

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia de Alimentos

Departamento de Tecnologia de Alimentos

TESE DE DOUTORADO

Estudo do desempenho de papelão ondulado virgem e reciclado exposto a diferentes condições de umidade relativa

Elizabeth de Fatima Gazeta Ardito

Orientador: Prof. Dr. José de Assis Fonseca Faria

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Doutor em Tecnologia de Alimentos.

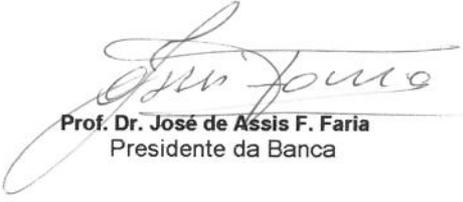
PARECER

Campinas, SP

2000

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Elizabeth de Fátima Gazeta Ardito, aprovada pela Comissão Julgadora em 09 de novembro de 2000.

Campinas, 09 de novembro de 2000


Prof. Dr. José de Assis F. Faria
Presidente da Banca

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

20010084

UNIDADE Be
N.º CHAMADA:
T/UNICAMP
Ar28e
V. Ex.
TOMBO BC/ 43408
PROC. 96-392/01
C D
PREC. R\$ 11,00
DATA 09/01/01
N.º CPD

CM-00154311-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

Ar42e

Ardito, Elizabeth de Fatima Gazeta

Estudo do desempenho de papelão ondulado virgem e reciclado exposto a diferentes condições de umidade relativa /Elizabeth de Fatima Gazeta Ardito. – Campinas, SP: 107p., 2000.

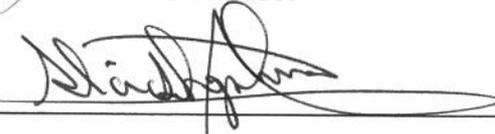
Orientador: José de Assis Fonseca Faria
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Papelão. 2.Embalagens. 3.Desempenho. 4.Umidade.
I.Faria, José de Assis Fonseca. II.Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.
III.Título.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. José de Assis Fonseca Faria

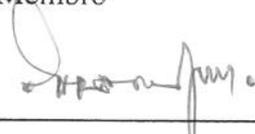
Orientador


Prof. Dr. Alcides Lopes Leão

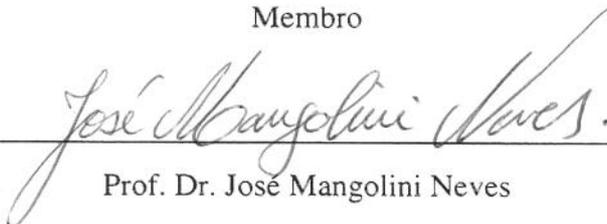
Membro

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Junior

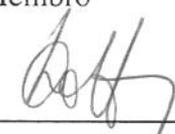
Membro


Prof. Dr. Carlos Alberto Rodrigues dos Anjos

Membro


Prof. Dr. José Mangolini Neves

Membro


Dra. Leda Coltro

Membro

Dra. Marisa Padula

Membro

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

DEDICATÓRIA

Ao meu pai (*in memoriam*) pelo incentivo ao estudo

À minha mãe pela dedicação e apoio

Ao meu esposo pelo amor e compreensão

Aos meus filhos pela existência e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Ao ITAL – Instituto de Tecnologia de Alimentos, pela oportunidade, e ao CETEA – Centro de Tecnologia de Embalagem do ITAL, pelo apoio para a realização do doutoramento;

Ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa Tecnológica, pela concessão de bolsa tipo sanduíche para desenvolvimento do trabalho experimental no exterior;

Ao FPL – *Forest Products Laboratory*, pela aprovação do projeto de pesquisa e fornecimento dos equipamentos e instalações para o seu desenvolvimento;

Ao Prof. Dr. José Assis F. Faria, pela orientação do programa de doutorado;

Ao Dr. Thomas John Urbanik, pela orientação no desenvolvimento do projeto de pesquisa;

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Rodrigues dos Anjos, pelas valiosas sugestões;

À CKPG – *Containerboard and Kraft Paper Group*, pelo fornecimento dos papéis usados no estudo;

Ao IPST – *Institute of Paper Science and Technology*, pela fabricação das estruturas de papelão ondulado;

Aos pesquisadores Steven J. Kuskowski e Sung K. Lee, pela colaboração na realização das análises;

À Nilda Doris Montes Villanueva e Steve P. Verrill, pela assessoria na análise estatística dos dados;

Ao técnico Fernando César Zullo, pela editoração da tese;

Aos Professores Alcides Lopes Leão, Antonio Marsaioli Junior, José Mangoline Neves e as Pesquisadoras Leda Coltro e Marisa Padula, membros da banca examinadora;

A todos, que direta ou indiretamente, participaram e colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABELAS.....	v
ÍNDICE DE ANEXOS	vi
RESUMO	vii
SUMMARY	ix
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVO	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Produção do papelão ondulado	15
3.2 Componentes do papelão ondulado/ processo de fabricação.....	15
3.3 Estruturas de papelão ondulado	17
3.4 Tipos de onda do papelão ondulado.....	18
3.5 A embalagem de papelão ondulado	19
3.6 Ensaio de avaliação de estruturas e embalagens de papelão ondulado	20
3.7 Ensaio para avaliação dos componentes do papelão ondulado	22
3.8 Condicionamento do papelão ondulado e seus componentes para ensaio	23
3.9 Desenvolvimento estrutural de caixas de papelão ondulado	24
3.10 Fatores que influenciam o desempenho de caixas de papelão ondulado em compressão	27
3.11 Efeito da umidade relativa no desempenho do papelão ondulado	29
3.12 Efeito de condições de umidade cíclica no desempenho do papelão ondulado	31
3.13 A higroexpansividade do papelão ondulado em umidade cíclica	35
3.14 A reciclagem do papelão ondulado	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1 Materiais	40
4.1.1 Componentes do papelão ondulado	40
4.1.2 Estruturas de papelão ondulado	40
4.1.3 Embalagens de papelão ondulado	41
4.2. Metodologia	41

4.2.1 Condições de ensaio.....	41
4.2.2 Avaliação dos papéis capa e miolo	42
4.2.2.1 Identificação do tipo de fibra	42
4.2.2.2 Gramatura.....	42
4.2.2.3 Espessura.....	43
4.2.2.4 Absorção de água	43
4.2.2.5 Rigidez à flexão.....	44
4.2.2.6 Resistência à compressão	45
4.2.2.7 Higroexpansividade.....	46
4.2.3 Avaliação das estruturas de papelão ondulado.....	47
4.2.3.1 Resistência à compressão de coluna.....	47
4.2.3.2 Rigidez à flexão.....	48
4.2.3.3 Taxa de fluência do papelão ondulado	48
4.2.4 Avaliação das embalagens de papelão ondulado	51
4.2.4.1 Resistência à carga vertical	51
4.2.4.2 Taxa de fluência das embalagens de papelão ondulado	52
4.2.5 Análise estatística.....	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1 Caracterização dos papéis capa e miolo.....	54
5.2 Avaliação das estruturas de papelão ondulado	73
5.3 Avaliação das embalagens de papelão ondulado	83
6. CONCLUSÕES	96
7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Comportamento típico do papel durante o ensaio de fluência, realizado com variações senoidais de umidade entre 50 e 90% UR, a cada 10 minutos.....	32
FIGURA 2. Curva característica obtida na análise dos dados de fluência.	51
FIGURA 3. Fotomicrografia do papel capa virgem (VL205) x150	55
FIGURA 4. Fotomicrografia do papel capa reciclado (RL205) x 150.	55
FIGURA 5. Fotomicrografia do papel miolo virgem (VM127) x 150.	56
FIGURA 6. Fotomicrografia do papel miolo reciclado (RM127) x 150.	56
FIGURA 7. Rigidez à flexão dos papéis capa na direção DF.....	59
FIGURA 8. Rigidez à flexão dos papéis capa na direção DT.	59
FIGURA 9. Resistência à compressão dos papéis capa na direção DF.	61
FIGURA 10. Resistência à compressão dos papéis capa na direção DT.....	61
FIGURA 11. Alongamento dos papéis capa, na direção DF.	62
FIGURA 12. Alongamento dos papéis capa, na direção DT.....	63
FIGURA 13. Rigidez à compressão dos papéis capa na direção DF.....	64
FIGURA 14. Rigidez à compressão dos papéis capa na direção DT.	64
FIGURA 15. Rigidez à flexão dos papéis miolo na direção DF.	67
FIGURA 16. Rigidez à flexão dos papéis miolo na direção DT.	67
FIGURA 17. Resistência à compressão dos papéis miolo na direção DF.....	69
FIGURA 18. Resistência à compressão dos papéis miolo na direção DT.....	69
FIGURA 19. Alongamento do papel miolo na direção DF.....	70
FIGURA 20. Alongamento do papel miolo na direção DT.....	71
FIGURA 21. Rigidez à compressão dos papéis miolo na direção DF.....	72
FIGURA 22. Rigidez à compressão dos papéis miolo na direção DT.	72

FIGURA 23. Resistência à compressão de coluna das estruturas de papelão ondulado a 50 e a 90% UR.	74
FIGURA 24. Rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado, nas direções DF e DT, a 50% UR.....	77
FIGURA 25. Rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado, nas direções DF e DT, a 90% UR.....	77
FIGURA 26. Taxa mínima de fluência das estruturas de papelão ondulado.....	82
FIGURA 27. Amplitude de higroexpansão das estruturas de papelão ondulado.	82
FIGURA 28. Resistência à compressão das embalagens (tubos) de papelão ondulado a 23°C/50% UR.	84
FIGURA 29. Taxa mínima de fluência das embalagens de papelão ondulado.	89
FIGURA 30. Amplitude de higroexpansão das embalagens de papelão ondulado.	89
FIGURA 31. Relação entre a rigidez à compressão e a amplitude de higroexpansão de cada um dos papéis usados na composição das estruturas de papelão ondulado.....	92
FIGURA 32. Correlação entre a taxa mínima de fluência das embalagens de papelão ondulado e tenacidade do painel.....	94

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1. Fatores de correção usados no desenvolvimento estrutural de caixas de papelão ondulado.	28
TABELA 2. Estruturas de papelão ondulado	41
TABELA 3. Gramatura, espessura e taxa de absorção de água dos papéis capa e miolo. ..	57
TABELA 4. Rigidez à flexão dos papéis capa.	58
TABELA 5. Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão dos papéis capa para as condições constantes de 50 e 90% UR.	60
TABELA 6. Rigidez à flexão dos papéis miolo.	66
TABELA 7. Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão dos papéis miolo a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR.	68
TABELA 8. Resistência à compressão de coluna das estruturas de papelão ondulado. ...	74
TABELA 9. Rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado.	76
TABELA 10. Taxa mínima de fluência das estruturas de papelão ondulado.....	79
TABELA 11. Valores de amplitude da higroexpansão das estruturas de papelão ondulado.....	80
TABELA 12. Taxa mínima de fluência das estruturas de papelão ondulado e comparação pareada das estruturas.	81
TABELA 13. Amplitude de higroexpansão das estruturas de papelão ondulado e comparação pareada das estruturas.	81
TABELA 14. Resistência à compressão das embalagens de papelão ondulado.	83
TABELA 15. Taxa de fluência das embalagens de papelão ondulado.....	85
TABELA 16. Taxa mínima de fluência das embalagens de papelão ondulado e comparação pareada entre as embalagens.....	88
TABELA 17. Amplitude de higroexpansão das embalagens de papelão ondulado e a comparação pareada entre as embalagens.....	88
TABELA 18. Amplitude de higroexpansão dos papéis capa e miolo.	90

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A

- Figura A1. Equipamento VCA – Vacuum Compression Apparatus, desenvolvido no Forest Products Laboratory – Madison –WI 107
- Figura A2. *X-Y Table* usada para determinação da taxa de fluência das estruturas de papelão ondulado (*ECT creep test*)..... 107

RESUMO

Em muitos países, as indústrias de papelão ondulado têm sido forçadas a melhorar a qualidade do papelão ondulado reciclado de modo a torná-lo mais competitivo, com o objetivo de reduzir o uso de fibras virgens e diminuir a quantidade de resíduo sólido nos aterros. Entretanto, pouco se conhece sobre o desempenho do papelão ondulado, principalmente aqueles com componentes reciclados, quando sujeitos às forças de empilhamento em condições de umidade relativa cíclica.

