da embalagem modelo 201 através dos modelos de elementos finitos da placa Lateral nas formas de modelagem (MS) e (MI).	130
7.9 Modelos de elementos finitos de embalagem 201 obtidos nas formas (MS) e (MI).	132
Capítulo 8	135
Conclusões	135
Sugestões para pesquisas futuras	138
Referências Bibliográficas	139
Anexo I	148
Figuras das estruturas de papelão, embalagens e dos ensaios de desempenho realizados.	148
Anexo II	150
Tabelas e figuras de desempenho dos materiais avaliados.	150
Anexo III	154
Figuras dos modelos de elementos finitos das estruturas de papelão ondulado e das embalagens.	154

Lista de Figuras

FIGURA 3. 2 Plano de simetria (XY), da estrutura do papelão ondulado.	36
FIGURA 4.17.1 Esquema do ensaio das estruturas de papelão ondulado em aparelho de dois pontos.	55
FIGURA 4.22. 1 Detalhe das tensões de cisalhamento e comprimento do arco S.	61
FIGURA 4.24.1 Embalagem composta das placas P1 e P2, testeira e lateral respectivamente.	63
FIGURA 4.24. 3 Dimensões (mm) das aberturas projetadas.	65
FIGURA 4.24. 4 Disposição e dimensão (mm) das duas aberturas em cada lateral.	66
FIGURA 4.24. 5 Disposição das 3 aberturas em cada lateral em (mm).	66
FIGURA 4.24. 6 Disposição e dimensão da abertura da placa testeira.	
FIGURA 4.25. 1 Sistema de coordenadas do elemento, geometria e localização dos nós.	68
FIGURA 4.25. 2 Elemento quadrático de oito nós da família Serendipity; e os oito nós a ele associados. O sistema de referência local tem o vetor r normal ao plano na direção da espessura e os vetores t e s constituem as coordenadas curvilíneas solidárias ao plano.	69
FIGURA 4.25. 3 Localização dos pontos de integração.	75
FIGURA 5.1 Curva da tensão pela deformação inteira tal como é obtida da máquina universal de ensaios sem o expurgo do trecho de acomodação da amostra nas garras do Instron. Papel Kraft 125 DF.	85
FIGURA 5.2 Curva da tensão pela deformação com o expurgo do trecho de acomodação da amostra nas garras do Instron. Papel Kraft 125 DF.	85
FIGURA 5.3 Curva da tensão pela deformação com o expurgo do trecho de acomodação da amostra nas garras do Instron. Papel Miolo 170 DF.	86

FIGURA 5.4. Módulo de elasticidade dos papéis capa (C) e miolo (M), obtidos por meio de ensaios de flexão (f) e por tração (t), nas direções de fabricação (DF) e transversal (DT).	87
FIGURA 5.5. Índice de compressão dos papéis capa realizados pelos métodos de <i>short span</i> (ISCT), compressão do anel corrugado em aparelho Concora (ICCT) e compressão do anel (IRCT), em função da gramatura na direção de fabricação (DF) e transversal (DT).	89
FIGURA 5.6. Índice de compressão dos papéis miolo determinados pelos métodos de <i>short span</i> (ISCT), compressão do papel corrugado em aparelho Concora (ICCT) e compressão de anel (IRCT), em função da gramatura na direção de fabricação (DF) e transversal (DT).	90
FIGURA 5.7 Resistência à compressão de coluna.	93
FIGURA 5.8 Valores de rigidez para as estruturas de papelão ondulado estimados pelo procedimento de CARLSSON (1985), a partir dos valores de módulo de elasticidade realizados pelos métodos de tração e flexão para as direções de fabricação (DF) e transversal (DT).	96
FIGURA 6.1 Geometrias para das ondas do miolo :(a) trapezoidal; (b) reta - senoidal e (c) cilíndrica.	107
FIGURAS A1 (esquerda) e A2 (direita). Estruturas de papelão ondulado de onda C e BC respectivamente.	148
FIGURAS A5 e A6. À esquerda a Figura A5, ensaio de resistência à tração dos papéis capa e miolo na máquina universal de ensaios. FIGURA A6 à direita ensaio de resistência ao esmagamento do anel (RCT) dos papéis capa e miolo na máquina tipo barra de deflexão marca Reg Med.	149
FIGURA A7. Ensaio de rigidez em flexão da estrutura de papelão ondulado em aparelho de quatro pontos.	149
FIGURA B1. Curva de deformação de amostra de embalagem modelo 200.	153
FIGURA B2. Curva de deformação de amostra de embalagem modelo 201.	153
FIGURA C1. Modelo de papelão com miolo estrutural e onda com forma trapezoidal, acima detalhes da terceira camada com elemento de cola na crista da onda à esquerda (M_{ETA}) e sem elemento de cola à direita (M_{ET}).	154
FIGURA C2. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MS_C).	154
FIGURA C3. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea sanduíche onda BC (MS_C).	155
FIGURA C4. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea idealizada (MI_{BC}).	155

FIGURA C5. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea idealizada (MI_{BC}).	156
FIGURA C6. Gráfico de distribuição de tensão na direção Z do modelo FEM rigidez em flexão de quatro pontos de placa ortotrópica homogênea idealizada (MI_{C45}).	156
FIGURA C7. Placa lateral modelo estrutural trapezoidal ME_T estrutura CK45.	157
FIGURA C8. Modelo FEM de placa testeira com abertura ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MSC).	157
FIGURA C9. Modelo FEM de placa lateral ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MSC) com duas aberturas.	158
FIGURA C10. Modelo FEM de placa lateral ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MSC) com três aberturas.	158
FIGURA C11. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda C (M_{SC}).	159
FIGURA C12. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda C (MSC), deformação na direção da aplicação do carregamento UY.	159
FIGURA C13. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda com duas aberturas laterais C (MSC).	160
FIGURA C14. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda C (MSC), deformação na direção da aplicação do carregamento UY.	160

Lista de Tabelas

TABELA 2.1. Características dos tipos de onda (PICHLER, 1987).	12
TABELA 2.2. Constantes elásticas dos elementos constituintes do papelão.	16
TABELA 2.3. Fatores de correção para projetos de caixas de papelão ondulado.	20
TABELA 2.4. Características de 4 embalagens para tomate.	28
TABELA 4.1 Composição das estruturas de onda C, de acordo com a gramatura nominal (gm^{-2}).	45
TABELA 4.2 Composição das estruturas de onda BC de acordo com a gramatura nominal (gm^{-2}).	46
TABELA 4.3 Número de aberturas e código, porcentagem das aberturas e número de nós das placas para produtos hortícolas.	64
TABELA 5.1. Gramatura e espessura dos papéis capa (c) e miolo (m).	83
TABELA 5.2. Resistência à tração e rigidez em flexão dos papéis capa e miolo.	84
TABELA 5.3. Resistência ao rasgo e resistência ao esmagamento de ondas onduladas, em aparelho Concora.	88
TABELA 5.4. Gramatura total (g.m^{-2}) e estrutura do papelão ondulado.	90
TABELA 5.5. Parâmetros geométricos das estruturas de onda C avaliadas experimentalmente.	91
TABELA 5.6 Parâmetros geométricos das estruturas de onda BC avaliadas experimentalmente.	92
TABELA 5.7. Rigidez em flexão das estruturas de papelão ondulado, medida em aparelho de quatro pontos (N.m).	94
TABELA 5.8 Dimensões internas e externas das embalagens avaliadas experimentalmente.	97
TABELA 5.9 Estruturas de papelão ondulado classificadas como finas de acordo com REDDY (1984) e o índice de esbeltez proposto por JOHNSON et al. (1983).	97

TABELA 5.10 Estruturas de papelão ondulado utilizadas nos ensaios de rigidez de dois pontos placas (Pichler/IPT) e rigidez em flexão de quatro pontos classificadas como finas e moderadamente grossas de acordo com REDDY (1984).	98
TABELA 5.11 Resistência à compressão das embalagens de papelão ondulado obtida nos ensaios e a estimativas de resistência obtida pelos métodos de MCKEE et al. (1963) da carga crítica (Pcr) N.	99
TABELA 5.12 Estimativa da resistência à compressão da embalagem modelo 201 calculada com três diferentes fórmulas utilizadas na literatura para embalagens de papelão ondulado, com resultados da carga crítica (Pcr) N.	100
TABELA 6.1 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma estrutural (M_{ET}) da estrutura CK45.	108
TABELA 6.2 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma estrutural (M_{ET}) da estrutura CK58.	109
TABELA 6.3 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma sanduíche (M_{ST}) das estruturas CK45 e CK58.	111
TABELA 6.4 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma sanduíche (M_S) da estrutura BCK85.	112
TABELA 6.5 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma sanduíche (M_S) da estrutura BCK120.	113
TABELA 6.6. Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma idealizada (M_{IT}) das estruturas CK45 e CK58.	114
TABELA 6.7 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma idealizada (M_{IT}) das estruturas BCK85 e BCK120	115

TABELA 6.8 Quadro comparativo das vantagens e restrições para cada uma das formas de modelagem realizadas pelo método dos elementos finitos (M_E , M_S e M_I).	118
TABELA 7.1. Valores de flecha das estruturas ensaiadas em aparelho de 4 pontos e o modelo de elementos finitos idealizado de camada única (MI).	122
TABELA 7.2. Verificação da variação da flecha máxima em função da variação dos módulos de cisalhamento transversal (G_{xz} e G_{yz}) do modelo FEM idealizado de camada única (MI) da estrutura CK45 e a comparação com o dado experimental.	124
TABELA 7.3 Carga crítica de flambagem N_{cr} KN.m^{-1} obtida para os modelos de elementos finitos (ME_T), das placas testeira e lateral de elementos finitos (ME_T), com e sem adesivo.	126
TABELA 7.4. Verificação da variação da carga crítica de flambagem em função da variação dos módulos de cisalhamento transversal (G_{xz} e G_{yz}) do modelo de elementos finitos (MS) da estrutura CK45 e a comparação com o dado experimental.	128
TABELA 7.5. Carga crítica de flambagem N_{cr} kN.m^{-1} das placas da embalagem obtida pelos métodos dos elementos finitos e analítico.	129
TABELA 7.6 Carga crítica de flambagem N_{cr} N das placas da embalagem obtida pelo métodos dos elementos finitos para placas com duas e três aberturas.	131
TABELA 7.7. Estimativa da resistência à compressão da embalagem de papelão ondulado modelo 201 a partir das estimativas de resistência das placas laterais N.	132
TABELA 7.8 Carga crítica de flambagem N_{cr} Nm^{-1} da placa lateral modelada na forma de sanduíche comparada com a teoria de LEKHNITSKII (1968).	133
TABELA 7.9. Carga crítica de flambagem P_{cr} (N) dos modelos de embalagens modeladas na forma de sanduíche e ortotrópica homogênea comparada com a teoria de LEKHNITSKII (1968).	134
TABELA B1. Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos papéis capa e miolo.	150
TABELA B2. Módulo de Elasticidade obtido através da Rigidez Taber para os papéis capa e miolo.	150
TABELA B3. Resistência à compressão dos papéis capa e miolo realizados pelos métodos de compressão de anel (RCT), short span (SCT) e compressão do papel corrugado em aparelho concora (CCT) (kNm^{-1}).	151
TABELA B4. Valores de resistência à compressão de coluna do papelão ondulado (kN.m^{-1}).	151

TABELA B5. Rigidez em flexão do papelão ondulado, medida em aparelho de dois pontos (N.m).	152
TABELA B6. Rigidez em flexão de papelão ondulado, calculada pelo procedimento proposto por CARLSSON et al. (1985).	152

Nomenclatura

Letras Latinas

a - ponto médio entre as camadas externas do papelão	[-]
c - constante	[-]
B - largura da placa	[m]
BC - estrutura de papelão ondulado com ondas do tipo B e C	[-]
cr - comprimento da crista	[m]
C - estrutura de papelão ondulado com onda do tipo C	[-]
C_L - resistência à compressão de coluna	[N.m ⁻¹]
d - constante	[-]
DF - direção de fabricação	[-]
DT - direção Transversal ao processo de fabricação	[-]
D₁₁ - rigidez na direção de fabricação	[N.m]
D₂₂ - rigidez na direção transversal	[N.m]
D₁₂ - rigidez de cisalhamento	[N.m]
D₆₆ - rigidez torcional	[N.m]
E_(1,2,3) ou (x, y, z) - módulo de elasticidade nas três direções octogonais	[GPa]
E_m - módulo de elasticidade do papel para a camada k (miolo)	[GPa]
E_k - módulo de elasticidade da camada equivalente k na direção	[GPa]
f - constante	[-]
F - carga	[N]
FC - fator de correção	[-]
FR - força de ruptura média	[N]
G_(xy, xz, yz) - módulo de cisalhamento	[GPa]
Gr - gramatura	[g.m ⁻²]
h_t - espessura total da estrutura de papelão ondulado	[m]
h_c - altura da onda	[m]
H - rigidez torcional total	[N.m]
I - momento de inércia por unidade de comprimento	[m ³]
I_{ES} - índice de esbeltez	[-]
K_M - coeficiente obtido por MCKEE et al. (1963)	[-]
K_f - coeficiente de flambagem	[-]
L - comprimento do corpo de prova	[m]

Lê - resistência à compressão da capa externa	[N.m ⁻¹]
Li - resistência à compressão da capa interna	[N.m ⁻¹]
lt - comprimento lateral da onda	[m]
M - momento	[N.m]
Mi - resistência à compressão do miolo	[N.m ⁻¹]
Ncr - carga crítica de flambagem por unidade de comprimento	[N.m ⁻¹]
Pcr - carga crítica de flambagem	[N]
2p - comprimento total da onda	[m]
P - peso do corpo de prova	[g]
Q - rigidez reduzida	[N.m ⁻²]
R - resistência à tração	[N.m ⁻¹]
RE - resistência à compressão da embalagem pela fórmula completa de MCKEE et al. (1963)	[N]
REr - resistência à compressão da embalagem pela fórmula reduzida de MCKEE et al. (1963)	[N]
RT - rigidez taber	[m.N.m]
S - comprimento do arco	[m]
Sb_m - rigidez da camada referente ao miolo	[N.m]
t_c - espessura da capa	[m]
t_m - espessura do miolo	[m]
t_k - espessura da camada k ou (2.a)	[m]
Z - perímetro da embalagem	[m]
Z_k - espessura da camada k	[m]
w - deflexão normal à superfície da placa	[-]
W - Largura do corpo de prova	[m]

Letras Gregas

A - ângulo de inclinação da onda	[°]
Γ - coeficiente determinado por LIBOVE e RUBKA (1953)	[-]
Δ - deflexão	[m]
ε - deformação específica	[-]
η - coeficiente	[-]
λ - coeficiente de flambagem da estrutura	[-]
v_(1,2,3) ou (x, y, z) - coeficiente de Poisson nas três direções octogonais	[-]
σ - tensão	[Pa]
τ - tensão de cisalhamento	[Pa]
ψ - coeficiente que depende da altura e largura da placa	[-]

Superescritos

C - capa	[-]
M - miolo	[-]

Subscritos

c - Capa	[-]
m - Miolo	[-]

Abreviações

ABPO - Associação Brasileira de Papelão Ondulado	[]
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas	[]
BCK85 - Estrutura de onda BC tipo 85	[-]
BCK120 - Estrutura de onda BC tipo 120	[-]
CK45 - Estrutura de onda C tipo 45	[-]
CK58 - Estrutura de onda C tipo 58	[-]
CCT - Resistência à compressão do papel ondulado em aparelho <i>concora</i>	[N.m ⁻¹]
ECS - Resistência à compressão de coluna do papelão ondulado	[N.m ⁻¹]
FAO – ONU - Organização das nações unidas	[]
IRCT - Índice de resistência à compressão do anel	[kN.m ⁻¹ .Kg ⁻¹]
ICCT - Índice de resistência à compressão em aparelho <i>concora</i>	[kN.m ⁻¹ .Kg ⁻¹]
ISCT - Índice de resistência à compressão pelo método <i>short span</i>	[kN.m ⁻¹ .Kg ⁻¹]
RCT - Resistência à compressão do anel	[N.m ⁻¹]
P ₂ aMS ₁ - Placa com duas aberturas placa sanduíche e 3,71 % de abertura	[-]
P ₂ aMS ₂ - Placa com duas aberturas placa sanduíche e 5,14% de abertura	[-]
P ₂ aMS ₃ - Placa com duas aberturas placa sanduíche e 6,58 % de abertura	[-]
P ₃ aMS ₁ - Placa com três aberturas placa sanduíche e 5,56 % de abertura	[-]
P ₃ aMS ₂ - Placa com três aberturas placa sanduíche e 7,72 % de abertura	[-]
P ₃ aMS ₃ - Placa com três aberturas placa sanduíche e 9,87 % de abertura	[-]
SCT - Resistência à compressão do papel pelo método <i>short span</i>	[N.m ⁻¹]
UR - Umidade Relativa	[%]

Siglas

ABPO - Associação Brasileira de Papelão Ondulado	[]
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas	[]
FAO – ONU - Organização das nações unidas	[]

Símbolos obtidos do manual de utilização do programa de elementos finitos Ansys

A - Elemento de área no plano s-t	[m ²]
{ <i>a_c</i> } - Vetor de aceleração tota	[-]
[D] _j - Matriz de propriedades do material	[-]
<i>E_{xj}</i> - Módulo de Young da camada na direção x da camada j	[GPa]
<i>F^r</i> - Vetor de reação de carga	[-]
{ <i>F^d</i> } - Vetor de carga total aplicada	[-]
{ <i>Fnd</i> } - Vetor das cargas nodais aplicadas	[-]
{ <i>F^{ac}</i> } - Vetor de carga de aceleração	[-]
{ <i>Fth</i> } - Vetor de carga térmica do elemento	[-]
{ <i>F^{pr}</i> } - Vetor de carga de pressão do elemento	[-]
<i>G_{x,yj}</i> - Módulo de cisalhamento da camada no plano x-y da camada j	[GPa]

HBI - Householder-Bisection-Inverse	[-]
[K] - Matriz de rigidez total	[-]
[K_e] - Matriz de rigidez do elemento	[-]
[K_r] - Matriz de rigidez reduzida	[-]
[M_r] - Matriz de massa reduzida	[-]
[M] - Matriz de massa total	[-]
[M_r] - Matriz de massa do elemento	[-]
M_x - Momento na direção de x	[N.m ⁻¹]
M_y - Momento na direção de y	[N.m ⁻¹]
N₁ - Número de camadas	[-]
N_x - Quantidade de saída de NX	[-]
N - Número de elementos	[-]
r - Coordenada normal, que varia de -1.0 (abaixo) até +1.0 (acima)	[-]
t - Espessura média total	[m]
t_r - Espessura da camada j	[-]
T_x - Força por unidade de comprimento	[N.m ⁻¹]
{u} - Vetor de deslocamentos nodais	[-]
z_j^b - Coordenada de z na camada inferior j	[-]
z_j^t - Coordenada de z na camada superior j	[-]
z - Coordenada normal da casca, com z = 0 na superfície média da casca	[-]
Δσ_{x,j}³ - Tensões no elemento na direção x da camada j no ponto 3 de integração	[-]
λ_i - Autovalor	[-]
v_{xy,j} - Coeficiente de Poisson para camada no plano x-y da camada j	[-]
ξ₂ - Valor máximo da tensão do critério de ruptura	[-]
σ_{xz,j} - Tensão média de cisalhamento na camada j no plano x-z do elemento	[-]
σ_x - Tensão da camada na direção x	[-]
σ_{x^r} - Tensão de ruptura da camada na direção x	[-]
σ'_{xz} - Valor ajustado da tensão de cisalhamento	[N.m ⁻²]
σ'_{yz,j} - Tensão de cisalhamento transversal tal como calculada a partir das relações deformação específica- deslocamento	[N.m ⁻²]
σ_{x,j}^t - Tensão na camada superior j e na direção de x do elemento	[-]
τ_x^k - Tensão interlaminar de cisalhamento entre as camadas k e k+1	[-]
{φ_i} - Autovetor	[-]

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

O papelão ondulado é um material presente em quase todos os setores da economia na forma de embalagens ou acessórios, portanto, a sua produção está diretamente ligada a variação da atividade econômica, sendo desta forma, utilizado como um dos parâmetros para medir o nível da atividade econômica industrial (FOLHA DE SÃO PAULO, 2001).

A evolução da participação do papelão ondulado no mercado brasileiro de embalagens é significativa, haja vista o crescimento de 77% observado no mercado de caixas de papelão ondulado no Brasil, verificado no período de 1990-98, apesar da utilização cada vez maior de outras formas de embalagens como sacos de papel, papel cartão, embalagens plásticas. O papelão ondulado tem uma produção estimada, para 2005, de 2,3 milhões de toneladas e uma participação no mercado brasileiro de embalagens que pode passar de um taxa de crescimento de 29,5% em 1999 para uma previsão de crescimento ao redor de 32,3% em 2005 (WALLIS, 2000).

Segundo dados da Associação Brasileira de Papelão Ondulado – ABPO (2004), os principais consumidores de papelão ondulado no ano de 2004, por segmento da economia, foram: produtos alimentícios com 35,9%; químicos e derivados 9,2%; avicultura e fruticultura com 8,9%; bebidas e fumos 5,9%; têxteis e vestuário 3,8%; produtos farmacêuticos e perfumaria com 3,0% e outros com 19,2%. A partir desses dados pode-se perceber a importância que tem os

produtos hortícolas que junto com a avicultura somam quase 9% do consumo de papelão ondulado do Brasil.

O papelão ondulado por suas características construtivas é um material com qualidades únicas como: facilidade construtiva, custo reduzido em relação a sua capacidade de contenção do produto e resistência mecânica. A característica de boa resistência mecânica, está diretamente relacionada com a principal função que deve exercer uma embalagem, a proteção do produto (PICHLER, 1999). A função de comunicação, que cada vez mais ganha importância na escolha do tipo de embalagem, é segundo POMMIER et al. (1988) dependente da facilidade em que se tem de imprimir nela, e que por sua vez, depende da composição utilizada que, por sua vez, influi diretamente na resistência mecânica da embalagem.

A crescente demanda por embalagens que apresentem a um só tempo qualidades como origem renovável, “reciclabilidade”, e boa apresentação, coloca o papelão ondulado como uma opção sempre viável sob todos os ângulos citados, e reforçam a longevidade do uso do papelão.

A agricultura brasileira passa por um processo de modernização principalmente no que se refere à qualidade do produto. O mercado se amplia dia a dia abrindo novas frentes, principalmente no exterior, e está cada vez mais competitivo e exigente. Para atingir esses mercados, fornecedores de produtos hortícolas tem que apresentar o produto de uma forma que garanta sua integridade e tenha uma boa aparência. Levar em consideração os fatores ambientais, tais como radiação, umidade e também a prevenção de injúria mecânica causada durante o transporte são requisitos importantes no projeto de embalagem, afim de que o produto chegue ao destino com a qualidade desejada (CHITARRA e CHITARRA, 1990).

A função de conter, proteger, transportar e manter um produto em condições ótimas da origem ao destino significa garantir uma perda mínima de qualidade, até o seu destino e requer da embalagem características específicas quanto à forma e estrutura (GAYET et al, 1995).

A manutenção da qualidade dos produtos hortícolas está na dependência, em primeiro lugar, das tecnologias empregadas nos processos de colheita e pós-colheita, e numa segunda fase da seleção adequada das embalagens. As condições em que são armazenados são determinantes

no nível da atividade metabólica após a colheita, e isto faz com que as condições ambientais determinem o período de vida que o produto terá com qualidade. Estes produtos sofrem perdas por danos mecânicos devido ao manuseio, transporte e distribuição. A principal função da embalagem é a de proteger o produto da ação causada pelo atrito entre os frutos e dos frutos com a embalagem.

Por outro lado o crescimento do uso da paletização, maior período e condições adversas de armazenamento além de transporte a longas distâncias, tem exigido boas condições de estocagem das embalagens (POMMIER e POUSTIS, 1989).

Ao longo dos últimos 40 anos tem-se despendido um esforço considerável para viabilizar métodos empíricos confiáveis MCKEE et al. (1963), primeiramente, e modelos matemáticos como elementos finitos a partir de 1990 POMMIER e POUSTIS (1989) que permitam o dimensionamento adequado de uma embalagem para atender a mais importante característica citada, a resistência mecânica.

A busca pela garantia da qualidade dos produtos hortícolas tem envolvido vários setores governamentais (Ministério da Agricultura; Ministério da Saúde e Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior), que resultou na Instrução Normativa 009 de 12 de novembro de 2002, com áreas de interesse inter-relacionadas com a necessidade de regulamentar o acondicionamento, manuseio e comercialização dos produtos hortícolas “in natura” em embalagens próprias. Esta norma procura assegurar a verificação das informações a respeito dos produtos hortícolas, além da obrigatoriedade da indicação qualitativa e quantitativa, bem como que as dimensões externas devem permitir empilhamento, preferencialmente, em palete com medidas de 1,00 m por 1,20 m. Esta instrução normativa no seu parágrafo único diz ser "de inteira responsabilidade, do fabricante da embalagem, informar as condições apropriadas de uso, tais como o peso máximo e o empilhamento suportável, as condições de manuseio, bem como se a mesma é retornável ou descartável".

1.2 Diagnóstico e estado da arte

A complexidade de uma abordagem mecânica estrutural a respeito de um assunto que se caracteriza fortemente pelo seu caráter multidisciplinar não poderia ter seus contornos e linha de ação definidos sem que fossem consultados alguns atores relevantes da cadeia do produto ligados à pesquisa e a indústria do segmento de “Embalagem de Papelão Ondulado”, primeiramente e num segundo momento os agentes ligados à distribuição e comercialização de “Embalagem Para Produtos Hortícolas”.

Para tanto, foram entrevistados seis pesquisadores ligados à indústria e à pesquisa, considerados como informantes chaves, segundo a metodologia proposta por CHANG e SEREIA (1993) e quatro agentes da cadeia produtiva do tomate, escolhido como produto hortícola representativo.

O objetivo desta etapa inicial do trabalho é reduzir o esforço em trabalho conexo de pouca relevância, concentrar esforços no foco do problema com mais clareza.

A principal contribuição foi apreender, ainda que de forma preliminar, as condições críticas a que são submetidas às embalagens, os principais critérios de julgamento sobre condições de armazenamento, e informações a respeito dos grupos de referência em pesquisa sobre papelão ondulado.

Com relação às técnicas de análise estrutural como elementos finitos e o uso de recursos computacionais que pudessem auxiliar no desenvolvimento de embalagens de papelão ondulado o pensamento dominante, entre os profissionais, foi na direção de ser esta uma meta a ser buscada, mas sem perspectivas de curto prazo. A falta de informações mais precisas sobre o método de elementos finitos direcionado à modelagem do papelão ondulado foi apontada como a causa principal de não se ter conhecimento da existência de alguém que trabalhe no Brasil com este método. Primeiro pela dificuldade de se reunir uma considerável quantidade de informações necessárias à sua implementação até hoje só encontrada de forma fragmentada e com poucos trabalhos específicos dirigidos ao assunto. Segundo, por causa da formação dos técnicos ligados a área de embalagens onde são poucos os que tem interesse direto na aplicação dessa ferramenta de análise estrutural.

Entre os produtos hortícolas com maior volume de comercialização, o tomate apresenta expressiva importância e também apresenta uma série de problemas ligados ao processo de distribuição e varejo, que são comuns a diversos outros produtos, como são os casos do mamão, papaia e da banana, em que a embalagem é um fator importante e que se estende da colheita até o consumidor final.

Muitos problemas com embalagens são comuns a um grupo considerável de produtos hortícolas. Aliado a isso, o fato de que muitas embalagens são desenvolvidas considerando um espectro que envolve um grupo de produtos, ao invés de um produto específico com objetivo de reduzir custos, considerando o universo total das indústrias de embalagens. Exceção feita a poucas indústrias que possuem equipe de desenvolvimento de produto, como é o caso da Rigesa Westvaco, que oferece aos clientes embalagens personalizadas, com uma gama de opções para cada cliente e para cada tipo de produto, especificamente.

Quanto ao benefício e a revenda do tomate foram visitadas duas empresas com diferentes padrões técnicos de seleção. Uma primeira empresa, que pode ser considerada de pequeno porte, faz a seleção apenas por tamanho do produto e mecanicamente, com limitações no processo de seleção do grau de maturidade do produto, o que requer que esta etapa seja realizada manualmente. Na segunda empresa, de porte médio para grande, o processo de seleção é feito eletronicamente, e os recursos possibilitam seleção numa grande faixa de tamanhos e cores.

A cor é muito importante por que, no caso do tomate, representa o estado de amadurecimento do produto, ou seja, indica o tempo de vida útil de que dispõe o comerciante para realizar sua venda e que medidas ele deve tomar para prolongar este período.

Na ponta do consumo foram realizadas duas visitas a duas lojas do Carrefour, uma em Londrina -PR e outra em Campinas-SP. Pode-se verificar que os critérios para comercialização de produtos hortícolas são decididos localmente. Enquanto a loja de Campinas adotava um procedimento padrão, com embalagem de papelão ondulado personalizada, a loja de Londrina, dada a inexistência de oferta com o mesmo padrão de serviço, recebia o produto com diferentes

tipos de embalagens, os quais tinham baixo padrão de seleção, seja por cor ou tamanho. Todavia, a gerência de comercialização de produtos hortigranjeiros do Carrefour de Londrina anotou que a tendência era das compras se tornarem centralizadas em São Paulo, onde seria possível encontrar produtos com melhor qualidade e dentro dos requisitos pretendidos pela rede.

Das visitas aos pontos de comercialização a impressão que ficou foi de que existe ainda uma boa distância a ser percorrida para que o consumidor final seja beneficiado pela adoção de técnicas de seleção e embalagem já disponíveis para os produtos hortícolas. Também o transporte adequado até o ponto de venda final e finalmente a exposição para venda, de forma generalizada e não apenas nas grandes redes.

Mas a tendência, em médio e longo prazo, como atestou o gerente de comercialização do Carrefour - Londrina, é que os avanços sejam colocados a disposição do consumidor com a incorporação de tecnologias de seleção e distribuição mais adequadas.

Neste contexto, segundo Juarez Pereira, assessor técnico da Associação Brasileira de Papelão Ondulado (ABPO) e ligado à Indústria Klabin de Papel e Celulose, a embalagem de papelão ondulado tem certamente o seu lugar assegurado por ser um produto reciclável, por sua versatilidade e por ser oriundo de fontes renováveis. Também por propiciar a produção de embalagens de fácil montagem, enchimento e fechamento, que podem ser feitas manualmente ou com uma ferramenta leve (FAO, 1993).

Os requisitos existentes no projeto de embalagens para produtos hortícolas, diferenciam-se da maioria dos produtos, em razão das exigências de preservação da qualidade desses produtos. Não podem receber carga alguma e, além disso precisam de aberturas para passagem do ar, o que reduz a resistência ao empilhamento destas embalagens (FRASER, 1991).

Assim, no projeto de uma embalagem, a necessidade de se avaliar os níveis de abertura, utilizando o procedimento de tentativa e erro torna-se muito caro e moroso, e requer um projetista com muita experiência. Também, na maioria dos casos, não explora alternativas, que só se tornam possíveis com o recurso de modelos.

A modelagem do papelão ondulado, para o dimensionamento de uma embalagem, utilizando-se o método dos elementos finitos, requer o conhecimento das propriedades mecânicas do material, e o conhecimento das variações dimensionais existentes em decorrência do processo de fabricação.

Com isso, fica evidente que o emprego de uma tecnologia que reduza os custos de análise estrutural, a fim de possibilitar que os fornecedores de produtos hortícolas disponham de opções de embalagens adequadas a cada tipo de produto e condição de uso, é um passo importante a ser dado.

Desta forma, o recurso do método dos elementos finitos pode contribuir com estudos de modelagem, de forma a simular diferentes formas geométricas e condições de carregamento e com vistas à melhoria da qualidade das embalagens, para reduzir os custos de projeto e fabricação, bem como as perdas dos produtos hortícolas na cadeia de comercialização, contribuindo para aumentar a produtividade dos setores envolvidos.

1.3 Hipóteses

Geral

* Este estudo assumiu a hipótese de que se forem conhecidas as propriedades mecânicas dos materiais que compõem as estruturas do papelão ondulado, de tal forma que possam ser caracterizadas como materiais mecânicos, é possível empregar o recurso do método dos elementos finitos na modelagem de uma embalagem de papelão ondulado.

Específicas

* Se existem diferentes formas de se modelar as estruturas ortotrópicas pelo método dos elementos finitos, como no caso específico do papelão ondulado, e se algumas dessas formas forem identificadas, estas poderão ser caracterizadas e modeladas em programas de elementos finitos e ter o seu desempenho comparado com a finalidade de identificar as vantagens e restrições de cada uma destas formas identificadas.

* Se existem procedimentos analíticos e semi-empíricos consagrados pelo uso e teoria sobre o desempenho de estruturas ortotrópicas é possível obter os valores gerados por estes procedimentos, compará-los entre si e com os valores gerados pelos programas de elementos finitos.

* Se o método de elementos finitos permite a modelagem de estruturas vazadas e que para os produtos hortícolas a existência de aberturas é fundamental, então é possível modelar uma embalagem de papelão ondulado para esses produtos, utilizando-se os conhecimentos das propriedades mecânicas das placas que a constituem.

1.4 Objetivos

Gerais

* Reunir, de forma ordenada e num único trabalho, as metodologias disponíveis sobre a aplicação do método dos elementos finitos na modelagem do papelão ondulado, com a finalidade de se obter um modelo de embalagem para produtos hortícolas.

Específicos

* Realizar a caracterização física em laboratório e avaliar o desempenho dos componentes e das estruturas do papelão ondulado, considerando-se desde a fase de papel, passando pelas estruturas ainda em forma de placas e, por fim, das embalagens propriamente ditas, com vistas à determinação das suas propriedades mecânicas e parâmetros que caracterizem o papelão ondulado como material mecânico que permite a sua modelagem pelo método dos elementos finitos.

* Identificar as alternativas existentes na literatura para a modelagem do papelão ondulado, a fim de que estas possam ser implementadas com os recursos disponíveis em programas de elementos finitos.

* Comparar os resultados de desempenho dos modelos de elementos finitos com os valores obtidos nos ensaios laboratoriais e os valores obtidos através de cálculos analíticos de modo a identificar as vantagens e restrições de cada forma de modelagem.

* Modelar uma embalagem de papelão ondulado para produtos hortícolas utilizando o método de elementos finitos, a partir do conhecimento das propriedades mecânicas dos elementos constituintes das placas e comparar os resultados de resistência à compressão entre os valores obtidos para os modelos, com e sem aberturas.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

2.1 Definição e características principais

O papelão ondulado é uma estrutura formada por um ou mais elementos ondulados (miolos) fixados a um ou mais elementos planos (capas), por meio de adesivo aplicado no topo das ondas (ABNT, 1984), conforme mostrado na Figura 2.1.

No processo de fabricação, o papel, elemento básico que irá compor a estrutura do papelão ondulado, apresenta diferenças bastante acentuadas quanto à magnitude das propriedades mecânicas medidas em duas direções ortogonais: a direção de fabricação e a direção transversal ao processo de fabricação. A maior rigidez, portanto maior módulo de elasticidade, está alinhada com a direção de fabricação do papel, isto porque alinhada com a direção de fabricação estão as propriedades mecânicas mais nobres do papel, pois as fibras mais longas conferem maior grau de resistência mecânica ao papel.

A fabricação do papelão ondulado é realizada com uma máquina chamada ondulateira que utiliza, além do papel e a cola, o vapor d'água.

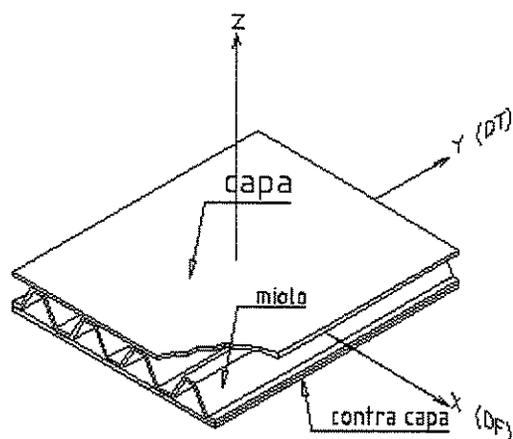


FIGURA 2. 1 Estrutura do papelão com detalhe dos elementos constituintes capa e miolo, e as direções de fabricação (DF) e transversal (DT).

No caso da estrutura de papelão ondulado, a direção transversal ao processo de fabricação é a que confere a maior resistência mecânica à compressão. Porque paralelamente à direção transversal do papelão é que são formadas as ondas do miolo, que conferem à estrutura do papelão maior resistência mecânica à compressão. Isto é o resultado da soma da resistência dos papéis que compõem a estrutura na direção transversal, com adição de resistência à estrutura na do miolo, devido a sua geometria ondulada que é capaz de produzir, com pouco material, um acréscimo significativo à sua resistência mecânica à carga de compressão.