O objetivo deste estudo foi, portanto, determinar o desempenho de papelão ondulado em condições de umidade relativa cíclica, estabelecendo-se os parâmetros que regem a degradação de suas propriedades físico-mecânicas em função da umidade relativa do ambiente.

Estudaram-se dois tipos de papel capa e papel miolo (virgem e reciclado) e cinco estruturas de papelão ondulado formadas com esses papéis. As estruturas de papelão ondulado e seus componentes foram submetidos aos ensaios estáticos de flexão e compressão em condição de umidade relativa padronizada pela norma TAPPI T402-om 93 de 23°C/50% UR e em condição de umidade relativa alta de 23°C/90% UR. As estruturas de papelão ondulado e tubos, fabricados a partir das estruturas, foram submetidos à determinação da taxa de fluência em condição de umidade relativa cíclica, com oscilações senoidais de 50 a 90% UR, a cada 12 horas.

Os resultados dos ensaios em condição de umidade cíclica demonstraram que as estruturas com componentes reciclados apresentaram maior higroexpansividade, maior taxa de fluência e maior número de colapso. Houve uma relação direta entre a amplitude de higroexpansão dos materiais e sua taxa de fluência. A estrutura composta apenas com materiais reciclados (RRR) apresentou a maior taxa de fluência e a maior amplitude de higroexpansão. Inversamente, a estrutura composta apenas com materiais virgens (VVV) apresentou a menor taxa de fluência e a menor amplitude de higroexpansão. Os ensaios estáticos de resistência à compressão de coluna e resistência à compressão da caixa,

realizados em condição padronizada de umidade relativa, não apresentaram diferença significativa, ao nível de 5%, entre essas duas estruturas. O ensaio de flexão foi o que apresentou distinção entre essas estruturas de composição completamente diferente, principalmente, devido às diferenças na rigidez de seus componentes.

Uma boa correlação foi obtida quando comparou-se a taxa de fluência dos tubos com uma propriedade relacionada à rigidez de seus painéis, definida como tenuidade do painel do tubo. Quanto maior a tenuidade do painel, maior a taxa de fluência do tubo e, conseqüentemente, pior seu desempenho em umidade cíclica. A estrutura com todos os componentes reciclados (RRR) apresentou o maior valor de tenuidade e a estrutura com todos os componentes virgens (VVV) o menor valor.

Em condição de umidade relativa cíclica, o uso de miolo reciclado na estrutura (VRR) acarretou melhor desempenho que o uso de miolo virgem (VVR). Não houve diferença significativa ($p \geq 0,05$) entre tubos fabricados a partir das estruturas com capa externa reciclada (RVV) e tubos fabricados a partir da estrutura com todos os componentes virgens (VVV).

Os ensaios convencionais de resistência à compressão de coluna e resistência à compressão da caixa não se correlacionaram com o desempenho do papelão ondulado em umidade cíclica.

SUMMARY

In many countries corrugated board industry have been forced to improve the quality of recycled material to make it more competitive and to reduce both the needs for virgin material and the problem of waste disposal. However, there is a lack of information about the behavior of recycled corrugated boards when subject to long-term stacking in a cyclic relative humidity conditions.

The objective of this study was to determine the corrugated board performance at cyclic environment in order to obtain a relationship between relative humidity and the strength loss of corrugated board materials.

The studied materials were two types of linerboards and mediums (virgin and recycled) made into five combined boards. The paper and the combined board were subjected to bending and compression tests at standard relative humidity and high relative humidity conditions. Creep rate of boards was measured in a cyclic relative humidity as was top-to-bottom creep of tubes made from the combined boards.

Results of cyclic creep tests on combined board made with recycled components exhibited higher higroexpansive strain, higher creep rates and more creep failure. Material higroexpansivity was directly related with material creep rate. Combined board made from all recycled components (RRR) had the highest minimum creep rates along with the largest higroexpansive amplitudes. Conversely, combined board made from all virgin components (VVV) had the lowest minimum creep rates and the smallest higroexpansive amplitudes. The static compression strength tests detected no statistical difference ($p \geq 0,05$) in performance of two vastly different combined board (VVV) and (RRR). One test that did show a distinction between the two extreme materials was the bending test most likely due to the difference in combined board component stiffness.

A strongest relationship was obtained between creep rate and a stiffness property characterized by the universal slenderness of the panels of the corrugated tubes. The results

showed that combined board tubes made from all recycled components (RRR) had the lowest performance and the tubes made from all virgin components (VVV) had the highest. Corrugated fiberboard tubes made from virgin medium (VVR) performed poorly when subjected to cyclic relative humidity as compared to corrugated fiberboard tubes made from the same linerboards but with recycled medium (VRR). At the cyclic humidity condition there was no statistical difference ($p \geq 0,05$) between corrugated fiberboards tubes made from recycled double back linerboard (RVV) and corrugated fiberboard tubes made from all virgin components (VVV).

Standard strength tests did not correlate well with the results of cyclic creep tests.

Estudo do desempenho de papelão ondulado virgem e reciclado exposto a diferentes condições de umidade relativa

1. INTRODUÇÃO

As caixas de papelão ondulado são leves, de baixo custo e bastante eficientes no transporte de produtos industrializados e *in natura*. Nos Estados Unidos, são utilizadas na distribuição de 90% desses produtos e no Brasil esse índice é de 70%, sendo sua demanda utilizada como um medidor da atividade econômica do País.

Dos 6,6 milhões de toneladas de papel produzidos no Brasil em 1998, 1,7 milhão foi destinado ao setor de papelão ondulado, ou seja 26%. A expedição de caixas de papelão alcançou, nesse período, 1,6 milhão de toneladas. Num cenário em que a demanda por produtos de papelão ondulado cresce em média anual de 6 a 7%, estima-se que a expedição de caixas no ano 2002 atingirá 2,1 milhões de toneladas (PRODUTOS..., 1997, DATAMARK, 1988, WALLIS, 1999).

As caixas de papelão ondulado representaram, em 1997, 29,6% do mercado brasileiro de embalagens, estimado em 5,4 milhões de toneladas (US\$ 11.327 milhões) (DATAMARK, 1998).

A exemplo de outros materiais de embalagem, o papelão ondulado tornou-se, no período de 1988 a 1994, objeto de crítica de organizações ambientais e do público em geral, pela alta visibilidade que as embalagens apresentam quanto à produção de resíduo sólido, o que deu origem ao nome *Packaging Dillema* para referir-se às questões ambientais ligadas à área de embalagem.

Para diminuir o impacto das embalagens no meio ambiente, as indústrias de embalagem tomaram uma série de iniciativas, tais como redução de peso dos materiais e incentivo à reciclagem.

No ano 2000, os EUA e a Comunidade Econômica Européia têm como objetivo reciclar 50% de todo papel produzido. Para alcançar esse índice, a taxa de reciclagem de papelão ondulado deverá passar dos 73% e 65% alcançados pelos EUA e pela Comunidade Econômica Européia, respectivamente, em 1998 (JÖNSON, 1999). No Brasil, a reciclagem do papelão ondulado, em 1998, foi de 72% (CEMPRE, 1999).

A alta taxa de reciclagem alcançada pelo papelão ondulado deve-se, além da maior conscientização ambiental da população, ao fato desse material não caber em sacos de lixo. A população o coloca na rua separadamente, o que evita a contaminação com outro tipo de resíduo e facilita o trabalho dos catadores e a reciclagem.

Além de reduzir o volume de lixo jogado nos aterros, a reciclagem tem a vantagem de diminuir o corte de árvores de plantações comerciais reflorestadas, consumir de 10 a 50 vezes menos água que o processo tradicional que usa celulose virgem e reduzir em 50% o consumo de energia (CEMPRE, 1999).

Embora a indústria de papelão ondulado não encontre dificuldades para atingir seus objetivos quanto à reciclagem, o grande desafio é a qualidade do material reciclado. A maneira como as fibras se degradam com a reciclagem e, conseqüentemente, o desempenho do material produzido com essas fibras ainda é pouco conhecido.

O desempenho do papelão ondulado tem sido avaliado por meio de ensaios padronizados, com condições constantes de temperatura e umidade relativa. Vários trabalhos realizados indicam que esses ensaios podem prever, com segurança, o desempenho do papelão ondulado quando exposto a ambientes com 50% UR (McKEE *et al.*, 1963, JOHNSON & URBANIK, 1989, POMMIER *et al.*, 1994).

Entretanto, os ensaios realizados em condições padronizadas de temperatura e umidade relativa não são adequados para avaliar o desempenho do papelão ondulado quando submetido às condições de umidade cíclica que ocorrem naturalmente no sistema de distribuição, pelas mudanças climáticas ou movimentação de produtos em câmaras frigoríficas (SYMPOSIUM, 1992, JÖNSON, 1999).

Sabe-se que em ambientes com alta umidade relativa o papelão ondulado absorve água e, conseqüentemente, perde resistência. Essa perda é muito mais acentuada, se o papelão ondulado for exposto a condições de umidade relativa cíclica. O ganho e perda de umidade, em condições de umidade relativa cíclica, levam o papelão a colapsar em compressão muito mais rapidamente, mesmo que o conteúdo de umidade médio seja menor que em condições de umidade relativa alta (BYRD, 1972, MARCONDES, 1994).

No caso de materiais reciclados, a diminuição da resistência das fibras com oscilações da umidade relativa é significativamente maior (MARCONDES, 1994).

Para compensar a perda de resistência do papelão ondulado no sistema de distribuição, a indústria utiliza fatores de segurança, que se traduzem no aumento da quantidade de fibras utilizadas na sua fabricação, que podem variar de 5 a 10, esse último para produtos *in natura*.

A falta de conhecimento do comportamento do papelão ondulado em ambiente com umidade cíclica, principalmente dos materiais reciclados, tem levado a indústria a usar fatores de segurança muito elevados, aumentando o uso de fibras e, conseqüentemente, o custo do material reciclado, ou ainda a especificar embalagens inadequadas.

Torna-se imperativo, portanto, aprofundar o conhecimento dos fatores que influenciam o desempenho das embalagens de papelão ondulado, quando expostas a ambientes com variações de umidade relativa, principalmente as produzidas com componentes reciclados. Esse conhecimento possibilitará desenvolver métodos de ensaio mais adequados para avaliar as implicações ao aumentar o uso de fibras recicladas, sendo isso de grande importância para expandir significativamente o uso do papelão ondulado reciclado.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi determinar o desempenho de estruturas de papelão ondulado com componentes virgens e reciclados, estabelecendo-se os parâmetros que melhor correlacionem a diminuição de sua resistência em compressão com a variação da umidade relativa do ambiente.

Os resultados deste estudo darão suporte para a implantação de ensaios que traduzam melhor o desempenho de caixas de papelão ondulado submetidas ao empilhamento no sistema de distribuição, ampliando o campo de aplicação do papelão ondulado reciclado pela especificação mais adequada de embalagens.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção do papelão ondulado

A produção de papelão ondulado no Brasil é pequena se comparada com outros países. Em 1998, o Brasil produziu 1,7 milhão de toneladas enquanto nos EUA a produção alcançou 54 milhões de toneladas e na Europa Ocidental 35 milhões (DATAMARK, 1998, JÖNSON, 1999). Em 1996, o consumo *per capita* de papelão ondulado, no Brasil, foi de 10 kg/habitante e nos EUA foi de aproximadamente 90 kg/habitante (PERES, 1997).

Embora seja o principal tipo de embalagem de transporte usado no Brasil, o papelão ondulado ainda encontra um forte concorrente nas caixas de madeira que são utilizadas, principalmente, para produtos hortifrutícolas. O aumento do consumo do papelão ondulado só será alcançado com a melhoria de sua qualidade e redução de custo.

3.2 Componentes do papelão ondulado/ processo de fabricação

Papelão ondulado é a estrutura formada por um ou mais elementos ondulados (papel miolo) fixados a um ou mais elementos planos (papel capa), por meio de adesivo aplicado no topo das ondas (ABNT,1983).

Normalmente, a matéria-prima para a obtenção do papel, usado na fabricação do papelão ondulado, é a celulose proveniente da madeira de árvores coníferas, como o *Pinus*, que fornecem celulose de fibra longa. Árvores folhosas, como o Eucalipto, fornecem celulose de fibra curta, que geralmente é usada na fabricação de papéis de escrever e imprimir.

A celulose de fibra longa concede ao papel alta resistência mecânica, característica necessária para embalagens tais como as caixas de papelão ondulado, enquanto a celulose

de fibra curta proporciona um papel com melhor formação e acabamento, indicado para fins de impressão e escrita.