A partir dos elementos constituintes básicos do papelão ondulado, os papéis, pode-se formar diferentes composições com a adição alternada desses elementos, as capas e o miolo ondulado. Na Figura 2.2 A, vê-se uma estrutura chamada de parede simples, composta de um miolo ondulado colado às capas, e na Figura 2.2B a direita uma estrutura denominada de parede dupla, que é composta de dois elementos ondulados e três elementos planos.

As placas que constituem o papelão ondulado possuem algumas características construtivas relativas às dimensões das ondas que formam o miolo, que ainda não estão normalizadas, e podem ter uma pequena variação, mas que obedecem a certos limites como mostra a Tabela 2.1.

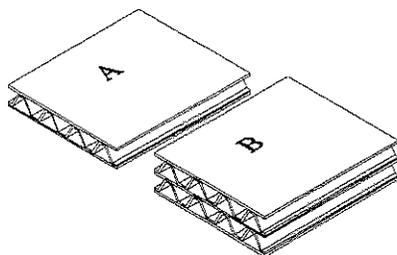


FIGURA 2. 2 Tipos de estruturas de papelão ondulado. Parede simples (A) e parede dupla (B).

TABELA 2.1. Características dos tipos de onda (PICHLER, 1987).

Tipo de onda	Número de ondas em 100 mm	Altura da onda (mm)
A	11 a 13	4.2 a 4.5
B	16 a 18	2.5 a 2.8
C	13 a 15	3.6 a 3.7
E (microonda)	31 a 38	1.2 a 1.4

2.2 Relações constitutivas

As relações de carga/deslocamento que são dependentes da magnitude da tensão e da deformação correspondente, e de fatores ambientais como a temperatura, a umidade relativa e outros, que são chamadas de relações constitutivas podem descrever todas as possíveis características do comportamento de um material (PERKINS, 1983). Desta forma, ao se relatar as grandezas das cargas aplicadas e as deformações correspondentes deve-se informar também as condições do ambiente em dos ensaios.

Quando a duração do carregamento é curta e a deformação é suficientemente pequena para que possa ser descrita como uma deformação infinitesimal e quando as condições do ambiente, temperatura e umidade, são constantes, a tensão e a deformação específica podem ser assumidas como lineares. No caso do papel, o material pode ser considerado como sendo simétrico e ortotrópico, (PERKINS, 1983).

As quantidades E_1 , E_2 e E_3 são chamadas módulo de Elasticidade nas direções 1_(x), 2_(y) e 3_(z). Os ν_{ij} são os coeficientes de Poisson para as deformações específicas transversais na direção j quando a carga é aplicada na direção i . G_{23} , G_{31} , e G_{12} são os módulos de cisalhamento. As relações mostradas na Equação (2.1) envolvem nove constantes elásticas independentes.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

O estado plano de tensão ocorre em sólidos cujas dimensões na direção da espessura Z são muito pequenas em relação às dimensões laterais, como no caso particular do papel. Por exemplo, uma placa solicitada no seu plano médio (x,y) e sem carregamento atuando perpendicular a ele. Neste caso, as tensões τ_{yz} e τ_{xz} são nulas na superfície e σ_z é nula ao longo da espessura, e os componentes σ_x , σ_y e τ_{xy} , podem ser supostos constantes na espessura.

O estado de deformações é determinado pelas Equações (2.2) com a componente ε_z calculada pela Expressão (2.3)

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{1-\nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad \text{e} \quad \gamma_{yx} = \gamma_{xz} = 0 \quad (2.3)$$

Para uma placa com espessura constante, material ortotrópico e com o plano da placa paralelo ao plano x-y mostrado na Figura 2.3, as equações constitutivas podem se escritas como na Equação (2.4) (PERKINS, 1983) e (REDDY, 1984).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde a igualdade (2.4) pode ser posta como

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.5)$$

2.3 Propriedades mecânicas dos componentes do papelão ondulado

A obtenção das propriedades mecânicas de materiais que retratem da forma a mais coerente possível o comportamento mecânico do papelão ondulado, tem exigido considerável esforço de muitos grupos de pesquisa. Esta dificuldade é decorrente, em grande parte, do papelão ondulado ser um material ortotrópico.

PAGE e SETH (1980) entendem que os principais mecanismos que afetam o módulo de elasticidade do papelão são: o módulo de elasticidade das fibras; o efeito da transferência da carga a partir de cada fibra para a região vizinha do final da fibra; a presença de deslocamentos, microcompressões, depressões e entrelaçamento ao longo das fibras.

Os autores descrevem quatro estados do papel que podem afetar o seu módulo de elasticidade e alertam que a literatura tem usado com ambigüidade tais estados. O estado I dito natural, assume que o ângulo entre as fibras é baixo e a curva Tensão/Deformação (T/D) é linear. No estado II ocorre um deslocamento nas fibras, o que gera uma distorção por ação mecânica, e a curva T/D sofre uma inclinação secundária. No estado III, tem-se fibras com certo grau de

enrugamento, porém de amplitude ainda menor que a espessura. No entanto, o módulo neste estágio é apreciavelmente reduzido. E por fim, o estágio IV, as fibras são incapazes de transmitir carga durante o carregamento na fase elástica. As fibras mudam de direção abruptamente e as tensões não são transmitidas ao longo das fibras.

Para SETH e PAGE (1983) o módulo de elasticidade do papel depende de dois fatores separados das propriedades elásticas das fibras do material e da estrutura da folha. Estes autores concluem que a curva de tensão/deformação do papel é controlada pela sua estrutura através do fator que leva em consideração a orientação das fibras na folha e do fator que descreve a eficiência das tensões distribuídas entre as fibras. Na maioria dos casos, esses fatores são relativamente constantes em toda curva de tensão/deformação.

UESAKA (1983) pondera que apesar dos esforços e dos novos métodos de testes, persistem os problemas na obtenção das propriedades mecânicas do papelão uma vez que esses problemas são inerentes às características do papel e do papelão, tais como:

- Natureza planar do papel: Espessura muito menor que as dimensões do plano. Esta geometria planar resulta em dificuldades experimentais à avaliação das suas propriedades.
- Anisotropia: Por ser uma estrutura de fibra que compõe uma rede única, o papel comporta-se como um material ortotrópico. A anisotropia mecânica requer teorias mais complexas para a caracterização precisa do material, aumentando o número de constantes do material ou funções que são determinadas experimentalmente.
- Não homogeneidade: A distribuição de densidade de massa e flutuações locais de espessura e orientação das fibras. Esses fatores requerem especial atenção na análise final dos dados.

BAUM et al. (1981) utilizaram o ultra-som para medir as propriedades mecânicas dos elementos que compõe o papelão ondulado. A partir da análise de um conjunto muito grande de

dados relativos às propriedades dos componentes do papelão ondulado, encontraram algumas relações para o cálculo do módulo de cisalhamento e do coeficiente de Poison. Alguns dos valores das propriedades mecânicas dos elementos que compõe o papelão ondulado, obtidas por estes autores estão mostrados na Tabela 2.2. Pode-se observar a grande variação entre os valores do módulo de elasticidade de alguns dos diversos tipos de papel utilizados no fabrico do papelão, bem como a redução de resistência causada pelo acréscimo de umidade.

TABELA 2.2. Constantes elásticas dos elementos constituintes do papelão.

Elemento (g.m ⁻²)*	E _x	E _y	G _{xy}	Poison ν _{xy}	Poison ν _{yx}	Umidade Relativa
	GPa	GPa	GPa	-	-	(%)
Capa (330)*	7.36	2.88	1.74	0.177	0.45	20
Capa (333)*	6.82	2.70	1.65	0.192	0.485	35
Capa (337)*	6.36	2.48	1.57	0.176	0.452	50
Capa (350)*	5.55	2.09	1.32	0.184	0.487	65
Capa (357)*	4.99	1.78	1.15	0.186	0.523	80
Miolo (168)*	4.56	1.98	1.19	0.172	0.403	65
Miolo (134)*	5.28	1.97	1.24	0.167	0.447	65
Papelão (494)*	7.24	2.19	1.54	0.164	0.541	65

BAUM et al.(1981).

Valores próximos aos obtidos por BAUM et al. (1981) também foram obtidos por outros autores, utilizando-se ensaios não especificados, CARLSSON et al. (1985), NORDSTRAND (1995), POMMIER et al. (1991) e RAHMAN (1997).

ALGAR (1965) considera alguns fatores que afetam a relação tensão versus deformação, como o aumento no grau de vínculo interno do papel, como resultado da pressão exercida quando este ainda está úmido ou o aumento do batimento resulta em aumento tanto da relação carga/deformação como da carga de ruptura. Talvez o maior efeito na curva de carga/elongação seja devido ao grau de restrição aplicado à folha do papel durante a secagem. Pondera que a folha seca e livre de pressão possui baixos módulos de elasticidade e geralmente uma baixa carga de ruptura, porém, alta elongação comparada com as que foram secas com restrição.

A análise dos dados obtidos em ensaio de tração uniaxial do papel tem como primeiro objetivo a caracterização do material, cujo resultado desta análise é a forma da curva resultante a qual deve ter presente todos os fatores que afetam o seu comportamento e, como objetivo de fundo, identificar o desempenho das embalagens fabricadas com este material. Com o propósito de obter uma curva média e representativa de um conjunto de curvas, URBANIK (1982) propôs um procedimento estatístico. A curva que resulta deste processo de cálculo, segundo o autor, é a que melhor representa o comportamento do papel, uma vez que considera as fases, linear e não-linear, observadas nos ensaios de tração uniaxial do papel.

2.4 Avaliação do desempenho do papelão ondulado a partir dos seus componentes

A necessidade de predição da capacidade de carga suportada pelas embalagens de papelão ondulado tem suscitado o aparecimento de um número considerável de ensaios de laboratório que se propõem a medir a capacidade de resistência à compressão dos elementos constituintes deste papelão. Com isso, procura-se permitir ao projetista estimar a capacidade de carga de uma embalagem a partir da resistência a compressão dos elementos componentes do papelão.

ARDITO et al. (1991) avaliaram a resistência à compressão de seis estruturas de papelão ondulado de onda C com parede simples, bem como dos seus componentes. Os dados de

compressão dos componentes, esmagamento do anel (RCT) e resistência à compressão do papel miolo ondulado (CCT) permitiram que a combinação destes resultados fosse comparada com a resistência à compressão de coluna do papelão (ECS). Verificaram forte correlação entre a resistência à compressão da coluna do papelão ondulado e a de seus componentes. Os resultados obtidos mostraram que a resistência à compressão de coluna é proporcional à soma das resistências de seus componentes e com eles pode-se obter com razoável precisão a predição da carga de compressão da coluna.

MARKSTROM (1988) comparou os resultados de quatro diferentes métodos para a determinação da resistência à compressão e verificou que os valores de índice de compressão, obtidos pelo método de *short span*, foram muito superiores aos valores observados para os métodos de compressão de anel de papel ondulado, em aparelho "Concora" e compressão de papel como "Liner".

FELLERS (1983) descreve que a idéia básica, por trás do princípio do teste de compressão do papel na forma de *short-span* é que a aglomeração do papel no processo de compressão ocorra antes da flambagem.

Em estudo realizado, SETH (1985) adverte que vários são os fatores que podem afetar a resistência à compressão do papelão ondulado. Demonstrou, assim mesmo, existir considerável precisão entre a medida da resistência dos componentes e a resistência à compressão da estrutura do papelão ondulado.

WESTERLIND e CARLSSON (1992) analisaram a resposta à compressão de coluna do papelão ondulado utilizando um procedimento onde as amostras são preparadas com uma forma geométrica, o que evita a aglomeração de material no final do processo de compressão, fenômeno comum nos testes de coluna. Também verificaram que a resistência à compressão da estrutura do papelão ondulado pode ser estimada com bastante precisão a partir das medidas de resistência à compressão dos seus componentes obtidas pelo método *short-span*, desde que os valores sejam ajustados pelo procedimento estatístico de Weibull.

2.5 Dimensionamento de embalagens de papelão ondulado

Os estudos de MCKEE et al. (1963) mostraram que um tratamento empírico de resistência à compressão, pelas caixas de papelão foi adequado para estimar a carga máxima de compressão. A partir de princípios da engenharia mecânica, desenvolveram uma fórmula simplificada para o cálculo da resistência à compressão de caixas de papelão. A simplificação empírica adotada por MCKEE et al. (1963) baseou-se em observações experimentais que correlacionaram os valores de resistência à compressão da coluna da estrutura do papelão com as propriedades de rigidez em flexão da estrutura do papelão ondulado.

Em ambientes com alta umidade relativa os materiais celulósicos apresentam redução significativa na sua resistência à compressão. Isto é causado pelo enfraquecimento das ligações internas (fibras) e estrutura interfibrilar. Foi observado que o processo de perda (desorção) e ganho (adsorção) de água apresenta um fenômeno de histerese (ARDITO, 1992).

A Tabela 2.3, obtida de BORDIN e GARCIA (1992), indica resultados de experimentos do CETEA para os fatores citados.

A resistência do papelão ondulado à compressão é afetada por vários aspectos, dentre os quais destaca-se a umidade relativa, o tempo de estocagem, a forma de empilhamento, o tipo de manuseio e as características do produto embalado. Para cada aspecto pode-se determinar o fator de correção correspondente.

2.6 Análise de flambagem com o cálculo da carga crítica

O problema de dimensionamento de embalagens de papelão ondulado é considerado como um problema de cálculo da carga crítica de uma placa plana retangular (MCKEE et al., 1963; POMMIER e POUSTIS 1989; URBANIK, 1996b). Isto se deve ao fato de que as embalagens de papelão ondulado, para efeito de dimensionamento estrutural, podem ser analisadas como quatro placas independentes.

O problema da instabilidade de uma placa plana é de forma geral dado pela formulação a seguir.

Uma placa de uma dada forma tem forças externas aplicadas no meio da superfície. Num caso geral assume-se que a carga consiste em duas partes: uma carga com magnitude e distribuição sobre a aresta constante, e uma dada carga somente como um multiplicador constante λ .

TABELA 2.3. Fatores de correção para projetos de caixas de papelão ondulado.

Fatores	Possibilidades	Resistência à compressão (%)
Umidade relativa	50%	115
	65%	100
	75%	90
	80%	80
	90%	60
Umidade relativa para as determinações abaixo foi de 65 % e temperatura de 23°C.		
Tempo de Estocagem	1 semana	65
	1 mês	60
	3 meses	55
	1 ano	50
Tipo de manuseio	Normal	80
	Severo	60
Característica do Produto	Sustentável	130
	Não Sustentável	100
Tipo de Empilhamento	Colunar	95
	Colunar + Sobrepalete	90 – 60
	Cruzado	50
	Cruzado+Sobrepalete	48 – 40

BORDIN e GARCIA (1992).

O significado posterior é que a lei de distribuição de forças sobre a aresta pode variar de zero até qualquer valor arbitrariamente grande. Supondo-se que para $\lambda=0$ a placa esta em estado de equilíbrio (generalizado estado de tensão plana), e que com o aumento de λ chegará um momento em que este estado deixará de existir. Necessita-se determinar os valores de $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$, para o qual a bifurcação toma o lugar do equilíbrio, como por exemplo, outras formas de equilíbrio tornam-se possíveis em adição à forma plana, uma série infinita para tais valores. O menor valor de λ para qual a forma de equilíbrio deixa de ser única e estável, é chamado de valor crítico, e a carga correspondente a esses valores é chamada de carga crítica (LEKHNITSKII, 1968).

As placas são submetidas a forças normais e de cisalhamento que agem no seu plano. Se essas forças no plano são suficientemente pequenas, o equilíbrio é estável e as deformações resultantes são caracterizadas pela ausência de deslocamentos.

Como a magnitude dessas forças no plano aumenta até uma certa intensidade de carga, ocorre uma mudança acentuada na forma de deformação, ou seja, simultaneamente com as deformações no plano, deslocamentos laterais são introduzidos. Nesta condição, o originalmente equilíbrio estável torna-se instável e a placa é dita como flambada. A carga que produziu esta condição é chamada carga crítica. A importância da carga crítica é a iniciação do modelo de flexão, o qual, se a carga é novamente aumentada, permite rapidamente deflexões laterais muito grandes e eventualmente a completa ruptura da placa (SZILARD, 1974; TIMOSHENKO e WOINOWSKY-KRIEGER, 1959).

É importante observar que na teoria clássica de flambagem a curva principal do equilíbrio estável sempre passa por um estado de equilíbrio neutro. Todas as formulações matemáticas da análise de estabilidade linear estática de placas estão baseadas nesta afirmação (SZILARD, 1974).

Os métodos para a determinação aproximada da carga crítica são três: estático, de energia e dinâmico, (LEKHNITSKII, 1968).

JOHNSON et al. (1979), com base nos fundamentos da teoria para placas com comportamento não linear, desenvolveram uma nova teoria para a flambagem de placas anisotrópicas de papelão ondulado. Esta teoria permite a análise de estruturas que apresentem não-linearidades cinemáticas (grandes deformações) e não-linearidades físicas, tal como são conhecidas as propriedades mecânicas deste tipo de estrutura. Também foi desenvolvido um programa computacional que permite gerar facilmente um grande número de parâmetros, e que leva em consideração as características do comportamento não-linear e as propriedades mecânicas diferentes para as distintas camadas do papelão ondulado. Os resultados mostraram que esta forma de análise pode explicar como se ajustar as espessuras das capas e dos miolos, de forma a maximizar a resistência à compressão de coluna do papelão ondulado por unidade de peso.

Um sistema de fixação, para avaliar placas de papelão ondulado simplesmente suportadas e submetidas a carregamento nas extremidades, foi desenvolvido por HAHN et al. (1992)a. Este mecanismo permitiu avaliar carregamentos nas placas, dentro do regime de pós-flambagem até o colapso da placa. Com o uso do método aproximado de Moiré eles também verificaram que a flambagem ocorreu no primeiro modo e que as condições de contorno foram simétricas. As placas de papelão, ensaiadas com carregamentos de compressão, mostraram pontos de ruptura onde ocorre o colapso devido às rupturas nas capas, em regiões de alta concentração de tensões, não se verificando maiores influências nas tensões concentradas introduzidas nos suportes das extremidades.

2.7 Modelagem do papelão ondulado pelo método dos elementos finitos

As equações diferenciais parciais que governam o comportamento das placas são de difícil solução e desta forma não podem ser resolvidas analiticamente. O método dos elementos finitos é um método numérico que permite a solução de problemas matemáticos complexos como é o caso das placas que formam o papelão ondulado.

Para JÖNSON (1993) a relutância em se usar princípios de engenharia no dimensionamento de embalagens de papelão é decorrente do fato que as características do papel

são afetadas mais rapidamente por fatores como condições atmosféricas e taxa de carregamento, do que outros materiais comumente usados. Esta relutância tem favorecido a avaliações de desempenho empíricas. Como resultado, tem-se que há poucos métodos disponíveis e precisos para a medição e descrição das propriedades físicas e mecânicas do papelão das embalagens.

As quatro características que influem no desempenho estrutural do papelão são: o papel usado e a orientação da suas fibras; a altura da onda; o número de ondas e o espaço entre o topo das mesmas e a integridade das linhas de cola.

Ainda segundo JÖNSON (1993), para a aplicação de técnicas como elementos finitos são necessários mais conhecimentos sobre as propriedades estruturais do papelão na tensão, flexão e cisalhamento. Conclui, no entanto, que a técnica de elementos finitos será de grande importância no projeto e otimização de embalagens de papelão ondulado.

A obtenção da carga crítica de flambagem, de uma embalagem de papelão ondulado, pelo método dos elementos finitos pode ser feita considerando-se que a mesma é constituída de quatro placas planas independentes e com condição de contorno simplesmente suportada. A partir da análise dos resultados das placas, obtidos para cada placa isoladamente, pode-se estimar a carga crítica de toda a embalagem, (MCKEE et al., 1963; POMMIER e POUSTIS 1989; POMMIER et al., 1991; URBANIK 1996b).

A necessidade de ensaios destrutivos de embalagens, em parte ou no seu todo, é apresentada por POMMIER e POUSTIS (1989) como uma das limitações da fórmula de MCKEE et al. (1963), por causa do reduzido número de caixas que podem ser testadas para uma determinada finalidade. Eles propõem a utilização do método de elementos finitos e através de modelos realizar as simulações e avaliações necessárias. As avaliações realizadas, utilizando um grande número de amostras de papelão e dois tipos de onda, tipo C e tipo BC, mostraram que somente estruturas de papelão ondulado simétricos comportaram-se de acordo com a fórmula de MCKEE et al. (1963). Atualmente, oitenta por cento do mercado de papelão ondulado é representado por composições assimétricas, como as estruturas BC, o que torna a fórmula de

MCKEE et al. (1963) muito limitada, necessitando de outro método para estimar a resistência à compressão do papelão ondulado.

Por outro lado, o crescimento do uso da paletização, o maior período de tempo e as condições adversas de armazenamento, além de transporte a longas distâncias, têm requerido das embalagens boas condições após o período de estocagem (POMMIER e POUSTIS, 1989).

A rigidez em flexão da estrutura do papelão ondulado, nas direções de fabricação e transversal, são informações básicas para avaliar o comportamento mecânico de uma estrutura ortotrópica como o papelão ondulado.

Dispondo-se das informações de rigidez, uma embalagem de papelão ondulado pode ser modelada utilizando-se o método de elementos finitos, a partir do conhecimento das propriedades mecânicas dos elementos das placas que a constituem e considerando-se as hipóteses cinemáticas compatíveis com as solicitações a que são submetidas às embalagens (POMMIER et al., 1991).

Para MCKINLAY e BOX (1993), a determinação da rigidez ao cisalhamento do papelão ondulado e de outras placas em forma de sanduíche é difícil, porque na maioria dos casos o processo de carregamento requerido para que este tipo de análise possa ser realizada, se faz necessária a introdução de tensões de cisalhamento, as quais também causam efeitos secundários, que complicam a medição. Neste trabalho os autores analisam o campo de deformação introduzido pelas forças de torção e demonstram como determinar com precisão, por meio de uma simples equação, a rigidez de cisalhamento do papelão ondulado e outras formas de placas em forma de sanduíche. Uma análise com a utilização do método dos elementos finitos confirmaram os resultados obtidos pelo procedimento analítico proposto de onde os autores consideraram esta forma precisa e real, para qualificar uma placa do tipo sanduíche. Este aspecto é relevante para o controle de qualidade no processo de manufatura das estruturas de papelão ondulado, e é usada extensivamente nas indústrias de embalagens.

NORDSTRAND et al. (1994) conduziram uma avaliação para determinação do módulo de cisalhamento transversal para várias formas geométricas que foram propostas como

aproximações à verdadeira geometria do corrugado do miolo do papelão ondulado com o objetivo de se modelar o papelão ondulado como uma estrutura em forma de sanduíche. A redução do módulo efetivo de cisalhamento do corrugado devido às deformações das capas foi quantificado e os resultados foram comparados com a teoria clássica de elementos finitos. Para a análise de elementos finitos, o módulo de cisalhamento efetivo foi calculado para duas formas geométricas para o miolo, cilíndrica e triangular. Usando o programa de elementos finitos Ansys foi implementado um modelo com dois elementos de vigas elásticas para modelar a estrutura do corrugado. O miolo e as capas foram considerados unidos rigidamente como um vínculo ideal. A fórmula teórica encontrada para aproximar o módulo de cisalhamento transversal baseado na deformação do miolo mostrou bom ajuste com os resultados de elementos finitos.

Com o objetivo de verificar o comportamento do papelão ondulado através da carga crítica de flambagem RAHMAN (1997) utilizou o programa de elementos finitos Ansys para investigar a análise com representação do material na fase linear como na fase não linear. Não verificou diferença entre a carga crítica de flambagem entre as duas formas de representação das propriedades mecânicas do material. Isto se deveu porque a carga crítica de flambagem ocorre antes do limite de proporcionalidade do material. Com isso, uma análise não linear de pós flambagem do material pode ser mais conclusiva.

PATEL et al. (1997) realizaram um estudo experimental para medir o valor da carga de colapso de cilindros de papelão ondulado carregados na direção axial que coincidiu com a direção transversal à direção de fabricação do papelão ondulado. Os cilindros avaliados, além de testados com cargas de compressão axial, foram avaliados quanto à torção, pressão externa e a combinação desses carregamentos. A mesma estrutura foi modelada no programa de elementos finitos Ansys onde foi adotado o critério de ruptura quadrático de Tsai-Wu. Os resultados obtidos com método dos elementos finitos mostraram um bom ajuste para as cargas de colapso dos cilindros avaliados experimentalmente. Da mesma forma encontraram um bom ajuste para a carga crítica de flambagem entre os resultados obtidos com o método dos elementos finitos obtida com o programa Ansys e com o método de diferenças finitas obtida para os modelos com o uso do programa Bosor.

RAHMAN e ABUBKR (1998) num estudo com modelos de papelão ondulado com elementos finitos propuseram um procedimento simples para substituir a rigidez atribuída à camada adesiva existente entre o topo do miolo e as capas. Pelo procedimento as propriedades do adesivo são estimadas como um valor relativo às propriedades da capa. O objetivo do trabalho foi quantificar a influência do material adesivo no desempenho da estrutura do papelão ondulado. Os resultados mostraram que os valores adotados para os módulos de elasticidade da cola, em vinte vezes aos obtidos para a capa, aumentaram em cinquenta por cento a resistência a flambagem da estrutura.

GILCHRIST et al. (1999), numa investigação sobre o comportamento mecânico do papelão ondulado, usaram o método dos elementos finitos para avaliar o seu desempenho. Modelos numéricos com reprodução da geometria do papelão ondulado foram criados e analisados considerando as não linearidades geométricas (grandes deformações) e físicas referentes às propriedades dos materiais (plasticidade). Na análise dos modelos de elementos finitos foi utilizado o programa comercial Abaqus. O estudo compreendeu as avaliações das estruturas quanto aos ensaios de flexão de quatro pontos, flexão anticlástica e esmagamento de coluna. Os resultados obtidos com o desempenho dos modelos foram correlacionados com os resultados experimentais onde foi observado um razoável grau de aproximação. Foi verificada também a necessidade de inclusão dos valores do elemento adesivo (cola) como forma de melhorar os ajustes para os próximos trabalhos.

2.8 Modelagem de embalagens de papelão ondulado para produtos hortícolas pelo método dos elementos finitos considerando a cadeia do frio.

Uma embalagem de papelão é constituída, na sua forma mais simples, de quatro placas planas, sendo duas laterais e duas testeiras ligadas entre si pelas arestas laterais (MOURAD et. al., 1999).

Além da função de contenção e proteção, as embalagens dos produtos hortícolas devem propiciar condições adequadas para que os produtos apresentem menores perdas em qualidade até chegar ao consumidor final.

As embalagens, existentes no mercado, utilizadas para o armazenamento e transporte de produtos hortícolas em geral e para tomates em particular, apresentam grandes diferenças no que se refere às dimensões, tipo de onda e principalmente às características de qualidade e gramatura do papel utilizado.

CASTRO (2000), em dois experimentos, avaliou o efeito de quatro tipos de embalagem de papelão ondulado em tomate, onde verificou o nível de injúria mecânica nos frutos. As caixas com três por cento, destinada à ventilação dos produtos, apresentavam forma de elipse com 25 mm de largura e 70 mm de altura. Observou que embalagens menores ofereceram melhores condições de acondicionamento em função da menor capacidade de carga, uma vez que as pressões exercidas nas camadas inferiores do produto são menores que nas embalagens com maior capacidade. As caixas apresentaram grandes diferenças dimensionais e também quanto à composição dos elementos constituintes do papelão, mostrados na Tabela 2.4.

OLORUNDA e TUNG (1985) avaliaram injúrias mecânicas no tomate onde utilizaram uma embalagem cujas dimensões (410x210x150 mm) estão muito próximas da caixa 2 utilizada por CASTRO (2000). O estudo consistiu de simulações de transporte do produto onde foram observados os efeitos causados por vibração mecânica, carga de compressão e tipo de embalagem. Verificaram que a aplicação de uma pressão moderada e uniforme sobre o produto pode reduzir a incidência de danos mecânicos por impacto.

Em razão da atividade metabólica presente nos produtos vegetais após a colheita ocorre um processo de envelhecimento natural, que os torna mais sensíveis ao desenvolvimento de microorganismos e aos danos mecânicos.

A diminuição desse processo, que reduz o tempo de vida do produto, é obtida com a redução da temperatura e aumento da umidade relativa no ambiente de armazenamento de acordo com a necessidade de cada produto hortícola em particular.

TABELA 2.4. Características de 4 embalagens para tomate.

Embalagens	Telescópica 1	Caixa 2	Caixa 3	Caixa 4
Capacidade kg	14	10	10	7
Dimensões (mm)	375x275x252	465x267x153	487x277x148	586x377x73
	C x L x A	C x L x A	C x L x A	C x L x A
Composição do papelão por:	Capa externa: (200) Kraft virgem;	Capa externa : (200) Kraft virgem;	Capa externa: (150) Branca virgem;	Capa externa : (200) Branca virgem com tratamento;
Gramatura (gm ⁻²) e				
Tipo de onda e qualidade do papel	Mb: (120) Reciclado;	Mb: (120) Reciclado;	Mb: (150) Semi- químico ;	Mb: (150) Semi- químico em fibra virgem;
	Capa interna: (200) Kraft virgem;	Capa interna: (200) Kraft virgem	Capa interna: (200) Kraft virgem;	Capa interna: (280) Kraft virgem;
	Mc: (120) Reciclado e Capa interna: 200 Kraft virgem		Mc: (175) Semi- químico em fibra virgem com tratamento;	Mc: (175) Semi- químico em fibra virgem com tratamento ;
			Capa interna: (200) Kraft virgem com tratamento hidrorepelente	Capa interna: (280) Kraft virgem com tratamento hidrorepelente

Adaptado de CASTRO (2000). Miolo onda B = Mb; Miolo onda C = Mc.

Para MITCHELL (1992) embalagens de papelão ondulado com 5 % de abertura nas paredes laterais podem ser suficientes para permitir a transferência de calor sem debilitar a embalagem. Poucas aberturas com tamanhos maiores resultam em ventilação mais eficiente do que um número maior de aberturas com áreas menores. Para este autor, quando as frutas requerem amadurecimento antes da comercialização, é necessário o aquecimento uniforme e muitas vezes tratamento com etileno. As embalagens com área de ventilação adequada permitem a execução desta função com maior eficiência.

O tamanho e a localização das aberturas das embalagens são os mais importantes critérios a serem observados para que se obtenha um resfriamento rápido. Além do tamanho, são importantes para o resfriamento uniforme dos produtos, a localização das aberturas. O ar deve entrar em contato com maior número de produtos possíveis o que requer embalagens com 5 a 10% de abertura e, a velocidade de resfriamento é aumentada com a coincidência das aberturas quando sobrepostas nos paletes,(FRASER, 1991).

LANGBRIDGE (1982) considera que aberturas ao redor de cinco por cento da área lateral da embalagem de papelão ondulado podem reduzir o tempo de resfriamento em 25 % e como efeito negativo reduzir a resistência ao empilhamento em até três por cento se essas aberturas forem posicionadas longe das quinas.

Aberturas de diferentes formas e tamanhos não mostram diferentes taxas de resfriamento se a área total for igual. Larguras menores que 15 mm nas aberturas podem ser bloqueadas pelos produtos e por isso tornarem-se menos efetivas.

Uma série de embalagens para produtos hortícolas desenvolvidas no CETEA foi apresentada por MOURAD (1999), onde as embalagens para o acondicionamento desses produtos mostraram algumas especificidades caso a caso e com diferentes tamanhos e formas para as aberturas, cilíndricas e oblongas. Além disso, as embalagens apresentadas possuíam níveis de aberturas que variaram de 3 %, para tomate e pimentão, até 5 % e 6 % para banana e mamão respectivamente.

BAIRD et al. (1988) utilizaram um modelo de engenharia econômica para analisar as influências das diversas variáveis que afetam o tempo de resfriamento e os custos para frutas e vegetais. Dentre as variáveis inclui-se o tamanho do produto, a forma e as propriedades térmicas, a configuração do produto (a granel e em embalagens de papelão), a área de ventilação das embalagens, a profundidade do produto durante o resfriamento, a temperatura inicial do produto e a temperatura final desejada.

A porcentagem de área destinada à ventilação é apontada como um fator crítico que afeta a eficiência e a efetividade de um sistema de resfriamento. Apesar de constatarem ser comum o uso de embalagens para frutas e vegetais com menos de 3% de abertura, consideram estas porcentagens insuficientes para atender as necessidades mínimas do resfriamento dos produtos. Embalagens poderiam ser projetadas com pelo menos cinco por cento de abertura, sem que a sua resistência mecânica seja significativamente afetada, afirmam os mesmos autores.

HASS et al. (1976) avaliaram embalagens com laranjas e diferentes níveis de aberturas em túnel de vento. Concluíram que a resistência da embalagem ao fluxo de ar decresce com o aumento da área livre nos lados perpendiculares ao fluxo de ar, resultado decorrente da área e forma das aberturas.

GAYET et al. (1995) consideram que em razão da sensibilidade do tomate ao etileno, as embalagens para tomate deveriam ter pelo menos cinco por cento da área total destinada à ventilação. Sugerem furos com no mínimo 25 mm de diâmetro e dispostos nas laterais, procurando colocá-los o mais afastado quanto se possa das arestas. Um furo com a função de servir como alça em cada uma das faces das embalagens e duas aberturas nas laterais são sugestões apresentadas.

As aberturas em forma de elipse são indicadas como opção aos furos circulares por melhorar a resistência mecânica da caixa à compressão. Os autores alertam para a necessidade de precisão nas localizações dos furos para assegurar a coincidência das aberturas quando as embalagens estiverem empilhadas e assim manter eficiente a ventilação.

2.9 Conclusão

Foi possível identificar que diferentes autores procuraram modelar o papelão ondulado pelo método dos elementos finitos utilizando-se de três maneiras distintas: a primeira forma reproduz a estrutura do papelão de forma completa, compondo cada elemento tal como este se apresenta na realidade; uma segunda opção considera a placa do papelão como constituída de camadas tipo sanduíche e uma terceira forma de modelagem idealiza o papelão como uma placa ortotrópica homogênea.

Embora os melhores resultados de ajuste do modelo tenham sido obtidos com os modelos que utilizaram a forma de sanduíche para representar as camadas não foi possível identificar as vantagens e restrições de forma objetiva, uma vez que cada autor se ocupou de uma forma de modelagem em intervalos de tempo muito grandes e com uso de programas de elementos finitos diferentes.

As análises de resistência à compressão foram, na sua grande maioria, realizadas a partir da obtenção da carga crítica de flambagem. Nenhum dos trabalhos encontrados modelou e comparou resultados obtidos pelos métodos dos elementos finitos para estruturas de onda BC.

Também ficou evidente a carência da existência de um trabalho mais completo, onde estivessem presentes as análises desde o papel até a embalagem com as respectivas informações das propriedades mecânicas e parâmetros dimensionais.

A junção dos recursos existentes no programa de elementos finitos Ansys com informações obtidas de laboratório complementadas informações da literatura para tornar possível à análise de um modelo de uma estrutura de papelão ondulado com aberturas evitando assim a necessidade de sua confecção material é um objetivo importante a ser buscado para tornar o uso do recurso do método dos elementos finitos ainda mais atraente e apropriado à modelagem de embalagens para produtos hortícolas.

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

3.1 Introdução

O objetivo deste capítulo foi de reunir de forma ordenada e lógica os conhecimentos disponíveis da teoria de placas aplicada ao estudo de um caso particular de placa ortotrópica (papelão ondulado) e como se dá a junção destes conhecimentos para viabilizar a sua análise estrutural pelo método dos elementos finitos.

Neste sentido, são detalhadas as diferentes formas de se simular a estrutura do papelão ondulado aplicando os conhecimentos da teoria de placas, de modo a tornar compatível as formas de se representar as características da estrutura do papelão ondulado com os recursos disponíveis no programa de elementos finitos Ansys.

3.2 Teoria de placa

As embalagens de papelão ondulado são essencialmente tubos quadrangulares formados por placas planas.

Placas são corpos sólidos, limitados por duas faces planas e paralelas, cujas dimensões laterais são grandes em comparação com a distância entre as superfícies planas (espessura), classificadas em dois grupos. Esta classificação é resultado da comparação entre a sua espessura

com as dimensões das suas arestas: placas finas e placas moderadamente grossas. Diz-se que uma placa é fina quando a razão entre a espessura e a menor dimensão lateral for menor que 1/20 (REDY, 1984).

De um elemento estrutural qualquer analisado sob o prisma da Teoria da Elasticidade pode-se distinguir os seguintes componentes básicos: as equações de equilíbrio; as condições de compatibilidade e as leis constitutivas. As equações de equilíbrio são respondidas pelas leis de Newton: as deformações e os deslocamentos são expressados pelas condições de compatibilidade. As relações entre as tensões e as deformações são expressas pelas leis constitutivas, (REDY, 1984).

A teoria clássica de pequenas deformações elásticas lineares para placas ortotrópicas, com espessura constante e camada única é uma formulação que descreve o comportamento de placas finas submetidas a carregamento transversal. Os deslocamentos da placa são assumidos como relativamente pequenas em relação à espessura. (LEKHNITSKII, 1968); (SZILARD, 1974); (TIMOSHENKO e WOINOWSKY-KRIEGER, 1959).

Assume-se que as propriedades elásticas dos materiais que compõem as placas de papelão ondulado tem três planos de simetria. Assim, considera-se que a equação que governa a deformação é dada por:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x,y) \quad (3.2.1)$$

Onde $w = w(x,y)$ é a deformação transversal ao meio da superfície da placa, $p(x,y)$ é a carga transversal sobre a placa, e as equações abaixo são as rigidezes à flexão de uma placa anisotrópica, Figura 3.1.

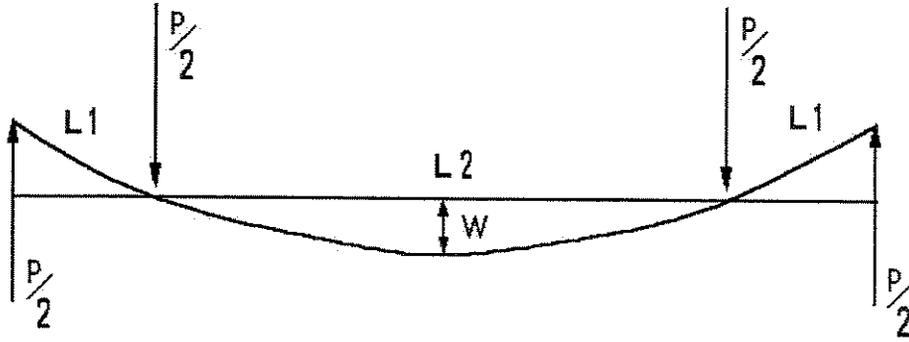


FIGURA 3.1 Placa submetida à flexão pura num ensaio em flexão de quatro pontos.

$$D_{11} = \frac{h^3}{12} \quad Q_{11} = \frac{E_1 h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \quad (3.2.2)$$

$$D_{22} = \frac{h^3}{12} \quad Q_{22} = \frac{E_2 h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \quad (3.2.3)$$

$$D_{12} = \frac{h^3}{12} \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21} E_1 h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} = \frac{\nu_{12} E_2 h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \quad (3.2.4)$$

$$D_{66} = \frac{h^3}{12} \quad Q_{66} = \frac{G_{12} h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \quad (3.2.5)$$

$$H = D_{12} + D_{66} \quad (3.2.6)$$

Onde:

h = espessura da placa

Q = Chamada de rigidez reduzida

ν = Coeficiente de Poison.

A rigidez definida para as direções principais D_{11} e D_{22} da placa e D_{12} a rigidez de cisalhamento e D_{66} a rigidez de torção, também é referida como rigidez torcinal aparente ou apenas rigidez torcional. O termo H é muitas vezes chamado de rigidez torcional total.

No plano, as tensões para uma placa plana submetida ao carregamento transversal, são dadas pelas equações a seguir.

$$\sigma_x = \frac{12M_x}{h^3} z \quad (3.2.7)$$

$$\sigma_y = \frac{12M_y}{h^3} z \quad (3.2.8)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{12M_{xy}}{h^3} z \quad (3.2.9)$$

Onde os momentos de flexão resultantes (momentos por unidade de comprimento) são definidos como segue.

$$M_x = (D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) \quad (3.2.10)$$

$$M_y = (D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) \quad (3.2.11)$$

$$M_{xy} = -2D_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3.2.12)$$

3.3 Teoria da modelagem do papelão ondulado

As placas de papelão ondulado possuem algumas propriedades específicas por causa da reprodução da geometria das ondas que constituem o miolo de forma contínua e simétrica em

relação ao seu plano médio XY, e com reduzida dimensão do corrugado em relação ao todo da placa, como está mostrado na Figura 3.2.

Com isso, o corrugado do miolo pode ser modelado macroscopicamente como uma estrutura ortotrópica sólida, seja na forma de sanduíche com as capas o conjunto da estrutura em forma de camadas, seja compondo uma unidade sólida única que contenha a somatória das propriedades das camadas somadas, das capas com o miolo.

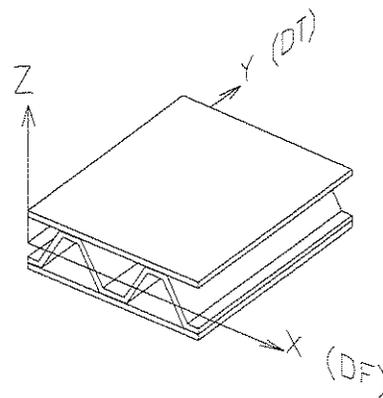


FIGURA 3. 2 Plano de simetria (XY), da estrutura do papelão ondulado.

As possíveis formas de se modelar uma estrutura de papelão ondulado podem então ser definidas como segue:

- 1 . Modelo de papelão ondulado com miolo estrutural (ME), Figura 3.3 (A).
2. Modelo de placa ortotrópica homogênea com miolo em forma de sanduíche (MS), Figura 3.3 (B)
3. Modelo de placas ortotrópica homogênea idealizada de camada única (MI) Figura 3.3 (C).

A grosso modo, cada forma de modelagem atende a um determinado objetivo. Também a opção do projetista para implementação de cada modelo vai depender do nível de detalhamento das informações disponíveis a respeito das propriedades mecânicas dos materiais utilizados na sua fabricação e das características geométricas das estruturas envolvidas.

As metas pretendidas com as diferentes formas de se modelar o papelão ondulado irão determinar a escolha do tipo de modelo para a estrutura. Deve-se ter em mente que a complexidade da forma de miolo estrutural (ME) é mais indicada para fornecer informações da geometria da onda, tanto para se obter respostas sobre geometrias da forma, ou seja, se reta na forma de trapézio, ou composta (reta + senoidal) ou ainda cilíndrica.

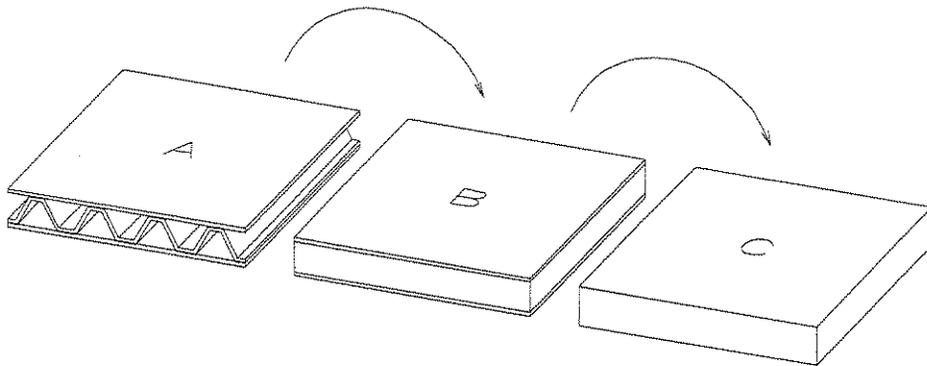


FIGURA 3.3 Transição do miolo estrutural (A) para estrutura sanduíche com miolo homogêneo (B) e por fim a estrutura homogênea ortotrópica sólida (C).

Na medida em que se reduz proporcionalmente o grau de detalhamento da estrutura não é mais necessária a obtenção, para sua implementação, de um volume grande de informações sobre os materiais e suas propriedades, bem como da geometria da estrutura, porém, as informações a serem obtidas serão proporcionalmente limitadas.

3.3.1 Teoria da modelagem com miolo ortotrópico homogêneo em forma de sanduíche

As duas formas de modelagem, sanduíche e ortotrópica única, tem em comum a adoção do mesmo conceito que considera o corrugado do miolo como uma placa ortotrópica e homogênea.

Na forma de sanduíche a rigidez total da estrutura é complementada com a utilização das propriedades das capas. No cálculo da rigidez do miolo se utiliza o momento de inércia utilizado para ondas na forma reta - senoidal propostas por CARLSSON et al. (1985).

Na forma de placa ortotrópica única idealizada, a rigidez total da estrutura é caracterizada por um único valor, que é resultado da soma das rigidezes das capas e do miolo, de acordo com descrito por CARLSSON et al. (1985), LUO et al. (1992), e NORDSTRAND et. al. (1994).

Para LUO et al.(1992) é possível a substituição de uma placa ortotrópica por uma placa equivalente, desde que os valores de rigidez, correspondentes à geometria e outros fatores da rigidez, sejam considerados. Chamado de método elástico equivalente, os autores propõem que estruturas descontínuas como placas em forma de sanduíches corrugados sejam representadas por uma placa ortotrópica com espessura constante idealizada, que reflita a rigidez do sistema considerado. O conceito de placa equivalente é aplicável às mais complicadas formas de rigidez de placas compostas, tal como o papelão ondulado, sob algumas pré-condições:

1. A relação do comprimento do período do miolo em relação às dimensões do contorno da placa é suficientemente pequena para permitir a homogeneidade da rigidez considerada.
2. Os valores de rigidez são distribuídos uniformemente nas duas direções.
3. A rigidez de flexão e rigidez de torção não dependem das condições de contorno da placa ou da distribuição da força vertical.
4. Há um vínculo perfeito entre as capas e o miolo.

As quantidades fundamentais que caracterizam as propriedades de uma placa ortotrópica homogênea na flexão são os principais valores de rigidez D_{11} , D_{22} , D_{12} e D_{66} e os coeficientes de Poison, ν_{12} e ν_{21} (LEKHNITSKII, 1968).

A partir das formulações de CARLSSON et al. (1985), LUO et al. (1992), e NORDSTRAND et al. (1994), através de procedimentos de cálculos analíticos, pode-se construir as matrizes de elasticidade do papelão ondulado para as ondas tipo B e C, ou seja estruturas de parede simples, e para estruturas de parede dupla como as formadas por ondas BC as mais comuns.

Para simplificar a modelagem da complicada geometria do papelão ondulado há a necessidade de se assumir intuitivamente uma formulação para cada rigidez.

1. Assume-se que há uma superposição da rigidez de flexão da capa e do miolo que podem ser somadas e assim ser representadas por uma única informação. As rigidezes serão dadas por:

$$D_{11} = D_{11}^C + D_{11}^M \quad (3.3.1)$$

$$D_{22} = D_{22}^C + D_{22}^M \quad (3.3.2)$$

$$D_{12} = D_{12}^C + D_{12}^M \quad (3.3.3)$$

$$D_{66} = D_{66}^C + D_{66}^M \quad (3.3.4)$$

Onde:

c = capa

m = miolo

A rigidez D^M refere-se a rigidez do miolo considerado na sua forma estrutural, onde a forma ondulada confere ao papel um ganho significativo de resistência mecânica pelo aumento do momento de inércia.

2. Assume-se que as generalizações podem ser aplicadas individualmente para ambos, capa e miolo. Desta forma, a rigidez em flexão nas direções D_{11} e D_{22} para os componentes individuais do papelão serão dados por:

$$D_{11}^c = \frac{E^c}{1 - \gamma_{12}^c \gamma_{21}^c} I_{yy}^c \quad (3.3.5)$$

$$D_{22}^c = \frac{E^c}{1 - \gamma_{12}^c \gamma_{21}^c} I_{xx}^c \quad (3.3.6)$$

$$D_{11}^m = \frac{E^m}{1 - \gamma_{12}^m \gamma_{21}^m} I_{yy}^m \quad (3.3.7)$$

$$D_{22}^m = \frac{E_2^m}{1 - \gamma_{12}^m \gamma_{21}^m} I_{xx}^m \quad (3.3.8)$$

Combinando as equações acima, as expressões para D_{11} e D_{22} do papelão ondulado podem ser escritas como:

$$D_{11} = \frac{E_1^c}{1 - \gamma_{12}^c \gamma_{21}^c} I_{yy}^c + \frac{E_1^m}{1 - \gamma_{12}^m \gamma_{21}^m} I_{yy}^m \quad (3.3.9)$$

$$D_{22} = \frac{E_2^c}{1 - \gamma_{12}^c \gamma_{21}^c} I_{xx}^c + \frac{E_2^m}{1 - \gamma_{12}^m \gamma_{21}^m} I_{xx}^m \quad (3.3.10)$$

O momento de inércia para as capas é:

$$I_{xx}^c = I_{yy}^c = 2 \int_{-H/2}^{H/2+h} Z^2 dz \quad (3.3.11)$$

Assume-se que o momento de inércia do miolo corrugado paralelo ao eixo (y_y) é igual a zero. Para tanto, foi considerado que a espessura do papel miolo é muito pequena em relação à espessura da camada corrugada de tal forma que o momento de inércia I_{yy}^m , pode ser tomado como muito pequeno aproximando-se do zero quando a seção da área para a direção $Z \approx 0$. Neste trabalho assume-se, de acordo com as referências de PETERSON (1980)a, POMMIER et al. (1991) e LUO et al. (1992), que :

$$I_{yy}^m \approx 0 \quad (3.3.12)$$

então,

$$D_{11}^m = 0 \quad (3.3.13)$$

O que equivale dizer que a equação (3.3.9) pode ser reescrita para a seguinte forma:

$$D_{11} = \frac{E_1^c}{1 - \gamma_{12}^c \gamma_{21}^c} I_{yy}^c \quad (3.3.14)$$

O momento de inércia do miolo sugerido é o proposto por CARLSSON et al. (1985), que aproxima a geometria do miolo por uma forma reta - senoidal e oferece o melhor compromisso entre rapidez e precisão:

$$I_{xx}^m = \frac{1}{9\pi} \left\{ \left[3 + \left(\frac{t^m}{t^c} \right)^2 \right] + \frac{2\eta t_f}{2p} \left[1 + 3 \left(\frac{t^m}{t_f} \right)^2 \right] \right\} h_c^2 t^m \quad (3.3.15)$$

Cálculo da rigidez de cisalhamento $D_{12} = D_{21}$.

$$D_{12} = \gamma^c D_{22}^c + \frac{1}{2} \gamma_{12}^m D_{22}^m \quad (3.3.16)$$

$$D_{21} = \gamma^c D_{11}^c + \frac{1}{2} \gamma_{12}^m D_{22}^m \quad (3.3.17)$$

A rigidez à torção D_{66} fica.

$$D_{66} = G_{12}^c I_{xx}^c + \frac{1}{2} G_{12}^m I_{xx}^m \quad (3.3.18)$$

$$D_{66} = G_{12}^c I_{yy}^c + \frac{1}{2} G_{12}^m I_{xx}^m \quad (3.3.19)$$

3.4 Conclusões

A palavra chave deste Capítulo foi rigidez. A partir do conhecimento da rigidez de um material pode-se determinar as suas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade), de uma estrutura ortotrópica montada em camadas como o papelão ondulado, considerado no seu todo ou em camadas equivalentes.

Para análise pelo método dos elementos finitos das estruturas apresentadas foram detalhadas as três formas de estudo possíveis para sua implementação.

Nas diferentes etapas de modelagem pelo método dos elementos finitos deverão estar presentes as formas de modelo ME, MS e MI, utilizadas para reproduzir o desempenho das estruturas de papelão ondulado.

A partir dos conceitos descritos neste Capítulo, o processo de modelagem toma contorno mais definido se for considerado que no Capítulo de Material e Métodos, com base na teoria aqui descrita, serão delineados os procedimentos metodológicos para viabilizar a obtenção das propriedades mecânicas e os parâmetros geométricos que permitam a implementação dos modelos no programa de elementos finitos nos Capítulos 6 e 7.

O momento de inércia da porção corrugada do papelão ondulado, ou seja, o seu miolo, apresenta valores diferentes em relação aos dois eixos de simetria. Sendo necessário assumir em primeiro lugar uma forma geométrica que o represente. Em segundo lugar, assumir que devido à espessura muito fina do papel em relação a camada ondulada e por se encontrar próximo da linha neutra da estrutura o momento de inércia na direção de fabricação pode ser estimado como nulo, por influir muito pouco na rigidez da estrutura (KELLICUTT e PETERS, 1959).

Capítulo 4

Material e Métodos

4.1 Apresentação

A finalidade deste capítulo é descrever os procedimentos dos ensaios, visto que alguns destes serão utilizados para reproduzir o comportamento mecânico do papelão ondulado seja na forma de embalagens ou ainda na forma de placas das estruturas com a modelagem pelo método dos elementos finitos. Também visa dar ao leitor um entendimento de como são obtidas as propriedades e os parâmetros que caracterizam o papel e as estruturas de papelão ondulado como material mecânico e desta forma poder ser modelado por um programa de elementos finitos comercial como o Ansys.

O grau de detalhamento observado na descrição foi considerado necessário por tratar-se de um trabalho com enfoque fortemente multidisciplinar, bem como o entendimento dos métodos e processos necessários para a compreensão do texto de aspectos específicos que são citados somente em literatura de circulação restrita.

4.2 Características do material utilizado

Nos ensaios para determinação das propriedades mecânicas os componentes utilizados foram papel capa *kraft* e papel miolo fornecidos pela Klabin Fabricante de Papel e Celulose S/A, de Jundiaí –SP.

Os papéis capa foram fabricados com matéria prima virgem pelo processo *kraft* e os papéis miolo fabricados a partir de aparas, isto é, papel e papelão ondulado reciclado após o consumo.

O material utilizado, produzido comercialmente, foi retirado das bobinas antes de entrar no processo de fabricação das estruturas. Para os papéis capa foram utilizados três gramaturas nominais de fabricação 125, 140 e 200 g.m⁻². As gramaturas nominais de fabricação do papel miolo reciclado foram 120, 140 e 170 g.m⁻².

4.3 Composição das estruturas de papelão ondulado utilizadas

A estrutura do papelão ondulado com onda C é mostrada no Anexo I Figura A1. As estruturas de papelão ondulado foram retiradas da linha de produção de embalagens antes do corte para a confecção das embalagens. As composições das estruturas avaliadas, mostradas na Tabela 4.1 apresentam duas formas de composição com as estruturas com onda C, formando a composição da onda BC, está mostrada na Anexo I Figura A2.

TABELA 4.1 Composição das estruturas de onda C, de acordo com a gramatura nominal (gm⁻²).

Nomenclatura	Capa Externa <i>Kraft</i>	Miolo Reciclado	Capa Interna <i>Kraft</i>
CK45	125	120	125
CK58	140	170	140

Na Tabela 4.2 estão mostradas as duas formas de composição para as estruturas com onda BC.

TABELA 4.2 Composição das estruturas de onda BC de acordo com a gramatura nominal (gm⁻²).

Nomenclatura	Capa Externa <i>Kraft</i>	Miolo Onda B Reciclado	Miolo Plano Reciclado	Miolo Onda C Reciclado	Capa Interna <i>Kraft</i>
BCK85	140	140	140	140	140
BCK120	200	170	170	170	200

4.4 Embalagens utilizadas no ensaio de compressão.

Para avaliação da resistência à compressão foram confeccionadas pela Klabin, vinte embalagens num processo automático de corte, vinco e colagem, dez embalagens do modelo 200 e dez do modelo 201, segundo a classificação de modelos descrita por PICHLER (1987), que estão mostradas na Figura A3 do Anexo I. A embalagem do modelo 200 não tem abas superiores, mas somente abas inferiores que quando dobradas e coladas formam o fundo. As embalagens do modelo 201 possuem abas inferiores e superiores.

4.5 Determinação da gramatura dos componentes e das estruturas do papelão ondulado.

As amostras de papelão coletadas ao acaso, em número de 10 e com área de 100mm², foram pesadas com balança Qualy-Med modelo AE 163 e precisão de 0,1g. O ensaio foi realizado a 23^o C e 50% UR conforme o procedimento adotado e descrito pela norma NBR 5981/ABNT *Papel e Cartão - Determinação da massa por unidade de área - (Gramatura) -* (ABNT-1992) e o ensaio foi realizado após 48 horas de condicionamento a 23^o C e 50% UR, utilizando-se a equação 4.5.1.

$$Gr = \frac{10.000}{A} . P \quad (4.5.1)$$

Onde: Gr = Gramatura (g.m^{-2}); P = Massa do corpo-de-prova (g); A = Área do corpo-de-prova (m^{-2}).

4.6 Determinação da espessura dos componentes e das estruturas do papelão ondulado

A determinação da espessura das estruturas de papelão ondulado foram feitas em amostras coletadas ao acaso e em número de 10. Foi utilizado um micrômetro com precisão de $1\mu\text{m}$ e pressão de medida de $50 \pm 2\text{kPa}$, segundo o procedimento adotado descrito na norma ABNT NBR - 9160 *Papel e cartão – determinação da espessura da folha. Cálculo da massa específica aparente do cartão* (ABNT, 1985).

4.7 Determinação da rigidez à flexão dos componentes da estrutura do papelão

Dez corpos de prova característicos de cada um dos papéis selecionados, com dimensões de 70,0 por 38,1 mm, foram testados nas direções do papel, direção de fabricação (DF) e direção transversal (DT).

Na determinação da rigidez à flexão dos papéis capa e miolo utilizou-se a metodologia TAPPI T489 om-92 – *Stiffness of paper and paperboard* (TAPPI, 1994) – e o aparelho Taber – *Stiffness Tester* mostrado no Anexo I Figura A4.

Este método determina o momento de flexão necessário para fletir um corpo-de-prova de 70 mm de comprimento por $38,1 \pm 3\text{mm}$ de largura, 15° da sua linha de centro, com força aplicada a 50mm do ponto onde o corpo de prova é fixado, sendo os resultados expressos em gf.cm.

A rigidez à flexão do material (*bending stiffness*) definida como sendo o módulo de elasticidade vezes o momento de inércia, por unidade de largura, foi calculado pela Equação descrita em 4.7.1 (MOURAD et al., 1999).

$$\Delta = F.L^3 / 3.E.I \quad (4.7.1)$$

Onde: Δ = deflexão (mm); F = força aplicada (mN); L = comprimento do corpo de prova (mm); E = módulo de elasticidade (mN/mm²); I = momento de inércia (mm⁴)

Como a deflexão do corpo-de-prova é conhecida e igual a 15°, tem-se $D/L = \text{sen}15^\circ$, portanto:

$$E.I = F.L^2 / 3 \text{ sen}15^\circ \quad (4.7.2)$$

Dividindo-se os dois termos pela largura do corpo-de-prova (w):

$$EI_w = F.L^2 / 3 \text{ sen}15^\circ \text{ sendo que } F.L = \text{Rigidez Taber}$$

Portanto:

$$EI_w = \text{Rigidez Taber } L / 3.w.\text{sen}15^\circ \quad (4.7.3)$$

4.8 Determinação da resistência à tração e porcentagem de alongamento do papel.

A resistência à tração dos papéis capa e miolo foi determinada numa máquina universal de ensaios INSTRON modelo 5500 R com uso de uma célula de carga de 500 N com histerese de 0,0041 % (FS), repetibilidade 0,0013 % (FS), erro, 0,087 % (FS) e creep 0,0023 % (FS).

Os corpos-de-prova, em número de dez foram cortados com auxílio de uma guilhotina com largura padrão de $15 \pm 0,1$ mm e comprimento de 250 mm. Foram submetidos a um esforço de tração uniformemente crescente até sua ruptura, nas direções transversal e longitudinal de acordo com a norma ABNT NBR - 7536 *Papel e cartão – determinação da resistência à tração* (ABNT, 1985), mostrada na Figura A5 do Anexo I.

A resistência à tração foi calculada, para cada direção separadamente, utilizando-se a fórmula:

$$R = \frac{FR}{W} \quad (4.8.1)$$

Onde: R = resistência á tração em uma das direções (Nm⁻¹); FR = força de ruptura média (N); W= largura do corpo-de-prova (m).

A porcentagem de alongamento do corpo-de-prova foi determinada com auxílio da seguinte equação:

$$\%A = \frac{(df - di)}{di} \times 100 \quad (4.8.2)$$

Onde: A% = porcentagem de alongamento; df = distância entre as garras no instante de ruptura (m) e di = distância entre as garras no início do ensaio (m).

$$\text{Módulo de Elasticidade (Young)} = \frac{[\text{Tensão no ponto de ruptura}]}{[(\text{Alongamento no ponto de ruptura/Comprimento inicial da amostra})^*]} \quad (4.8.3)$$

*OBS: Considera-se o início da curva de tensão válida para o cálculo do módulo de elasticidade os valores obtidos após realizado o expurgo dos dados iniciais registrados, visto que tais valores são fruto da acomodação da amostra nas garras do Instron.

4.9 Determinação da resistência ao esmagamento do anel do papel (RCT).

A determinação da resistência ao esmagamento do papel foi realizada segundo a norma ABNT- NB 0:01.7-014 (1980), Figura A6 Anexo I.

Dos papéis capa e miolo foram cortados dez corpos de prova de cada gramatura com 12,70 ± 0,1 mm de largura por 152,40 ± 0,13 mm de comprimento que foram pré-condicionados por 48 horas a 23^o C e 50% UR. Os ensaios foram realizados nas direções de fabricação (DF) e transversal (DT).

Na direção DF, o comprimento do corpo de prova foi colocado no anel perpendicular à direção de fabricação e na DT o comprimento do corpo de prova foi colocado no anel paralelo à direção de fabricação.

A seleção do disco, apropriada para cada espessura de corpo de prova, foi de modo que a ranhura anelar entre o disco e o suporte tivesse uma largura entre 150 % e 175 % da espessura nominal do corpo-de-prova.

Foi utilizado na compressão pelo aparelho de barra de flexão, aumento da força da ordem de $67 \pm 23 \text{ N.s}^{-1}$ a $111 \pm 23 \text{ N.s}^{-1}$.

4.10 Determinação da resistência à compressão do papel ondulado em aparelho Concora (CCT).

O procedimento para determinação da resistência à compressão do papel ondulado em aparelho Concora se deu como descrito pela norma SCAN-P 42:81.

Foi utilizado um aparelho ondulator do tipo Concora para onda tipo A, com controle de temperatura, que durante a operação foi de $177 \pm 11^{\circ} \text{ C}$. Com dois rolos de diâmetro externo de $228,5 \pm 1 \text{ mm}$. Um dos rolos é acionado por um motor a $4,0 \pm 0,05 \text{ s}^{-1}$. Cada rolo possui 84 dentes de $4,74 \pm 0,05 \text{ mm}$ de altura com raio superior de 1,5 mm e raio inferior de 2,0 mm.

Os dez corpos de prova de cada gramatura com $12,70 \pm 0,1 \text{ mm}$ de largura por $152,40 \pm 0,13 \text{ mm}$ de comprimento papéis capa e miolo foram pré-condicionados por 48 horas a 23° C e 50% UR. Os ensaios foram realizados nas direções de fabricação (DF) e transversal (DT).

As amostras, imediatamente depois de onduladas, foram fixadas num suporte com as dimensões de onda do ondulator Concora e submetidas a uma compressão num aparelho de barra de flexão com aumento da força da ordem de $67 \pm 23 \text{ N. s}^{-1}$ a $111 \pm 23 \text{ s}^{-1}$.

4.11 Determinação da resistência à compressão do papel do papel (SCT).

O ensaio de compressão dos papéis realizado com o auxílio do aparelho *Short Span Compression Tester* K455, também conhecido como SCT ou STFI Figura C do Anexo II., foi conduzido de acordo com a norma Tappi T826.

A pressão de operação durante o ensaio foi de 600 kPa \pm 20 kPa. A faixa de medida do equipamento é de 0 a 500 N e precisão de \pm 1 %, com velocidade de compressão de 3mm.min⁻¹ \pm 1 mm. ⁻¹. As amostras foram cortadas com auxílio de uma guilhotina manual, com largura de 15 mm e comprimento de 180 mm e pré-condicionadas por 48 horas a 23^oC e 50% UR.

4.12 Determinação dos parâmetros geométricos das seções das estruturas de papelão ondulado.

O perfil das ondas foi determinado segundo o método proposto por URBANIK (1981) para uma aproximação com uma onda de forma trapezoidal. Os parâmetros obtidos foram o ângulo (α) da onda e o fator de correção (FC), equações 4.12.1 e 4.12.2 respectivamente, onde o ângulo é formado entre a parede lateral da onda e a crista (lt), o comprimento da crista (cr), altura da onda (hc) e o fator de correção é a relação entre o comprimento do papel miolo sem a ondulação e o comprimento após o processo de ondulação, mostrados na Figura 4.12.1.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{hc - tm}{(2p - 2cr)} \quad (4.12.1)$$

$$FC = \frac{(lt + cr) \cdot 2}{2p} \quad (4.12.2)$$

Onde: 2 p = comprimento da amostra /n^o de ondas;; α = ângulo de inclinação da onda; cr= comprimento da crista (mm); FC = fator de correção; ht = altura total da estrutura (mm); hc = altura da onda (mm); lt = comprimento da lateral da onda (mm); tc = espessura das capas (mm); tm = espessura do miolo (mm)

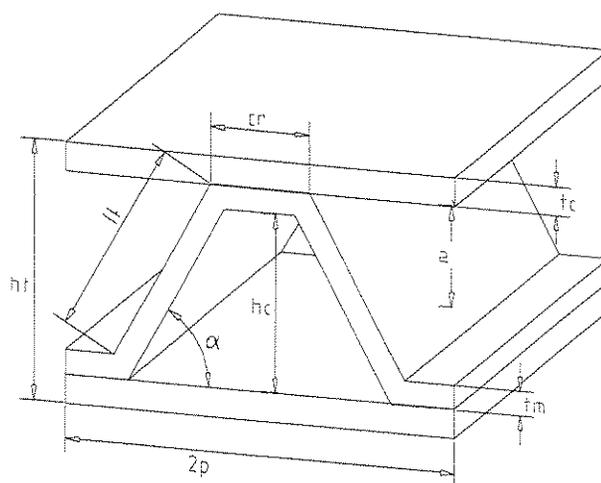


FIGURA 4.12. 1 Parâmetros geométricos da onda na forma trapezoidal.

4.13 Determinação da espessura total da estrutura do papelão ondulado.

A aparelhagem utilizada foi um micrômetro com as características já descritas na seção 4.4. Executado nas mesmas condições do condicionamento. O procedimento adotado foi o descrito pela norma ABNT NBR - 6738 *Papelão ondulado – determinação da espessura da folha*. (ABNT, 1981)a.

4.14 Cálculo estimado da resistência à compressão de coluna estrutura do papelão ondulado a partir da resistência á compressão dos componentes.

A estimativa de resistência á compressão de coluna a partir da resistência á compressão dos componentes foi calculada pela fórmula geral descrita por ARDITO et al. (1991).

$$ECS = d.(Le.FC.Mi+Li)+f \quad (4.14.1)$$

Onde: ECS = resistência à compressão de coluna do papelão ondulado (N); Le= resistência à compressão da capa externa (N); Li = resistência á compressão da capa interna (N);

i = resistência compressão do miolo (N); FC = Fator de Correção (relação entre o comprimento inicial do papel miolo e o final, após a ondulação); d e f = constantes.

Para o cálculo da resistência à compressão adotou-se constantes determinadas por ARDITO et al. (1991) e BILLERUD HANBOOK (1983).

A equação 4.14.1 foi utilizada para estimar a resistência à compressão de coluna utilizando os dados de resistência ao esmagamento de anel para as capas Le e Li e para o miolo M. As constantes foram obtidas de ARDITO et al. (1991), ou sejam:

$$d = 1,37 \quad e \quad f = 0,43$$

Da mesma forma a equação 4.14.1 foi empregada com os dados de resistência ao esmagamento do anel, porém para o miolo, a resistência à compressão foi obtida com o papel ondulado no aparelho Concora. As constantes foram as obtidas de ARDITO et al. (1991), ou sejam:

$$d = 1,1 \quad e \quad f = 0,07$$

Na terceira forma de estimativa de compressão da coluna foram utilizados os dados de resistência a compressão dos papeis do SCT para as capas Le e Li e para o miolo M. As constantes foram as indicadas no BILLERUD HANBOOK (1983), ou sejam:

$$d = 0,685 \quad e \quad f = 4,62$$

4.15 Determinação da resistência à compressão da estrutura do papelão ondulado.

A determinação da resistência à compressão de coluna foi determinada conforme a norma ABNT – 6739 *Papelão ondulado – Determinação da resistência à compressão de coluna.* (ABNT, 1981)B, a qual especifica um corpo de prova de $63,0 \pm 0,5$ mm de largura e $100,0 \pm$

0,5mm de comprimento, cortados com auxílio de um cortador pneumático. O ensaio foi executado nas mesmas condições de temperatura e umidade relativa.

Os corpos foram submetidos a uma compressão de coluna num aparelho tipo barra de deflexão, que funciona com duas placas planas e paralelas, uma das quais acionada a velocidade constante e a outra conjugada a um dinamômetro de barra de deflexão. O aumento da carga de compressão foi de $111 \pm 23 \text{ N.s}^{-1}$.

4.16 Determinação da rigidez à flexão da estrutura do papelão ondulado

Dentre os testes existentes o mais utilizado para obtenção das rigidezes em flexão principais é o teste dos quatro pontos. O teste de rigidez de quatro pontos pode ser realizado com um aparelho da Lorentzen & Wettre, como mostra a Figura A7 do Anexo I, (MOURAD, 1999).

A rigidez é obtida pela equação abaixo. Quando o material é testado na direção perpendicular à onda e na direção da onda, resulta na obtenção da rigidez em flexão D_{11} e D_{22} . As amostras devem ter 100 mm de largura e 320 mm de comprimento.

$$D_{11} \text{ e } D_{22} = (P/2 \cdot L_1 \cdot L_2^2) / (8 \cdot \Delta \cdot W) \text{ (N.m)} \quad (4.16.1)$$

Onde: D_{11} e D_{22} = São rigidez em flexão nas direções perpendicular da onda e na direção da onda (N.m); $P/2$ = Carga aplicada em cada extremidade (N); L_1 = Distância entre os apoios e o ponto de aplicação dos carregamentos 0,13 (m); L_2^2 = Distância entre os apoios (m); Δ = Deslocamento devido à flexão (m); W = largura do corpo de prova (m).

4.17 Determinação da rigidez à flexão da estrutura do papelão ondulado em aparelho de dois pontos

A resistência à compressão das embalagens de papelão ondulado foi realizada aplicando uma carga de compressão. O equipamento usado foi o descrito por PICHLER (1987), que é esquematicamente mostrado na Figura 4.17.1. As amostras foram condicionadas a 23°C e 50%

UR. Para as estruturas de parede simples onda C, o comprimento do corpo de prova foi de 200 mm e para as estruturas de parede dupla com ondas BC, o comprimento do corpo de prova foi de 250 mm. Os carregamentos foram de 1N para as estruturas de onda C e de 2N para as estruturas de onda BC. As estruturas foram avaliadas na direção de fabricação e transversal.

$$\Delta = \frac{Pl^3}{3D} \quad (4.17.1)$$

Onde: Δ = flecha (mm); P = Carga por unidade de largura do corpo de prova [N.m^{-1}]; l = Comprimento da placa C menos a 50 mm destinada ao engaste da estrutura; D = Rigidez da estrutura (N.m).

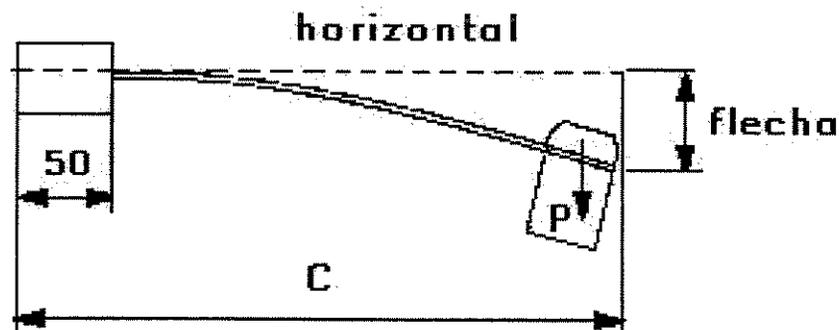


FIGURA 4.17.1 Esquema do ensaio das estruturas de papelão ondulado em aparelho de dois pontos.

4.18 Determinação da resistência à compressão das caixas de papelão ondulado.

A resistência à compressão das embalagens de papelão ondulado foi realizada aplicando uma carga de compressão. O equipamento usado foi uma Mesa de Compressão Lausmont Modelo 152-50. Foi configurada na opção de placas rígidas e paralelas com inclinação máxima de 1:500, velocidade de compressão de $0,208 \text{ mm.s}^{-1}$ e uma pré-carga de 222 N. Os critérios de

parada estabelecidos em 20 % da redução da resistência à compressão da embalagem ensaiada ou 30 mm de deformação. A faixa de uso da célula de carga utilizada foi de 0 a 20.000 N e resolução de 10,0 N.