A resistência mecânica do papel não depende somente das características morfológicas da fibra, como seu tamanho e largura, mas também de outros fatores, entre os quais o processo usado para sua obtenção. Para a obtenção da pasta celulósica podem ser usados vários processos, sendo os mais empregados os processos de alto rendimento, os semiquímicos e os processos químicos (SENAI/IPT, 1988).

Nos processos de alto rendimento, como o processo mecânico, por exemplo, a madeira é pressionada contra um elemento triturador, que pode ser uma pedra ou um disco metálico ranhurado, sendo o veículo de transporte do material moído a água. É um processo de alto rendimento, pois não remove a lignina e carboidratos da madeira e fornece um papel de baixa resistência mecânica, usado apenas como papel jornal ou papel toalha. Nos processos químicos a madeira é cozida com agentes químicos, tais como só soda cáustica ou a mistura desta com sulfeto de sódio (processo *kraft*), para remover grande parte da lignina e carboidratos, produzindo uma pasta de alta qualidade, a qual é usada na fabricação de papéis que exigem alta resistência mecânica, como os usados em embalagens. Combinações dos processos químicos e mecânicos, denominadas processos semiquímicos, também são usadas para converter a madeira em pasta. Nos processos semiquímicos, após a operação de lavagem da matéria-prima, efetua-se um cozimento parcial da madeira com soda cáustica ou sulfato de sódio neutro, com a finalidade de amolecer a lignina e carboidratos que unem as fibras sendo em seguida feita a moagem em um refinador de disco. A pasta semiquímica é usada, também, na fabricação de papéis que exigem alta resistência mecânica como o papel miolo, empregado na fabricação de papelão ondulado.

As fibras utilizadas na fabricação do papel podem, também, ser de aparas (papéis velhos e usados) obtidas pelos processos de reciclagem. Nestes processos, as aparas são separadas em desagregadores denominados *hydrapulper* por ação mecânica e água. Para papéis destinados à fabricação de papelão ondulado, não é necessário aplicar técnicas às

pastas as técnicas de limpeza fina, remoção de tintas, branqueamento e lavagens especiais, o que tornam estes processos mais fáceis e diminuem seu custo operacional.

O papel capa, usado na composição do papelão ondulado, requer alta qualidade e resistência mecânica. É normalmente produzido com celulose de fibra longa obtida pelo processo químico. Por exemplo, o papel capa de 1ª ou *kraftliner* contém no mínimo 75% de celulose de fibra longa virgem. Por questões econômicas e pela maior conscientização ambiental, muitas vezes o papel capa é produzido com menor quantidade de fibras virgens, sendo denominado papel capa de 2ª ou *testerliner*, quando produzido com até 50% de fibras secundárias. O papel capa pode, também, ser fabricado com 100% de fibras secundárias, sendo, nesse caso denominado, papel capa reciclado.

O papel miolo geralmente é fabricado com pastas celulósicas obtidas pelos processos semiquímicos ou com 100% de fibras secundárias. No Brasil, o papel miolo é produzido somente com fibras secundárias.

3.3 Estruturas de papelão ondulado

As estruturas de papelão ondulado são classificadas de acordo com o número de capas e miolo usado na sua formação (ABNT, 1974). Assim, têm-se:

Papelão de face simples é a estrutura formada por um elemento ondulado (miolo), colado a apenas um elemento plano (capa). O papelão ondulado de face simples é usado como material de acolchoamento ou divisória e para algumas embalagens de lâmpadas.

Papelão de parede simples é a estrutura formada por um elemento ondulado (miolo), colado, nos dois lados, a elementos planos (capas). O papelão ondulado de parede simples é usado principalmente para a fabricação de caixas. A especificação de seus componentes é sempre feita da capa externa para a capa interna.

Papelão ondulado de parede dupla é a estrutura formada por três elementos planos (capas), colados a dois elementos ondulados (miolos) intercalados. O papelão de parede

dupla é usado na fabricação de caixas que requerem maior resistência ao empilhamento. A especificação de seus componentes se inicia pela capa externa.

Papelão ondulado de parede tripla é a estrutura formada por quatro elementos planos (capas), colados a três elementos ondulados (miolos), intercalados. O papelão de parede tripla é usado principalmente como calço e divisórias e em casos específicos de caixas que requeiram elevada resistência. A especificação de seus componentes também se inicia pela capa externa.

3.4 Tipos de onda do papelão ondulado

As ondas conferem ao papelão ondulado maior ou menor resistência contra choques e esmagamento, dependendo do tipo de ondulação empregado.

Existem quatro tipos padronizados de ondas: **A**, **B**, **C** e **E**. O tipo de onda é caracterizado pela altura das ondas e pelo número de ondas por unidade de comprimento (PICHLER, 1987).

A onda **A** (altura = 4,2 a 4,5mm e nº onda/10cm = 11 a 13) é a mais alta e espaçada, conferindo ao papelão ondulado boa característica de acolchoamento e melhor desempenho em compressão na direção topo-base da caixa. A desvantagem da onda **A** é que ela é mais difícil de dobrar e vincar para a formação de embalagens do que os outros tipos de onda.

A onda **B** (altura = 2,5 a 2,6mm e nº onda/10cm = 16 a 18), devido ao seu maior número de ondas por unidade de comprimento, é utilizada quando se precisa de maior resistência ao esmagamento, proporcionando também boa superfície para impressão.

A onda **C** (altura = 3,6 a 3,7mm e nº de onda/10cm = 13 a 15) tem propriedades intermediárias àquelas das ondas **A** e **B**.

A onda **E** (altura = 1,2 a 1,4mm e nº de onda/10cm = 31 a 38), pelo seu elevado número de ondas por unidade de comprimento, também proporciona boa superfície de

impressão. O papelão ondulado com onda **E**, ou microondulado, como é conhecido, situa-se entre o cartão e o papelão ondulado, sendo muito utilizado em caixas destinadas ao consumidor final, tais como eletrodomésticos, ferramentas, bebidas alcoólicas, etc., ou seja, em situações cujo tamanho inviabiliza o uso de cartão.

Tendo como base as diferentes propriedades das ondas, podemos dizer que a onda **B** é a que melhor atende às exigências de embalagens para produtos enlatados. Os produtos enlatados suportam cargas relativamente grandes no empilhamento, não exigindo da caixa alta resistência na direção topo/base. Além disso, as concentrações de tensões provocadas pelo peso do produto e o formato das bordas das latas, nas paredes e fundo da caixa, exigem um boa resistência ao esmagamento do papelão ondulado.

Para produtos incapazes de suportar as cargas de empilhamento, tais como, produtos hortícolas, cartuchos em geral, biscoitos, etc., a utilização da onda **A** ou **C** é a mais indicada. Como a onda **A** não é utilizada no Brasil, a onda **C** tem sido largamente empregada para produtos que requerem resistência da caixa no empilhamento (PICHLER, 1987).

3.5 A embalagem de papelão ondulado

Uma das vantagens do papelão ondulado é a facilidade que oferece para a fabricação de caixas com diferentes estilos e uma grande variedade de acessórios internos.

Os diferentes estilos de caixas e acessórios internos são padronizados e codificados pela FEFCO (*Federation Européene des Fabricantes de Carton Ondulé*) e publicados no *International Fiberboard Case Code* (ASSCO & FEFCO, 1987). Esta publicação substitui longas e complicadas descrições de caixas e acessórios, por quatro números internacionalmente conhecidos.

No Brasil é adotada a codificação empregada pela FEFCO, sendo que os códigos dos modelos de caixas que não constam da classificação européia são precedidos da letra B (ABNT, 1974).

A caixa de código 0201, também chamada de caixa normal, é a mais usada, uma vez que sua construção é a mais econômica. Esta caixa consiste basicamente de uma peça com junta grampeada ou colada, com abas na parte superior e/ou inferior.

Os outros tipos de caixas de papelão ondulado existentes no mercado são: telescópicas, envoltório, gavetas, rígidas e pré-montadas. É usada, também, uma série de acessórios internos de papelão ondulado dependendo da aplicação das caixas.

3.6 Ensaios de avaliação de estruturas e embalagens de papelão ondulado

Há uma série de ensaios padronizados para avaliação do papelão ondulado e suas embalagens. A especificação de um ou outro ensaio irá depender do uso final.

Diferentemente de outros países, como os Estados Unidos da América e países da Europa que instituíram especificações em âmbito de organizações (Regra 41 nos EUA e FEFCO na Europa), no Brasil as especificações se desenvolveram em âmbito dos usuários, onde cada um instituiu seus próprios critérios.

Durante muitos anos, o ensaio de resistência ao arrebentamento (teste de Mullen) foi considerado o ensaio mais importante para o papelão ondulado, tanto que a Regra 41 apenas se baseava neste ensaio. A resistência ao arrebentamento é definida como a pressão necessária para romper o papelão ondulado, quando aplicada através de uma membrana de borracha em condições padronizadas (ABNT, 1981b). O sucesso deste ensaio tinha como base o fato de que os papéis *kraft*, de mesma gramatura, apresentavam desempenho semelhante no empilhamento.

Com o avanço da tecnologia para obtenção de papéis com resistência ao empilhamento mais altos, independentemente do valor de gramatura, e com o aumento da

participação de fibras secundárias, a especificação do papelão ondulado com base no ensaio de arrebentamento tem sido questionada. Hoje, o resultado desse ensaio está mais relacionado com a resistência ao manuseio das caixas, enquanto o desempenho no empilhamento tem sido relacionado com a resistência à compressão de coluna do papelão ondulado e resistência à compressão da caixa (PICHLER, 1987).

O ensaio de resistência à compressão de coluna do papelão ondulado, consiste basicamente em determinar a força necessária para colapsar um corpo-de-prova de papelão ondulado, com a largura perpendicular à força de compressão, entre duas placas planas e paralelas (ABNT, 1981c).

Várias metodologias têm sido propostas para a determinação da resistência à compressão de coluna, onde as modificações mais significativas são no tamanho e formato do corpo-de-prova. De acordo com McKEE *et al.* (1963), os métodos de ensaio mais adequados são os que especificam o reforço das bordas do corpo-de-prova com parafina ou os que especificam um entalhe no corpo-de-prova para orientar o colapso, uma vez que evitam a flambagem do corpo-de-prova durante o ensaio.

O ensaio de resistência à compressão da caixa é realizado com a caixa montada e fechada. A caixa é submetida à força de compressão, entre duas placas planas e paralelas, até o colapso, conforme especificado na norma NBR 6739 da ABNT (ABNT, 1981a).

Outro ensaio relacionado com o desempenho do papelão ondulado no empilhamento é o ensaio que mede a rigidez à flexão do papelão ondulado, uma vez que o abaulamento dos painéis das caixas diminui sua resistência à compressão. A rigidez à flexão é diretamente proporcional à espessura da estrutura de papelão ondulado e à qualidade da capa e do miolo (McKEE *et al.*, 1963).

A medida de rigidez mais aceita internacionalmente é a determinada com o papelão ondulado submetido à flexão em quatro pontos, efetuada conforme a norma TAPPI T 820 cm-85 (TAPPI, 1994c).

Ensaio de gramatura, espessura, taxa de absorção de água (teste de Cobb) e teor de umidade são ensaios usados para caracterização do papelão ondulado, sendo efetuados principalmente pelo fabricante (MARCONDES, 1994, JÖNSON, 1999).

3.7 Ensaio para avaliação dos componentes do papelão ondulado

A resistência à compressão de coluna do papelão ondulado e, conseqüentemente, a resistência à compressão da caixa dependem da resistência à compressão do papel capa e do papel miolo.

Embora o desempenho do papel sob tração já tenha sido largamente estudado, seu desempenho em compressão só começou a ser avaliado nos últimos 20 anos, pela dificuldade dessa determinação. Vários trabalhos foram realizados procurando-se um método de ensaio mais adequado para medir o desempenho do papel em compressão. Um dos primeiros ensaios desenvolvidos foi o de esmagamento de anel (*ring crush test*), realizado conforme a norma TAPPI T 818 om-87 (TAPPI, 1994e). Este ensaio mostrou-se inadequado para avaliar o real potencial do papel em suportar forças de compressão, uma vez que a largura do corpo-de-prova permite a sua flexão antes de colapsar, principalmente para papéis de baixa gramatura (SETH, 1984).