O ensaio, utilizando 20 embalagens, sendo dez do modelo 200 de papelão ondulado CK 45 e dez do modelo 201 CK 45, descritas no item 3.4, foram realizados, depois de determinadas as suas dimensões de comprimento, altura e largura (C, H e L).

4.19 Cálculo da rigidez em flexão das estruturas de papelão ondulado pelo método analítico proposto por CARLSSON et al. (1985).

Para que se possa analisar o papelão ondulado como um conjunto de placas ortotrópicas homogêneas sobrepostas e de tal modo que formem uma única estruturas do tipo sanduíche, são necessárias as propriedades mecânicas equivalentes de cada camada.

O cálculo da rigidez de cada elemento constituinte do papelão ondulado necessário na análise estrutural da placa foi obtido com o procedimento de cálculo proposto por CARLSSON et al. (1985).

Para as estruturas de parede simples, isto é, estruturas com uma ondulação central dita miolo e duas placas laterais chamadas de capas o cálculo da rigidez utilizou-se:

$$D_{11} = \frac{E_x^c}{1 - \nu_{xy}^c \nu_{yx}^c} I^c \quad (4.19.1)$$

$$D_{22} = \frac{E_y^c}{1 - \nu_{xy}^c \nu_{yx}^c} I^c + \frac{E_y^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} I^m \quad (4.19.2)$$

$$D_{12} = \frac{\nu_{xy} E_y^c}{1 - \nu_{xy}^c \nu_{yx}^c} I^c \quad (4.19.3)$$

$$D_{xy} = G_{xy}^c I^c + G_{xy}^m I^m \quad (4.19.4)$$

$$I^m = \frac{1}{9\pi} \left\{ \left[3 + \left(\frac{t_m}{t_c} \right)^2 \right] + \frac{2\eta h_c}{2p} \left[1 + 3 \left(\frac{t_m}{h_c} \right)^2 \right] \right\} h_c^2 t_m \quad (4.19.5)$$

$$I^c = \left\{ \frac{1}{2} - \frac{t_c}{t} + \frac{2}{3} \left(\frac{t_c}{t} \right)^2 \right\} t^2 t_c \quad (4.19.6)$$

$$\eta = \left\{ 1 + \left(\frac{2p/4 + t^m}{a\pi} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (4.19.7)$$

Onde: I^c = momento de inércia por unidade de largura das capas (m^3); I^m = momento de inércia por unidade de largura do miolo (m^3); η = coeficiente; t = espessura da estrutura do papelão ondulado (m); t^c e t^m = espessura dos papéis (t^c capa e t^m) miolo (m); h_c = altura da onda (m); a = ponto médio entre as camadas externas do papelão ondulado (m); $2p$ = comprimento da onda Figura 4.12.1.

Nos procedimentos para o cálculo da rigidez equivalente, mostrada na Figura 4.19.1, para as estruturas de papelão ondulado onde a determinação do módulo de cada camada isoladamente se faz necessário, como nas estruturas em forma de sanduíche, a obtenção do módulo de rigidez equivalente para o corrugado do miolo é dado pelas seguintes relações.

$$S_{b,m} = E_m \cdot I_m \quad (4.19.8)$$

$$E_{k(DT)} = \frac{S_{b,m} \cdot 12}{t_k^3} \quad (4.19.9)$$

Onde: E_m = módulo de elasticidade do papel miolo para a referida camada; t_k = altura da onda sem a espessura do miolo que é a espessura da camada k ou $2 \times a$ (m); S_b = rigidez da camada (N.m); $E_{k(DT)}$ = módulo de elasticidade da camada k (estrutura) na direção transversal (Gpa)

Para as estruturas com parede dupla, tal como as estruturas de ondas BC, a rigidez na direção transversal é dada pela somatória da rigidez dos miolos e das capas (FELLERS e CARLSSON, 1983), Figura 4.19.1.

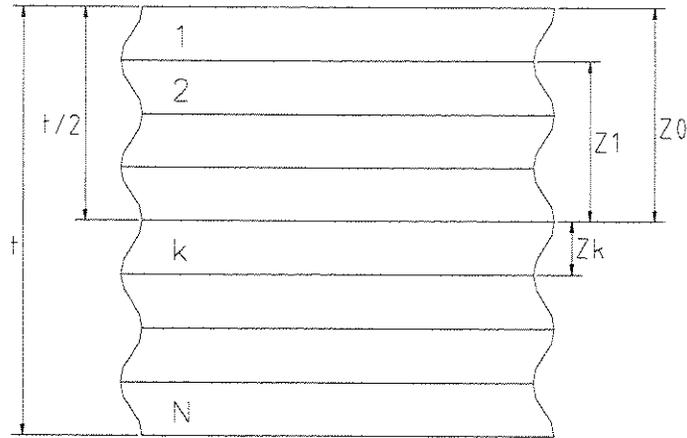


FIGURA 4.19. 1 Coordenadas de cada uma das camadas z_k da estrutura de múltiplas camadas.

$$D_{22} = D - \frac{B^2}{A} \quad (4.19.9)$$

$$A = \sum_{k=1}^N (E_{DT})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (4.19.10)$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (E_{DT})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (4.19.11)$$

$$D = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (E_{DT})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (4.19.12)$$

$$z_0 = \frac{-t}{2} \quad \text{para } k = 0 \quad (4.19.13)$$

$$z_k = z_{k-1} + t_k \quad \text{para } k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.19.14)$$

Onde: t = espessura total da estrutura (m); t_k = altura da onda sem a espessura do miolo que é a espessura da camada k ou $2 \times a$.

Na rigidez da direção de fabricação é levada em consideração somente a rigidez das capas, o miolo serve apenas como um elemento de separação como foi mostrado na equação 3.3.14. Análises conduzidas por FELLERS e CARLSSON (1983) mostram que a rigidez do miolo na direção de fabricação pode ser negligenciada comparada com a função que tem de separar as capas e a camada de miolo plano. Com isso, utilizam-se as mesmas equações 4.19.1, 4.19.3 e 4.19.6 para o cálculo de D_{11} , D_{12} e D_{xy} para as estruturas de parede dupla.

4.20 Cálculo da resistência à compressão do papelão ondulado utilizado o procedimento empírico proposto por MCKEE et al. (1963).

É possível obter-se um valor aproximado da resistência de uma caixa de papelão sem reforços e sem parede telescópica, através da correlação entre a resistência da caixa e certas propriedades do papelão.

A correlação entre a resistência à compressão da caixa com a rigidez e resistência à compressão de coluna do papelão foi demonstrada por MCKEE et al. (1963). A fórmula utilizada foi a seguinte:

$$RE = K_M \cdot C_L^a \cdot (\sqrt{D_{11} \cdot D_{22}})^b \cdot Z^c \quad (4.20.1)$$

Onde: RE = resistência à compressão da caixa (N); C_L = resistência à compressão de coluna de papelão ondulado (Nm^{-1}); D_{11} = rigidez perpendicular às ondas (N.m); D_{22} = rigidez na direção das ondas (N.m); Z = perímetro da caixa (m); K_M , a , b , e c são constantes experimentais e os valores determinados por MCKEE et al. (1963) foram: $K_M = 2,028$; $a = 0,746$; $b = 0,254$; $c = 0,492$.

MCKEE et al. (1963) encontraram, para a fórmula simplificada, um valor de K igual a 5,874 para a caixa de papelão ondulado tipo 201 de parede simples.

$$REr = 5,874 \cdot C_L \cdot d^{0,508} \cdot Z^{0,492} \quad (4.20.2)$$

Onde : d = espessura da estrutura do papelão ondulado (m).

4.21 Relações encontradas por BAUM et al. (1981) para o papelão ondulado

BAUM et al. (1981) empiricamente encontraram que a média geométrica de dois coeficientes de Poison no plano é aproximadamente constante.

$$(\nu_{12}\nu_{21})^{\frac{1}{2}} \approx 0,293 \quad (4.21.1)$$

Desta maneira pode-se determinar aproximadamente o módulo de cisalhamento pela fórmula que segue:

$$G_{xy} G_{12} \approx 0,387 \cdot (E_1 E_2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.21.2)$$

Onde E_1 e E_2 são os módulos de Young nas direções principais.

Essas relações são utilizadas para estimar a rigidez de flexão, D_{12} e D_{66} , para as estruturas de papelão ondulado, a partir dos valores da rigidez de flexão, principais, D_{11} e D_{22} . As relações obtidas são:

$$D_{12} \approx 0,293 (D_{11} \cdot D_{22})^{1/2} \quad (4.21.3)$$

$$D_{66} \approx 0,354 (D_{11} \cdot D_{22})^{1/2} \quad (4.21.4)$$

As equações 4.21.3 e 4.21.4 serão utilizadas para estimar os valores de rigidez de cisalhamento e torção para as estruturas de papelão ondulado.

4.22 Relações encontradas por NORDSTRAND et al. (1994) especificamente para papelão ondulado para o coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento.

Para NORDSTRAND et al. (1994) os módulos de cisalhamento transversal G_{xz} e G_{yz} que correspondem às tensões de cisalhamento τ_{xz} e τ_{yz} (Figura 4.22.1) respectivamente, podem ser determinadas pelas relações a seguir:

$$G_{yz} = \frac{h_e t_m}{pS} G_{12} \quad (\text{Gpa}) \quad (4.22.1)$$

$$G_{xz} = \Gamma \cdot E_c \quad (\text{Gpa}) \quad (4.22.2)$$

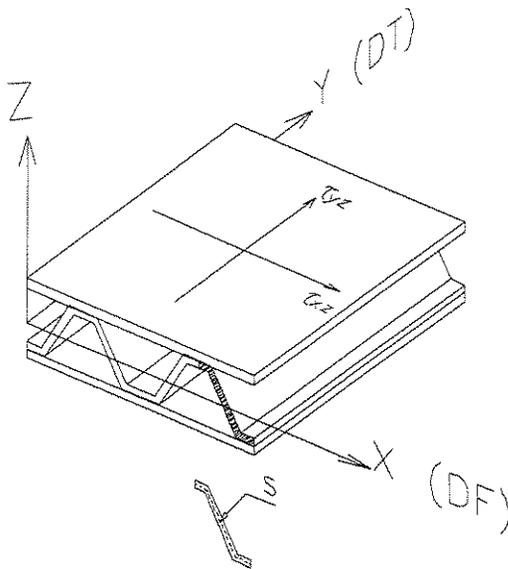


FIGURA 4.22. 1 Detalhe das tensões de cisalhamento e comprimento do arco S.

Onde: h_c = altura total da onda (m); t_m = espessura do miolo (m); $p = 2p/2$ (m); S = comprimento do arco da onda (m); G_{xy} = Módulo de cisalhamento no plano determinado pela relação de BAUM et al. (1981); $\Gamma = 0,961e^{-3}$ (Coeficiente adimensional que depende da geometria do corrugado que foi determinado para uma geometria de corrugado quase trapezoidal por LIBOVE e RUBKA, 1951); E_c = Módulo de elasticidade do corrugado para direção transversal de fabricação determinado pelas relações de CARLSSON et al. (1985).

4.23 Cálculo da carga crítica pelo procedimento de LEKHNITSKII (1968)

A carga crítica é função da rigidez transversal e da longitudinal, é dependente das condições de contorno da placa e é calculada como segue:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_{11} D_{22}}}{B^2} K_f \quad (4.23.1)$$

Onde: N_{cr} = Carga crítica de flambagem por unidade de largura da placa; D_{11} = Rigidez à torção na direção de x (N.m); D_{22} = Rigidez à torção na direção de y (N.m); K_f = Coeficiente de flambagem;

O coeficiente de flambagem por sua vez é dependente das propriedades mecânicas, da geometria seção da transversal e das condições de contorno.

Para LEKHNITSKII (1968) o coeficiente de flambagem para uma placa simplesmente suportada é o que segue.

$$K_f = \sqrt{\frac{D_{11}}{D_{22}}} \cdot \left(\frac{m}{C}\right)^2 + \frac{2 \cdot (D_{12} + 2 \cdot D_{66})}{\sqrt{D_{11} \cdot D_{22}}} + \sqrt{\frac{D_{22}}{D_{11}}} \cdot \left(\frac{\Psi}{m}\right)^2 \quad (4.23.2)$$

Onde: $\psi = H_p/L_p$; $L_p =$ Largura da placa (m) ; $H_p =$ Altura da placa (m); $m = 1,2,3\dots$ meias ondas na direção de x; $P_{cr} =$ Carga crítica de flambagem da embalagem Ncr. Z (N)

4.24 Procedimento proposto por POMMIER e POUSTIS (1989) para estimar a resistência à compressão de embalagens de papelão ondulado a partir da resistência das placas

A modelagem do papelão ondulado teve por meta reproduzir o comportamento das placas que compõem a embalagem denominadas de testeira e lateral seguindo o procedimento de POMMIER e POUSTIS (1989). Este método considera que a resistência à compressão de uma embalagem é dada pela avaliação das suas placas admitidas como se fossem independentes uma da outra e com condição de contorno como simplesmente suportada nos seus quatro lados, Figuras 4.24.1 e 4.24.2

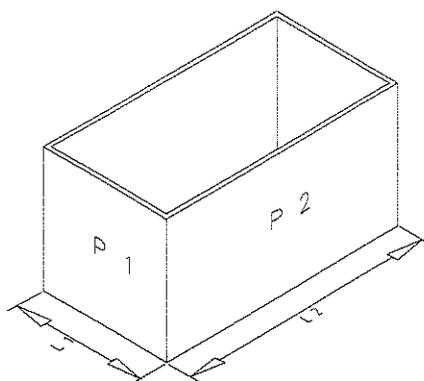


FIGURA 4.24.1 Embalagem composta das placas P1 e P2, testeira e lateral respectivamente.

Pelo procedimento proposto por POMMIER e POUSTIS (1989) a partir da determinação das cargas críticas das Placas 1 e 2, determinadas pelas equações de LEKHNITSKII (1968), pode-se estimar a carga necessária para levar a colapso a embalagem. Após o cálculo de P_1 e P_2 , se P_1 for maior que P_2 , então a carga de compressão será $P = P_2 (2 L_1 + 2 L_2)$, onde L_1 e L_2 são as larguras das placas.

Os modelos das placas testeira e lateral foram analisadas com diversos níveis de abertura e os níveis propostos foram avaliados de acordo com a Tabela 4.3, para a placa lateral. As aberturas foram selecionadas segundo os parâmetros sugeridos por LANGBRIDGE (1982) e MOURAD et al. (1999).

TABELA 4.3 Número de aberturas e código, porcentagem das aberturas e número de nós das placas para produtos hortícolas.

Número de aberturas	Área de ventilação lateral (mm ²)	Porcentagem (%)
Duas aberturas (P ₂ aMS ₁)	6463,5	3,71
Duas aberturas(P ₂ aMS ₂)	8963,5	5,14
Duas aberturas(P ₂ aMS ₃)	11463,5	6,58
Três aberturas(P ₃ aMS ₁)	9692,2	5,56
Três aberturas(P ₃ aMS ₂)	13445,2	7,72
Três aberturas(P ₃ aMS ₃)	17165,2	9,87

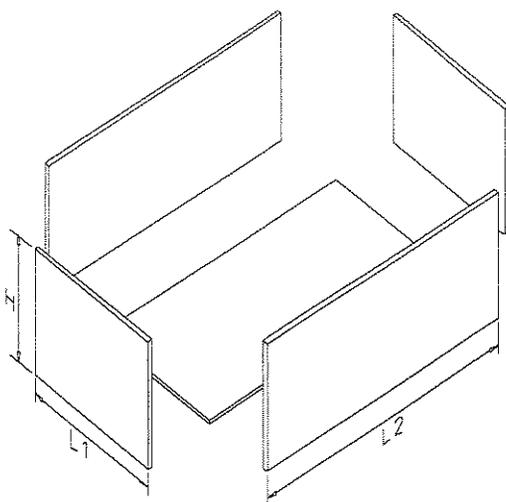


FIGURA 4.24. 2 Vista expandida da embalagem composta das placas P1 e P2, testeira e lateral respectivamente, tal como é modelada.

A abertura tem a função de permitir a circulação de ar, removendo o gás etileno produzido por grande parte dos produtos hortícolas e também o O₂ e o CO₂. O etileno é resultado da respiração natural dos produtos que após a colheita continuam o processo de amadurecimento. A embalagem deve propiciar, além da proteção ao produto, condições de ventilação adequada. A ventilação é realizada com auxílio de sistemas de refrigeração que insuflam ar frio sobre um conjunto de embalagens sobrepostas sobre um palete. As dimensões e formas das aberturas estão mostradas na Figura 4.24.3.

A necessidade das aberturas estarem dispostas de forma simétrica nas laterais da embalagem evita que durante o processo de montagem do palete uma caixa não obstrua a passagem do ar para as demais caixas, colocadas na seqüência da passagem da corrente de ar frio, como mostram as Figuras 4.24.4. e 4.24.5.

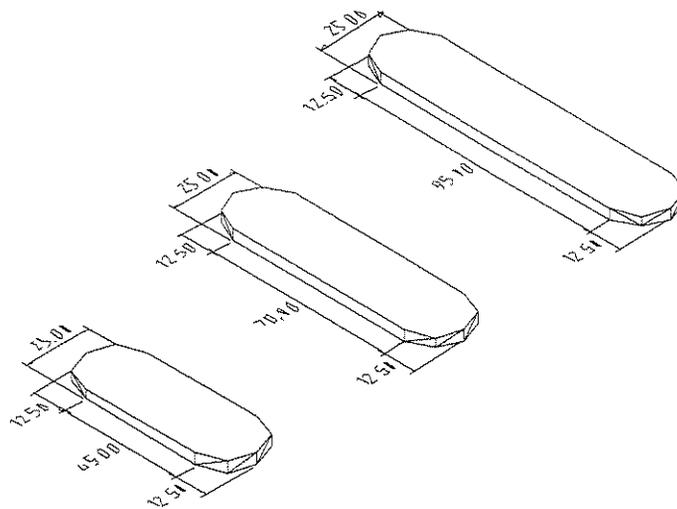


FIGURA 4.24. 3 Dimensões (mm) das aberturas projetadas.

As aberturas de formato oblongo são as mais utilizadas para embalagens de produtos hortícolas (LANGBRIDGE, 1982) por que com esta forma os produtos com formato esférico não conseguem o encaixe perfeito como ocorre quando as aberturas têm formas cilíndricas.

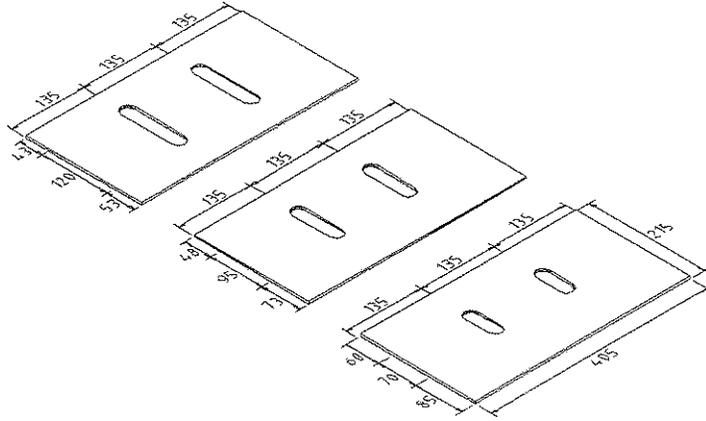


FIGURA 4.24. 4 Disposição e dimensão (mm) das duas aberturas em cada lateral.

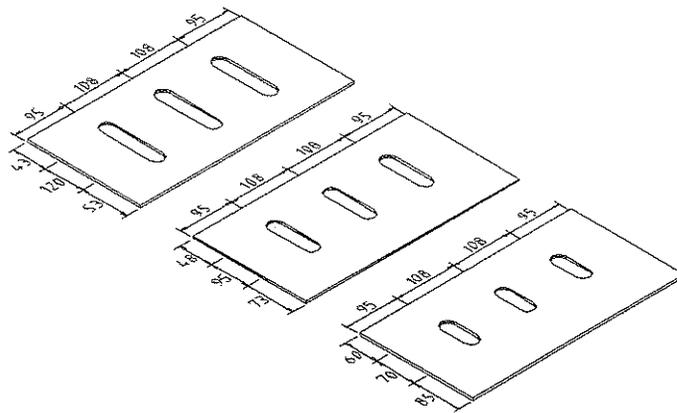


FIGURA 4.24. 5 Disposição das 3 aberturas em cada lateral em (mm).

Para as placas testeiras foram mantidas para todas simulações as mesmas dimensões de abertura mostradas na Figura 4.24.6. A abertura da placa da testeira tem dupla função de permitir ventilação, mas também serve para o manuseio na carga e descarga, opção muito recorrente nos diversos tipos de embalagens comerciais para produtos hortícolas. Com isso, a abertura da placa testeira foi mantida constante e os diferentes níveis de aberturas foram avaliados somente para a placa lateral que é também quem determina a resistência final da embalagem testada já que tem dimensões bem maiores que a testeira.

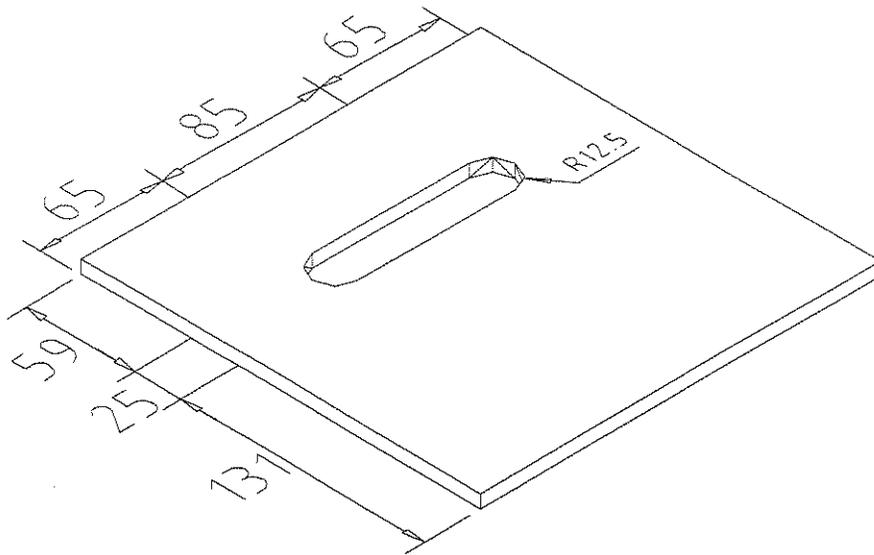


FIGURA 4.24. 6 Disposição e dimensão da abertura da placa testeira.

4.25 Elemento de placa selecionado Shell 91.

Neste trabalho optou-se por modelar todos os elementos de placa com o elemento tipo “Shell 91” (Figura 4.25.1). Este tipo de elemento possui recursos para a modelagem com uma única camada ou com múltiplas camadas e desta forma atende aos objetivos pretendidos para a modelagem do papelão. É mais robusto para algumas formas de análise que os elementos similares como o “Shell 99”, que permite modelar placas acima de 100 camadas, desnecessário para a modelagem do papelão ondulado.

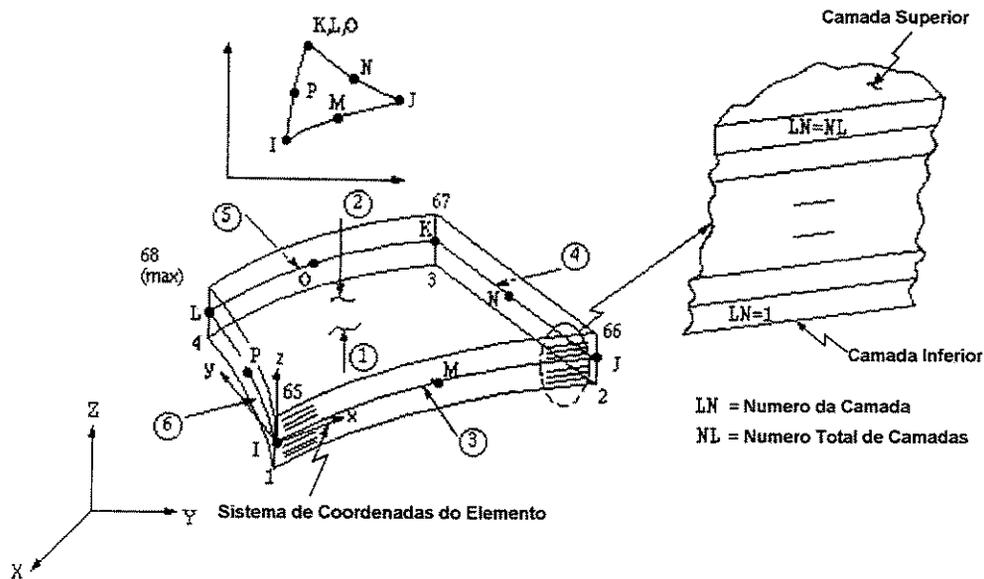


FIGURA 4.25. 1 Sistema de coordenadas do elemento, geometria e localização dos nós.

Os elementos quadriláteros de oito nós, como o Shell 91, é um tipo de elemento muito utilizado na sua forma curvilínea isoparamétrica, pois ele permite gerar facilmente funções de aproximação que possuem propriedades particulares em uma direção privilegiada. Esta representação pode ser particularmente interessante no caso de estudos físicos que possuem uma anisotropia de constituição ligada aos materiais ou ligada a geometria SABONNADIÈRE e COULOMB (1993).

Além das vantagens já enumeradas, o elemento tipo Shell 91 tem processamento mais rápido para estruturas com menos de três camadas e é mais lento para estruturas com até cinco camadas que é o caso das ondas BC em relação ao elemento Shell 99.

4.25.1 Hipóteses e Restrições.

Um elemento de placa, normal ao centro do plano, permanece reto após a deformação, como mostra a Figura 4.25.2, mas não necessariamente normal ao plano médio. Cada par dos pontos de integração (na direção r) é assumido como se tivesse a mesma orientação e material. Não há rigidez significativa associada com a rotação por todo o elemento no eixo r . Um valor de rigidez nominal está presente usando o método de Zienkiewicz, de qualquer modo, para prevenir rotações livres nos nós. Este elemento não gera uma matriz de massa consistente; e somente a matriz de massa *lumped* está disponível.

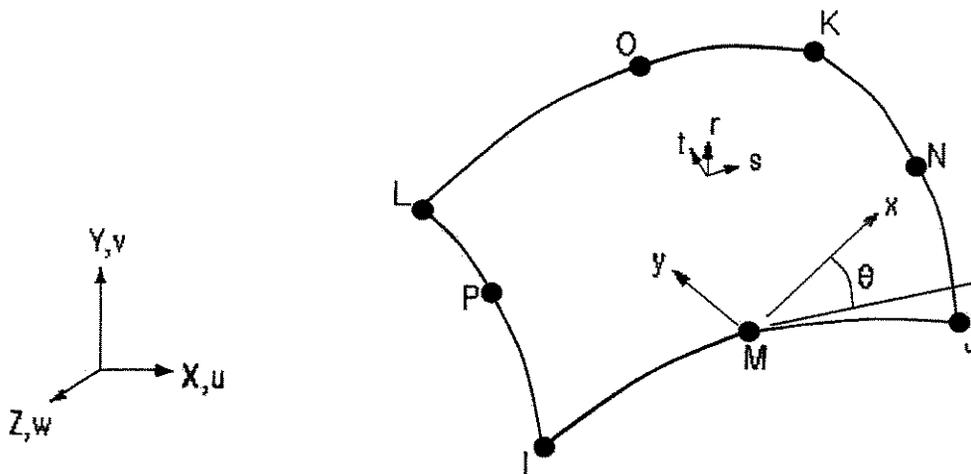


FIGURA 4.25. 2 Elemento quadrático de oito nós da família Serendipity; e os oito nós a ele associados. O sistema de referência local tem o vetor r normal ao plano na direção da espessura e os vetores t e s constituem as coordenadas curvilíneas solidárias ao plano.

4.25.2 Relação Tensão – Deformação

A matriz de propriedades do material para cada camada j é dada por $[D]_j$:

$$[D]_j = \begin{bmatrix} BE_{xj} & Bv_{xy,j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ BV_{xy,j}E_{x,j} & BE_{y,j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{xy,j} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{yz,j}}{f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{yz,j}}{f} \end{bmatrix} \quad (4.25.2.1)$$

Onde:

$$B = \frac{E_{y,j}}{E_{y,j} - (v_{xy,j})^2 E_{x,j}}$$

$E_{x,j}$ = Módulo de Young da camada na direção x da camada j.

$v_{xy,j}$ = Coeficiente de Poisson para camada no plano x-y da camada j.

$G_{xy,j}$ = Módulo de cisalhamento da camada no plano x-y da camada j.

$$f = \left\{ \begin{array}{l} 1.2 \\ 1.0 + 0.2 \frac{A}{25t^2} \end{array} \right\} 3960\Psi, \text{ qual dos dois for maior.}$$

A = elemento de área no plano s-t.

t = espessura média total.

4.25.3 Cálculo das Tensões, Forças e dos Momentos.

As tensões de cisalhamento transversais (e as deformações) devem ser zero na superfície livre, e ter um pico no centro. Desta forma, a não ser que materiais não-lineares sejam empregados, ou utilizada a opção sanduíche, eles serão ajustados por:

$$\sigma'_{xz,j} = \frac{3}{2}(1-r^2)\sigma'_{xz,j} \quad (4.25.3.1)$$

$$\sigma'_{yz,j} = \frac{3}{2}(1-r^2)\sigma_{yz,j} \quad (4.25.3.2)$$

Onde:

$\sigma'_{xz,j}$ = Valor ajustado da tensão de cisalhamento

$\sigma_{yz,j}$ = Tensão de cisalhamento transversal tal como calculada a partir das relações de deformação específica- deslocamento

r = coordenada normal, que varia de -1.0 (abaixo) até +1.0 (acima)

Somatória das forças e momentos

No plano as forças são calculadas como:

$$T_x = \sum_{j=1}^{N_l} t_j \left[\frac{\sigma'_{x,j} + \sigma^b_{x,j}}{2} \right] \quad (4.25.3.3)$$

$$T_y = \sum_{j=1}^{N_l} t_j \left[\frac{\sigma'_{y,j} + \sigma^b_{y,j}}{2} \right] \quad (4.25.3.4)$$

$$T_{xy} = \sum_{j=1}^{N_l} t_j \left[\frac{\sigma'_{xy,j} + \sigma^b_{xy,j}}{2} \right] \quad (4.25.3.5)$$

Onde:

T_x = Força no plano por unidade de comprimento

N_l = Número de camadas

$\sigma'_{x,j}$ = Tensão na camada superior j e na direção de x do elemento

$\sigma^b_{x,j}$ = Tensão na camada inferior j e na direção de x do elemento

t_j = espessura da camada j

Os momentos fora do plano são calculados como:

$$M_x = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^{N_l} t_j (\sigma^b_{x,j} (2z_j^b + z'_j) + \sigma'_{x,j} (2z'_j + z_j^b)) \quad (4.25.3.6)$$

$$M_y = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^{N_l} t_j (\sigma^b_{y,j} (2z_j^b + z'_j) + \sigma'_{y,j} (2z'_j + z_j^b)) \quad (4.25.3.7)$$

$$M_{xy} = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^{N_l} t_j (\sigma^b_{xy,j} (2z_j^b + z'_j) + \sigma'_{xy,j} (2z'_j + z_j^b)) \quad (4.25.3.8)$$

M_x = Momento na direção de x

M_y = Momento na direção de y

M_{xy} = Momento de torção em xy

z_j^b = Coordenada de z na camada inferior j

z'_j = Coordenada de z na camada superior j

z = coordenada normal da casca, com $z = 0$ na superfície média da casca.

As forças de cisalhamento transversal são calculadas como:

$$N_x = \sum_{j=1}^{N_l} t_j \sigma_{xz,j} \quad (4.255.3.9)$$

$$N_y = \sum_{j=1}^{N_l} t_j \sigma_{yz,j} \quad (4.25.3.10)$$

N_x = Força de cisalhamento transversal na direção de x

N_y = Força de cisalhamento transversal na direção de y

$\sigma_{xz,j}$ = Tensão média de cisalhamento na camada j no plano x - z do elemento

Para os cálculos das forças de cisalhamento transversal, as tensões de cisalhamento não devem ser ajustadas como mostrado nas equações 4.25.3.1 e 4.25.3.2.

Cálculo das Tensões de Cisalhamento interlaminares

Na ausência de forças atuantes no corpo, as equações no plano de equilíbrio do volume infinitesimalmente pequeno são:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial Y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial Z} = 0 \quad (4.25.3.11)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial Z} = 0 \quad (4.25.3.12)$$

Reescrevendo a equações acima na forma incremental

$$\Delta\sigma_{xz} = -\Delta z \left(\frac{\Delta\sigma_x}{\Delta X} + \frac{\Delta\sigma_{xy}}{\Delta Y} \right) \quad (4.25.3.13)$$

$$\Delta\sigma_{yz} = -\Delta z \left(\frac{\Delta\sigma_{yx}}{\Delta X} + \frac{\Delta\sigma_y}{\Delta Y} \right) \quad (4.25.3.14)$$

Colocando estas equações em termos da camada j,

$$\Delta\sigma_{xz,j} = -t_j \left(\frac{\Delta\sigma_{x,j}}{\Delta X} + \frac{\Delta\sigma_{xy,j}}{\Delta Y} \right) \quad (4.25.3.15)$$

$$\Delta\sigma_{yz,j} = -t_j \left(\frac{\Delta\sigma_{yx,j}}{\Delta X} + \frac{\Delta\sigma_{y,j}}{\Delta Y} \right) \quad (4.25.3.16)$$

Onde:

$$\Delta\sigma_{x,j} = (\sigma_{x,j}^2 + \sigma_{x,j}^3 - \sigma_{x,j}^1 - \sigma_{x,j}^4) / 2 \quad (4.25.3.17)$$

$$\Delta\sigma_{xy,j} = (\sigma_{xy,j}^4 + \sigma_{xy,j}^3 - \sigma_{xy,j}^1 - \sigma_{xy,j}^2) / 2 \quad (4.25.3.18)$$

$$\Delta\sigma_{yz,j} = (\sigma_{yz,j}^2 + \sigma_{yz,j}^3 - \sigma_{yz,j}^1 - \sigma_{yz,j}^4) / 2 \quad (4.25.3.19)$$

$$\Delta\sigma_{y,j} = (\sigma_{y,j}^4 + \sigma_{y,j}^3 - \sigma_{y,j}^1 - \sigma_{y,j}^2) / 2 \quad (4.25.3.20)$$

$\Delta\sigma_{x,j}^3$ = Tensões no elemento na direção x da camada j no ponto 3 de integração

Δx e Δy estão mostrados na Figura 4.25.3.

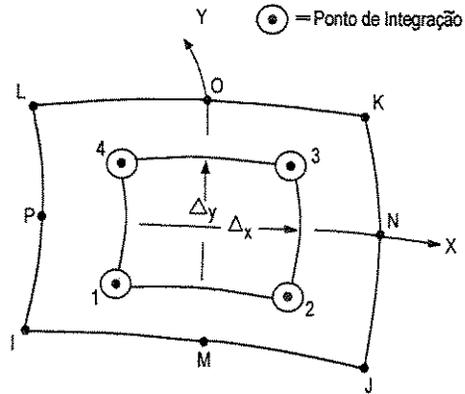


FIGURA 4.25. 3 Localização dos pontos de integração.

A tensão de cisalhamento interlaminar fica:

$$\tau_x^k = \sum_{j=1}^k \Delta\sigma_{xz,j} - S_x \sum_{j=1}^k t_j \quad (4.25.3.21)$$

$$\tau_y^k = \sum_{j=1}^k \Delta\sigma_{yz,j} - S_y \sum_{j=1}^k t_j \quad (4.25.3.22)$$

Onde:

τ_x^k = Interlaminar tensão de cisalhamento entre as camadas k e k+1

$$S_x = \frac{\sum_{j=1}^{N_j} \Delta\sigma_{xz,j}}{t}$$

t = Espessura total

4.25.4 Critério de ruptura para tensão máxima

$$\xi_2 = \text{máximo de} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\sigma_{xt}}{\sigma_{xt}^f} \text{ ou } \frac{\sigma_{xc}}{\sigma_{xc}^f} & \text{qual for aplicável} \\ \frac{\sigma_{yt}}{\sigma_{yt}^f} \text{ ou } \frac{\sigma_{yc}}{\sigma_{yc}^f} & \text{qual for aplicável} \\ \frac{\sigma_{zt}}{\sigma_{zt}^f} \text{ ou } \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zc}^f} & \text{qual for aplicável} \\ \frac{|\sigma_{xy}|}{\sigma_{xy}^f} & \\ \frac{|\sigma_{yz}|}{\sigma_{yz}^f} & \\ \frac{|\sigma_{xz}|}{\sigma_{xz}^f} & \end{array} \right. \quad (4.25.4.1)$$

Onde:

ξ_2 = Valor máximo da tensão do critério de ruptura

$$\sigma_{xt} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \sigma_x \end{array} \right. \quad \text{qual for maior}$$

σ_x = Tensão da camada na direção x.

$$\sigma_{xc} = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_x \\ 0 \end{array} \right. \quad \text{qual for menor}$$

σ_{xt}^r = Tensão de ruptura da camada na direção x

4.26 Obtenção da carga crítica de flambagem pelo método de elementos finitos com programa ANSYS: o método reduzido.

A estimativa da resistência à compressão de embalagens de papelão ondulado através da carga crítica de compressão é uma das formas bastante indicadas por HÖKE e GÖTTSCHING (1985), POMMIER et al. (1991), URBANIK (1996)b e RHAMAN (1997).

Para a obtenção da carga crítica são necessários os seguintes procedimentos a serem implementados no programa:

1. Construção do modelo de elementos finitos.
2. Obtenção da solução estática
3. Obtenção do auto valor de flambagem

A técnica iterativa HBI (Householder-Bisection-Inverse) é então usada para a obtenção do autovalor

4. Verificação dos resultados.

4.26.1 Análise Estática

As equações de equilíbrio globais para análise estrutural estática são:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (4.26.1)$$

onde:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\} = \sum_{m=1}^N [K_e] \quad (4.26.2)$$

$[K]$ = matriz de rigidez total

$\{u\}$ = vetor de deslocamentos nodais

N = número de elementos

$[K_e]$ = matriz de rigidez do elemento

$\{F^r\}$ = vetor de reação de carga

$\{F^a\}$, o vetor de carga total aplicada, é definido por:

$$\{F^a\} = \{F^{nd}\} + \{F^{ac}\} + \sum_{m=1}^N (\{F_e^{th}\} + \{F_e^{pr}\}) \text{ vetor de reação de carga}$$

Onde:

$\{F^{nd}\}$ = vetor de cargas nodais aplicadas

$\{F^{ac}\} = -[M]\{a_c\}$ = vetor de carga de aceleração.

$$[M] = \text{matriz de massa total} = \sum_{m=1}^N [M_e]$$

$[M_e]$ = matriz de massa do elemento

$\{a_c\}$ = vetor de aceleração total

$\{F_e^{th}\}$ = vetor de carga térmica do elemento

$\{F_e^{pr}\}$ = vetor de carga de pressão do elemento

4.26.2 O método reduzido

Para o caso de produtos hortícolas a avaliação da resistência à compressão através da carga crítica de flambagem é a mais adequada em razão do curto tempo de armazenamento a que são submetidos à maioria desses produtos desde a colheita até a comercialização.

Os trabalhos conduzidos por URBANIK (1997), NORDSTRAND (1995), PATEL et al. (1997), e ARDITO (2000) destacam a importância da avaliação da resistência das embalagens no pós-flambagem. Isto, no entanto, não se aplica aos produtos hortícolas porque se a embalagem, que tem a função de proteger a integridade física desses produtos, já houver apresentado alguma forma de deformação, sua finalidade principal não foi cumprida. Diferente de outros tipos de produtos, chamados auto-suportáveis, como as latas folha de flandres, onde a resistência do conjunto das latas dentro de uma caixa de papelão é aproveitada parcialmente de forma a complementar ao da embalagem principal.

Por este método, o sistema de equações é primeiro condensado nos graus de liberdade associados aos graus de liberdade *mestres* pela redução de Guyan. Neste procedimento de condensação uns grupos de n graus mestres caracterizam as frequências naturais de interesse do sistema. A seleção destes graus *mestres* pode ser feita manualmente ou usando-se um comando de seleção automática. O procedimento de escolha dos graus *mestres* foi sempre o automático.

O método reduzido é uma técnica que preserva o potencial de energia do sistema, mas modifica um pouco a dimensão da energia cinética. A energia cinética dos modos de frequências baixos é menos sensível a condensação do que a energia cinética nos modos de frequências altos. Os números de graus *mestres* selecionados podem ser usualmente menor que duas vezes o número de frequências de interesse. Esta forma reduzida pode ser expressa como:

$$[K]\{\phi_i\} = \lambda_i[M]\{\phi_i\} \quad (4.26.2.1)$$

onde: $[K]$ = matriz de rigidez reduzida

$\{\phi_i\}$ = autovetor

λ_i = autovalor

$[M]$ = matriz de massa reduzida

A técnica iterativa HBI (Householder-Bisection-Inverse) é então usada para a obtenção do autovalor.

4.27 Propriedades das placas

As placas, que tem as mesmas dimensões das placas componentes das embalagens avaliadas nos ensaios experimentais, são enquadradas no grupo de placas finas de acordo com REDDY (1984). JOHNSON et al. (1983) mostram que a altura da coluna de papelão ondulado influi diretamente na resistência da estrutura em virtude do seu índice de esbeltez. O índice é determinado a partir da equação 4.27.1.

$$I_{ES} = 2\sqrt{3} \frac{h}{t} \quad (4.27.1)$$

Onde h é a altura da placa e t é a espessura da estrutura em mm. A partir dos índices de esbeltez encontram-se três diferentes regiões para a forma de ruptura das estruturas de papelão ondulado, mostradas a seguir:

- | | |
|---|---------------------|
| I. Flambagem elástica : Altura da coluna = longa | $I_{ES} > 100$ |
| II. Flambagem inelástica : Altura da coluna = média | $100 > I_{ES} > 30$ |
| III. Resistência à compressão da coluna: Altura da coluna = curta | $30 > I_{ES} > 0$ |

4.28 Análise estatística

Os resultados dos ensaios realizados para os papéis capa e miolo bem como para as estruturas de papelão ondulado foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA) e efetuou-se o teste de Tukey para comparar os contrastes entre as médias para o nível de 5% de probabilidade (STEEL e TORRIE, 1980; COSTA NETO, 1977).

4.29 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram reunidos os procedimentos metodológicos para obtenção das propriedades mecânicas dos papéis que compõem as estruturas de papelão ondulado e das próprias estruturas em forma de placas após o processo de fabricação os quais constituem informações básicas para a fase de modelagem.

Como nos ensaios realizados não foi possível obter todas as propriedades mecânicas necessárias à implementação do programa de elementos finitos, utilizou-se equações disponíveis na literatura para estimativa de algumas propriedades, tais como, os módulos de cisalhamento e de torção propostos por (LIBOVE e RUBKA , 1951; NORDSTRAND, 1994).

As obtenções dos parâmetros geométricos das ondas do papelão ondulado são fundamentais tanto na construção de modelos de elementos finitos que reproduzam de maneira idêntica às formas das estruturas reais, como para o cálculo dos momentos de inércia dos corrugados que é um dado essencial para se estimar as propriedades do corrugado para uma forma de placa homogênea equivalente.

O procedimento para cálculo de uma placa homogênea equivalente demonstrada nas metodologias propostas por CALSSON e FELLERS (1983) e CARLSSON et al. (1985) que permitem estimar a rigidez em flexão de uma camada corrugada a partir das propriedades mecânicas do miolo e dos seus parâmetros geométricos.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de desempenho dos materiais realizados em laboratório e também discutidas algumas alternativas de utilização desses dados para aplicação diretamente no processo de modelagem, ou como valores secundários, assim como dos resultados da utilização de procedimentos analíticos com a finalidade de estimar algumas propriedades das estruturas, a partir das propriedades dos seus componentes.

Neste sentido são apresentadas estimativas da resistência à compressão de coluna e resistência a compressão de embalagens por meio de equações empíricas ou semi-empíricas disponíveis na literatura, com a finalidade de verificar o grau de aproximação com os valores experimentais.

5.2 Características dos papéis capa e miolo

A Tabela 5.1 apresenta os valores de gramatura e espessura dos componentes do papelão ondulado. Os papéis capa, sem exceção, apresentaram C.V. de gramatura que oscilou de 1,1 a 2,2 %, um pouco acima, porém próximos aos valores nominais. Os valores de gramatura para os papéis miolo apresentaram valores ainda maiores em relação aos valores nominais, com exceção do Miolo 140, que mostrou valor médio pouco abaixo do valor nominal.

TABELA 5.1. Gramatura e espessura dos papéis capa (c) e miolo (m).

Papel	Gramatura (g.m^{-2})		Espessura (mm)	
	Média *	C.V.(%)	Média *	C.V.(%)
C 125	126,39 a	2,4	0,215 a	2,5
C 140	142,25 b	1,1	0,241 b	1,3
C 200	204,55 c	1,1	0,334 c	3,4
M 120	136,91 i	2,7	0,246 i	4,0
M 140	137,82 ij	1,4	0,259 ij	7,9
M170	180,62 k	1,2	0,330 k	5,3

* As letras junto às médias indicam a existência ou não de diferença estatística ao nível de 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

C.V.= Coeficiente de variação (Desvio-Padrão/Média)

Os dados de rigidez em flexão e resistência à tração para os papéis capa e miolo nas direções de fabricação e transversal estão na Tabela 5.2. Os valores de rigidez em flexão refletem com clareza a variação nominal entre os papéis capa e miolo avaliados. Por sua vez, os valores de resistência à tração mostram que a relação observada para os papéis capa permanece crescente com a gramatura, o mesmo não ocorreu para os papéis miolo nas gramaturas 120 e 140.

O módulo de elasticidade é um elemento fundamental no processo de dimensionamento, pois contém a principal relação que envolve os métodos de engenharia para um elemento estrutural qualquer. No caso específico dos materiais ortotrópicos, como é o caso do papelão ondulado, que além de possuírem diferentes propriedades nos três eixos ainda apresentam variações de espessura, densidade e micro ondulação na superfície. Desta forma, a obtenção desta propriedade característica do material pode apresentar diferenças que dependem do processo de obtenção do parâmetro e dos critérios que se adota para análise dos dados obtidos de cada processo.

TABELA 5.2. Resistência à tração e rigidez em flexão dos papéis capa e miolo.

Papel	Resistência à tração (kN.m ⁻¹)				Rigidez Taber (mNm)			
	DF		DT		DF		DT	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
C 125	11,51 a	6,4	4,21 a	4,8	1,59 a	9,3	0,60 a	10,2
C 140	11,90 ab	9,9	5,28 b	8,3	2,33 b	11,5	1,06 b	12,4
C 200	13,28 bc	12,3	6,48 c	4,5	5,68 c	8,3	2,23 c	7,3
M 120	6,48 i	2,6	2,54 i	5,4	1,36 i	8,6	0,52 i	11,8
M 140	5,98 ij	9,1	2,96 j	2,6	1,47 j	7,4	0,57 j	12,4
M 170	7,74 k	9,9	3,53 k	6,2	2,95 k	13,6	1,36 k	12,1

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal

Na Tabela B1 do Anexo II, pode-se observar os dados de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para os papéis capa e miolo nas direções de fabricação e transversal. Os valores dos módulos de elasticidade foram obtidos a partir dos dados de resistência à tração e equação 4.8.3.

A observação destes valores mostra claramente tratar-se dos mesmos materiais, tanto para capa como para miolo. Os valores de coeficiente de Poisson, para a direção de fabricação, foram obtidos a partir dos dados de porcentagem de alongamento na tração realizados na máquina universal de ensaios. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram o comportamento do material Kraft 125 para a direção de fabricação.

Da observação das Figuras 5.1 e 5.2 percebe-se que o comportamento do papel é linear com exceção do trecho de acomodação do material nas garras da máquina universal de tração semelhante ao que observaram SETH e PAGE (1983). URBANIK (1982) em seus experimentos obteve curvas com comportamento não linear, o que contrasta com as Figuras mostradas e que indica a necessidade de critérios de julgamento do comportamento do material adequado a cada caso.

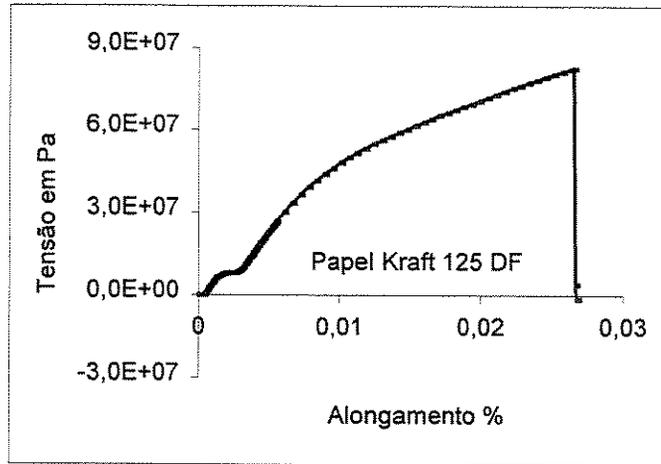


FIGURA 5.1 Curva da tensão pela deformação inteira tal como é obtida da máquina universal de ensaios sem o expurgo do trecho de acomodação da amostra nas garras do Instron. Papel Kraft 125 DF.

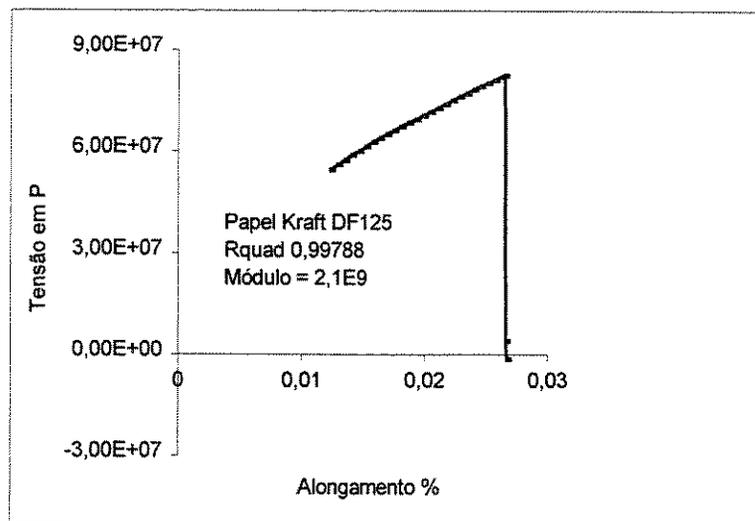


FIGURA 5.2 Curva da tensão pela deformação com o expurgo do trecho de acomodação da amostra nas garras do Instron. Papel Kraft 125 DF.

A curva obtida para o papel miolo mostrada na Figuras 5.3 apresenta um pouco mais de curvatura. Este comportamento não linear do miolo pode estar relacionado a não uniformidade de orientação das fibras uma vez que se trata de material reciclado e a adição de cargas

inorgânicas e ainda a presença do adesivo aplicado na colagem das capas (SETH e PAGE , 1983).

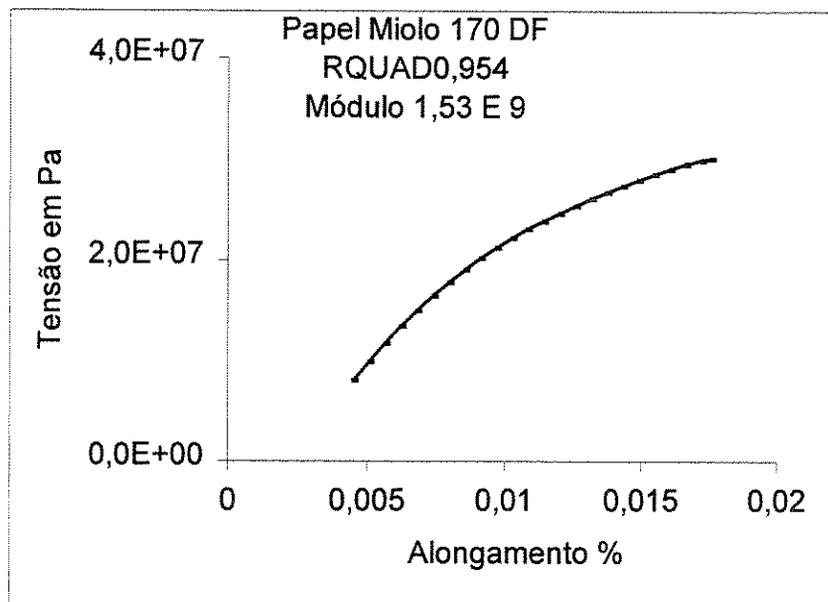


FIGURA 5.3 Curva da tensão pela deformação com o expurgo do trecho de acomodação da amostra nas garras do Instron. Papel Miolo 170 DF.

Os valores obtidos para os módulos de elasticidade por meio de flexão mostrados na Tabela B2 do Anexo II foram superiores para os papéis capa do que os obtidos por meio de ensaio de tração. Isto em parte pode ser explicado pela natureza planar que no caso dos papéis capa que sofrem uma espécie de batimento, no processo de fabricação, criando uma pequena crosta que oferece resistência ao processo de flexão.

Na Figura 5.4 estão mostrados os valores de módulo de elasticidade obtidos para os papéis miolo e capa pelos métodos de tração e flexão para as duas direções de fabricação. Pode-se observar que os valores de módulo de elasticidade obtidos por meio de ensaio de rigidez em flexão para os papéis capa e miolo são superiores aos verificados para os valores obtidos por meio de ensaio de tração.

Métodos não destrutivos como o de ultra-som foram empregados com boa precisão por BAUM et al. (1981) na obtenção das constantes elásticas do papelão ondulado e também dos papéis que compõe a estrutura isoladamente. Com isso, procurou evitar alguns dos problemas

decorrentes dos métodos convencionais. Pode-se observar, que diferente do que se observou para os papéis capa, os valores obtidos para os papéis miolo estão muito próximos nos valores relativos à direção de fabricação para as gramaturas de M120 e M170. A diferença entre os dois métodos de ensaio volta a ser acentuada para as três gramaturas de papel miolo quando se observa na figura o comportamento das colunas para a direção transversal.

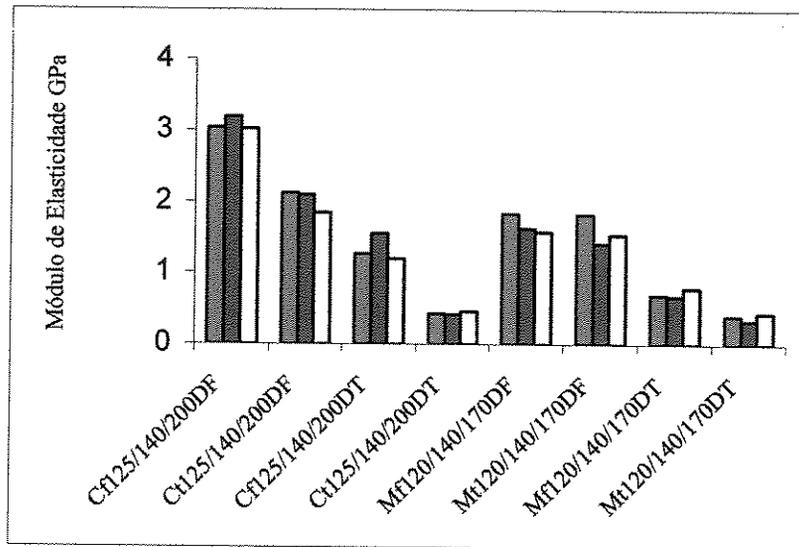


FIGURA 5.4. Módulo de elasticidade dos papéis capa (C) e miolo (M), obtidos por meio de ensaios de flexão (f) e por tração (t), nas direções de fabricação (DF) e transversal (DT).

No teste de esmagamento de ondas visto na Tabela 5.3, a carga de compressão é aplicada perpendicular ao plano da onda ondulada em aparelho Concora. A carga máxima obtida é usada para caracterizar a resistência ao esmagamento. A ruptura é definida como o colapso completo da lateral da onda (JOHNSON, et al., 1983).

Durante o processo de fabricação, a resistência do papel é afetada pela ação da onduladeira. Uma estimativa da resistência do papel ondulado, que considere a perda de resistência após o processo de ondulação é obtida através do teste de compressão de onda. A resistência do papelão ondulado aos esforços nesta direção estão relacionados à carga máxima no fundo da caixa e ao amortecimento. Os valores de resistência ao rasgo dos papéis, mostrados na

Tabela 5.3, denotam as diferenças de valores verificados para as direções transversal e longitudinal. Para os papéis, capa o comportamento observado é bem mais constante do que o verificado para os papéis miolo, principalmente nas gramaturas 140 e 170. Esse comportamento pode estar relacionado com o comprimento das fibras e a sua orientação, que no caso dos papéis miolo, e já reciclados torna esta orientação mais difusa reduzindo a diferença dos valores observados entre a direção de fabricação e transversal.

TABELA 5.3. Resistência ao rasgo e resistência ao esmagamento de ondas onduladas, em aparelho Concora.

Papel	Resistência ao Rasgo (mN)				Esmagamento (kN.m ⁻¹)			
	DF		DT		DF		DT	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
C 125	9,4 a	9,9	12,4 a	5,6	24,5 a	3,7	14,1 a	6,6
C 140	11,5 b	4,4	14,2 b	6,0	27,0 b	7,2	17,3 b	7,5
C 200	18,8 c	9,4	23,0 c	6,4	24,0 ac	7,1	20,3 c	6,7
M 120	7,7 i	18,9	14,2 i	10,8	23,6 i	5,2	13,0 i	6,5
M 140	7,1 ij	9,8	8,2 ij	6,5	22,3 ij	3,9	13,8 ij	8,2
M 170	9,0 k	8,2	11,1 k	12,1	27,2 k	5,2	18,2 k	6,5

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal

A resistência à compressão dos papéis capa e miolo pelos métodos de compressão do anel (RCT), *short span* (SCT) e compressão do papel ondulado em aparelho Concora (CCT) tem os resultados mostrados na Tabela B3 do Anexo II.

Os valores observados para compressão dos papéis capa mostram um crescimento linear em função da gramatura. A exceção verificada foi o comportamento do papel Miolo 140 apresentou valores de compressão inferiores ao Miolo 120 para os três tipos de teste realizados.

Os resultados do índice de compressão dos papéis mostram haver diferenças marcantes entre os três métodos utilizados. Para os papéis capa e miolo a diferença entre as direções de fabricação e transversal foi constante independente do método empregado. Não foram observadas

variações entre as diferentes gramaturas mostrando, a exemplo do que foi observado para os módulos de elasticidade, que se trata do mesmo material mostrado na Figura 5.5 e na Figura 5.6.

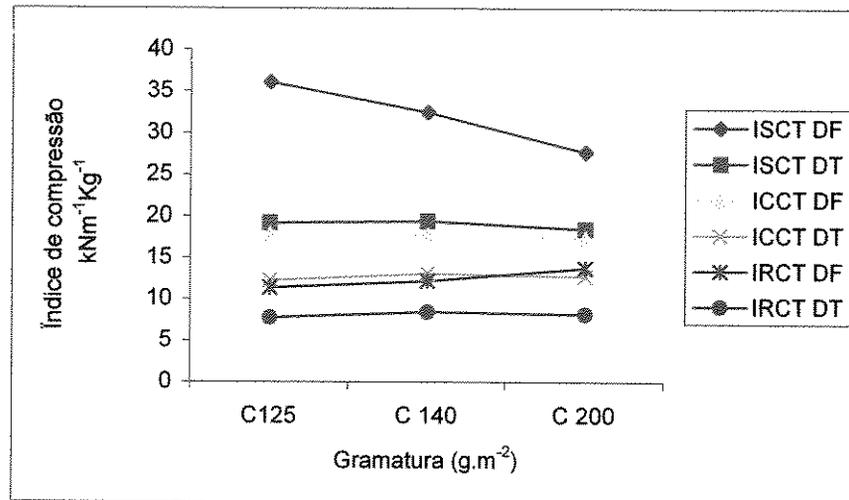


FIGURA 5.5. Índice de compressão dos papéis capa realizados pelos métodos de *short span* (ISCT), compressão do anel corrugado em aparelho Concora (ICCT) e compressão do anel (IRCT), em função da gramatura na direção de fabricação (DF) e transversal (DT).

A gramatura das estruturas de papelão ondulado, mostradas na Tabela 5.4, juntamente com os valores de espessura são os parâmetros mais utilizados pela indústria para qualificar as estruturas de papelão ondulado (MOURAD et al. 1999).

As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram os parâmetros geométricos referentes às estruturas de onda C e BC respectivamente, determinados experimentalmente. Os parâmetros são necessários para se obter os valores dos módulos equivalentes com o uso dos procedimentos propostos por (CARLSSON et al., 1985, e NORDSTRAND, 1994).

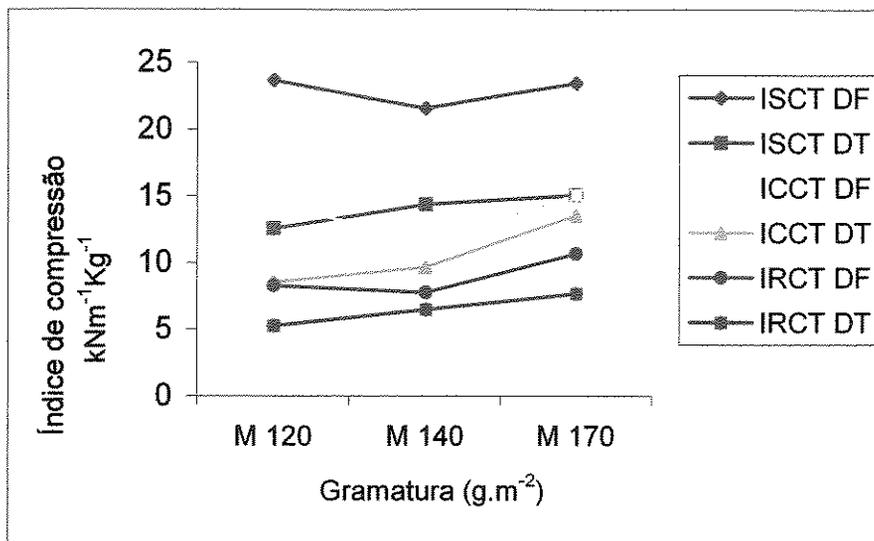


FIGURA 5.6. Índice de compressão dos papéis miolo determinados pelos métodos de *short span* (ISCT), compressão do papel corrugado em aparelho Concora (ICCT) e compressão de anel (IRCT), em função da gramatura na direção de fabricação (DF) e transversal (DT).

Os parâmetros geométricos obtidos estão muito próximos dos parâmetros geométricos encontrados na literatura (POMMIER e POUSTIS, 1989, POMMIER et al.,1991), para os tipos de estrutura examinados.

TABELA 5.4. Gramatura total (g.m⁻²) e estrutura do papelão ondulado.

Estruturas de papelão	Gramatura		Espessura (mm)	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
CK45	447,2 a	0,6	3,86 a	2,7
CK58	563,1 b	0,9	4,01 ab	0,6
BCK85	852,6 c	1,0	6,38 c	0,4
BCK120	1187,0 d	1,2	6,92 d	4,4

Para as estruturas de onda C foi verificado um aumento à resistência de compressão de coluna na direção transversal de 54 por cento em relação à estrutura CK45 de composição (K125/M120/K125) para a estrutura CK58 (K140/M140/K140). Para as estruturas de onda BC o

acréscimo verificado foi de 53%, da estrutura BCK85 (K140/M140/K140) para a estrutura de composição BCK120 (K200/M170/K200).

TABELA 5.5. Parâmetros geométricos das estruturas de onda C avaliadas experimentalmente.

Parâmetro	Estrutura	Estrutura
	CK45	CK58
Altura da onda C (mm)	3,47	3,49
Fator de Correção	1,41	1,41
Ângulo da onda α	57 ⁰	57 ⁰
Comprimento da onda p (mm)	8,28/2	8,33/2
Crista (cr) (mm)	0,00207	0,00210
Lateral (lt) (mm)	0,00380	0,00487
Comprimento do Arco S (mm)	0,00587	0,0069

Os dados de resistência à compressão de coluna das estruturas estão mostrados na Tabela B4 do Anexo II. As estruturas foram ensaiadas num aparelho do tipo barra de flexão, a 23⁰ C e 50% UR. Verifica-se um aumento significativo da resistência à compressão, à medida que as gramaturas dos componentes da estrutura aumentam de espessura tanto para as estruturas de ondas do tipo C como para as estruturas de ondas do tipo BC.

Na fórmula de MCKEE et al. (1963) para cálculo da resistência à compressão de embalagens, a resistência à compressão de coluna é um dos fatores mais importantes. A direção transversal, por apresentar maior resistência à compressão, é a que prevalece na quase totalidade das embalagens. Há situações, no entanto, que para aumentar a resistência total da embalagem e por facilidade na montagem, alguns fabricantes acrescentam uma aba com a estrutura na direção de fabricação.

TABELA5.6 Parâmetros geométricos das estruturas de onda BC avaliadas experimentalmente.

Parâmetro	Estrutura		Estrutura	
	BCK85		BCK120	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
Altura da onda				
C (mm)	3,50	1,54	3,48	1,87
Fator de Correção				
onda C	1,46		1,42	
Ângulo onda C α	59,7 ⁰		57 ⁰	
Crista (cr) (mm)	0,00196		0,00202	
Lateral (lt) (mm)	0,00378		0,00374	
Comprimento do				
Arco (mm)	0,00574		0,00576	
Comprimento onda C				
p (mm)	7,85 / 2	3,79	8,09 / 2	3,90
Altura onda B (mm)				
	2,22	5,50	2,45	4,58
Fator de Correção				
onda B	1,30		1,32	
Ângulo da onda B α	51,2 ⁰		52 ⁰	
Comprimento onda B				
p (m ⁻³)	6,25 / 2	1,54	6,50 / 2	3,14
Crista (cr) (mm)	0,00156		0,00162	
Lateral (lt) (mm)	0,00249		0,00267	
Comprimento do				
Arco (mm)	0,00405		0,00429	

A diferença de resistência de compressão de coluna em porcentagem entre as direções de fabricação e transversal para cada tipo de estrutura variou entre 130% e 240%, como pode ser observado na Figura 5.7. Estes valores mostram o efeito da geometria corrugada do miolo do papelão ondulado.

O acréscimo de resistência de compressão da coluna da direção transversal em relação à direção de fabricação pode chegar a 75%, segundo URBANIK (1996)a. Considera importante o conhecimento da resistência na direção de fabricação, uma vez que nos processos automáticos de enchimento de embalagens e o manuseio nas operações de carga e descarga estas sofrem solicitações que afetam o seu desempenho.

Na Figura 5.7 estão mostrados os valores estimados de compressão de coluna por fórmulas semi-empíricas extraídas de ARDITO et al. (1991) e BILLERUD HANDBOOK (19893) somente para a direção transversal e e estrutura de parede simples.

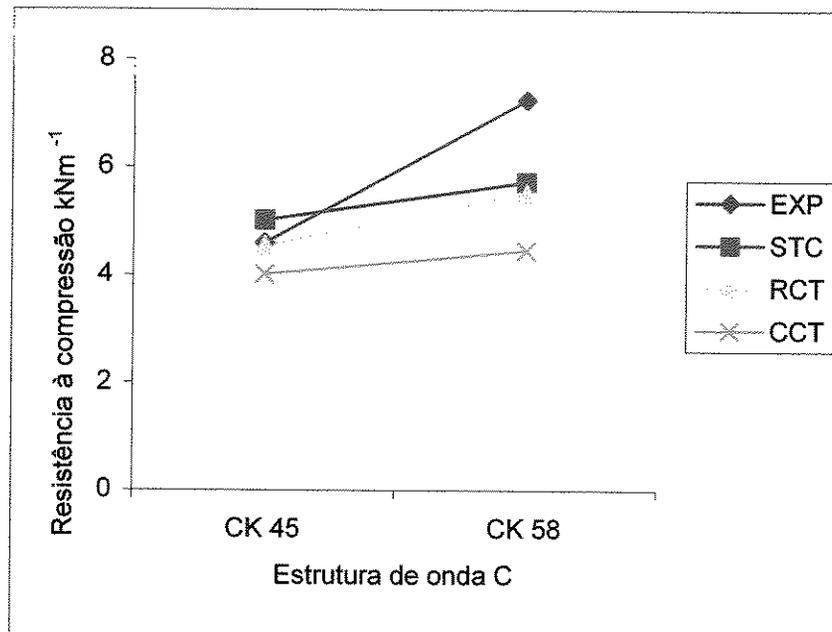


FIGURA 5.7 Resistência à compressão de coluna.

Os valores obtidos para onda C mostram que houve uma aproximação muito boa em relação aos dados experimentais, principalmente, os resultados obtidos com as equações 1 e 3, isto é, que utilizaram para cálculo de resistência a compressão dos componentes feitas no ensaio de compressão de anel e *short span*, respectivamente.

A predição dos valores de compressão de coluna das estruturas de papelão ondulado é possível através de equações que utilizam a resistência à compressão dos componentes.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos na determinação da rigidez em flexão das estruturas de papelão obtidas no ensaio de aparelho de 4 pontos. Os valores foram obtidos na direção de fabricação (DF) e na direção transversal (DT) a 23^o C e 50% UR.

TABELA 5.7. Rigidez em flexão das estruturas de papelão ondulado, medida em aparelho de quatro pontos (N.m).

Estruturas de papelão	DF		DT	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
CK45	6,16 a	7,99	3,42 a	2,81
CK58	7,81 ab	7,95	4,30 b	2,53
BCK85	20,50 c	6,24	12,79 c	2,73
BCK120	40,72 d	3,18	19,08 d	3,96

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal

Entre as estruturas de onda C não se verificou grandes variações nos valores de rigidez. No entanto, para as estruturas de onda BC a diferença nos valores de rigidez ficou próxima de 100 % na direção de fabricação e 50% na direção transversal. A variação nos valores de rigidez reflete a diferença de gramatura dos componentes.

A Tabela B5 do Anexo II apresenta os resultados obtidos na determinação da rigidez à flexão das estruturas de papelão obtidas no ensaio de aparelho de 2 pontos, os valores de rigidez foram calculados a partir dos dados de tensão e deslocamento (flecha). Os valores foram obtidos na direção de fabricação (DF) e na direção transversal (DT).

Os valores observados para rigidez em flexão, encontrados pelo método de dois pontos, mostraram certa coerência entre si, tanto na direção de fabricação como na direção transversal. Os módulos de elasticidade das placas a partir dos dados obtidos com o aparelho de dois pontos estão mais baixos que os obtidos com o ensaio de quatro pontos. Estes valores podem ser

atribuídos ao aspecto já mencionado das tensões de cisalhamento que ocorrem durante o carregamento. Outro fator que pode contribuir para estes resultados é a imprecisão na leitura do aparelho devido a sua rusticidade.

Os ensaios com o aparelho de dois pontos se justificam por se tratar de uma tecnologia de baixo custo e fácil operação e também porque não foram encontrados trabalhos na literatura em que estivessem presentes resultados obtidos com os dois métodos e utilizando o mesmo material.

Em contraste com o método de quatro pontos, a força aplicada no método de 2 pontos causa tensões de cisalhamento na placa. Estas tensões criam inicialmente seções no plano de corte da placa tornando-a deformada TIMOSHENKO e GOODIER (1951). Estes fenômenos que ocorrem com o método de 2 pontos podem explicar o principal motivo pelo qual o método não foi difundido, apesar da simplicidade e custo menores.

A possibilidade de se obter os valores de rigidez em flexão para uma estrutura como a do papelão ondulado, a partir dos módulos de elasticidade dos seus componentes é importante para possíveis avaliações de composições sem a necessidade de ensaiar uma estrutura já fabricada.

Utilizando a metodologia descrita por CARLSSON et al. (1985), a rigidez em flexão foi calculada com os dados de módulo de elasticidade obtidos pelos dois procedimentos de ensaio dos papéis. Módulos de elasticidade obtidos por flexão com o aparelho de rigidez Taber e por tração com os papéis ensaiados na máquina universal de ensaios. Os resultados estão mostrados na Tabela B6 do Anexo II, expressos em N.m.

Como pode ser observado nos valores da Tabela B6 do Anexo II existe uma variação expressiva entre os métodos pelos quais se obtém os módulos de elasticidade, seja por flexão ou por tração, que refletem diretamente nos valores de rigidez da estrutura como um todo.

Na Figura 5.8 os valores de rigidez em flexão calculados pelo procedimento proposto por CARLSSON et al. (1985) são mostrados ao lado dos valores obtidos experimentalmente para a direção de fabricação.

Os valores de rigidez em flexão obtidos experimentalmente pelo aparelho de quatro pontos foram sempre superiores aos valores calculados enquanto que os resultados obtidos pelo aparelho de dois pontos foram sempre inferiores aos obtidos por meio de cálculo. Assim, pode-se inferir que os procedimentos para estimar a rigidez carecem de uma revisão, possivelmente com a adição da rigidez atribuída à camada adesiva de forma a tornar os valores calculados mais próximos dos valores obtidos experimentalmente pelo aparelho de quatro pontos.