Para evitar esse problema, CLAVIN & FELLERS (1975) desenvolveram um ensaio denominado “*short span test*”, no qual o comprimento do corpo-de-prova sob compressão é de apenas 0,7mm, o que impede sua flexão durante o ensaio, resultando em valores reais de resistência à compressão. Entretanto, o sistema usado para prender o corpo-de-prova não permite medir propriedades de elasticidade do papel.

GUNDERSON (1983) desenvolveu no *Forest Products Laboratory - Madison - WI, EUA*, um outro equipamento para medir a resistência à compressão de papéis. Neste equipamento, o corpo-de-prova é preso sob vácuo e suportado lateralmente, evitando-se assim sua flexão, sem no entanto criar tensões que poderiam ser transferidas ao corpo-de-prova. O equipamento emprega um novo conceito de suporte lateral ajustável e possibilita

medir a deformação independente de tensões geradas para prender o corpo-de-prova. Desta forma, é possível obter uma curva de compressão x alongamento e, por meio do modelo matemático desenvolvido por URBANIK (1982), determinar a rigidez à compressão e o módulo de elasticidade do papel. Outra vantagem do equipamento desenvolvido por GUNDERSON (1983) é que o sistema utilizado para prender o corpo-de-prova, sob vácuo, permite o rápido equilíbrio do papel com diferentes ambientes de umidade relativa .

O desempenho do papelão ondulado em compressão depende, também, da rigidez de seus componentes, principalmente dos papéis capa (CONSIDINE *et al.*, 1989).

Existem vários métodos para medir a rigidez do papel. Todos usam uma tira de papel, de dimensões padronizadas, presa em uma das extremidades. O corpo-de-prova sofre deflexão por meio de uma força aplicada na extremidade livre.

Em alguns casos a força é mantida constante e mede-se a deflexão angular resultante. Em outros, como no equipamento tipo Taber, mede-se a força necessária para produzir uma deflexão em um ângulo predeterminado (ABNT, 1984, TAPPI, 1994g).

3.8 Condicionamento do papelão ondulado e seus componentes para ensaio

A pasta celulósica, embora insolúvel, possui grande afinidade com a água. A água tende a enfraquecer as ligações entre as fibras do papel, alterando o seu comportamento mecânico e a sua estabilidade dimensional. Desta forma, as características de resistência do papelão ondulado e de seus componentes dependem do seu teor de umidade.

A pasta celulósica e o papel, quando secos, absorvem água do ambiente a que estão expostos até atingirem o equilíbrio higroscópico. Se a umidade do ar diminuir, estes materiais irão perder água para o ambiente até que o equilíbrio seja novamente restabelecido. Entretanto, os teores de umidade de equilíbrio, nos dois casos, não serão os mesmos. O teor de umidade de equilíbrio obtido na absorção de água destes materiais é menor que o valor obtido pela dessorção de água, fenômeno este conhecido como *histerese* (ARDITO *et al.*, 1988).

Portanto, as propriedades de resistência do papelão ondulado e de seus componentes não dependem apenas das condições de umidade relativa do ambiente, mas também, do sentido de chegada à umidade de equilíbrio.

Essa situação é contornada, durante os ensaios de laboratório, pelo pré-condicionamento seguido do condicionamento dos materiais, o que garante que no momento do ensaio as características do papelão ondulado são relativas à curva de adsorção de umidade.

As normas TAPPI T 402 om-93 (TAPPI, 1994f) e ASTM D 685-93 (ASTM, 1997) estabelecem $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 2\%$ UR para a condição de condicionamento e 22 a 40°C e 10 a 35% UR, para o pré-condicionamento, para todos os materiais à base de celulose.

No Brasil, a norma NBR 6740 da ABNT especificava, até 1993, $65\pm 2\%$ para a umidade relativa e $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ para a temperatura como condição de condicionamento, para os materiais celulósicos. A partir de 1994, com a revisão da norma, a atmosfera normalizada para papel, cartão e celulose, passou a ser também de $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ para a temperatura e $50\pm 2\%$ para a umidade relativa com a seguinte ressalva: “ para países de clima tropical, é permitido o uso de atmosfera de $(27\pm 1)^{\circ}\text{C}$ para a temperatura e $(65\pm 2)\%$ para a umidade relativa” (ABNT, 1994).

No caso do papelão ondulado, até o momento, permanece a NBR 6733 (ABNT, 1983), que estabelece $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ para a temperatura e $(65\pm 2)\%$ para a umidade relativa.

Como condição de pré-condicionamento, a NBR 6733 e a NBR 6740 estabelecem de 10 a 35% para a umidade relativa e temperatura não superior a 40°C .

3.9 Desenvolvimento estrutural de caixas de papelão ondulado

As caixas de papelão ondulado são estruturas de engenharia sendo que muitos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de otimizar seu desenvolvimento. McKEE *et al.* (1963), baseando-se no desempenho de materiais ortotrópicos à flambagem,

desenvolveram uma fórmula para determinar a resistência à compressão de caixas de papelão ondulado a partir da resistência à compressão de coluna e rigidez do papelão ondulado e da geometria da caixa, apresentada na Equação (1).

$$C = k \cdot c^a (\sqrt{D_1 \cdot D_2})^b \cdot Z^c \quad (1)$$

onde:

C = resistência à compressão da caixa (lbf)

c = resistência à compressão de coluna (lbf/pol)

D₁ = rigidez do papelão ondulado perpendicular às ondas (lbf.pol)

D₂ = rigidez do papelão ondulado na direção paralela às ondas (lbf.pol)

Z = perímetro da caixa (pol)

K, a, b e c são constantes experimentais e os valores determinados por McKEE *et al.* (1963) foram:

$$K = 2,028 ; \quad a = 0,746 \quad ; \quad b = 0,254 \quad e \quad c = 0,492$$

Durante a análise de dados obtidos com a Equação (1), McKEE *et al.* (1963) verificaram que havia uma correlação entre as propriedades da estrutura de papelão ondulado e sua geometria, o que permitiu sua simplificação. Na simplificação da Equação (1), a resistência à compressão da caixa passou a ser expressa em termos da espessura do papelão ondulado em lugar de sua rigidez, conforme apresentado na Equação (2).

$$C = k \cdot c \cdot e^{0,508} \cdot Z^{0,492} \quad \text{ou} \quad C = k \cdot c \cdot \sqrt{e \cdot Z} \quad (2)$$

onde:

C = resistência à compressão da caixa (lbf)

c = resistência à compressão de coluna do papelão ondulado (lbf/pol)

e = espessura do papelão ondulado (pol)

Z = perímetro da caixa (pol)

Para as unidades citadas o valor de k é igual a 5,87.

A Equação (2), embora largamente empregada pela indústria de papelão ondulado, até hoje, tem algumas limitações tais como: 1) sua aplicação não permite otimizar o desempenho dos componentes do papelão ondulado, 2) só é válida para caixa tipo normal (0201) quando o comprimento da caixa não excede a três vezes sua largura e o perímetro não excede a sete vezes sua altura e 3) foi desenvolvida em condições constantes de umidade relativa (URBANIK, 1996b).

KONING (1975) expandiu a fórmula de McKEE *et al.* (1963), incluindo as propriedades de resistência à compressão do papel capa para determinar o desempenho das caixas de papelão ondulado em compressão. Embora tenha encontrado boa correlação entre os dados teóricos e os práticos (KONING, 1978), as conclusões foram muito limitadas considerando-se o número de variáveis possíveis na fabricação das estruturas de papelão ondulado.

JOHNSON *et al.* (1980) foram além e desenvolveram um modelo que incluía os dados obtidos na curva tensão x alongamento dos papéis capa e miolo e a geometria da estrutura. Este modelo podia ser incorporado a um programa de elementos finitos e assim permitir prever o comportamento de estruturas de papelão ondulado multicamadas, variando-se a espessura de seus componentes. URBANIK (1981a) utilizou o mesmo programa para prever a resistência à compressão de coluna do papelão ondulado, variando-se a curva tensão x alongamento e a espessura dos componentes (papel capa e miolo).

A aplicação do método de elementos finitos tem se mostrado mais eficiente para calcular as propriedades de compressão de estruturas de papelão ondulado que a fórmula de McKEE *et al.* (1963) baseada em tentativa e erro. Entretanto, é necessário um

conhecimento mais profundo das propriedades do papelão ondulado e dos fatores que afetam essas propriedades para tornar possível a aplicação do método de elementos finitos para o desenvolvimento de estruturas de papelão ondulado (JÖNSON, 1999).

3.10 Fatores que influenciam o desempenho de caixas de papelão ondulado em compressão

A extrapolação de resultados obtidos em ensaios de laboratório para situações reais, quando se visa à especificação ou projetos de sistemas de engenharia, está sempre sujeita a variáveis ligadas a condições de uso nem sempre previsíveis ou reproduzíveis.

Da mesma forma, o desenvolvimento de caixas de papelão ondulado, com base em ensaios em condições padronizadas, garante a realização de ensaios em condições próximas às de máxima resistência do material e permite o intercâmbio de resultados obtidos em diferentes laboratórios, mas não permite a reprodução de condições reais de variações na umidade relativa do ambiente e tempo de estocagem, nem considera fatores inerentes ao próprio sistema, como o tipo de conteúdo e empilhamento (PICHLER, 1987).

Para compensar as diferenças entre os resultados obtidos em laboratório e os de desempenho em condições reais de uso, no cálculo estrutural das caixas de papelão ondulado aplicam-se fatores de correção aos dados obtidos em condições padronizadas.

Os fatores que mais influenciam a resistência à compressão de caixas de papelão ondulado são: umidade relativa, tempo de estocagem, forma de empilhamento, tipo de manuseio e tipo de produto. A Tabela 1 apresenta a resistência à compressão remanescente obtida a partir dos dados de resistência medidos em laboratório, após a caixa estar sujeita a cada um desses fatores. Os dados da Tabela 1 são resultados de experimentos e observações realizadas pelo Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA), do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), Campinas-SP (BORDIN & GARCIA, 1992).

TABELA 1. Fatores de correção usados no desenvolvimento estrutural de caixas de papelão ondulado.

Parâmetro	Resistência à compressão remanescente (%)
Umidade relativa	
50%	114
65%	100
75%	91
90%	57
90% e 5°C	51
Tempo de estocagem	
Uma semana	65
Um mês	60
Três meses	55
Um ano	50
Tipo de empilhamento	
Colunar	95
Colunar com sobrepalete	90 a 60
Cruzado	50
Cruzado com sobrepalete	48 a 40
Tipo de manuseio	
Normal	80
Severo	60
Característica do produto	
Sustentável	130
Não sustentável	100

Fonte: BORDIN & GARCIA (1992).

A partir da resistência à compressão de caixas de papelão ondulado, determinada em condições padronizadas de laboratório, pode-se calcular a susceptibilidade dessas caixas suportarem as condições reais de estocagem e transporte, empregando-se os dados da Tabela 1. Pode-se, também, determinar a resistência que a caixa deverá apresentar nos ensaios de laboratório, para um sistema de distribuição caracterizado, possibilitando mudanças na caixa ainda na fase de desenvolvimento.

Entretanto, o aumento no número de produtos danificados no mercado, à medida que novos materiais são introduzidos, demonstram que o procedimento usado, até hoje, para o desenvolvimento de caixa de papelão ondulado precisa ser melhor estudado (JÖN SON, 1999).

A causa do aumento no número de produtos danificados no mercado pode ser devido a: (1) o uso de fatores que não refletem a realidade a que os produtos ficam sujeitos no sistema de distribuição, e (2) a não eficiência do ensaio de compressão de caixas para avaliar o desempenho do papelão ondulado no empilhamento (JÖN SON, 1999).

Faz-se, portanto, necessário um estudo mais amplo dos parâmetros que influenciam o desempenho de caixas de papelão ondulado no sistema de distribuição, bem como o estudo de métodos de ensaio que reflitam melhor o desempenho do papelão ondulado em compressão.

É extremamente importante que a indústria siga de perto esses desenvolvimentos, uma vez que irão influenciar o surgimento de novos materiais e embalagens, bem como o desenvolvimento de novos métodos de ensaio.

3.11 Efeito da umidade relativa no desempenho do papelão ondulado

Dos parâmetros que influenciam o desempenho do papelão ondulado, um dos mais importantes a ser estudado é a umidade relativa, uma vez que não é possível seu controle durante toda a cadeia de distribuição.

Sabe-se que os materiais à base de celulose, como o papelão ondulado, absorvem água do ambiente a que estão expostos até atingir o equilíbrio. A água enfraquece as ligações entre as fibras de celulose e, conseqüentemente, diminui as propriedades físico-mecânicas dos materiais.