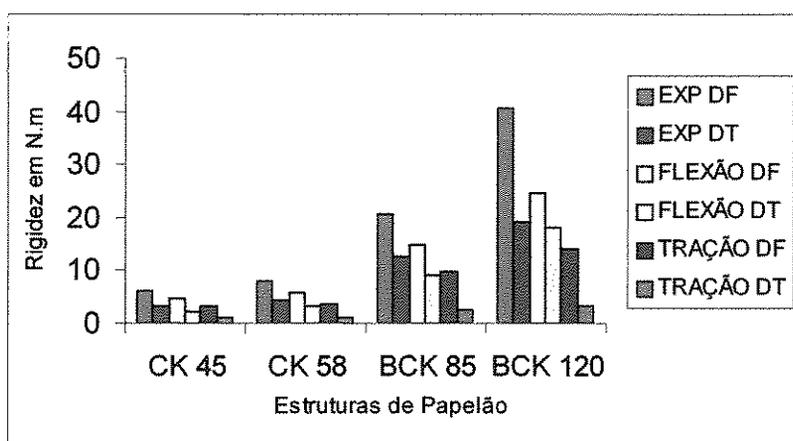


FIGURA 5.8 Valores de rigidez para as estruturas de papelão ondulado estimados pelo procedimento de CARLSSON (1985), a partir dos valores de módulo de elasticidade realizados pelos métodos de tração e flexão para as direções de fabricação (DF) e transversal (DT).

5.4 Dimensões das embalagens e as propriedades das placas

As embalagens, dos modelos 200 e 201 (Figura A3 do Anexo I), analisadas experimentalmente apresentaram as dimensões mostradas na Tabela 5.8. As dimensões internas e externas foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos por MOURAD et al. (1999). Como era esperado, foi verificada uma pequena diferença para mais apenas na altura externa das caixas em função da existência de abas no modelo 201.

As placas, que tem as mesmas dimensões das placas componentes das embalagens avaliadas nos ensaios experimentais, são enquadradas no grupo de placas finas de acordo com REDDY (1984), como mostram os resultados da Tabela 5.9. Num trabalho em que avaliaram a influência da altura das placas na sua resistência à compressão, JOHNSON et al. (1983) mostraram que a altura da coluna de papelão ondulado influi diretamente na resistência da estrutura em virtude do seu índice de esbeltez.

TABELA 5.8 Dimensões internas e externas das embalagens avaliadas experimentalmente.

Dimensões (mm)	Modelo 200				Modelo 201				
	Interna	C.V.		Interna	C.V.		Interna	C.V.	
		(%)	Externa		(%)	Externa		(%)	Externa
Comprimento	399,4	0,34	405,6	0,38	399,3	0,31	405,9	0,44	
Largura	209,8	0,86	215,0	0,49	209,6	0,51	215,8	0,52	
Altura	198,7	0,48	206,0	0,62	198,0	0,24	215,2	0,56	

Os valores obtidos indicam que essas estruturas comportam-se de acordo com a teoria de flambagem de EULER, isto é apresentam flambagem elástica (POMMIER et al., 1991 e RAHMAN, 1997).

TABELA 5.9 Estruturas de papelão ondulado classificadas como finas de acordo com REDDY (1984) e o índice de esbeltez proposto por JOHNSON et al. (1983).

Estruturas de papelão	t/a (finas < 0,05)*	Índice de esbeltez I
CK45	0,0179	193
CK58	0,0186	186
BCK85	0,0296	117
BCK120	0,0321	107

* A menor dimensão considerada para todos os tipos de estruturas foi $a = 0,215$ m.

As estruturas avaliadas nos ensaios de rigidez em flexão de quatro pontos apresentaram valores de relação menor dimensão e a espessura que mostram que as estruturas CK45 e CK58

são finas e as estruturas BCK 85 e BCK120 são consideradas moderadamente grossas de acordo com a classificação de REDDY (1984), como pode ser observado na Tabela 5.16. Por outro lado às estruturas avaliadas nos ensaios de rigidez em flexão de dois pontos todas as quatro estruturas foram consideradas como moderadamente grossas.

TABELA5.10 Estruturas de papelão ondulado utilizadas nos ensaios de rigidez de dois pontos placas (Pichler/IPT) e rigidez em flexão de quatro pontos classificadas como finas e moderadamente grossas de acordo com REDDY (1984).

Estruturas de papelão	PICHLER/IPT	RIGIDEZ DE
	QUATRO PONTOS	
	t/a (finas < 0,05)*	
CK45	0,06	0,04
CK58	0,07	0,03
BCK85	0,10	0,06
BCK120	0,11	0,07

* As menores dimensões das estruturas foram, a = 0,06m (PICHLER/IPT) e a = 0,10m (RIGIDEZ DE QUATRO PONTOS)

5.5 Desempenho das embalagens de papelão ondulado

Na Tabela 5.11 estão mostrados os valores de resistência à compressão das embalagens avaliadas experimentalmente. Os resultados mostram, como esperado, valores médios maiores para as embalagens modelo 201 em relação às embalagens do modelo 200. Muito provavelmente tanto os maiores valores de resistência à compressão, como menores valores do coeficiente de variação são decorrentes diretos do efeito das abas. Nas Figuras B1 e B2 do Anexo II estão mostradas as curvas de deformação dos modelos de embalagens 200 e 201 obtidos experimentalmente.

A resistência à compressão para os dois modelos de caixa calculados pela fórmula de MCKEE et al. (1963) foram muito próximos, diferindo apenas quando se observa a estimativa de resistência da embalagem calculada pela fórmula reduzida comparada com a fórmula completa.

A fórmula reduzida embora tenha apresentado resultados bem superiores aos verificados experimentalmente, com 13% a mais na estimativa da carga de compressão para o modelo 200 e 7,6% para o modelo 201, foi a que mais se aproximou dos valores experimentais. A fórmula completa com valores acima dos resultados experimentais e dos resultados da formulação reduzida mostra que pode não ser a mais apropriada para representar adequadamente a resistência à compressão de uma embalagem de papelão ondulado.

TABELA 5.11 Resistência à compressão das embalagens de papelão ondulado obtida nos ensaios e a estimativas de resistência obtida pelos métodos de MCKEE et al. (1963) da carga crítica (Pcr) N.

Método	Modelos de Embalagens	
	Mod 200 (CV)	Mod 201 (CV)
Experimental	1.571,0 *(10,9)	1.659,0* (5,4)
MCKEE et al. (1963)		
Completo	1.792,0	1.793,0
MCKEE et al. (1963)		
Reduzido	1.785,0	1.786,0

*Média obtida da avaliação de 10 amostras de cada modelo para a estrutura CK45.

Para PICHLER (1989) a fórmula semi-empírica desenvolvida por MCKEE et al. (1963) foi escrita a partir da avaliação da resistência à compressão de um número muito reduzido de embalagens e com apenas um único modelo a 201. Este mesmo autor argumenta que esta formulação que passou a ser utilizada indistintamente para o cálculo da carga de resistência à

compressão para todos os tipos de embalagens apresenta sérias limitações para ser aplicada como uma fórmula geral. Essas limitações são decorrentes do fato que o universo dos modelos das embalagens existentes no mercado é muito variado e repleto de configurações das mais diferentes formas.

Na Tabela 5.12 estão mostrados os valores das estimativas de carga de colapso da embalagem modelo 201 pelos métodos completo e reduzido de MCKEE et al. (1963) e também pela fórmula de LEKHNITSKII (1968) para todos os quatro tipos de estruturas analisadas.

TABELA 5.12 Estimativa da resistência à compressão da embalagem modelo 201 calculada com três diferentes fórmulas utilizadas na literatura para embalagens de papelão ondulado, com resultados da carga crítica (Pcr) N.

Estrutura de Papelão	Métodos de Estimativa da Carga de Colapso de Embalagem		
	MCKEE et al. (1963) Completo	MCKEE et al. (1963) Reduzido	LEKHNITSKII (1968)
CK 45	1792	1785	1719
CK 58	2671	2868	2166
BC 85	4332	4894	6233
BC 120	6774	7721	7143
Experimental			
(Somente para a estrutura CK45)		1.659,0* C.V.(5,4)	

*Média obtida da avaliação de 10 amostras do modelo 201 e estrutura CK 45.

Pode-se observar, na Tabela 5.12, que as fórmulas de MCKEE et al. (1963) para as estruturas de onda C apresentam valores bem acima dos obtidos com a fórmula de LEKHNITSKII (1968). Para as estruturas de onda BC as estimativas de carga de colapso verificadas para as fórmulas de MCKEE et al. (1963) foram, de forma geral, inferiores às observadas para a fórmula de LEKHNITSKII (1968).

Para POMMIER e POUSTIS (1989), ao simplificar a análise da carga crítica de flambagem, MCKEE et al. (1963) subestimou a rigidez em flexão na sua fórmula, não considerou a rigidez de cisalhamento e as torcionais e superestimou a resistência a compressão de coluna. Segundo estes mesmos autores, pouco indicada para estimar a resistência de estruturas de onda BC.

No cálculo da carga pela fórmula de LEKHNITSKII (1968) pode-se observar que no fator de flambagem, os módulos de elasticidade referente às torções e o cisalhamento são considerados e constituem uma parte significativa do valor final, influenciando decisivamente no valor final da carga.

5.5 Conclusões

Este capítulo teve a finalidade de expressar as características dimensionais e ponderais, e as propriedades mecânicas dos papéis e das estruturas de papelão ondulado e suas variações obtidas através dos seus respectivos ensaios de desempenho como tração, compressão e flexão e utilizados como matéria prima na confecção de embalagens para produtos hortícolas.

Foram analisados e discutidos algumas formas alternativas de obtenção da rigidez em flexão das estruturas a partir das propriedades mecânicas dos papéis constituintes por meio dos procedimentos de cálculo propostos por CARLSSON et al. (1985). A comparação dos resultados obtidos por este procedimento com os valores obtidos nos ensaios em aparelho de quatro pontos, universalmente considerado o mais adequado para expressar a rigidez em flexão das estruturas de papelão, mostrou a necessidade de se introduzir uma camada que represente o material adesivo utilizado no fabrico do papelão ondulado e que agrega um valor na rigidez total da estrutura, mas difícil de ser medido separadamente.

A carência de resultados na literatura que utilizem os valores da rigidez em flexão das estruturas a partir das propriedades dos seus elementos constituintes pode ser um indicativo da dificuldade de se obter resultados considerados aceitáveis. Em que pese a grande importância que este tipo de informação tem para se reduzir o número de ensaios e investimentos em aparelhos

para se obter uma estimativa confiável da rigidez da estrutura sem a necessidade da sua fabricação, a exemplo do que já ocorre com as equações que estimam a resistência a compressão de coluna com considerável nível de precisão.

Ficou constatada a dificuldade de se estimar a resistência à compressão de uma embalagem pela fórmula descrita por MCKEE et al. (1963). O Procedimento mais completo para estimar a resistência à compressão, que leva em consideração as condições de contorno e os módulos de rigidez em flexão e torcionais é o descrito por LEKHNITSKII (1968) o qual será adotado como parâmetro para o ajuste dos modelos de elementos finitos no Capítulo 7.

Os valores obtidos nos ensaios de desempenho dos materiais expressam as propriedades mecânicas dos papéis e das estruturas como um todo e constituem a principal fonte de entrada no programa de análise estrutural Ansys e serão utilizados nos Capítulos 6 e 7 com o objetivo de se construir os modelos matemáticos das estruturas de papelão ondulado pelo método dos elementos finitos.

Capítulo 6

Modelagem do Papelão Ondulado pelo Método dos Elementos Finitos

6.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar a forma como são construídos os modelos das estruturas de papelão ondulado com base na teoria apresentada no Capítulo 3 e as metodologias do Capítulo 4, para tornar mais claro ao leitor como se dá à aplicação daqueles conceitos na modelagem pelo método dos elementos finitos com a utilização do programa de elementos finitos Ansys.

Embora não se constituam numa abordagem totalmente inédita, no que tange a cada forma de modelagem em si, este capítulo procura estabelecer um processo de discussão comparativa entre as formas de modelagem. Outro aspecto diz respeito ao conjunto dos resultados necessários para dar entrada no programa de elementos finitos Ansys, parte obtidos diretamente dos ensaios laboratoriais e parte obtido a partir das metodologias apresentadas no Capítulo 4.

6.2 Modelagem por elementos finitos com programa ANSYS

O programa de elementos finitos Ansys é uma ferramenta universal para solução de problemas de engenharia que para tanto possui uma biblioteca com uma gama grande de opções de elementos que podem ser utilizadas para a modelagem de estruturas como o papelão ondulado.

O primeiro passo para a modelagem se dá pela construção do modelo, que nada mais é do que a representação virtual da estrutura. Esta representação é feita através de um modelo chamado domínio de estudo, que por sua vez é composto por um conjunto de pequenas porções chamadas elementos.

Chama-se de elemento finito no interior do domínio de estudo Ω um sub-domínio Ω_e cujas dimensões são muito pequenas face às dimensões de Ω , no entanto de dimensões finitas. Um elemento é caracterizado por seu número de nós e o grau de aproximação da função procurada em seu domínio.

O princípio do método dos elementos finitos consiste em definir uma partição do domínio (decomposição em sub-domínios, denominados elementos finitos, sem recobrimentos nem interseções), que é denominada discretização.

Modelar uma estrutura, isto é, o domínio que a representa é caracterizar este domínio por uma malha de nós comuns aos elementos adjacentes.

6.3 As três formas para a modelagem pelo método dos elementos finitos

Na modelagem do papelão ondulado pelo método de elementos finitos pode-se representar a estrutura real de diversas formas de acordo com os objetivos que se deseja atingir na análise e de acordo com as informações disponíveis para construção do modelo. As formas para a modelagem pelo método dos elementos finitos com base na teoria exposta no Capítulo 3 são as que estão a seguir:

M_E - Modelo estrutural

M_S - Modelo Sanduíche

M_I - Modelo Idealizado

As reproduções das estruturas do papelão onduladas são realizadas a partir das caracterizações da geometria obtidas experimentalmente. Para cada forma de se modelar a estrutura são utilizados os parâmetros necessários à sua implementação. A forma mais simples de modelo, o modelo idealizado M_I (Figura 3.2 - C), utiliza apenas a espessura total da estrutura, seguida do modelo em forma de sanduíche M_S (Figura 3.2 - B), que requer a espessura de cada camada separadamente e onde se utiliza os outros parâmetros da geometria da onda para calcular o momento de inércia do corrugado e calcular os módulos de elasticidade equivalentes. A forma mais complexa de se modelar o papelão ondulado, modelo estrutural (M_E), utiliza todos os dados para reproduzir a geometria da onda na forma muito próxima de como esta se apresenta na realidade considerando as opções observadas na Figura 6.1.

Após a construção do modelo, o principal requisito do programa para viabilizar a sua análise estrutural pelo programa de elementos finitos Ansys são as entradas das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios experimentais (Capítulo 5).

Como para cada propriedade mecânica do papel e da estrutura do papelão ondulado existe mais de uma forma de se verificar o seu desempenho ou mesmo de se estimar a propriedade a partir da avaliação dos elementos que os compõem no caso das estruturas as propriedades mecânicas adotadas como padrão para cada tipo de modelo foram dos ensaios considerados como universalmente mais utilizados e de preferência normalizados.

Nos casos onde as propriedades mecânicas necessárias à implementação do modelo não foram obtidas experimentalmente utilizou-se as equações disponíveis na literatura para estimar o seu valor.

6.4 Modelagem com miolo estrutural (ME)

A Figura 6.1 mostra três formas de representação da onda do papelão ondulado. Seguramente as ondas de forma trapezoidal e reta - senoidal são as que mais se aproximam da geometria verdadeira,(LIBOVE e RUBKA, 1951; NORDSTRAND, 1994).

A modelagem com o miolo corrugado na forma estrutural permite uma série de simulações de geometrias para a forma do miolo, as quais podem permitir análises, desde a prospecção de novos materiais, como por exemplo, as micro-ondas e camadas de adesivo, até análise de desgaste da ondulateira para se estimar as perdas de resistência e planejar alguma forma de compensar esta perda com a adição de mais material adesivo.

Em virtude da proximidade muito grande entre as duas formas de representação do papelão, na forma trapezoidal ou senoidal optou-se por implementar a estrutura apenas na forma trapezoidal Figura 6.1 (a).

6.5 Modelo de papelão com miolo estrutural e onda com forma trapezoidal (M_{ET}).

Desde que se disponha das informações a respeito da geometria da onda, e das propriedades mecânicas dos elementos constituintes do papelão que podem ser complementados com auxílio de relações empíricas pode-se implementar a estrutura de forma completa e realizar as análises mecânicas de interesse.

Nesta forma de modelar, a estrutura do papelão ondulado é representada na sua conformação estrutural completa, onde o papelão ondulado é reproduzido por um modelo que se aproxima da sua geometria tal como ele é fabricado.

(M_{ET}) – Modelo de papelão com miolo estrutural e onda com forma trapezoidal.

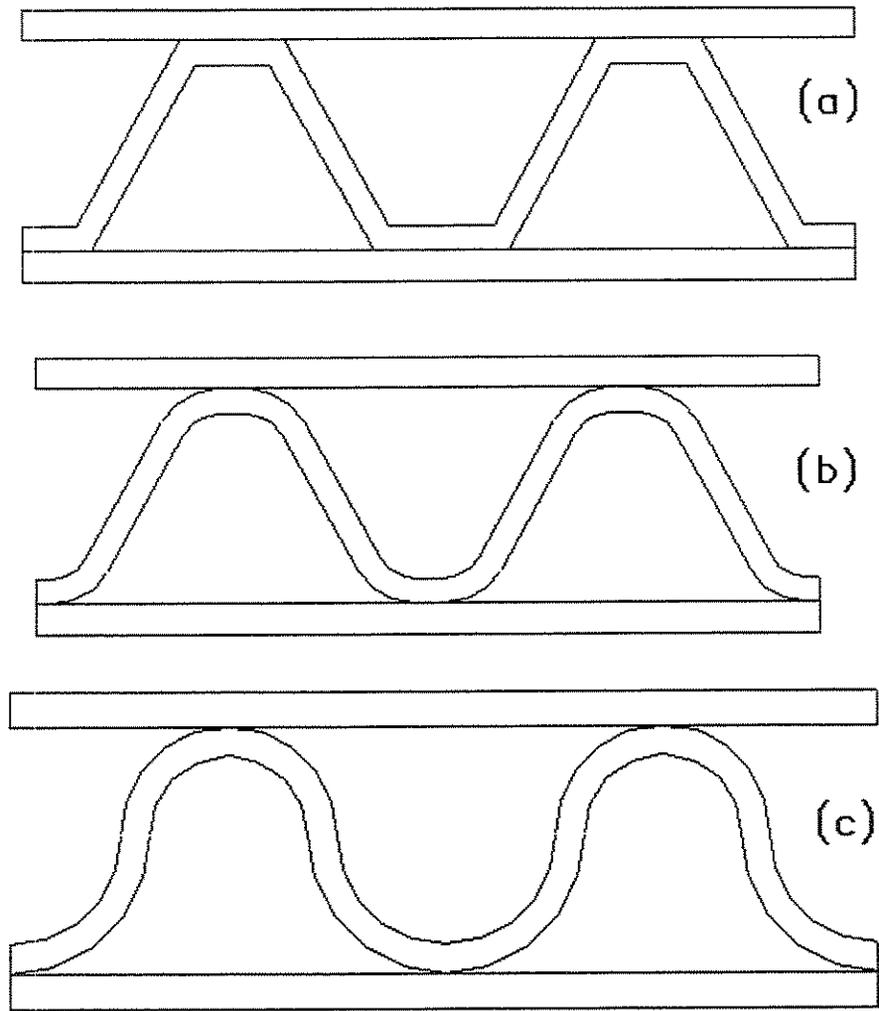


FIGURA 6.1 Geometrias para das ondas do miolo :(a) trapezoidal; (b) reta - senoidal e (c) cilíndrica.

O modelo (M_E), apresentado na Figura C1 do Anexo III aproxima a geometria do miolo por uma forma trapezoidal, como o descrito por URBANIK (1981) e POMMIER e POUSTIS (1989). Esta forma de modelagem por elementos finitos tem muitas vantagens por que além de ser uma boa aproximação facilita bastante o processo de construção do modelo.

Após a seleção do elemento, o programa de elementos finitos requer que sejam introduzidas as suas propriedades mecânicas, agrupados nas Tabelas 6.1 e 6.2 para as estruturas de onda C, CK45 e CK58, a partir dos valores experimentais obtidos na máquina universal de ensaios apresentados na Tabela 5.3.

TABELA 6.1 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma estrutural (M_{ET}) da estrutura CK45.

Propriedades	Estrutura de onda C (CK45)		
	Capas	Miolo	Adesivo
E_x (GPa)	2,12	1,83	30,4
E_y (GPa)	0,43	0,70	12,7
E_z (GPa)	0,43	0,70	12,7
G_{xy} (GPa)	0,37	0,95	0,369
G_{xz} (GPa)	0,003	0,95	0,369
G_{yz} (GPa)	0,003	0,95	0,369
ν_{xy}	0,14	0,12	0,01
$\nu_{xz}^{(1)}$	0,55	0,56	0,14
$\nu_{yz}^{(1)}$	0,14	0,12	0,01

⁽¹⁾ Os valores pequenos para o coeficiente de Poisson foram assumidos segundo NORDSTRAND (1997).

Os módulos de elasticidade nas direções principais E_x e E_y , correspondentes às direções de fabricação e transversal respectivamente, foram obtidos nos ensaios de tração realizados na máquina universal de ensaios. Entre as formas de avaliação de desempenho do papel, disponíveis neste trabalho, a opção pelos resultados obtidos nos ensaios de tração se deu porque esta forma de obtenção dos módulos de elasticidade é considerada como a que melhor representa as constantes elásticas do papel (CARLSSON e FELLERS,1983; CARLSSON et al., 1985) e de forma geral pondo as mesmas considerações de (ALGAR , 1965).

O módulo E_z , na direção normal ao plano xy , como não pode ser obtido experimentalmente é adotado o mesmo valor obtido para E_y .

Os módulos de cisalhamento e torção são obtidos por estimativas a partir das equações. Estes módulos, como são encontrados por estimativas indiretas das relações de NORDSTRAND et al. (1994). Os módulos da camada adesiva, também obtidos por estimativas, como um valor

em relação aos módulos obtidos para as capas, segundo RAHMAN e ABUBAKR (1998) com relação de 14,3 para a direção de fabricação e 6 vezes para a direção transversal em relação a valor da direção de fabricação. A diferença entre as direções de fabricação adotada para o material cola deve-se à facilidade de se fixar um valor para x e variar em y que foi adotado para z.

TABELA 6.2 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma estrutural (ME_T) da estrutura CK58.

Propriedades	Estrutura de onda C (CK58)		
	Capas	Miolo	Adesivo
E_x (GPa)	2,10	1,41	30,4
E_y (GPa)	0,42	0,34	12,7
E_z (GPa)	0,42	0,34	12,7
G_{xy} (Gpa)	0,35	0,85	0,369
G_{xz} (GPa)	0,003	0,85	0,369
G_{yz} (Gpa)	0,003	0,85	0,369
ν_{xy}	0,14	0,11	0,01
$\nu_{xz}^{(1)}$	0,45	0,48	0,14
$\nu_{yz}^{(1)}$	0,14	0,11	0,01

⁽¹⁾ Os valores pequenos para o coeficiente de Poison foram assumidos segundo NORDSTRAND (1997).

G_{xy} - Obtido pela equação de BAUM et al. (1981) (4.21.2).

G_{xz} - Obtido pela equação (4.22.1), de NORDSTRAND et al. (1994).

G_{yz} - Obtido pela equação de (4.22.2) NORDSTRAND et al. (1994).

ν_{xy} - Obtido nos ensaios de tração realizados na máquina universal de ensaios.

v_{xz} - Obtido pela equação (4.21.1) de ortotrópica de BAUM et al. (1981).

v_{yz} - Adotado valor igual ao obtido pela relação de ortotrópica de BAUM et al. (1981)

6.6 Modelo de placa ortotrópica homogênea sanduíche de ondas C (MS_C) e BC (MS_{BC})

A forma da modelagem, intermediária do papelão ondulado, por elementos finitos é modelo de placa ortotrópica homogênea sanduíche, ou de múltiplas camadas.

Esta forma de modelo possui além das camadas ortotrópicas homogêneas das capas, uma camada ortotrópica homogênea equivalente que representa a estrutura do corrugado do miolo (Figura C2 do Anexo III), seja pelas propriedades mecânicas do material em si, seja pela geometria ondulada que confere ao miolo uma resistência maior devido à sua geometria. No detalhe da Figura C2 fica bem evidente a espessuras das capas e o miolo que formam o compósito tipo sanduíche.

(MS_C) - Modelo de placa ortotrópica homogênea sanduíche de onda C.

(MS_{BC}) - Modelo de placa ortotrópica homogênea sanduíche de onda BC.

Na Figura C3 do Anexo III é mostrado o modelo de elementos finitos da placa ortotrópica em forma de sanduíche com cinco camadas de onda tipo BC. Os módulos de elasticidade para as camadas não onduladas, nas direções principais E_x e E_y , correspondentes às direções de fabricação e transversal, respectivamente, ou seja, as capas e o miolo não corrugado no caso de camada interna plana como nas ondas BC, do mesmo modo que na forma de modelo estrutural, foram obtidos nos ensaios de tração realizados na máquina universal de ensaios estão mostrados nas Tabelas 6.3 a 6.5. Os valores de módulo de cisalhamento e torcionais foram determinados por meio das relações propostas por (NORDSTRAND et al., 1994).

Não foi encontrado nenhum trabalho que tenha realizado modelagem com estruturas de cinco camadas pelo método dos elementos finitos, porém no mesmo trabalho em que (CARLSSON et

al., 1985) descreve os procedimentos para o cálculo do módulo de elasticidade do miolo corrugado, eles fazem uma advertência a respeito da possível assimetria das placas com cinco camadas o que não se verifica neste caso uma vez que as capas são constituídas do mesmo material e espessura e o mesmo ocorre com as camadas internas constituídas de um miolo plano e duas camadas de miolo corrugado de mesmo material e espessura.

TABELA 6.3 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma sanduíche (M_{ST}) das estruturas CK45 e CK58.

Propriedades	Estrutura de onda C (CK45)		Estrutura de onda C (CK58)	
	Capas	Miolo	Capas	Miolo
E_x (GPa)	2,1	0,001	2,1	0,001
E_y (GPa)	0,43	0,089	0,42	0,072
E_z (GPa)	0,43	0,089	0,42	0,072
G_{xy} (GPa)	0,37	0,57	0,36	0,41
G_{xz} (GPa)	0,003	0,0006	0,003	0,0005
G_{yz} (GPa)	0,003	0,022	0,003	0,019
ν_{xy}	0,14	0,14	0,09	0,09
$\nu_{xz}^{(1)}$	0,55	0,55	0,45	0,45
$\nu_{yz}^{(1)}$	0,14	0,14	0,09	0,09

⁽¹⁾ Os valores pequenos para o coeficiente de Poisson foram assumidos segundo NORDSTRAND et al. (1994).

$E_{k(DT)}$ = módulo de elasticidade da camada k na direção transversal (4.19.9)

G_{xy} - Obtido pela equação de BAUM et al. (1981) (4.19.9).

G_{xz} - Obtido pela equação (4.22.1), de NORDSTRAND et al. (1994).

G_{yz} - Obtido pela equação de (4.22.2) NORDSTRAND et al. (1994).

ν_{xy} - Obtido nos ensaios de tração realizados na máquina universal de ensaios.

ν_{xz} - Obtido pela equação (4.21.1) de ortotrópica de BAUM et al. (1981).

ν_{yz} - Adotado valor igual ao obtido pela relação de ortotrópica de BAUM et al. (1981)

Na forma de modelo sanduíche, onde se considera cada camada do papelão de forma particular, foi necessário obter a rigidez do miolo para o cálculo do módulo de elasticidade, de modo a considerar a sua ondulação. Para este cálculo foi utilizado o procedimento proposto por CARLSSON et al. (1985), para o miolo.

TABELA 6.4 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma sanduíche (M_S) da estrutura BCK85.

Propriedades	Estrutura de onda BC (BCK85)			
	Capa e contra Capa	Miolo Sanduíche (onda B)	Miolo Plano	Miolo Sanduíche (onda C)
E_x (GPa)	2,1	0,001	1,41	0,001
E_y (GPa)	0,42	0,053	0,34	0,049
E_z (GPa)	0,42	0,053	0,34	0,049
G_{xy} (GPa)	3,63	0,035	2,67	0,035
G_{xz} (GPa)	0,005	0,0004	0,005	0,0003
G_{yz} (GPa)	0,005	0,015	0,005	0,025
ν_{xy}	0,09	0,11	0,11	0,11
$\nu_{xz}^{(1)}$	0,45	0,48	0,48	0,48
$\nu_{yz}^{(1)}$	0,09	0,11	0,11	0,11

⁽¹⁾ Os valores pequenos para o coeficiente de Poisson foram assumidos segundo NORDSTRAND et al. (1994).

Da mesma forma o módulo na direção normal ao plano xy (E_z) como não pode ser obtido experimentalmente é adotado o mesmo valor obtido para E_y .

TABELA 6.5 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma sanduíche (M_s) da estrutura BCK120.

Propriedades	Estrutura de onda BC (BCK120)			
	Capa e contra Capa	Miolo Sanduíche (onda B)	Miolo Plano	Miolo Sanduíche (onda C)
E_x (GPa)	1,84	0,001	1,53	0,001
E_y (GPa)	0,46	0,072	0,44	0,078
E_z (GPa)	0,46	0,072	0,44	0,078
G_{xy} (GPa)	0,35	0,41	0,32	0,41
G_{xz} (GPa)	0,005	0,0005	0,005	0,005
G_{yz} (GPa)	0,005	0,024	0,005	0,040
ν_{xy}	0,13	0,18	0,18	0,18
$\nu_{xz}^{(1)}$	0,51	0,63	0,63	0,63
$\nu_{yz}^{(1)}$	0,13	0,18	0,18	0,18

⁽¹⁾ Os valores pequenos para o coeficiente de Poisson foram assumidos segundo NORDSTRAND et al. (1994).

Para obter o módulo de elasticidade do miolo corrugado $E_{k(DT)}$ módulo de elasticidade da camada k na direção transversal são utilizadas as equações de CARLSSON et al (1985) que utiliza a rigidez em flexão obtida para a camada a partir da equação (4.19.8).

Os módulos de cisalhamento e torção são obtidos por estimativas a partir das equações de BAUM (1981) e NORDSTRAND et al. (1994).

6.7 Modelo idealizado de placa ortotrópica homogênea de única camada ondas C (MI_C) e BC (MI_{BC}).

A forma de modelagem pelo método de elementos finitos mais simples e a estrutura de papelão é representada por uma placa de uma única camada que contém todas as propriedades mecânicas da estrutura do papelão ondulado. Os ensaios que fornecem as informações necessárias para que se possa utilizar este tipo de modelagem são os ensaios de rigidez em flexão das estruturas de papelão de 2 e 4 pontos. Os valores das propriedades mecânicas estão mostrados nas Tabelas 6.6 e 6.7.

(MI_C) – Modelo idealizado de placa ortotrópica homogênea de única camada onda C;

(MI_{BC}) – Modelo idealizado de placa ortotrópica homogênea de única camada onda BC.
Figura C4 do Anexo III.

TABELA 6.6. Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma idealizada (MI_{IT}) das estruturas CK45 e CK58.

Propriedades	Estrutura de onda C (CK45)	Estrutura de onda C (CK58)
E _x (GPa)	1,285	1,444
E _y (GPa)	0,713	0,796
E _z (GPa)	0,713	0,796
G _{xy} (GPa)	1,34	2,05
G _{xz} (GPa)	1,62	1,69
G _{yz} (GPa)	1,62	1,69
ν _{xy}	0,13	0,13
ν _{xz} ⁽¹⁾	0,48	0,51
ν _{yz} ⁽¹⁾	0,13	0,13

⁽¹⁾ Os valores pequenos para o coeficiente de Poisson foram assumidos segundo NORDSTRAND et al. (1994)

Os módulos de elasticidade nas direções principais E_x e E_y , correspondentes às direções de fabricação e transversal respectivamente, foram obtidos nos ensaios de rigidez em flexão realizados em aparelho de quatro pontos e universalmente considerado como o que melhor representa as constantes elásticas das estruturas de papelão ondulado CARLSSON e FELLERS (1983), LUO et al. (1992); MOURAD et al. (1999) e GILCHRIST et al. (1999) e utilizando as equações 3.2.2. a 3.2.5 estão apresentados na Tabela a do Anexo III. O módulo na direção normal ao plano xy como não pode ser obtido experimentalmente é adotado o mesmo valor obtido para E_y .

Os módulos de cisalhamento e torção são obtidos por estimativas a partir das equações. Estes módulos como são encontrados por estimativas indiretas são utilizados como os principais pontos para se promover o ajuste dos modelos.

TABELA 6.7 Valores das propriedades mecânicas para entrada no programa de elementos finitos para implementação do modelo de papelão ondulado na forma idealizada (M_{IT}) das estruturas BCK85 e BCK120

Propriedades	Estrutura de onda BC (BCK85)	Estrutura de onda BC (BCK120)
E_x (GPa)	0,945	1,472
E_y (GPa)	0,590	0,689
E_z (GPa)	0,590	0,689
G_{xy} (GPa)	4,74	8,01
G_{xz} (GPa)	4,74	9,86
G_{yz} (GPa)	5,73	9,86
ν_{xy}	0,09	0,13
$\nu_{xz}^{(1)}$	0,45	0,51
$\nu_{yz}^{(1)}$	0,09	0,13

⁽¹⁾ Os valores pequenos para o coeficiente de Poisson foram assumidos segundo NORDSTRAND et al. (1994).

Os módulos de cisalhamento e torção são obtidos por estimativas a partir das equações. Estes módulos, como são encontrados por estimativas indiretas são utilizados juntamente com os módulos da camada adesiva também obtidos por estimativas, como os principais pontos para se promover o ajuste dos modelos.

G_{xy} - Obtido pela equação de BAUM et al. (1981) (4.21.2).

G_{xz} - Obtido pela equação 4.22.1, de NORDSTRAND et al. (1994).

G_{yz} - Obtido pela equação 4.22.2 NORDSTRAND et al. (1994).

v_{xy} - Obtido nos ensaios de tração realizados na máquina universal de ensaios.

v_{xz} - Obtido pela equação (4.21.1) de ortotropia de BAUM et al. (1981).

v_{yz} - Adotado valor igual ao obtido pela relação de ortotropia de BAUM et al. (1981)

6.8 As vantagens e restrições identificadas para a modelagem das estruturas de papelão ondulado analisadas e as condições de contorno das embalagens

As estruturas de papelão ondulado foram analisadas com o objetivo de se verificar o comportamento, adequação, facilidade de obtenção das propriedades, implementação das condições de contorno com vistas a recolher informações para os seguintes parâmetros de comparação:

- Grau de facilidade de modelagem (tempo gasto na construção do modelo).
- Grau de dificuldade na obtenção das informações necessárias a implementação de cada tipo de modelagem (propriedades mecânicas).
- Qualidade e volume de informações de serem obtidas com cada tipo de modelo.

A Tabela 6.8 apresenta a síntese do trabalho quanto aos requisitos necessários à implementação dos modelos no que se refere ao tempo despendido no processo de modelagem, volume de informações necessárias, tempo de processamento e resultados esperados.

Como pode ser observado na Tabela 6.8, a modelagem na forma de miolo estrutural (M_E) apresenta grande quantidade de informações necessárias para sua implementação, bem como tempo de modelagem e processamento altos. No entanto, é a única que pode fornecer informações relativas a geometria da onda e da camada adesiva de forma conclusiva.

A forma de modelagem em camadas tipo sanduíche (M_S), como é uma forma intermediária de modelagem, apresenta como maior vantagem à possibilidade de se poder trabalhar com estruturas complexas como as estruturas de onda BC, que têm 5 camadas e com embalagens com aberturas, e ainda oferecer algumas informações sobre o desempenho de cada camada de forma independente.

Para as estruturas modeladas na forma camada única idealizada (M_I) apresentaram como maior vantagem à rapidez na coleta das informações necessárias à sua implementação, rapidez no processo de modelagem e facilidade na modelagem de estruturas vazadas.

Quanto às condições de contorno das embalagens os trabalhos desenvolvidos por MCKEE et al. (1963), URBANIK (1981), POMMIER et al. (1991), POMMIER e POUSTIS (1989) e HÖKE e GÖTTSHIG (1985) são bastante conclusivos ao considerar as embalagens como estruturas simplesmente suportadas. Não havendo distinção na forma como é estimada a sua resistência à carga de compressão, se por meio do cálculo das placas que a compõe isoladamente ou por meio do modelo das embalagens na sua representação completa.

6.9 Recomendações e conclusões

A modelagem do papelão ondulado pelo método dos elementos finitos para ter os seus objetivos alcançados requer uma série de pré-requisitos que devem ser observados pelo projetista antes de se lançar à tarefa de modelagem propriamente dita.

TABELA 6.8 Quadro comparativo das vantagens e restrições para cada uma das formas de modelagem realizadas pelo método dos elementos finitos (M_E , M_S e M_I).

Parâmetros para comparação entre as formas de modelagem	Formas de modelagem		
	(M_E)	(M_S)	(M_I)
Volume de informações necessárias para implementação	Alto	Moderado	Pouco
Tempo gasto na modelagem	Alto	Pouco	Pouco
Tempo gasto no ajuste e processamento	Alto	Pouco	Pouco
Informações possíveis de ser obtidas com a análise em relação à geometria das ondas	Alto	Pouco	----
Informações possíveis de ser obtidas com a análise em relação a cada camada	Alto	Moderado	----
Dificuldade para análise de estruturas vazadas	Alta	Pouca	Pouca

Entender bem os procedimentos de ensaio dos materiais que constituem as estruturas. Esta fase de estudo é útil para a compreensão de algumas das razões que fazem diferentes métodos de avaliação de desempenho utilizados para medir uma mesma “constante elástica” apresentarem resultados tão diferentes. Conhecer os métodos, adquirir noção das grandezas envolvidas em cada procedimento são elementos básicos para se desenvolver um critério de julgamento para seleção do procedimento mais adequado.

Outro ponto que deve ser observado com rigor diz respeito aos parâmetros geométricos das estruturas de papelão ondulado. Além disso, pode ser apontada a dificuldade de realizar as medições de todas as faces da onda, definir seus limites e ângulo de inclinação, considerando-se que se trata de um material maleável que apresenta variações e com dimensão reduzida. Saber utilizar com critério os ensaios já existentes e padronizados por normas, que permitam estimar com segurança os limites superiores, por exemplo, da espessura total da estrutura e a partir desse valor calcular os demais parâmetros.

Para análise pelo método dos elementos finitos das estruturas apresentadas foram detalhadas as três formas de estudo possíveis para sua implementação.

A modelagem do papelão ondulado pelo método dos elementos finitos a ser realizada no Capítulo 7 deverá conter passo a passo às etapas necessárias da modelagem das estruturas avaliadas nos ensaios experimentais até o modelo da embalagem completa e finalmente a uma embalagem para produtos hortícolas cuja principal característica são as aberturas destinadas a permitir a ventilação adequada à conservação do produto.

Nas diferentes etapas de modelagem deverão estar presentes as formas de modelo ME, MS e MI, utilizadas para reproduzir o desempenho das estruturas de papelão ondulado dos ensaios realizados experimentalmente.

Neste capítulo ficou evidente que a escolha da forma para modelar o papelão ondulado deve levar em consideração muitas variáveis e aonde a decisão por uma ou outra forma, se por

um lado depende dos dados disponíveis para alimentação do programa de elementos finitos na outra ponta está o conjunto das informações esperadas pela análise dos modelos.

Capítulo 7

Verificação dos modelos de Papelão Ondulado pelo Método dos Elementos Finitos

7.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados do comportamento dos modelos de elementos finitos comparados com os resultados dos ensaios realizados em laboratório com as estruturas de papelão ondulado ou com os resultados dos cálculos obtidos com as equações analíticas apresentadas Capítulo 5.

O processo de ajuste dos modelos, como de resto em toda as etapas para atingir com maior precisão possível as metas de ajuste, é recorrente. A verificação é feita, nos casos em que ocorrem de diferenças muito grandes, em todos os passos dados até o resultado final. No entanto, quando se define com maior segurança que as etapas anteriores estão atendidas de forma satisfatória o ajuste final é realizado por meio dos parâmetros cujos valores foram estimados por equações disponíveis na literatura, uma vez que tem um bom grau de influência nos valores finais do comportamento da estrutura. Neste capítulo serão mostrados dois exemplos de como se dá este ajuste.

7.2 Rigidez de quatro pontos

A modelagem pelo método dos elementos finitos de estruturas avaliadas no ensaio de rigidez em flexão de quatro pontos é um procedimento muito comum nos trabalhos de papelão ondulado. Em que pese algumas diferenças nos procedimentos dos ensaios em função das características específicas de alguns aparelhos, este método é considerado o mais adequado para o ensaio das estruturas e dele obter as constantes elásticas através das relações de tensão/deslocamento, Figuras C5 e C6 do Anexo III.

Na modelagem da placa utilizada no ensaio de rigidez de papelão com o aparelho de ensaio de quatro pontos as dimensões da placa descritas na Seção 3.9, onde foram implementados os modelos nas formas (MI_C) e (MI_{BC}). As restrições de carregamento e de contorno e procuram reproduzir as condições ocorridas durante o ensaio. O modelo da placa foi submetido a carregamento de momentos torcionais nas extremidades e os deslocamentos restringidos a 600 mm das extremidades nas direções D_X, D_Y e D_Z. Os resultados de flecha máxima obtida pela deformação dos modelos das estruturas de onda C e onda BC numa simulação do ensaio de rigidez em flexão de quatro pontos estão mostrados na Tabela 7.1.

TABELA 7.1. Valores de flecha das estruturas ensaiadas em aparelho de 4 pontos e o modelo de elementos finitos idealizado de camada única (MI).

Tipo Estrutura de Papelão	Experimental DF (mm) (CV)	Elementos Finitos DF (mm)
CK45	1,55 (7,98)	1,52
CK58	1,63 (7,95)	1,63
BCK85	0,99 (6,2)	0,97
BCK120	0,51 (3,1)	0,49

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal.

Esta análise teve como objetivo validar o recurso do método de elementos finitos para placas modeladas (MI_C). A forma de reprodução das estruturas de papelão ondulado para o ensaio de rigidez em quatro pontos foi o chamado modelo idealizado de única camada (MI).

Os modelos de elementos finitos feitos na forma homogênea idealizada (M_I) oferecem poucas possibilidades para o seu ajuste. Basicamente a espessura da placas, as propriedades mecânicas das estruturas obtidas nos ensaios de rigidez em flexão e as condições de contorno.

De forma geral, os valores de flecha máxima obtidos para os modelos em relação aos resultados experimentais apresentaram pouca diferença. Os melhores ajustes foram verificados para os valores de flecha das estruturas de onda C e proporcionalmente as maiores diferenças observadas para as estruturas de onda BC. Deve-se considerar, no entanto, a existência de variação dos resultados experimentais, fazendo com que as eventuais diferenças possam ser desconsideradas.

Outro fato que pode ser considerado é que as estruturas de onda BC por apresentarem maior espessura e complexidade pode ter contribuído para estes resultados. Nos modelos de elementos finitos para estruturas idealizadas para as ondas tipo C, de menor espessura e complexidade, a relação tensão deformação é menos afetada pelo efeito dos módulos de torção obtidas pelas relações de BAUM et al. (1981) e NORDSTRAND et al. (1994), que nesta situação particular de deformação por torção pode ter contribuído para os resultados.

Com a finalidade de avaliar a sensibilidade dos modelos às variações dos módulos de cisalhamento transversal foram gerados modelos com sete condições diferentes onde foi alterada apenas a variável de interesse mantendo-se o restante inalterado.

Na Tabela 7.2 pode ser observado que o módulo de cisalhamento G_{xz} (condições 2 a 4), mostrou-se bem menos sensível em relação ao módulo G_{yz} (condições de 5 a 7) quando o modelo foi alterado para uma mesma série de valores.

TABELA 7.2. Verificação da variação da flecha máxima em função da variação dos módulos de cisalhamento transversal (G_{xz} e G_{yz}) do modelo FEM idealizado de camada única (MI) da estrutura CK45 e a comparação com o dado experimental.

Condição	G_{xz} (Gpa)	G_{yz} (Gpa)	Flecha (mm)
1	0,3	0,3	1,518
2	0,01	0,3	1,520
3	0,001	0,3	1,522
4	0,0001	0,3	1,523
5	0,3	0,01	1,520
6	0,3	0,001	1,524
7	0,3	0,0001	1,540
8	Experimental		1,550

A importância na identificação dos parâmetros de entrada que apresentam maior sensibilidade permite o ajuste dos modelos cujos módulos de cisalhamento transversal são estimados por relações, que embora tenham origem numa teoria bastante complexa, faz com que possam ser utilizadas como uma primeira aproximação para se dar à entrada com essas variáveis no programa, ainda que apresentem alguns pontos obscuros para sua aplicação nos modelos de elementos finitos (MCKINLAY e BOX, 1993); LUO et al., 1995; NORDSTRAND et al., 1994; NORDSTRAND, 1995).

7.3 Modelos de elementos finitos das placas Testeira e Lateral que formam as embalagens de papelão avaliadas no ensaio de compressão.

A carga crítica de flambagem, como foi definido nos itens 2.6, 4.23, 4.26 e 4.26.2, representa uma estimativa da resistência da embalagem. Com isso, as placas que compõe a embalagem, testeira e lateral, foram modeladas nas três formas de modelagem apresentadas, ou seja, M_{ET} - Modelo estrutural, M_S - Modelo Sanduíche, M_I - Modelo Idealizado.

As placas de papelão ondulado analisadas na forma de modelos de elementos finitos do programa Ansys foram denominadas com os mesmos códigos das estruturas de papelão ondulado analisadas experimentalmente. Todas analisadas para condição de contorno simplesmente suportadas.

A partir do que foi proposto por POMMIER e POUTIS (1989), detalhado no item 4.24 e calculado pelo procedimento de LEKHNITSKII (1968) em 5.5, e se forem conhecidas as cargas críticas de flambagem das placas que compõem as embalagens, pode-se determinar a resistência total da embalagem.

7.3.1 Placas modelo M_{ET} (Modelo Estrutural Trapezoidal)

Os modelos de placa, lateral e testeira, com miolo estrutural (M_{ET}) necessitaram um número grande de nós em razão da característica da modelagem que reproduz a estrutura do papelão ondulado de forma completa Figura C7 do Anexo III. A placa testeira necessitou de 17500 nós enquanto que o modelo da placa lateral o número de nós foi de 34294.

Na Tabela 7.3 estão mostrados os resultados referentes às cargas críticas de flambagem dos modelos de placas testeira e lateral com miolo estrutural (M_{ET}). Os valores de carga crítica foram obtidos para os modelos com a camada adesiva e sem a camada adesiva.

Os modelos das placas testeira e lateral com miolo estrutural (M_{ET}), apresentaram nos resultados para as cargas críticas de flambagem valores muito discrepantes quando avaliados nas formas com a camada adesiva e sem esta camada.

A placa testeira apresentou valores de carga crítica de flambagem bastante baixos para os modelos implementados mesmo com a camada adesiva. Isto também se deu com a placa lateral sem a camada adesiva, onde foi possível obter um bom ajuste apenas para a placa lateral com a camada adesiva.

TABELA 7.3 Carga crítica de flambagem N_{cr} $KN.m^{-1}$ obtida para os modelos de elementos finitos (ME_T), das placas testeira e lateral de elementos finitos (ME_T), com e sem adesivo.

Método	Placa ₁ Testeira 215x215 (mm)	Placa ₂ Lateral 215x405 (mm)
Modelo Elementos Finitos (Sem Adesivo)	1770	770
Modelo Elementos Finitos (Com Adesivo)	2794	1315
LEKHNITSKII (1968) Analítico	4003	1380

7.3.2 Modelos de elementos finitos das placas Testeira e Lateral (MS_C) e (MI_C).

A característica do elemento de múltiplas camadas permite a modelagem de estruturas de placas na forma de sanduíche, como as estruturas de papelão ondulado. Desta maneira, cada camada pode ser considerada como homogênea e ortotrópica, uma vez que o corrugado do

papelão ondulado pode ser transformado numa camada intermediária com as mesmas características mecânicas do miolo, já que possui propriedades mecânicas equivalentes.

Para a modelagem da placa tipo sanduíche o módulo de elasticidade do miolo foi aproximado com o procedimento proposto por CARLSSON et al. (1985). Os módulos de cisalhamento efetivos do miolo G_{xz} e G_{yz} foram estimados a partir das formulações de BAUM et al. (1981) e NORDSTRAND et al. (1994). Como o miolo pode ser considerado simétrico à contribuição da rigidez à torção no plano de cisalhamento ela pode ser desconsiderada, segundo (LIBOVE e HUBKA, 1951). Desta forma, os valores residuais do módulo de cisalhamento podem se associado a variável G_{xy} , para satisfazer os requerimentos de entrada do programa.

Os modelos de placas analisadas denominadas de testeira e lateral, consistem de 341 e 661 nós (6 graus de liberdade por nó) com 100 e 200 elementos cada uma respectivamente.

Os modelos de placa do tipo sanduíche foram executados com os mesmos números de nós e condições de contorno do que as placas modelos idealizadas.

Na Tabela 7.4 estão mostrados os valores de carga crítica de flambagem para diferentes valores referentes aos módulos de cisalhamento transversal (G_{xz} e G_{yz}). Os valores mostram maior sensibilidade a exemplo do que ocorreu com os modelos de rigidez em flexão de quatro pontos onde os modelos mostraram-se mais sensíveis às variações dos módulos de cisalhamento G_{xz} .

Os resultados da carga de compressão para as placas da embalagem estudada são apresentados na Tabela 7.5. A diferença verificada entre os valores de compressão obtidos experimentalmente e pelo método de elementos finitos placa modelo sanduíche foi muito pequena, menos de 1 % em relação ao valor obtido pela equação formulada por LEKHNITSKII (1968) e utilizada POMMIER e POUSTIS (1989) para estimar carga compressão das placas de uma embalagem.

7.3.3 Modelos de elementos finitos das placas Testeira e Lateral com aberturas para produtos hortícolas (MSC).

Os modelos das placas testeira e lateral foram analisados com diversos níveis de abertura. Os níveis de aberturas avaliados foram avaliados de acordo com a Tabela 7.7 para a placa lateral. As aberturas foram seleccionadas segundo os parâmetros sugeridos por LANGBRIDGE (1982) e MOURAD et al. (1999).

TABELA 7.4. Verificação da variação da carga crítica de flambagem em função da variação dos módulos de cisalhamento transversal (G_{xz} e G_{yz}) do modelo de elementos finitos (MS) da estrutura CK45 e a comparação com o dado experimental.

Condição	G_{xz} (GPa)	G_{yz} (GPa)	Carga Crítica de Flambagem (N)
1	2,27	0,35	1380
2	1,0	0,35	1386
3	0,01	0,35	1387
4	0,35	2,27	1388
5	0,35	1,0	1375
6	0,35	0,01	1344
7	0,35	0,001	1062
8	LEKHNITSKII (1968)		1380

Em razão das aberturas as placas tornaram-se áreas irregulares. Por esse motivo, a geração de malha escolhida foi com elementos triangulares de seis nós. O controle do nível de refinamento escolhido através do comando Smart foi três, igual para todos os modelos.

TABELA 7.5. Carga crítica de flambagem N_{cr} kN.m^{-1} das placas da embalagem obtida pelos métodos dos elementos finitos e analítico.

Método	Placa ₁ Testeira 215x215 (mm)	Placa ₂ Lateral 215x405 (mm)
Numérico FEM (M _{Sc})	2,91	1,35
Numérico FEM (M _{Ic})	5,55	1,58
LEKHNITSKII (1968) (Analítico)	4,00	1,38

A abertura da placa da testeira, Figura C8 do Anexo III tem dupla função, a de permitir ventilação, mas também serve para o manuseio na carga e descarga, opção muito recorrente nos diversos tipos de embalagens comerciais para produtos hortícolas. Com isso, a abertura da placa testeira foi mantida constante e os diferentes níveis de aberturas foram avaliados somente para a placa lateral que é também quem determina a resistência final da embalagem ensaiada já que tem dimensões bem maiores que a testeira.

Os autores avaliaram embalagens para tomate, pimentão, banana, mamão e morango. Optou-se por avaliar geometrias de aberturas apenas oblongas por que permitem embalar um número maior de produtos em razão de que produtos com forma esférica podem sofrer mais

injúrias mecânicas com as aberturas cilíndricas. Na Figura C9 do Anexo III esta mostrada um modelo de placa lateral com duas aberturas e na Figura C10 do Anexo III esta mostrado o modelo com três aberturas.

As dimensões das aberturas das placas estão limitadas ao tamanho e a geometria do produto a ser embalado. Com isso, para um determinado nível de ventilação pretendido é necessário o aumento no número de aberturas uma vez que existe limitações no tamanho das aberturas.

Os resultados de carga crítica de flambagem obtida para as placas com duas e três aberturas em três porcentagens diferentes estão mostrados na Tabela 7.6. Pelos resultados da carga crítica sem abertura e com as aberturas obteve-se uma estimativa da perda de resistência da embalagem em porcentagem. Os resultados mostram que a perda de resistência, para porcentagens de abertura de aproximadamente quatro por cento, podem reduzir em onze por cento a resistência da embalagem. A perda de resistência pode chegar próximo de vinte por cento para embalagens com níveis de aberturas próximas de dez por cento.

As informações obtidas da literatura que dão conta de perdas de resistência ao redor de cinco por cento para igual porcentagem de abertura precisam ser mais bem investigados. Os dados da literatura obtidos de MITCHELL (1992) e FRASER (1991) não informam se, por exemplo, as embalagens possuíam qualquer tipo de reforço como quinas dobradas ou cantoneiras uma vez que a existência desses acessórios alteram completamente a influência das aberturas das placas laterais da embalagem na resistência total da embalagem uma vez que o reforço absorveria a maior parcela da carga.

7.8 Estimativa da carga de compressão da embalagem modelo 201 através dos modelos de elementos finitos da placa Lateral nas formas de modelagem (MS) e (MI).

Os resultados da carga estimativa de compressão para a embalagem estudada estão mostrados na Tabela 7.7. A diferença verificada entre os valores de compressão obtidos experimentalmente e pelo método de elementos finitos placa modelo sanduíche foi muito pequena, e menor que 1 %.

TABELA 7.6 Carga crítica de flambagem Ncr N das placas da embalagem obtida pelo métodos dos elementos finitos para placas com duas e três aberturas.

Número de aberturas	Porcentagem de Abertura (%)	Carga Crítica de Flambagem (N)	Perda de Resistência em porcentagem (%)
Sem abertura	0	1896	0
Duas aberturas (P ₂ aMS ₁)	3,71	1676	11,0
Duas Aberturas (P ₂ aMS ₂)	5,14	1621	14,5
Duas aberturas (P ₂ aMS ₃)	6,58	1574	17
Três aberturas (P ₃ aMS ₁)	5,56	1640	13,5
Três aberturas (P ₃ aMS ₂)	7,72	1558	18,0
Três aberturas (P ₃ aMS ₃)	9,87	1546	18,5

O valor obtido pela equação formulada por LEKHNITSKII (1968) e utilizada para estimar carga de compressão de uma embalagem por POMMIER e POUSTIS (1989), para placas ortotrópicas simplesmente suportadas foi superior ao valor experimental em 3,5 %. Os valores obtidos pela fórmula semi-empírica de MCKEE et al. (1963) foi superior em 7,5 % . O resultado mais afastado do dado experimental foi o do modelo de placa tipo membrana 15%.

TABELA 7.7. Estimativa da resistência à compressão da embalagem de papelão ondulado modelo 201 a partir das estimativas de resistência das placas laterais N.

Método de obtenção da carga de Compressão	Carga de Compressão do modelo 201 (N)
Experimental	1658
Numérico FEM Sanduíche (MS)	1657
Numérico FEM (MI)	1724
MCKEE et al. (1963)	1792
LEKHNITSKII (1968)	1719

A proximidade do valor obtido pelo modelo de placa sanduíche em relação ao dado experimental mostra ser esta forma de modelagem apropriado para representar o conjunto estrutural que forma o papelão ondulado.

Na Tabela 7.8 estão mostrados os valores dos modelos de placa MS referentes as quatro estruturas analisadas experimentalmente com os referidos valores de carga crítica de flambagem obtidos pela fórmula de LEKHNTSKII (1968).

Os resultados mostram que com os modelos de elementos finitos na forma sanduíche podem ajustar-se bem tanto para as estruturas de onda C como para as estruturas de onda BC.

7.9 Modelos de elementos finitos de embalagem 201 obtidos nas formas (MS) e (MI).

Os modelos de embalagens completas obtidas pelo método dos elementos finitos nas formas MS e MI foram analisados para a embalagem modelo 201 e comparados com a teoria de

LEKHNITSKII (1968), mostrado nas Figuras C11 e C12 do Anexo III. Os resultados mostrados na Tabela 7.9 mostram que, desde que se disponha dos dados necessários à sua implementação é indiferente a forma de modelagem das embalagens quanto ao nível de aproximação com a teoria.

TABELA 7.8 Carga crítica de flambagem $Ncr Nm^{-1}$ da placa lateral modelada na forma de sanduíche comparada com a teoria de LEKHNITSKII (1968).

Estrutura de Papelaão	Modelo de Elementos Finitos (MS)	LEKHNITSKII (1968)
CK 45	1336	1386
CK 58	1457	1746
BC 85	5075	5026
BC 120	5697	5760

Uma embalagem com 5,14% de abertura lateral, tal como a que está mostrada na Figura 7.8, cujo estudo de perda de carga em placas com aberturas foi mostrado no item 7.3.3 foi analisada para uma estrutura CK 45 modelo (MS). Na análise com as placas separadamente os resultados mostraram que para se preservar o mesmo nível de resistência da embalagem avaliada experimentalmente com a estrutura de onda C CK45 seria necessário empregar uma estrutura equivalente a de uma estrutura BCK120.

Nesta avaliação o resultado obtido para o modelo de embalagem com duas aberturas laterais, como mostram as Figuras C13 e C14 do Anexo III, teve uma redução de 6,2% na resistência à carga de flambagem. Este resultado esta mais próximo do que a literatura considera para este nível de abertura, como as observações de MITCHELL (1992) e FRASER (1991).

TABELA 7.9.Carga crítica de flambagem P_{cr} (N) dos modelos de embalagens modeladas na forma de sanduíche e ortotrópica homogênea comparada com a teoria de LEKHNITSKII (1968).

Estrutura de Papeloão	Modelo de Elementos		LEKHNITSKII (1968)
	Finitos (MI)	Finitos (MS)	
CK 45	1724	1822	1719
CK 58	2398	1895	2166
BC 85	6048	6185	6233
BC 120	7047	7322	7143

Capítulo 8

Conclusões

* Na literatura existem três formas de se realizar a modelagem do papelão. As formas são: modelo com miolo estrutural (M_{ET}); modelo na forma de camadas tipo sanduíche (M_S); e o modelo homogêneo idealizado com uma única camada (M_I).

* A partir das avaliações das estruturas de papelão ondulado e dos seus componentes em laboratório são obtidos os parâmetros e as propriedades que os caracterizam como materiais mecânicos.

* A modelagem do papelão ondulado na forma de miolo estrutural (M_{ET}) necessita de um número significativamente maior de nós em relação às outras duas formas de modelagem, que são o modelo homogêneo idealizado (M_I) e o modelo na forma de sanduíche (M_S).

* A forma de modelagem com miolo estrutural (M_{ET}) é a maneira mais completa e eficaz de se modelar o papelão ondulado, porém a mais dispendiosa em tempo de modelagem, desde a coleta de dados necessários à sua implementação até o tempo de processamento necessário.

* A forma de modelagem da estrutura de papelão ondulado com sanduíche (M_S) constitui uma forma intermediária de modelagem, no que se refere ao processo de entrada de dados necessários à sua implementação e apresenta tempo de modelagem e processamento muito menor com pequena perda na precisão.

* A forma de modelagem tipo sanduíche (M_S) permite, com pouco acréscimo de tempo de modelagem e de processamento, a composição de estruturas com cinco camadas, como as estruturas de onda BC.

* Os modelos idealizados (M_I) são os mais simples de serem implementados porque os dados necessários são de rápida obtenção e em menor quantidade, quando comparado aos modelos com miolo estrutural (M_{ET}) e a estrutura na forma de sanduíche (M_S).

* As formas de modelagem tipo sanduíche (M_S) e idealizada (M_I), devido a sua estrutura monolítica, permitem a modelagem de estruturas vazadas com facilidade.

* Há um ajuste para todos os quatro tipos de estruturas no que se refere aos valores de flecha máxima dos modelos de elementos finitos na forma idealizada (M_I) e os dos ensaios de rigidez em flexão de quatro pontos.

* A avaliações da sensibilidade dos modelos de elementos finitos à variação dos módulos de cisalhamento transversal G_{xz} e G_{yz} mostram que na simulação do ensaio de rigidez em quatro pontos os modelos apresentam maior sensibilidade às variações do módulo G_{xz} .

* O modelo de placa na forma de sanduíche (M_S), quando se varia os módulos de cisalhamento transversal para estimar a carga crítica de flambagem, mostra maior sensibilidade às alterações do módulo G_{xz} .

* Na estimativa da resistência à compressão das embalagens, os resultados obtidos com os modelos de elementos finitos na forma (M_I) ficaram muito próximo dos valores obtidos com a equação de LEKHNITSKII (1968) e os resultados obtidos com o modelo de elementos finitos na forma (M_S), apresentaram diferenças muito pequenas em relação ao valor experimental.

* A redução da carga crítica de flambagem da placa lateral da embalagem observada nos modelos na forma de sanduíche (M_S), quando se introduziu vários níveis de aberturas do tipo

oblongo, variou em onze por cento para menos na resistência da placa com o nível de abertura de três por cento até uma redução na resistência de dezoito e meio por cento para um nível de abertura de quase dez por cento.

* Na avaliação da carga crítica de flambagem da placa lateral do modelo na forma de sanduíche (M_S) para as estruturas de papelão avaliadas, mostram um bom grau de aproximação quando comparadas com os resultados obtidos pela fórmula de LEKHNITSKII (1968).

* Os modelos da embalagem completa, modelada na forma de sanduíche (M_S) e na forma idealizada (M_I), para as estruturas de papelão avaliadas CK45, CK58, BC85 e BC120 quando comparados aos resultados de LEKHNITSKII (1968) mostram bom grau de ajuste para as duas formas de modelo de elementos finitos.

* O modelo de uma embalagem de elementos finitos na forma de sanduíche (M_S) com 5,14 % de abertura, apresenta redução de 6,2 % na carga crítica de flambagem.

Sugestões para pesquisas futuras

Os próximos trabalhos devem ter como objetivo analisar a resistência das embalagens considerando as diferentes formas de reforços encontradas nas embalagens comerciais que são colocados com o objetivo de aumentar a resistência mecânica.

As formas mais comuns de reforços são as dobras que utilizam os mesmos materiais das embalagens e também muito utilizada como reforço estão as diversas formas de cantoneiras.

A existência desses componentes estruturais altera completamente o comportamento das embalagens e permite que sejam adicionadas considerável acréscimo de carga e áreas de aberturas destinadas a ventilação dos produtos hortícolas.

Referências Bibliográficas

Abrahão, Roberto Funes. *Desenvolvimento de elementos finitos quadriláteros subparamétricos para análise de placas*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Estadual de Campinas., 1997, 195 p. Tese (Doutorado).

Algar, W. H., Effect of structure on the mechanical properties of paper: consolidation of the web. *Cambridge Symp.*, pp. 814-847, Sep. 1965.

Allem, H. G. *Analysis and design of structural sandwich panels*. 1ed., Hungria, Pergamon Press, 1969, 283p.

ANSYS. *Users Manual*, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, 1989.

Ardito, E. F., Garcia, A. E., Hashiba, L. H. Correlação entre a resistência à compressão de coluna do papelão ondulado e a de seus componentes. *Coltânea do ITAL*, Campinas, v.4 n.5, pp. 5-7, 1992.

Ardito, Elizabeth de Fátima. *Estudo do desempenho de papelão ondulado virgem e reciclado exposto a diferentes condições de umidade relativa*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 107 p. Tese (Doutorado).

Ardito, E. F., Garcia, A. E., Hashiba, L. H. Correlação entre a resistência à compressão de coluna do papelão ondulado e a de seus componentes. *Coletânea do ITAL*, Campinas, v.21, n.2, pp.264-271, 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Determinação da resistência o esmagamento do anel de papel* – MB 0:01.7-014. São Paulo: ABNT, 1980. 5p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Condicionamento de produtos de papelão ondulado*. NBR 6733. São Paulo: ABNT, 1980. 3p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Papelão ondulado determinação da espessura*. NBR 6738. São Paulo: ABNT, 1981a. 6p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *Papelão ondulado – determinação da resistência à compressão de coluna*. NBR 6737. São Paulo: ABNT, 1981b. 4p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Embalagem de papelão ondulado – determinação da resistência à compressão*. NBR 6739. São Paulo: ABNT, 1981c. 5p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Papelão ondulado e caixas de papelão ondulado - terminologia*. NBR 5985. São Paulo: ABNT, 1983. 12p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Papel e cartão – Determinação da espessura da folha e cálculo da massa específica aparente do cartão*. NBR 9160. São Paulo: ABNT, 1985. 2p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Papel e cartão – Determinação da massa por unidade de área – (Gramatura)*. NBR 5981. São Paulo: (ABNT), 1992. 2p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT). *Papel, cartão e celulose – atmosfera normalizada para condicionamento e ensaio – procedimento de controle da atmosfera e condicionamento das amostras*. NBR 6740. São Paulo: (ABNT), 1994. 8p.

Associação Brasileira de Papelão Ondulado – (ABPO). São Paulo. 2005. Disponível em <<http://www.abpo.org.Br>> Acesso em: 28 de março de 2005.

Baird, C. D., Gaffney, J. J. An numerical procedure for calculating heat transfer in bulk loads and fruits or vegetables. *ASHRAE Transactions*, 82, n.2, pp.525.1976.

Baird C. D., Gaffney, J. J., Talbot, M. T. Design criteria for efficient and cost effective forced-air cooling systems and fruits or vegetables. *ASHRAE Transactions*, v. 94, pp.1434-1453. 1988.

Baum, G. A., Habeger, C. C. On-line measurement of paper mechanical properties. *Tappi*, v.63, n. 7, pp. 63-66, 1980.

Baum, G. A., Brennan, D. C., Habeger, C. C. Orthotropic elastic constants of paper. *Tappi*, v.64, n. 8, pp. 97-101, 1981.

Billerud Handbook. *Testing of corrugated board and its components*. Scandinavian Pulp, Paper and Board. SCAN-P 46:83, 1983, 3p.

Bordin, M. R., Garcia, A. E. Fatores de correção para projeto de caixa de papelão ondulado. *Informativo CETEA, ITAL, Campinas*, v.4, n4, pp. 6-8, 1992.

Carlsson, L., Fellers, C., Jonsson, P. The bending stiffness of corrugated board under special consideration of asymmetrical and multi-ply construction (em alemão). *Das Pappier*. v.4, pp.149-156, 1985.

Castro, Larissa Rodrigues. *Influência de aspectos da classificação, embalagens e refrigeração na conservação pós-colheita do tomate de mesa*. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 153p. (Dissertação de Mestrado).

Chang, M. Y., Sereia, V. J. *Tipificação e caracterização dos produtores rurais do estado do Paraná – 1980*. Londrina: Iapar, 1993. 172p.

Chitarra, M. I. F., Chitarra, A. B. *Pós-colheita de Frutos e Hortaliças: Fisiologia e Manuseio*. Lavras: ESAL/FAEPE. 1990. 320p.

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. *Concepts and applications of finite element analysis*, John Wiley & Sons. 1989. 630p.

Costa Neto, P.L.O. *Estatística*. São Paulo: Edgard Blücher, 1977, 264p.

FAO – ONU, Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion (FAO). *Prevenición de pérdidas de alimentos poscosecha: frutas, hortaliças, raíces y tubérculos*.(Colección FAO: Capacitación, n.17/2), Roma, 1993, 183p.

Fellers, C., *Edgewise compressive strength of paper*. 1.ed Marcel Dekker,1983, v.1, Cap. 8, : *Handbook of physical and mechanical testing testing and paperboard*, pp 349-383.

Fellers, C., Carlsson, L. A. *Bending stiffness, with special reference to paperboard*. 1.ed Marcel Dekker,1983, v.1, Cap. 7, : *Handbook of physical and mechanical testing testing and paperboard*, pp. 323-347.

Folha de São Paulo. IPEA Aponta Crescimento Industrial de 11%. *Caderno Dinheiro*-29/01/2001.

Fraser, H.W. *Force-air rapid cooling of fresh Ontário fruits and vegetables*. Ministry of Agriculture and Food, Ontário. 1991. AGDEX 202-736. 4p.

Gayet, J. P., Bleinroth, E. W., Matallo, M., Garcia, E. E., Garcia, A. E., Ardito, E. F. G., Bordin, M. R. *Tomate para exportação: Procedimentos de colheita e Pós-colheita*. Ministério da

Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria do Desenvolvimento Rural, Programa de Apoio à Produção e Exportação de Frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais. Brasília: EMBRAPA, - SPI, 1995. 34p. Série Publicações Técnicas FRUPEX, 13.

Gilchrist, A. C., Suhling, J. C., Urbanik, T. J. Nonlinear finite element modeling of corrugated board. AMD- v.231/ MD v. *Mechanics of cellulosic materials*, pp.101-106,1999.

Hahn, E. K., Carlsson, L. A., Westelind, B. S. Edge-compression fixture for bucking studies of corrugated board panels, *Experimental Mechanics*, v.32, n.3, pp. 252-258, september 1992a.

Hahn, E. K. de Ruvo, A., Westelind, B. S., Carlsson, L. A., Compressive strength of edge- loaded corrugated board panels, *Experimental Mechanics*, v.32., n.3, pp.259-265.apr 1992b.

Hass, E., Flesnstein, G., Shiter, A., Magnor, G. Factors affecting resistance to air flow through packad fresh fruit. *ASHRAE Transactions*, v.82, pp. 548-554, 1976.

Höke, U. e Göttshing, L. Stauchfestigkeiten von papier, wellpappe und schachteln (em alemão). *Das Pappier*, v.39, pp.65-73, 1985.

IPC (The Institute for Interconneting and Packaging Eletronic Circuits). TM-650. *Teste methods manual: tensile strength, elongation and modulus*. IPC-TM- 650. 07/1995. 3p

Jenkinson, P. M. *Buckling coefficients for flat rectangular sandwich panels with corrugated cores under edwise compression*. FPL-RP-25, U.S. Departament of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratoy, Madison, WI, pp.1-19 , 1965.

Johnson, J. A., Bennett, K. A., Montrey, H. M. *Failure phenomena*. 1.ed Marcel Dekker,1983, v.1, Cap. 5, Handbook of physical and mechanical testing testing and paperboard, pp 145-253. In: Handbook of Paper and Mechanical Testing of Paperboard, v.1 (R.E. Mark Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 145-253, 1983.

Johnson, M. W., Urbanik, T. J., e Denniston, W. E. *Optimum fiber distrubution in singlewall corrugated fiberboard*. USDA, Research Paper FPL 348, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 1-39, 1979.

Jönson, G. *Corrugated board packaging: a Pira international packaging guide*. 2ed. Leatherhead: Pira International, 1999. 264p.

Kellicutt, K. Q., Peters, C. C. Structural design notes for corrugated containers, Note N.7: Relationship of moment of inertia to stiffness of corrugated board. *Package engineering*, pp. 84-87, 1959.

Langbridge, D.M. *Corrugated fiberboard boxes: Their use in packing fresh fruit and vegetables*. Australian Paper Manufactures Limited- APL, 1982. 155p.

Lekhnitskii, S. G. *Theory of elasticity of anisotropic elastic body*. Moscow: Mir Publishers, 1981, 430p.

Lekhnitskii, S. G. *Anisotropic plates*. New York-London-Paris: Gordon and Breach Science Publishers, 1968. 534p.

Libove, C., Rubka, R. E., *Elastic constants for corrugated core sandwich plates*. NACA TN n.2289, pp. 1-105, 1951.

Luo, S., Suhling, J. C., Considine, J. M., Laufenberg, T. L. . The bending stiffness of corrugated board , In: *Mechanics of cellulosic materials*, Editado por R. W. Perkins, ASME AMD, ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, v.145, n.3 pp.15-26, november,1992.

Luo, S., Suhling, J. C., Laufenberg, T. L. . The bending and twisting tests for measurement of the stiffness of corrugated board , In: *Mechanics of cellulosic materials*, Editado por R. W. Perkins, ASME AMD, ASME Applied Mechanics and Materials Summer Meeting, UCLA, Los Angeles, CA, v.209, n.3, pp.91-109, june,1995.

Mann, R. W., Baum, G. A, Habeger, C. C. Determination for all nine orthotropic elastic constants for machine-made paper. *Tappi*, v.63, n. 2, pp. 163-166, 1980.

Markström, H. Testing methods and instruments for corrugated board. In: A handbook. Stockholm, Lorentzen & Wettre, pp. 31-34, 1998.

McKee, R. C., Gander, J. W., Watchuta, J. R. *Compression strength formula for corrugated boxes*. Appleton: Institute of Paper Chemistry, (Project n. 1108-4, Report79). 1963. 12p.

McKinlay, P. R., Box, P. O. Analysis of the strain field in a twisted sandwich panel with application to determining the shear stiffness of corrugated fiberboard. *Products of Papermaking*, v.1, pp575-599, 1993.