WINK (1961) estudou o desempenho do papel em diferentes umidades relativas constantes e concluiu que o papel apresenta transformações irreversíveis de suas

propriedades físico-mecânicas, quando exposto a condições de umidade relativa superior a 65%. Foi, também, demonstrado que as propriedades físicas do papel são mais sensíveis à mudança de umidade que de temperatura. Mais tarde, BENSON (1971) também demonstrou uma mudança irreversível nas características do papel, quando exposto a ambientes com alta umidade relativa. Seu trabalho mostrou que: (1) as propriedades de tração do papel estão relacionadas com seu conteúdo de umidade, e (2) o conteúdo de umidade do papel é mais indicado para prever o comportamento do papel que a umidade relativa do ambiente, tomando-se por base a isoterma de sorção de umidade.

DE RUVO *et al.*(1976) publicaram um estudo bastante completo sobre o comportamento do papel e da celulose em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. As principais conclusões desse estudo foram: (1) existe uma correlação direta entre as propriedades elásticas do papel e sua higroexpansão, (2) a relação entre as propriedades do papel para na direção de fabricação (DF) e na direção transversal à fabricação (DT) muda com a absorção de água, e (3) a celulose apresenta comportamento irregular durante a absorção/dessorção de água, indicando que há um comportamento transitório na sorção de umidade.

MILTZ (1981) estudou o comportamento do papelão ondulado, fabricado com capa de papel *kraft* e miolo semiquímico, em diferentes condições de umidade relativa e concluiu que a resistência ao arrebentamento (*Mullen test*) e a resistência à perfuração (*Puncture test*) atingem seu valor máximo em ambientes de 60 a 70% UR. A resistência à compressão das caixas e a resistência ao esmagamento de onda do papelão ondulado diminuem à medida que aumenta a umidade relativa.

BACK (1985) comparou a resistência à tração e a resistência à compressão de papéis expostos a diferentes ambientes de umidade relativa constante. Ele concluiu que a resistência à compressão é mais adversamente afetada pela umidade que a resistência à tração e que, para condições constantes de umidade relativa, as propriedades de tração e compressão são função da umidade de equilíbrio no momento do ensaio, não importando o seu histórico. FELLERS *et al.*(1985) concluíram que a resistência à compressão é função da

umidade relativa do ambiente e que o valor será maior, se o equilíbrio foi obtido por adsorção ao invés de dessorção, devido ao efeito de histerese.

GUNDERSON *et al.*(1988) examinaram o comportamento de papel capa *kraft* e papel miolo semiquímico quando submetidos à compressão utilizando diferentes velocidades de ensaio e duas condições constantes de umidade relativa, 50 e 90% UR. Os resultados mostraram um comportamento de natureza viscoelástica não-linear para os dois materiais, sendo que a resistência à compressão e a rigidez em compressão aumentaram logaritmicamente com o aumento da velocidade de ensaio, enquanto a porcentagem de alongamento diminuiu. O efeito da velocidade de ensaio foi mais significativo a 90% UR que a 50% UR.

Os trabalhos já citados foram desenvolvidos em condições constantes de temperatura e umidade relativa. Entretanto, trabalhos de vários pesquisadores têm demonstrado a importância de se estudar o comportamento de materiais celulósicos em umidade cíclica (SYMPOSIUM, 1992). As conclusões desses trabalhos têm trazido informações fundamentais para o estudo do comportamento de sorção mecânica dos materiais celulósicos. Sorção mecânica é o efeito sinérgico da umidade relativa do ambiente e de uma força aplicada, no desempenho físico-mecânico do material, sendo que não pode ser previsto pela soma do desempenho do material exposto a cada fator separadamente.

3.12 Efeito de condições de umidade cíclica no desempenho do papelão ondulado

Durante a estocagem, transporte e distribuição, as caixas de papelão ondulado ficam sujeitas a flutuações nas condições de temperatura e umidade relativa. Essas flutuações podem ter origem natural ou artificial e ocorrem em várias frequências (SYMPOSIUM, 1992).

Exemplos de flutuações naturais são as mudanças que ocorrem no clima diariamente ou mesmo durante mudanças de estações, podendo a umidade relativa variar de 45 a quase 100% UR e a temperatura de 22 a 40°C em poucos dias. As caixas de papelão são, ainda,

sujeitas a condições artificiais de mudanças de temperatura e umidade relativa, quando são estocadas em ambientes refrigerados, como no caso de produtos hortigranjeiros e carnes, e trazidas para condições-ambiente, durante o manuseio e transporte.

Quando submetido a uma carga, como no caso do empilhamento de caixas, em ambiente com umidade cíclica, o papelão “incha” e “contraí” à medida que ganha ou perde água, ocorrendo progressivamente uma diminuição irreversível na altura da caixa. O fenômeno conhecido como fluência (*creep*) é um exemplo do resultado do comportamento de sorção mecânica dos materiais celulósicos. A Figura 1 apresenta as três fases da fluência do papel (CONSIDINE *et al.*, 1989).

Na fase primária, o papel flui lentamente apenas pelo efeito da absorção/dessorção de umidade, na fase secundária ou fase estacionária a velocidade de fluência é constante, até atingir a fase terciária que precede o colapso do material.

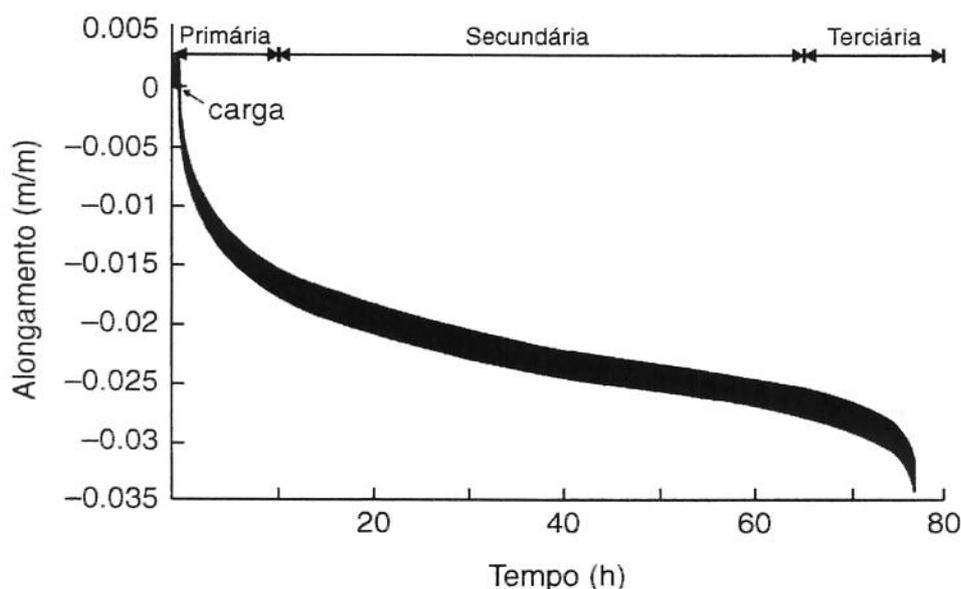


FIGURA 1. Comportamento típico do papel durante o ensaio de fluência, realizado com variações senoidais de umidade entre 50 e 90% UR, a cada 10 minutos.

Fonte: CONSIDINE *et al.*(1989).

BYRD (1972) comparou o desempenho do papelão ondulado em compressão, em umidade relativa constante de 90% UR e sob condições de umidade cíclica, com variações de 35 a 90% UR, e concluiu que o papelão irá apresentar maior taxa de fluência e colapsar mais rapidamente em ambiente com umidade cíclica, mesmo que o conteúdo de umidade médio seja menor do que em condições de umidade alta.

BYRD & KONING (1978) demonstraram que a taxa de fluência de amostras de papelão ondulado submetidas ao ensaio de compressão de coluna (ECT) em condições de umidade cíclica, com variações de 35 a 90% UR, foi 3 a 14 vezes maior em relação à obtida com amostras similares ensaiadas em condições constantes de 90% UR. Nesse mesmo estudo, os autores verificaram que quanto maior a porcentagem de pasta mecânica ou reciclada utilizada nos componentes do papelão ondulado, maior a velocidade de fluência da estrutura. Essa conclusão não foi evidente para as amostras ensaiadas em condições constantes de 90% UR. O autores concluíram, ainda, que a velocidade de fluência e colapso de um material, submetido a condições cíclicas de umidade, dependem do período em que as variações de umidade ocorram. Quanto maior o período, mais rapidamente ocorre a fluência do material.

BYRD (1984) mediu a taxa de fluência em estruturas de papelão ondulado e a taxa de fluência de seus componentes (papel capa e miolo), submetidos à compressão em umidade cíclica e concluiu que para a estrutura de papelão ondulado a taxa de fluência foi de 2 a 5 vezes maior do que a prevista com base na fluência de seus componentes, ou seja, a deformação dos componentes do papelão ondulado foi mais lenta do que a obtida para a estrutura. A explicação para este fato pode estar no trabalho de BYRD & KONING (1978), que demonstraram que devido à espessura da estrutura de papelão ondulado ser maior que a espessura de seus componentes, o período com que ocorrem as variações de umidade na estrutura de papelão é maior que o período com que ocorrem variações de umidade em seus componentes, portanto, espera-se que a taxa de fluência da estrutura seja maior.

GUNDERSON & CONSIDINE (1986), utilizando o mesmo princípio empregado por GUNDERSON (1983) para prender o corpo-de-prova sob vácuo, desenvolveram um

equipamento para determinar a taxa de fluência do papel, sob compressão, em umidade cíclica. Preso sob vácuo, para evitar flambagem durante o ensaio, o corpo-de-prova é submetido a uma carga constante controlada por um computador que também controla a umidade relativa. CONSIDINE *et al.* (1989), utilizando esse equipamento, estudaram a taxa de fluência de dois papéis capa *kraft*, quando submetidos a uma carga igual a 38-43% do valor obtido no ensaio de compressão realizado em condições padronizadas de 50% UR. A umidade variou de 50 a 90% UR, em ciclos senoidais, com duração de 10 minutos cada ciclo. Várias conclusões foram tiradas deste estudo sendo as principais: (1) para os materiais ensaiados, o nível de carga aceitável para o ensaio de fluência foi de 30% da resistência máxima obtida no ensaio de compressão realizado a 50% UR, cargas maiores resultaram em colapso do material muito rápido, em alguns casos, já no primeiro ciclo de umidade; (2) sob umidade cíclica, o material colapsou de 2 a 3 vezes mais rápido do que em umidade estática; (3) a fluência do papel capa foi acompanhada por uma acentuada diminuição na sua rigidez à compressão havendo, portanto, uma boa correlação entre a fluência do material e sua perda de rigidez em compressão; e (4) a taxa de fluência do papel capa e a diminuição da sua rigidez em compressão são bons indicadores do tempo de falha dos componentes do papelão em umidade cíclica.

É esperado que períodos curtos de oscilação de umidade causem uma maior velocidade de fluência nos materiais celulósicos, uma vez que, maior perda/ganho de umidade ocorrem em um curto intervalo de tempo, conforme o encontrado por GUNDERSON & TOBEY (1990) para papel *kraft*. Entretanto, para estruturas de papelão ondulado, se o período for muito curto para ocorrer a difusão de umidade até o equilíbrio, o material sofrerá pouca influência das oscilações de umidade.

Este fato foi confirmado em trabalho realizado por LEAKE & WOJCIK (1993) que demonstraram que caixas de papelão ondulado submetidas a ensaio de compressão em umidade cíclica, com oscilações entre 50 e 90% UR a cada 12, 24 e 48 horas, colapsaram em 15, 5 e 3 dias, respectivamente, indicando que ciclos longos aumentam o conteúdo médio de umidade do papelão ondulado por ciclo e, portanto, aumentam sua taxa de fluência.

URBANIK & LEE (1994), baseando-se nos resultados dos trabalhos de GUNDERSON & TOBEY (1990) e LEAKE & WOJCIK (1993), afirmaram que os ensaios em umidade cíclica, com períodos fixos de variação de umidade, não refletiam adequadamente a difusão de umidade e a fluência de embalagens de papelão ondulado e outros produtos de madeira.