Mitchell, F. G. Packages for horticultural crops. In: Kader, A. A. Ed. *Postharvest technology of horticultural crops*. 2 ed. Oacland: University of Califórnia, Division of Agriculture and Natural Resources Publications 3311, 1992, pp. 45-53.

Mourad, A. L. *Embalagens de papelão ondulado para acondicionamento de frutas e hortaliças*. In: Congresso Anual de Celulose e Papel. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 32 – ABTC, São Paulo, 1999, 9p. (Palestra).

Mourad, A. L., Garcia, A. E., Bordin, M. R., Adito, E. F. G. *Embalagens de papel, cartão e papelão ondulado*. Campinas, ITAL, 1999. 282p.

Nordstrand, T. Parametric study of the post-buckling strength of structural core sandwich panels. *Composite Structures*, v.30, pp. 441- 451, 1995.

Nordstrand, T., Carlsson, L. A., Allen, H. G. Transverse shear stiffness of structural core sandwich. *Composite Structures*, v.27, pp.317- 329, 1994.

Olorunda, A. e Tung, M. A. Simulated transit studies on tomatoes: effects of compressive load, container, vibration and maturity on mechanical damage. *Journal of Food Technology*, Oxford, v. 20, n.6, pp. 669-678, 1985.

Page, D. H. e Seth, R. S. The elastic modulus of paper III. The effects of dislocations, microcompressions, curl, crimps, and kinks. *Tappi*, v. 63, n. 10, pp. 99-102, 1980.

Patel, P. Nordstrand, T., Carlsson, L. A. Local buckling and collapse of corrugated board under biaxial stress. *Composite Structures*. Great Britain, v. 39, n. 1-2, pp 93-110, 1997.

Perkins, R. W. JR. *Models for describing the elastic, viscoelastic, and inelastic mechanical behavior of paper and board*, 1.ed. Marcel Dekker, 1983, v.1, Cap. 2, Handbook of physical and mechanical testing testing and paperboard, pp 24-75.

Peterson, W. S. Unified container performance and failure theory I: Theoretical development of mathematical model. *Tappi Journal*, v. 63, n. 10, pp. 75-79, 1980.

Peterson, W. S. Unified container performance and failure theory II: Comparisons between experimental data and mathematical model. *Tappi Journal*, v. 63, n. 11, pp. 115-120, 1980.

Pichler, E. F. *Caixas de papelão ondulado: desenvolvimento, especificação, controle de qualidade e utilização*. São Paulo IPT. 1987. 71p.

Pichler, E. F. *Embalagem: desenvolvimento, especificação, controle de qualidade e custos*. São Paulo IPT/LEA. 1999. 24p.

Pommier, J. C., Poustis, J. New approach for predicting box stacking strength . *Revue A.T.I.P.*, v.43, n.5, pp 217-221, 1989.

Pommier, J. C., Poustis, J., Azens, J. J. Fatigue resistance of a fiberboard case and of its components. Corrugated Containers Conference, *TAPI Proceedings*, pp. 23-24, 1988.

Pommier, J. C., Poustis, J. Bending stiffness of corrugated board prediction using the finite element method. In: *Mechanics of wood and paper materials*, Editado por R. W. Perkins, ASME AMD, ASME Winter Annual Meeting, Dallas, TX, v.112, pp.67-70, novembro1990a.

Pommier, J. C., Poustis, J. Box stacking strength prediction: today Mckee, tomorrow? In: *Mechanics of cellulosic materials*, ASME AMD, ASCE/ASME Joint Mechanics Conference, LaJolla, CA, July v.9, pp.109-12, novembro1990b.

Pommier, J. C., Poustis, J., Foucade, E., Morlier, P. Determination of the critical load of a corrugated box subjected to vertical compression by finite elements methods, In: *Proceedings of the 1991 international paper physics conference*, pp 437-447, Kona, HI, 1991.

Rahman, A. A. Finite element buckling analysis of corrugated fiberboard panels. *Proceedings of the 1997 ASME/ASCE/SES Summer Meeting. Mechanics of Cellulosic Materials*, AMD-v.221/MD-v.77, pp.87-92, 1997.

Rahman, A. A., Abubakr, S. Adhesive in the bukling failure of corrugated fiberboard: a finite element investigation. In: *Proceedings of 1998 ANSYS Conference, simulating real life: software with no bondaries; 1998 august 17-19; ANSYS, Inc; v. 1, pp. 533-539.*

Reddy, J. N. *Energy and variational methods in applied mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1994. led. 545p.

Sabonnadière, J. C., Coulomb, J. L. *Elementos finitos e CAE: Aplicações em engenharia elétrica*. Aleph Ed., 1993. 214p.

Scandinavian Pulp, Paper and Board, *CCT value and CCT index*, SCAN-42:81. Stockholm, 1981, 3p.

Seth, R. S. Relationship between edgewise compressive strength of paperboard and its components. *Tappi Journal*, v. 68, n.3, pp. 98-101, 1985.

Seth, R. S. Edgewise compressive strength of paperboard and the ring crush test. *Tappi Journal*, v. 67, n.2, pp. 114-115, 1984.

Seth, R. S., Page, D. H. The stress strain curve of paper. In: The role of fundamental research in paper making, *Transactions of the symposium held at Cambridge: September, 1981*. Edited by James Brander, Mechanical Engineering Publications, v.1, pp. 421-452, 1983.

Steel, G. D. R., Torrie, J. H. *Principles and procedures of statistics: A biometrical approach*. McGraw-Hill Publishing Company. 1980. 633p

Szilard, R. *Theory and analysis of plates: classical and numerical methods*. New Jersey: Printice-Hall. 1974. 722p.

Technical Association of The Pulp And Paper Industry (TAPPI). *Short Span Compressive Strength of Paperboard*. T – 826. Atlanta: Tappi, 1994.3p.

Technical Association of The Pulp And Paper Industry (TAPPI). *Stiffness of Paperboard T- 489 om-92*. Atlanta: TAPPI, 1994.4p.

Technical Association of The Pulp And Paper Industry (TAPPI). *Thickness (caliper) of paper , paperboard, and combined board*. T- 411 om-89. Atlanta: Tappi, 1994.3p.

Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. *Theory of plates and shell*. New York: Mc-Graw Hill Book Co., 2ed., 1959, 580p.

Timoshenko, S., e Goodier, J. N. *Theory of elasticity*. Tokyo: Mc-Graw Hill Book Co., 2ed., 1951, 504p.

Uesaka, T. *Specimen design for mechanical testing of paper and paperboard*. 1.ed Marcel Dekker,1983, v.1, Cap. 3, Handbook of physical and mechanical testing testing and paperboard, pp 77-113.

Urbanik T. J. *Effect of paperboard stress-strain characteristics on strength of singlewall corrugated fiberboard: A theoretical approach*. Research Paper FPL-RP-401. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, pp 1-15, 1981.

Urbanik, T. J. Linear and nonlinear material effects on postbuckling streng of corrugated containers. AMD- Vol.221/MD-v.77, *Mechanics of Cellulosic Materials*, ASME 1997, pp 93-99.

Urbanik, T. J. Method analyzes analogue plots of paperboard stress-strain data. *Tappi*, Atlanta, v. 65, n.4, pp.104-108, apr.1982.

Urbanik T. J. Machine direction strength theory of corrugated fiberboard. *Journal of Composites Technology & Research*. v.18, n.2, pp 80-88, apr. 1996a.

Urbanik T. J. Review of buckling mode and geometry effects on postbuckling strength of corrugated containers. In: ASME-INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 1996, Atlanta. *Proceedings*, Atlanta, ASMME, pp85-94, 1996b.

Wallis, G. *A evolução do mercado brasileiro de embalagens e sua inserção no mercado internacional*. In: Brasil pack trends 2005 – embalagens, distribuição e consumo. Campinas, SP: CETEA/ITAL, pp25-48, 2000.

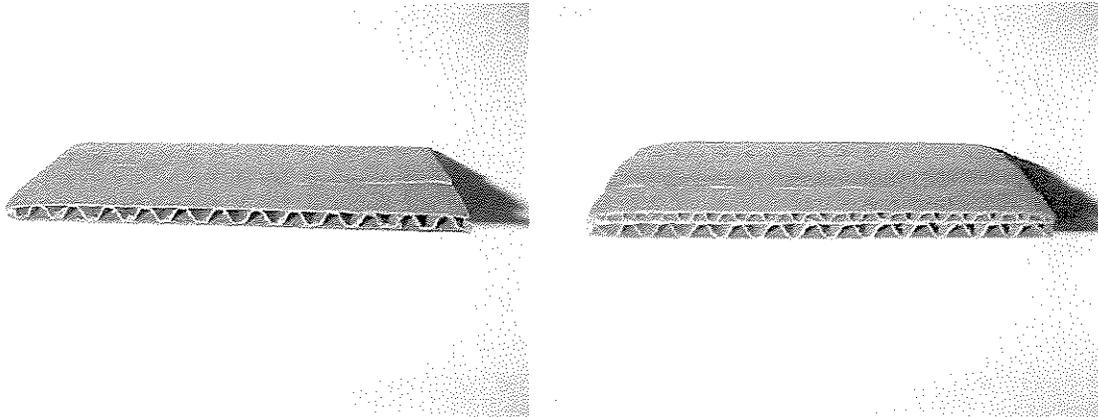
Westerlind, B. S. e Carlsson, L. Compressive response of corrugated board. *Tappi J.*, v. 75, n.7, pp. 146-154. 1992.

Zahn, J. J. *Local buckling of orthotropic truss-core sandwich*, Research Paper FPL 220, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1973.

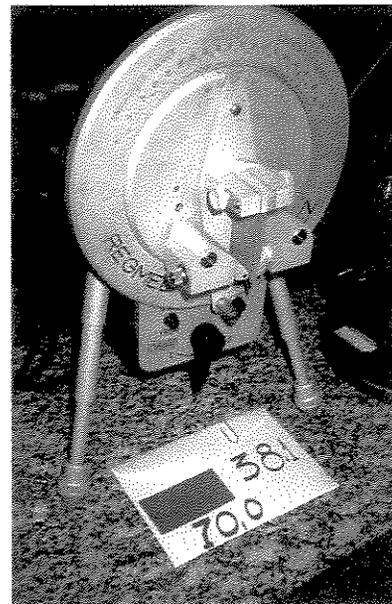
Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. *The finite element method*. London: Mc-Graw Hill Book Co., 1989, 4ed., 525p.

Anexo I

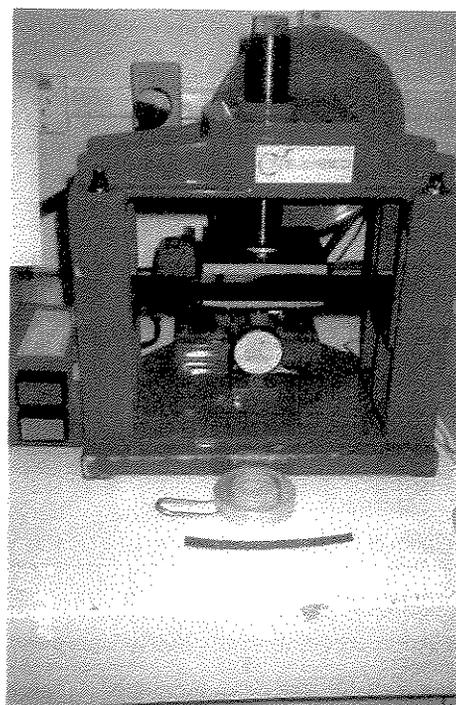
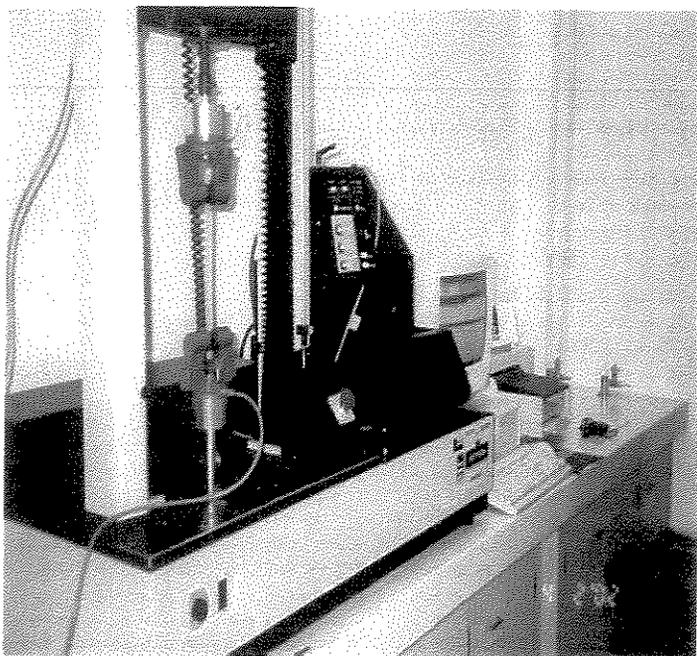
Figuras das estruturas de papelão, embalagens e dos ensaios de desempenho realizados.



FIGURAS A1 (esquerda) e A2 (direita). Estruturas de papelão ondulado de onda C e BC respectivamente.



FIGURAS A3 e A4. À esquerda Figura A3, embalagens de papelão ondulado Modelo 201 (MD1) acima, e o modelo 200 (MD2) abaixo. FIGURA A4 à direita, ensaio de resistência à tração dos papéis capa e miolo na máquina universal de ensaios.



FIGURAS A5 e A6. À esquerda a Figura A5, ensaio de resistência à tração dos papéis capa e miolo na máquina universal de ensaios. FIGURA A6 à direita ensaio de resistência ao esmagamento do anel (RCT) dos papéis capa e miolo na máquina tipo barra de deflexão marca Reg Med.

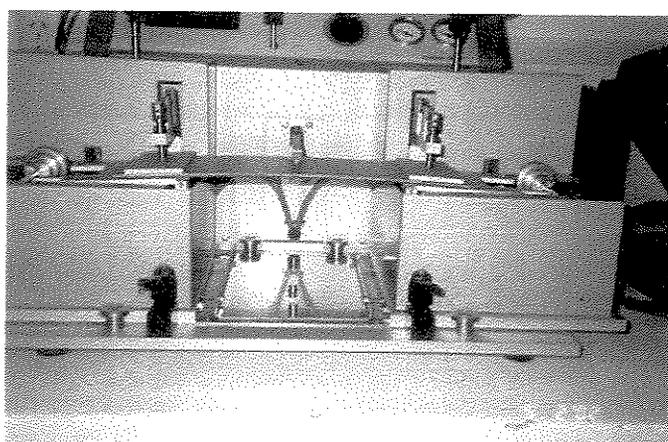


FIGURA A7. Ensaio de rigidez em flexão da estrutura de papelão ondulado em aparelho de quatro pontos.

Anexo II

Tabelas e figuras de desempenho dos materiais avaliados.

TABELA B1. Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos papéis capa e miolo.

Papel	Módulo de Elasticidade (GPa)		Coeficiente de Poisson (ν)	
	DF	DT	DF	DT
	Média	Média	Média	Média
C 125	2,12	0,43	0,55	0,14
C 140	2,10	0,42	0,45	0,09
C 200	1,84	0,46	0,51	0,13
M 120	1,82	0,40	0,56	0,12
M 140	1,41	0,34	0,48	0,11
M 170	1,53	0,44	0,63	0,18

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal.

TABELA B2. Módulo de Elasticidade obtido através da Rigidez Taber para os papéis capa e miolo.

Papel	Módulo de Elasticidade (Gpa)		Módulo de Elasticidade (Gpa)	
	DF	C.V.(%)	DF	C.V.(%)
C 125	3,04	9,39	1,27	10,22
C 140	3,19	11,53	1,56	12,45
C 200	3,02	8,32	1,20	7,31
M 120	1,83	8,60	0,70	11,85
M 140	1,63	7,42	0,68	12,41
M170	1,58	13,63	0,79	12,16

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal.

TABELA B3. Resistência à compressão dos papéis capa e miolo realizados pelos métodos de compressão de anel (RCT), short span (SCT) e compressão do papel corrugado em aparelho concora (CCT) (kNm^{-1}).

Papel	RCT		SCT		CCT	
	DF	DT	DF	DT	DF	DT
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
C125	1,44 a	0,98 a	4,56 a	2,42 a	2,26 a	1,55 a
C140	1,74 ab	1,22 ab	4,63 ab	2,77 ab	2,53 ab	1,36 ab
C200	2,82 c	1,69 c	5,56 c	3,80 c	3,59 c	2,62 c
M120	1,69 a	0,73 a	3,25 a	1,73 a	1,97 a	1,19 a
M140	1,08 ab	0,90 ab	2,99 ab	1,98 ab	1,61 ab	1,35 ab
M170	1,94 c	1,40 c	4,26 c	2,74 c	2,73 c	2,47 c

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal.

TABELA B4. Valores de resistência à compressão de coluna do papelão ondulado (kN.m^{-1}).

Estruturas de papelão	DF		DT	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
CK45	1,35 a	10,1	4,60 a	8,7
CK58	2,21 b	14,4	7,25 b	14,0
BCK85	2,82 c	16,0	9,77 c	3,5
BCK120	6,31 d	9,3	14,79 d	4,7

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal.

TABELA B5. Rigidez em flexão do papelão ondulado, medida em aparelho de dois pontos (N.m).

Estruturas de papelão	DF		DT	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
CK45	1,85 a	9,45	1,65 a	3,96
CK58	2,65 b	8,45	1,96 b	7,84
BCK85	2,38 bc	15,64	2,34 c	7,29
BCK120	5,13 d	7,96	3,40 d	7,25

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal.

TABELA B6. Rigidez em flexão de papelão ondulado, calculada pelo procedimento proposto por CARLSSON et al. (1985).

Estruturas de papelão	Rigidez N.m		Rigidez N.m	
	Módulo obtido por Flexão (Taber)		Módulo obtido por Tração (Instron)	
	DF	DT	DF	DT
CK45	4,7	2,3	3,3	1,1
CK58	5,7	3,4	3,7	1,1
BCK85	15,1	9,0	9,6	2,7
BCK120	24,8	18,2	14,3	3,2

DF = Direção de fabricação; DT = Direção transversal.

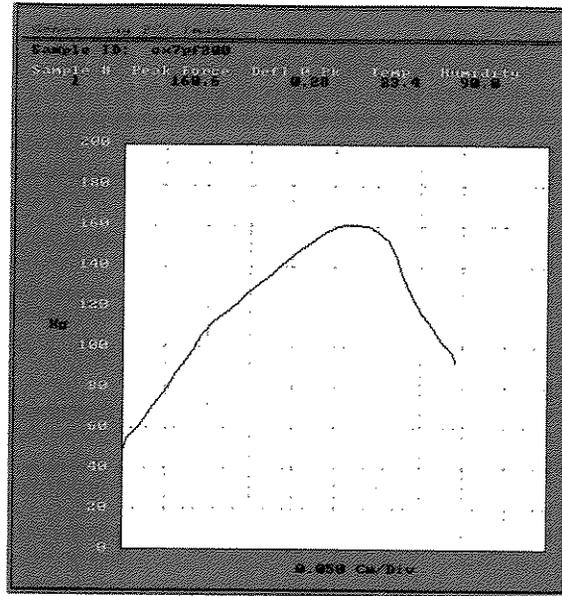


FIGURA B1. Curva de deformação de amostra de embalagem modelo 200.

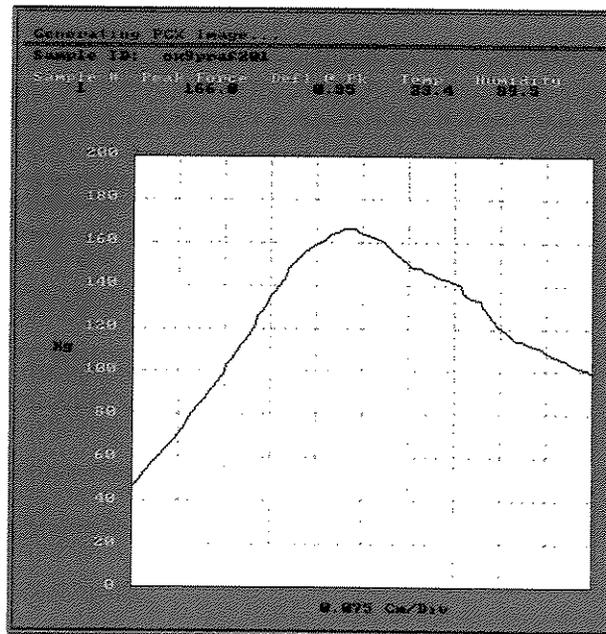


FIGURA B2. Curva de deformação de amostra de embalagem modelo 201.

Anexo III

Figuras dos modelos de elementos finitos das estruturas de papelão ondulado e das embalagens.

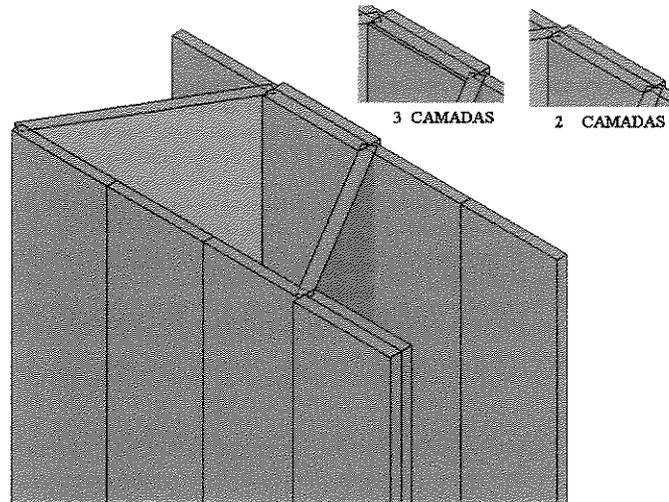


FIGURA C1. Modelo de papelão com miolo estrutural e onda com forma trapezoidal, acima detalhes da terceira camada com elemento de cola na crista da onda à esquerda (M_{ETA}) e sem elemento de cola à direita (M_{ET}).

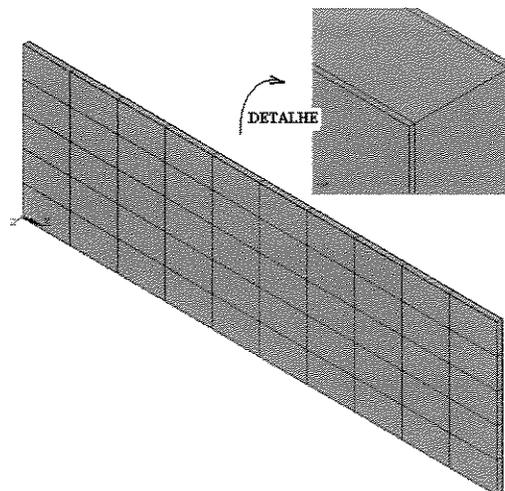


FIGURA C2. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MS_C).

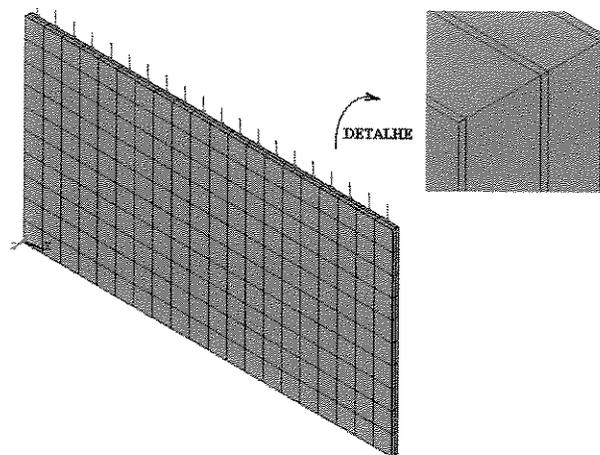


FIGURA C3. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea sanduíche onda BC (MS_C).

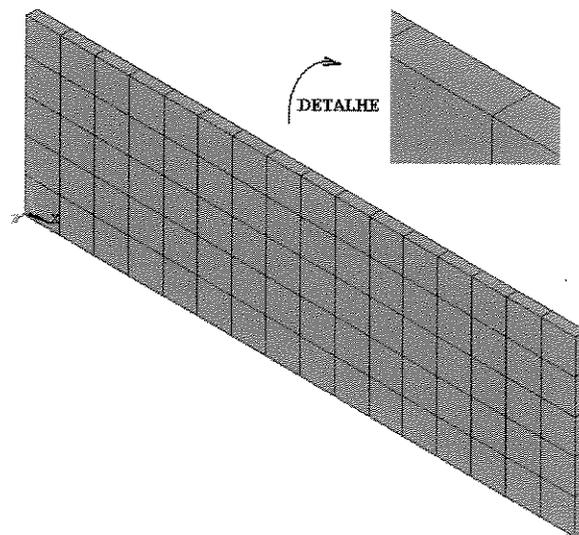


FIGURA C4. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea idealizada (MI_{BC}).

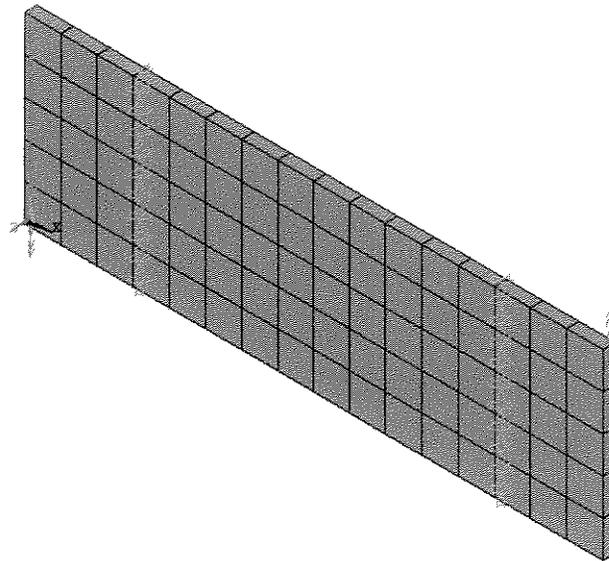


FIGURA C5. Modelo FEM de placa ortotrópica homogênea idealizada (MI_{BC}).

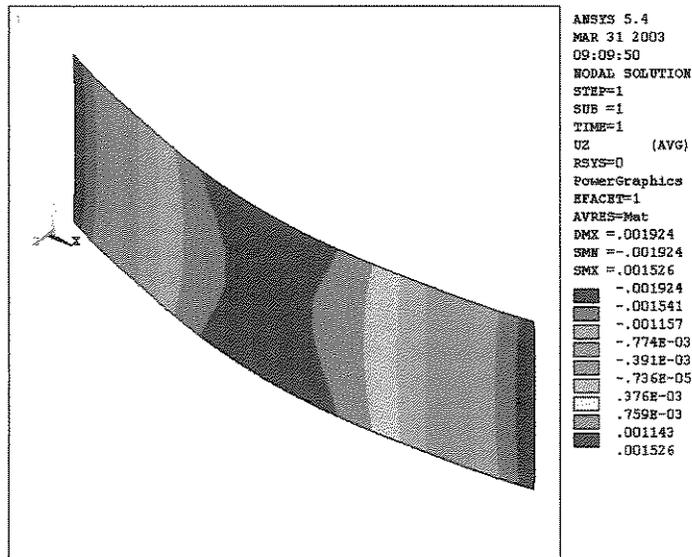


FIGURA C6. Gráfico de distribuição de tensão na direção Z do modelo FEM rigidez em flexão de quatro pontos de placa ortotrópica homogênea idealizada (MI_{C45}).

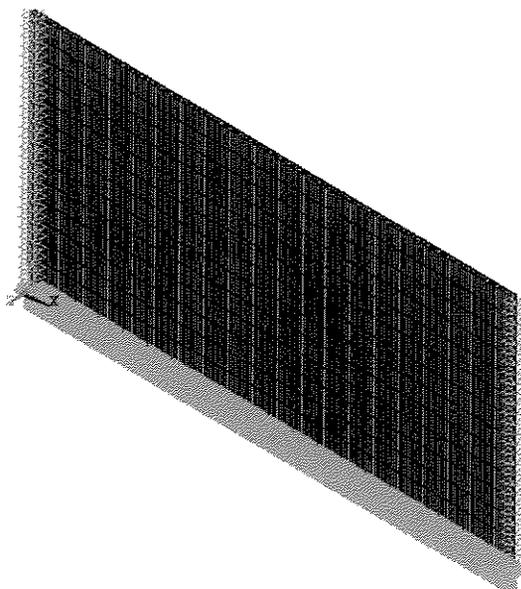


FIGURA C7. Placa lateral modelo estrutural trapezoidal ME_T estrutura CK45.

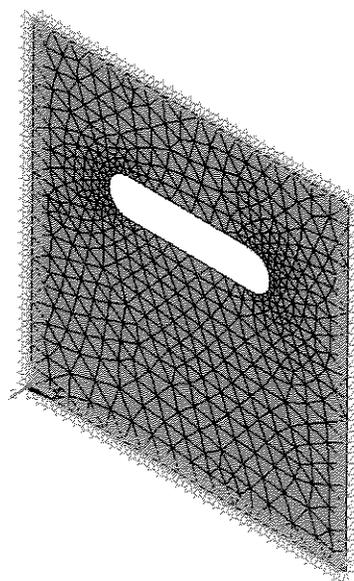


FIGURA C8. Modelo FEM de placa testeira com abertura ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MS_C).

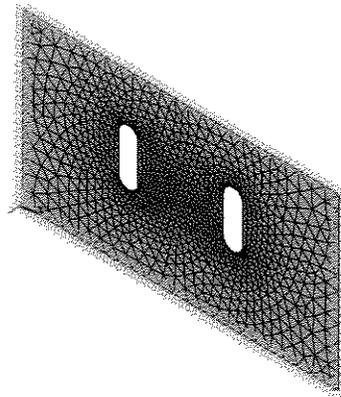


FIGURA C9. Modelo FEM de placa lateral ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MS_C) com duas aberturas.

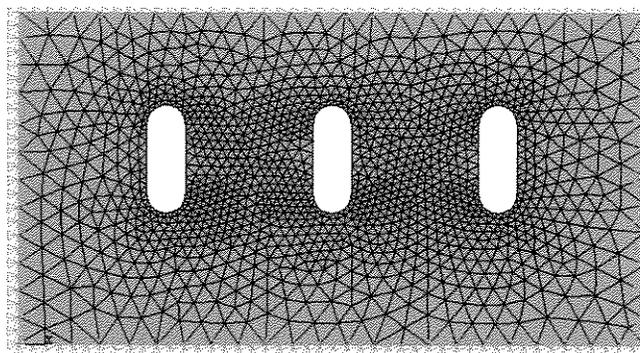


FIGURA C10. Modelo FEM de placa lateral ortotrópica homogênea sanduíche onda C (MS_C) com três aberturas.

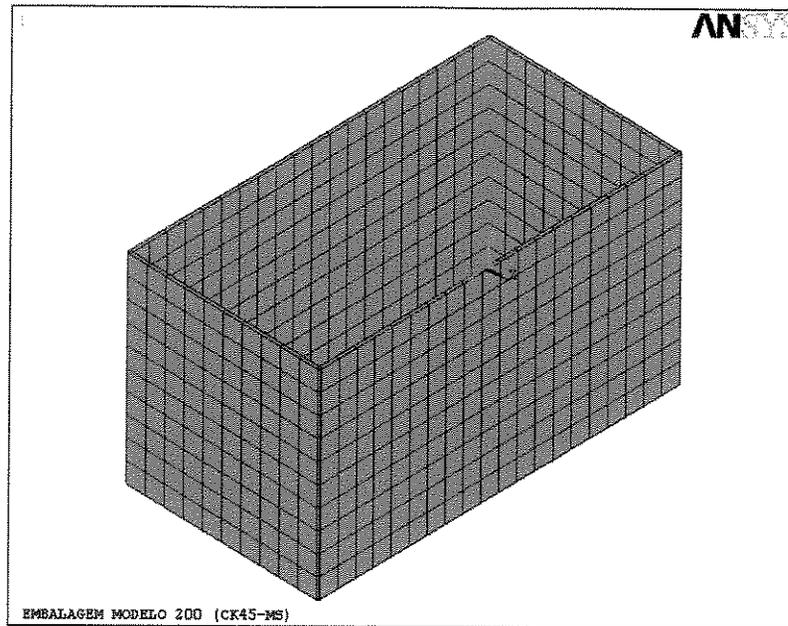


FIGURA C11. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda C (Msc).

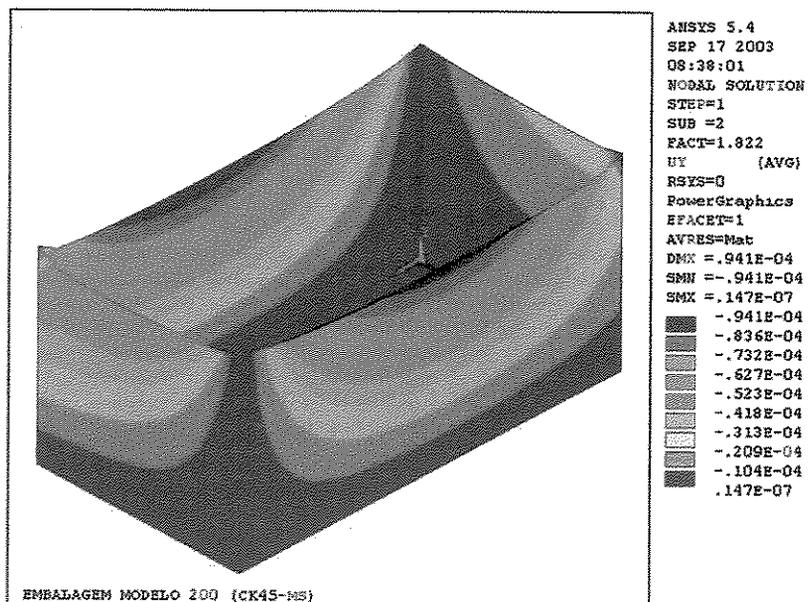


FIGURA C12. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda C (MSC), deformação na direção da aplicação do carregamento UY.

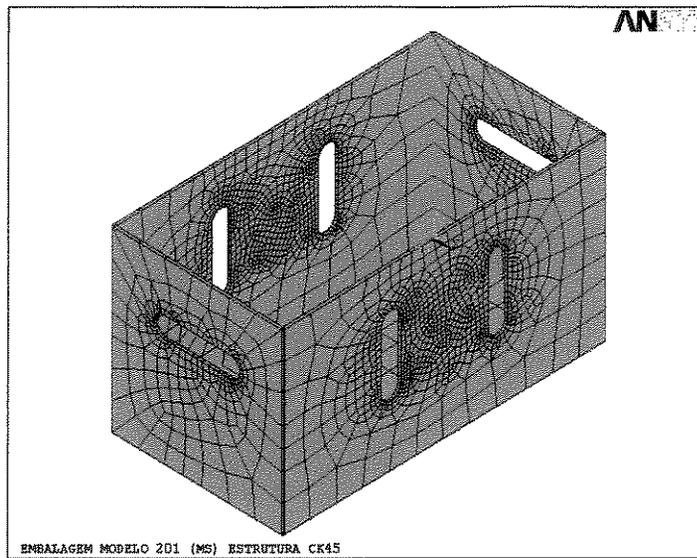


FIGURA C13. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda com duas aberturas laterais C (MSC).

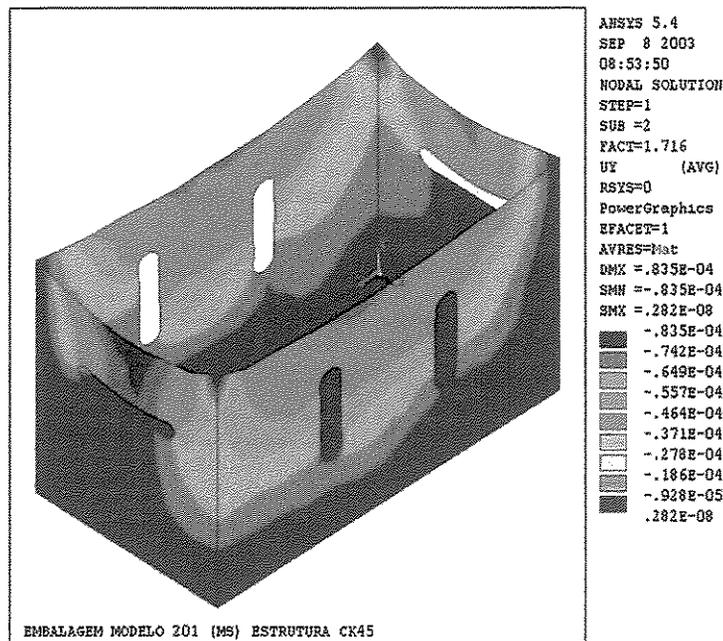


FIGURA C14. Modelo FEM de embalagem completa na forma sanduíche onda C (MSC), deformação na direção da aplicação do carregamento UY.