URBANIK & LEE (1994) propuseram, então, oscilações senoidais de umidade nas quais a frequência das oscilações varia logaritmicamente com o tempo. Trabalhos realizados por LAUFENBERG (1991) e GUNDERSON & LAUFENBERG (1994) demonstraram que em câmaras nas quais a umidade cíclica é controlada eletronicamente é possível controlar as variações da umidade relativa, de modo que sigam uma forma senoidal. Os resultados obtidos, nesses trabalhos, foram melhores que os encontrados em ensaios nos quais a umidade relativa oscilou em ciclos com período constante.

Empregando variações de umidade na forma senoidal, nas quais a frequência varia logaritmicamente com o tempo, o efeito do período de cada ciclo de umidade na fluência do material tornou-se muito mais evidente. A fluência aumenta à medida que o período de variação de umidade aumenta, sendo que a fluência do material pode ser interrompida, se a umidade relativa oscilar em ciclos mais rápidos que a capacidade do material em ganhar ou perder água (URBANIK & LEE, 1994). Oscilações senoidais resultaram em uma resposta contínua das mudanças nas características do material a cada ciclo, a qual não seria possível em condições com variações de umidade em múltiplos períodos constantes.

3.13 A higroexpansividade do papelão ondulado em umidade cíclica

Como a determinação da fluência de um material é muito demorada e exige equipamentos sofisticados, CONSIDINE *et al.* (1992) procuraram demonstrar a correlação dos resultados de fluência com outras propriedades do material mais fáceis de se determinar. Nesse trabalho, estudaram-se a velocidade de fluência e a estabilidade dimensional de dois papéis capa *kraft* de 337 g/m² sob condições de umidade cíclica, com variações de 50 a 90% UR e em condições constantes de 50 e 90% UR. Os resultados do

trabalho demonstraram que existe uma correlação direta entre a higroexpansividade do material e sua taxa de fluência. A amostra com menor higroexpansividade teve melhor desempenho em todas as condições de ensaio.

De acordo com KUSKOWSKI *et al.* (1994), a baixa orientação das fibras ($DF/DT = 1,1$ a $1,5$) e um rigoroso controle das tensões, durante o processo de secagem, são dois parâmetros que reduzem consistentemente a amplitude de higroexpansão do papel e conseqüentemente sua taxa de fluência.

NISKANEN *et al.* (1994) também encontraram uma forte correlação entre a higroexpansividade do papel *kraft* e sua taxa de fluência.

Pelos dados obtidos nos trabalhos de CONSIDINE *et al.* (1992) e NISKANEN *et al.* (1994) pode-se afirmar que a “intensidade” de mudança dimensional, como resultado da sorção de umidade, é uma medida da reação e sensibilidade do papel à umidade. Higroexpansividade, definida como a diferença entre a porcentagem de alongamento do papel a 90% UR e a porcentagem de alongamento do papel a 30% UR, é mais fácil de ser entendida pela indústria e não exige equipamentos sofisticados.

FRIDLEY *et al.* (1992) definiram a taxa de fluência de um material como sendo proporcional à mudança do conteúdo de umidade em materiais com comportamento de sorção mecânica, sendo que a adsorção e a absorção causam o mesmo grau de fluência. UESAKA *et al.* (1992) demonstram haver uma relação linear entre a amplitude de higroexpansão e o conteúdo de umidade do papel.

URBANIK (1994), baseando-se nos trabalhos de FRIDLEY *et al.* (1992) e UESAKA *et al.* (1992), empregou as alterações na higroexpansão do material, para prever sua taxa de fluência em umidade cíclica, conforme modelo descrito a seguir:

$$\bar{R} = 4A\mu/P \quad (3)$$

onde \bar{R} = taxa média de fluência (mm/h)

A = amplitude de higroexpansão (mm)

μ = constante de fluência

P= período (h)

Se A e P permanecerem constantes, as variações de \bar{R} dependerão unicamente de μ . Assumindo que \bar{R} varia de uma velocidade inicial R1, quando $t = 0$, a uma velocidade constante R2, quando atinge a fase estacionária, com a variação ocorrendo de forma exponencial a um tempo τ , a Equação (3) modifica-se para:

$$\bar{R}(t) = R2 + (R1 - R2)e^{-t/\tau} \quad (4)$$

onde τ é igual a constante de tempo, ou seja, define quão rápido a fluência ocorre.

De acordo com URBANIK (1994), a Equação (4) reproduziu com precisão a resposta da taxa média de fluência de um grande número de papéis, estruturas e caixas de papelão ondulado submetidos ao ensaio de fluência em umidade cíclica.

O valor de fluência determinado pela Equação (4), para um tempo igual a 5τ , foi determinado como sendo o ponto de taxa mínima de fluência (*minimum creep rate*). De acordo com CONSIDINE *et al.* (1989), se o ensaio permite avaliar o ponto de taxa mínima de fluência do material, então, o ponto de falha poderá ser previsto com precisão ($r^2 = 0,99$).

Conforme citado, vários trabalhos foram realizados com o objetivo de estudar o mecanismo da fluência do papel em umidade cíclica. Entretanto, até o presente, o comportamento do papel e do papelão ondulado, quando submetidos a uma carga vertical e expostos a ambientes de umidade cíclica não é completamente entendido.

Há, portanto, uma necessidade urgente em se estudar o comportamento do papelão ondulado em ambiente com umidade relativa cíclica. Essa necessidade inclui, principalmente, os materiais reciclados, uma vez que as caixas de papelão ondulado terão em sua composição cada vez mais papéis reciclados.

3.14 A reciclagem do papelão ondulado

O efeito da reciclagem nas propriedades de resistência do papel e, conseqüentemente, do papelão ondulado depende do processo de polpação pelo qual as fibras foram originalmente obtidas (LAW *et al.*, 1996).

Conforme mencionado no item 2.2, os papéis capa *kraft* usados na fabricação do papelão ondulado são geralmente obtidos de árvores coníferas (fibra longa) pelo processo químico, podendo receber uma certa quantidade de celulose de fibra curta, também obtida por processo químico.

Na polpação química, a remoção da lignina e das hemiceluloses resulta em fibras porosas e flexíveis, as quais se ligam fortemente apresentando um colapso irreversível, durante o processo de secagem do papel. Desta forma, o efeito da reciclagem nas propriedades físicas de papéis fabricados a partir de pasta química é muito mais severo que para papéis fabricados a partir de polpa mecânica, nos quais há apenas a moagem da madeira para separação das fibras. Na reciclagem, quanto maior o grau de ligação e colapso das fibras originais, menor sua capacidade de "inchamento", o que diminui a força de ligação das fibras recicladas e, conseqüentemente, sua resistência mecânica (JANG *et al.*, 1994; PHIPPS, 1994; NAZHAD & PASZNER, 1994; WOODWARD, 1996; LAW *et al.*, 1996; JÖN SON, 1999).

Trabalhos realizados no *Forest Products Laboratory - Madison- WI*, EUA, por KONING & GODSHALL (1975), demonstraram que a máxima redução nas propriedades de resistência do papelão ondulado ocorre na primeira reciclagem, em parte pelo processo de reciclagem e em parte pelo fato de que a capa reciclada irá conter fibras curtas provenientes do miolo da estrutura virgem. Nas reciclagens subseqüentes as perdas são bem menores.

Segundo KROESCHELL (1992), apenas 12% das fibras se reciclam mais que duas vezes. Também, à medida que as fibras são recicladas, diminuem de tamanho de modo que se forem recicladas muitas vezes acabam se perdendo durante o processo de fabricação do

papel. Estes dados estão de acordo com HORN (1975), que encontrou uma maior diminuição na densidade do papel após a primeira reciclagem que nas subseqüentes.

A refinação das fibras recicladas melhora sua capacidade de ligação. Entretanto, após atingir o ponto máximo, as propriedades de resistência começam a declinar, pois as fibras tornam-se muito curtas (LUMIAINEN, 1994).

FAHEY & BORMETT (1982) encontraram que a resistência à compressão de caixas de papelão reciclado pós-consumo é 30% menor que a resistência à compressão de caixas fabricadas com papelão virgem, quando o ensaio é realizado a 50% UR. A resistência ao arrebentamento foi 20% menor para o papel capa reciclado que para o papel capa virgem, a resistência ao esmagamento de anel (*ring crush test*) foi 29% menor e a resistência ao esmagamento da onda da estrutura foi 25% menor. As caixas de papelão ondulado virgens foram fabricadas com papel capa *kraft* de fibra longa (pinus) e papel miolo semiquímico de madeira folhosa (fibra curta). As caixas de papelão recicladas foram fabricadas com capa e miolo reciclados de papelão ondulado pós-consumo. Para as duas estruturas a gramatura do papel capa foi de 205g/m² e do papel miolo de 127g/m².

Impulsionadas por leis ambientais, as fábricas de papel estão cada vez mais colocando no mercado produtos à base de fibras recicladas. O efeito do aumento do uso de fibras recicladas no desempenho do papelão ondulado ainda é pouco conhecido.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Componentes do papelão ondulado

Utilizaram-se, neste estudo, dois tipos de papéis capa e dois tipos de papéis miolo, fornecidos pela *CKPG - Containerboard and Kraft Paper Group, Washington, DC, EUA*. Todos os papéis eram comercialmente disponíveis e foram produzidos em condições normais de fabricação.

Os papéis estudados foram: (1) papel capa virgem, produzido a partir de fibra longa (*softwood*) pelo processo *kraft*, com gramatura de 205g/m^2 , codificado como **VL205**; (2) papel capa reciclado, produzido com fibras 100% recicladas de papelão ondulado pós-consumo, com gramatura de 205g/m^2 , codificado como **RL205**; (3) papel miolo virgem, produzido a partir de fibras curtas (*hardwood*) pelo processo semiquímico, utilizando-se como solução o licor verde do processo *kraft* (*green licor*), com gramatura de 127g/m^2 , codificado como **VM127**; (4) papel miolo reciclado, produzido com 100% de fibras recicladas, provenientes de papel e papelão ondulado pós consumo, com gramatura de 127g/m^2 , codificado como **RM127**.

4.1.2 Estruturas de papelão ondulado

Os papéis foram convertidos em cinco diferentes estruturas de papelão ondulado de parede simples, onda C, com 300mm de largura, em uma planta piloto do *Institute of Paper Science and Technology (IPST) - Atlanta-GA*, nos EUA. A colagem das capas e ondas foi efetuada com adesivo comum à base de amido, com gramatura de 10g/m^2 .

A identificação e a composição das estruturas são apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2. Estruturas de papelão ondulado

Estrutura	Capa Externa	Miolo	Capa Interna	Código
I	Virgem	Virgem	Virgem	VVV
II	Reciclado	Reciclado	Reciclado	RRR
III	Reciclado	Virgem	Virgem	RVV
IV	Virgem	Virgem	Reciclado	VVR
V	Virgem	Reciclado	Reciclado	VRR

4.1.3 Embalagens de papelão ondulado

Vinte caixas, de cada uma das estruturas em estudo, foram confeccionadas no *Forest Products Laboratory*, em um equipamento manual de corte e vinco. As caixas foram construídas sem as abas inferiores e superiores, sendo, portanto, denominadas de “tubos”. Os tubos, com comprimento, largura e altura iguais a 203,2mm, foram montados com grampos.

4.2. Metodologia

4.2.1 Condições de ensaio

Os papéis capa e miolo, as estruturas de papelão ondulado e os tubos fabricados com essas estruturas foram avaliados em três condições de umidade relativa: (1) em condição de umidade relativa constante a 23°C/50% UR, conforme norma TAPPI T 402-om93 (TAPPI, 1994f); (2) em condição de umidade relativa constante alta de 23°C/90% UR; (3) em condição de umidade relativa cíclica, com oscilações senoidais de 50 a 90% UR, a cada 12 horas.

Todos os ensaios foram efetuados nos laboratórios do *Forest Products Laboratory – Madison – WI – EUA*.

4.2.2 Avaliação dos papéis capa e miolo

Retiraram-se cinquenta metros de cada uma das bobinas dos diferentes tipos de papéis estudados, com aproximadamente 1 metro de largura, tomando-se o cuidado para que não fossem utilizados os três primeiros metros da bobina nem os três últimos, para evitar que os papéis apresentassem amassamento ou danos por manuseio inadequado.

Para cada ensaio realizado, retiraram-se corpos-de-prova, aleatoriamente, na direção de fabricação do papel (DF) e na direção transversal à fabricação (DT).

Os papéis capa e miolo foram avaliados quanto a: identificação do tipo de fibra, gramatura, espessura, taxa de absorção de água, rigidez à flexão, resistência à compressão e higroexpansividade, de acordo com as seguintes metodologias:

4.2.2.1 Identificação do tipo de fibra

O tipo de fibra de cada um dos papéis foi confirmado pela análise de microscopia eletrônica de varredura. As micrografias foram comparadas com micrografias padrões dos diferentes tipos de fibras para sua identificação (PARHAM & KAUSTINEN, 1974).

4.2.2.2 Gramatura

Pesaram-se 10 corpos-de-prova de 200 x 200mm, em balança semi-analítica com precisão de 0,01g, conforme metodologia descrita na norma TAPPI T410 om-88 *Grammage of paper and paperboard* (TAPPI, 1994d). O ensaio foi realizado a 23°C/50% UR, após condicionamento dos corpos-de-prova durante 48 horas, na mesma condição do ensaio.

4.2.2.3 Espessura

Determinou-se a espessura dos papéis capa e miolo com micrômetro de precisão de 0,001mm, operado automaticamente, de forma a exercer uma pressão sobre o corpo-de-prova de 50 ± 2 kPa por 3 ± 1 segundos, conforme norma TAPPI T411 om-89 *Thickness (caliper) of paper, paperboard and combined board* (TAPPI, 1994h). O ensaio foi realizado em dez corpos-de-prova, com dez determinações por corpo-de-prova. Realizou-se o ensaio a 23°C/50% UR, após condicionamento dos corpos-de-prova na mesma condição por 48 horas.

4.2.2.4 Absorção de água

Determinou-se a taxa de absorção de água dos papéis capa e miolo por meio do teste de Cobb, de acordo com a metodologia TAPPI T441om-90 *Water absorptiveness of sized paper and paperboard - Cobb Test* (TAPPI, 1994i).

Amostras de cada um dos papéis foram previamente pesadas em balança semi-analítica com precisão de 0,01g e fixadas em um dispositivo circular com área interna de 100cm², adicionando-se 100mL de água destilada. Após 120 segundos, a água foi retirada do dispositivo e o excesso removido com auxílio de um papel absorvente e um rolo compressor de 10kg. A diferença de peso do papel, antes e após o contato com a água, expressa em gH₂O/m², é a taxa de absorção de água.

Para os papéis miolo foram utilizados três corpos-de-prova juntos, uma vez que no tempo de ensaio ocorreu passagem de água para o dispositivo, quando utilizado apenas um corpo-de-prova. A área de ensaio para cálculo permaneceu 100cm², conforme especificado na norma.

Realizou-se um total de cinco determinações para cada lado do papel. O ensaio foi realizado a 23°C/ 50% UR, após condicionamento dos corpos-de-prova na mesma condição por 48 horas.

4.2.2.5 Rigidez à flexão

A rigidez à flexão dos papéis capa e miolo foi efetuada de acordo com a metodologia TAPPI T489 om-92 – *Stiffness of paper and paperboard* – utilizando-se o equipamento *Taber Stiffness Tester* (TAPPI, 1994g).

Este método determina o momento de flexão necessário para defletir um corpo-de-prova de $38,1 \pm 0,3$ mm de largura, 15° da sua linha de centro, com a 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 calculada pela Equação 6 (MOURAD *et al.*, 1999), como segue:

$$\Delta = F.L^3 / 3 E.I \quad (5)$$

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 constante e igual a 15° , temos $\Delta/L = \text{sen } 15^\circ$ portanto:

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

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

$$E.I_w = F.L^2 / 3 w \text{ sen } 15^\circ \text{ onde } F .L = \text{Rigidez Taber}$$

portanto:

$$E.I_w = \text{Rigidez Taber} . L / 3 w \text{ sen } 15^\circ \quad (6)$$

Dez corpos-de-prova de cada um dos papéis em estudo foram testados nas duas direções do papel, **DF** – direção de fabricação e **DT** – direção transversal, após 48h de condicionamento nas condições 23°C/50% UR e 23°C/90% UR. O ensaio foi realizado nas mesmas condições do condicionamento.

4.2.2.6 Resistência à compressão

Determinou-se a resistência à compressão dos papéis capa e miolo com o uso do equipamento VCA – *Vacuum Compression Apparatus*, desenvolvido no *Forest Products Laboratory -WI*, EUA, por GUNDERSON & CONSIDINE (1986).

O equipamento VCA consiste basicamente de uma célula de carga e um sistema para suporte do corpo-de-prova sob vácuo, fechados dentro de uma câmara com controle de umidade relativa, conforme Figura A1 do Anexo A.

O diferencial de pressão (380mmHg) entre as duas superfícies do corpo-de-prova evita a sua flexão durante o teste, melhorando os resultados do ensaio.

O diferencial de pressão cria, também, um movimento de ar através e ao redor do corpo-de-prova fazendo com que este entre em equilíbrio com a umidade relativa do ensaio muito mais rapidamente.

A força para o corpo-de-prova falhar, por compressão, foi medida por uma célula de carga e a deformação por meio de um extensômetro colocado sobre o corpo-de-prova.

A resistência à compressão foi expressa em kN/m e a deformação calculada com base no comprimento original do corpo-de-prova e expressa em porcentagem.

A dimensão do corpo-de-prova foi de 30mm de largura e 150mm de comprimento, sendo que suas extremidades foram reforçadas com verniz, de modo a garantir que a falha ocorresse no centro do corpo-de-prova.

O ensaio foi realizado a 23°C/50% UR e 23°C/90% UR, para as duas direções do papel, DF e DT. O condicionamento do papel ocorreu dentro da própria câmara do equipamento.

As curvas de resistência à compressão *versus* deformação, obtidas para cada um dos papéis em estudo, foram analisadas pelo modelo matemático desenvolvido por URBANIK (1982), descrito na Equação (7):

$$p = C_1 \tan (C_2 E / C_1) \quad (7)$$

onde:

p = resistência à compressão (kN/m)

E = deformação (%)

A constante C_2 é o gradiente da reta traçada na parte inicial da curva e representa a rigidez do material, quando submetido à força de tração ou compressão (*Extentional stiffness*), aqui denominada como Rigidez à Compressão.

A constante C_1 é o valor da resistência à compressão determinado pela assíntota da curva, quando a deformação aproxima-se do infinito.

4.2.2.7 Higroexpansividade

Este ensaio foi efetuado com o uso do equipamento VCA desenvolvido no *Forest Products Laboratory* por GUNDERSON & CONSIDINE (1986), empregando-se um corpo-de-prova de 127x127mm, conforme visto na Figura A1, do Anexo A.

O ensaio consistiu em submeter o corpo-de-prova, fixado ao equipamento sob vácuo, a 7 oscilações completas de umidade relativa entre 30 e 90% UR, com um tempo de permanência em cada umidade de 20 minutos, de modo a garantir que o corpo-de-prova atingisse o equilíbrio em cada condição.

Os corpos-de-prova foram monitorados, quanto ao seu alongamento nas direções DF e DT, pelos extensômetros colocados diretamente sobre eles. A amplitude de higroexpansão foi definida como a diferença entre o alongamento a 90% UR e o alongamento a 30% UR, para cada ciclo. Calculou-se a média da amplitude de higroexpansão entre os ciclos 3 a 7. Os dois primeiros ciclos não foram considerados para o cálculo devido às tensões residuais do processo de fabricação do papel.

Foram ensaiados dez corpos-de-prova para cada tipo de papel, sendo os resultados expressos em porcentagem.

4.2.3 Avaliação das estruturas de papelão ondulado

As estruturas de papelão ondulado foram avaliadas quanto à resistência à compressão de coluna, rigidez à flexão e determinação da taxa de fluência de acordo com as seguintes metodologias:

4.2.3.1 Resistência à compressão de coluna

Prepararam-se 16 corpos-de-prova, de $51 \pm 0,8$ mm de comprimento e $38 \pm 1,6$ mm de altura, de cada uma das estruturas de papelão ondulado, em cortador automático, conforme descrito na norma TAPPI T811 om-88 *Edgewise compressive strength of corrugated fiberboard – short column test* (TAPPI, 1994b).

Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão de coluna, utilizando-se uma prensa de compressão tipo barra de deflexão, com incremento de força de 110 ± 23 N/s.

O ensaio foi realizado a $23^\circ\text{C}/50\%$ UR e $23^\circ\text{C}/90\%$ UR, após condicionamento dos corpos-de-prova nas mesmas condições por 48 horas.

4.2.3.2 Rigidez à flexão

A rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado foi determinada de acordo com a norma TAPPI T820 cm-85 – *Flexural stiffness of corrugated board* (TAPPI, 1994c).

Analisaram-se 10 corpos-de-prova de 27,94 por 38,10cm, para as direções DF e DT do papelão ondulado. O ensaio foi efetuado aplicando-se força em quatro pontos do corpo-de-prova (*four-point-bending*) através de um dispositivo construído no *Forest Products Laboratory*, acoplado a um dinamógrafo de tração/compressão marca INSTRON.

A força para fletir o corpo-de-prova, até o colapso, foi medida através de uma célula de carga com capacidade de 500N e a deflexão por meio de um transdutor LVDT – *linear variable differential transformer*.

A rigidez à flexão foi calculada pela Equação (8):

$$D = P.0,13.L^2 / 16.y.w \quad (8)$$

onde: D = Rigidez à flexão (N.m)

P = Força de flexão (N)

L = Distância entre os suportes para flexão do corpo-de-prova (m)

y = Deflexão (m)

w = Largura do corpo-de-prova (m)

O ensaio foi efetuado a 23°C/50% UR e 23°C/90% UR, após condicionamento dos corpos-de-prova nessas condições por 48 horas.

4.2.3.3 Taxa de fluência do papelão ondulado

A determinação da taxa de fluência das estruturas de papelão ondulado foi realizada utilizando-se um equipamento desenvolvido no *Forest Products Laboratory* por GUNDERSON & LAUFENBERG (1993), denominado *XY-TABLE*, apresentado na Figura A2, do Anexo A. Neste equipamento, a deformação x tempo (*creep rate*) do material é

determinada em amostras iguais às utilizadas no ensaio de resistência à compressão de coluna, sendo denominado, portanto, de *ECT Creep Test*.

O equipamento permite a análise de 28 corpos-de-prova conjuntamente, sendo a deformação medida por um micrômetro (Schaevitz Engineering – Modelo PPD-1000), o qual integra um sensor LVDT a um mecanismo pneumático que é dirigido automaticamente sobre cada corpo-de-prova, a cada 15 segundos.

O micrômetro é controlado por um computador que faz a coleta dos dados, transformando-os em um gráfico de deformação *versus* tempo.

O ensaio foi realizado sob condições de umidade relativa cíclica, com variações senoidais de 50 a 90% UR, sendo o tempo de um ciclo completo igual a 12 horas (URBANIK & LEE, 1994).

As amostras foram submetidas a uma carga igual a 78,3 N. Este valor foi determinado com base nos dados obtidos no ensaio de resistência à compressão de coluna realizado a 23°C/50% UR, procurando-se um tempo de falha igual a 7 dias, conforme sugerido por CONSIDINE *et al.* (1992).

Analisou-se um total de 28 corpos-de-prova para cada estrutura, divididos em cinco ensaios. Cada ensaio continha de cinco a seis corpos-de-prova de cada estrutura, distribuídos aleatoriamente no equipamento.

O comportamento do material foi monitorado para cálculo da taxa mínima de fluência (*minimum creep rate*) e da amplitude de higroexpansão, de acordo com o modelo matemático descrito por URBANIK (1994).

O método para cálculo, descrito em detalhes por URBANIK (1994), envolve dois ajustes para a curva original de deflexão x tempo. O primeiro ajuste é utilizado para determinar uma curva média de fluência. Esta curva média é obtida movendo-se o gradiente de regressão linear 36 horas obtendo-se uma curva de fluência x tempo (taxa de fluência). Uma vez que os dados dessa curva não são sempre consistentes devido às flutuações na

umidade relativa ou ruído, a curva da taxa de fluência geralmente apresenta-se não-uniforme. Estas irregularidades podem introduzir valores falsos, mais altos que o real. Com o objetivo de diminuir esses desvios na curva, é feito um ajuste usando-se a Equação (9). Na Equação (9), a taxa de fluência média $\bar{R}(t)$ apresentada na Equação (4) é substituída pela constante de fluência $\mu(t)$.

$$\mu(t) = \mu_s + (\mu_i - \mu_s) \exp^{-t/\tau} \quad (9)$$

onde: μ_i = fluência inicial (mm/h)

μ_s = fluência no estado estacionário (mm/h)

τ = constante de tempo (h)

t = tempo real (h)

τ é a constante de tempo para ocorrer a mudança do estado inicial (fase primária), para o estado estacionário (fase secundária). O valor de fluência obtido através da curva originada pela Equação (9), para o tempo igual a $5 \times \tau$ é a taxa mínima de fluência (*minimum creep rate*), uma vez que está próximo ao ponto da assíntota da curva.

A Figura 2 apresenta a curva média de fluência, a curva para a taxa de fluência obtida no primeiro ajuste e a curva para a taxa de fluência ajustada pela Equação (9).

A amplitude de higroexpansão é a medida da diferença entre o alongamento do material a 90% UR e o alongamento a 50% UR, expressa em mm.

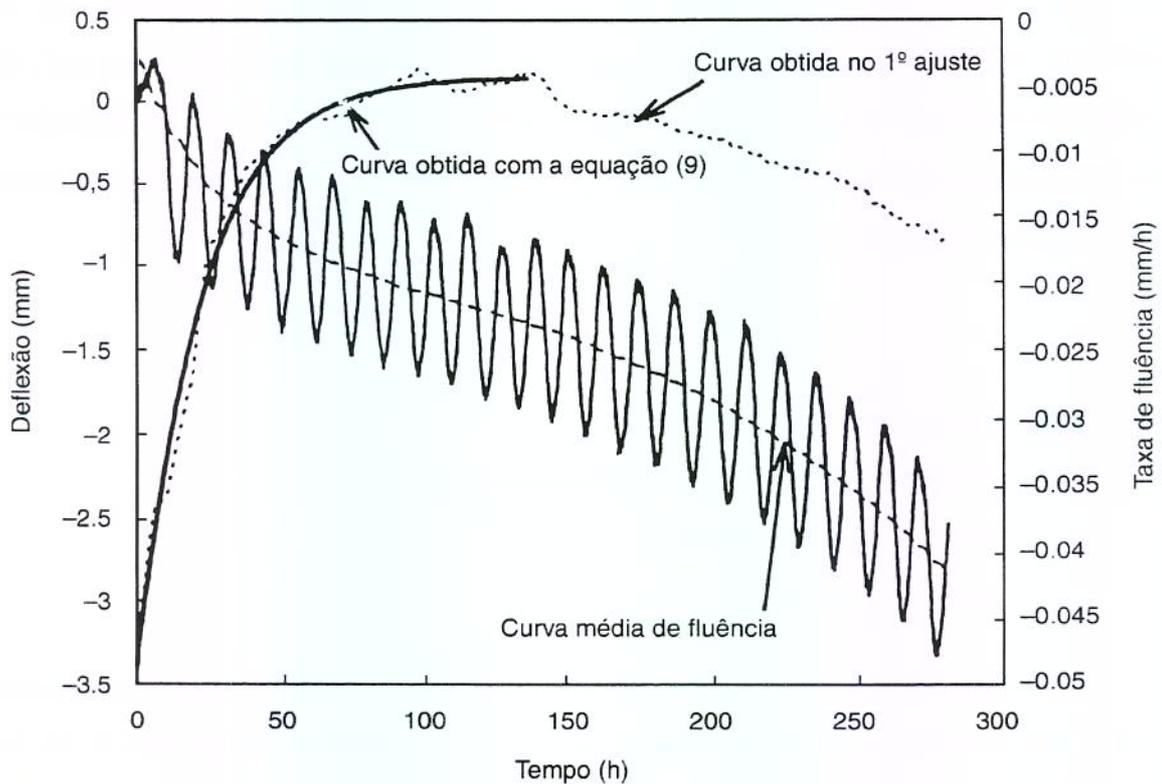


FIGURA 2. Curva característica obtida na análise dos dados de fluência.

Fonte: URBANIK, (1994).

4.2.4 Avaliação das embalagens de papelão ondulado

As embalagens (tubos) formadas com as estruturas em estudo foram avaliadas quanto à resistência à carga vertical e determinação da taxa de fluência, de acordo com as seguintes metodologias:

4.2.4.1 Resistência à carga vertical

Submeteram-se 10 embalagens de papelão, de cada uma das estruturas em estudo, ao ensaio de resistência à carga vertical, de acordo com a norma TAPPI T 804 om- 89 – *Compression test of fiberboard shipping container* (TAPPI, 1994a).

O ensaio foi realizado para a 23°C/50% UR, sendo o objetivo de sua realização fornecer dados para o ensaio de determinação da taxa de fluência das embalagens.

4.2.4.2 Taxa de fluência das embalagens de papelão ondulado

Determinou-se a taxa de fluência das embalagens de papelão ondulado, utilizando-se tubos medindo 203,2 x 203,2 x 203,2mm, cheios com grãos de soja, contidos em um saco plástico, conforme sugerido por LEAKE (1988), para simular a condição real caixa + conteúdo.

Os tubos foram submetidos a uma força constante e igual a aproximadamente 30% do valor de resistência à compressão, determinada pela norma TAPPI T 804 om-89 já descrita, sendo utilizada uma força média igual a 578 N.

Realizou-se um total de 11 ensaios. Em cada um, 6 tubos, escolhidos aleatoriamente entre as estruturas estudadas, foram ensaiados simultaneamente. A deflexão foi medida por meio de um micrômetro acoplado a um LVDT (*linear variable differential transformer*). A duração do ensaio variou de 30 a 400 horas. Neste período, nem todos os corpos-de-prova falharam. A decisão de parar o ensaio foi tomada após verificar que os 6 tubos haviam atingido a taxa mínima de fluência.

A taxa mínima de fluência e a amplitude de higroexpansão foram calculadas de acordo com procedimento descrito por URBANIK (1994), citado anteriormente para analisar os dados de fluência das estruturas de papelão ondulado.

4.2.5 Análise estatística

Os resultados dos ensaios efetuados para os papéis capa e miolo foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA), utilizando o programa *Statistica*, versão 5.0. A comparação foi efetuada separadamente para os papéis capa e

miolo, analisando o efeito do tipo de papel, da umidade relativa e a possível interação entre esses fatores.

Os resultados dos ensaios das estruturas e embalagens de papelão ondulado foram avaliados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA), utilizando-se o programa SAS versão 6.06. Os dados experimentais que apresentaram diferença significativa foram submetidos aos testes de comparação múltipla de Bonferroni ou Ryan-Einot-Grabriel -Welsch para determinar a diferença entre os resultados (CODY & SMITH, 1991).

O método de análise dependeu do tipo de ensaio, entretanto, o critério de avaliação foi o mesmo para todos os dados. Em todos os casos, as estruturas e embalagens de papelão ondulado foram consideradas estatisticamente diferentes, se a diferença existia ao nível de confiança de 95% ou mais ($p < 0,05$).

Em alguns casos, os resultados da análise estatística foram representados por gráficos de barra na forma de uma linha sólida. As barras unidas por uma mesma linha indicam as estruturas que não diferem entre si ao nível de 5% de erro.

Na análise estatística dos resultados do ensaio de taxa de fluência das estruturas e embalagens de papelão ondulado, as médias não foram comparadas diretamente entre si. Devido às diferenças no número de replicatas e posição do corpo-de-prova durante o ensaio, os dados foram ajustados pela técnica dos mínimos quadrados (*l.s.mean*) antes da comparação (CODY & SMITH, 1991).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos papéis capa e miolo

As fotomicrografias de cada um dos papéis estudados são apresentadas nas Figuras 3 a 6. A comparação da fotomicrografia do papel capa virgem (VL205) apresentada na Figura 3, com as fotomicrografias apresentadas no *Atlas of Eletron Micrographs* (PARHAM & KAUSTINEN, 1974), confirma o uso de 100% de fibras longas, provenientes de árvores coníferas, para a fabricação desse papel capa, o que lhe confere alta resistência mecânica.

A fotomicrografia do papel miolo virgem (VM127), apresentada na Figura 5, mostra fibras mais estreitas e curtas, características de fibras de árvores folhosas (PARHAM & KAUSTINEN, 1974). O uso deste tipo de fibra, embora forneça um papel de menor resistência, se explica pelo rápido crescimento de árvore desta origem, o que diminui o custo do papel.

As fotomicrografias dos papéis capa e miolo reciclados, apresentadas nas Figuras 4 e 6, respectivamente, mostram a presença de fibrilas que é característica de um maior grau de refinação necessário na reciclagem do papel (PARHAM & KAUSTINEN, 1974).

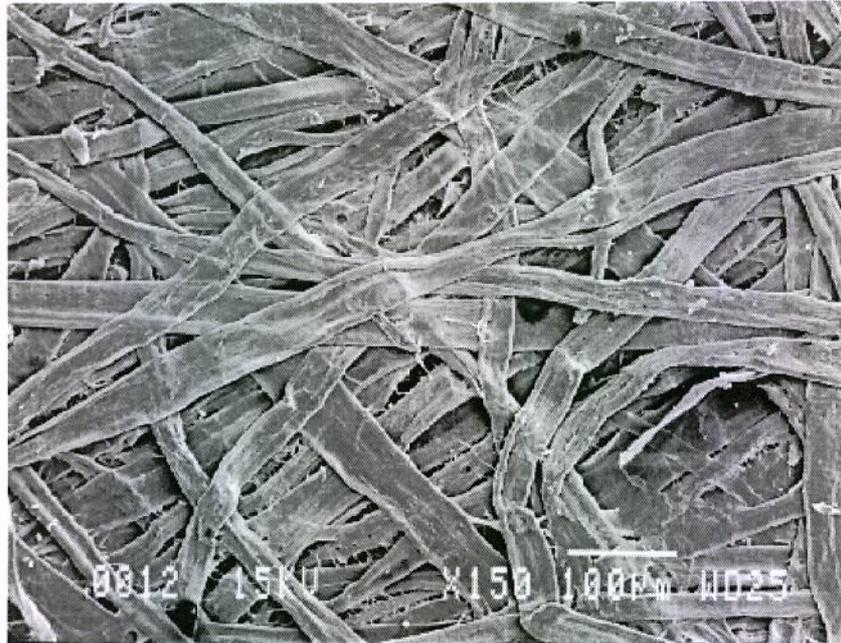


FIGURA 3 Fotomicrografia do papel capa virgem (VL205) x150 .

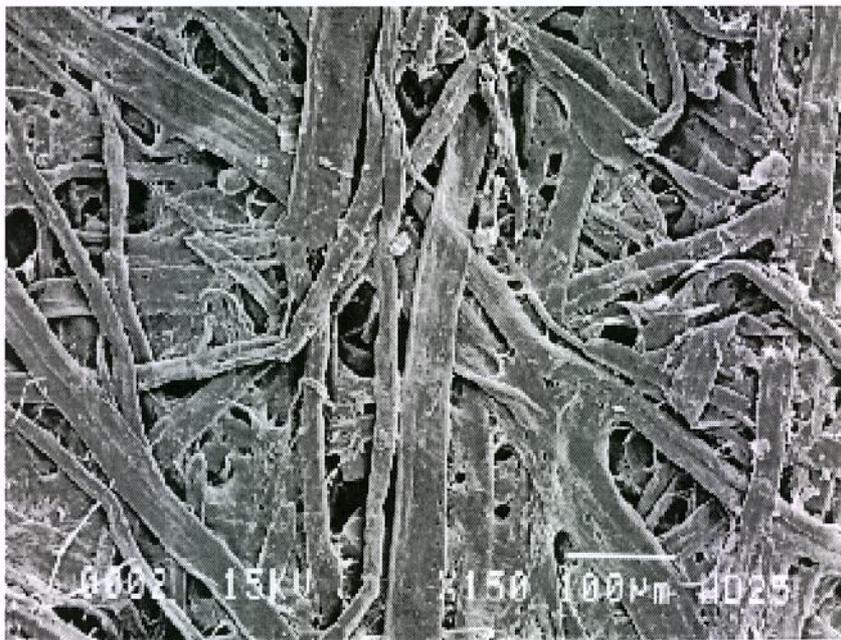


FIGURA 4. Fotomicrografia do papel capa reciclado (RL205) x 150.



FIGURA 5. Fotomicrografia do papel miolo virgem (VM127) x 150.



FIGURA 6. Fotomicrografia do papel miolo reciclado (RM127) x 150.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos na determinação da gramatura, espessura e taxa de absorção de água dos papéis capa e miolo a 23°C/50% UR.

TABELA 3. Gramatura, espessura e taxa de absorção de água dos papéis capa e miolo.

Papel	Gramatura (g/m ²)		Espessura (mm)		Taxa de Absorção de água* (g/m ²)	
	M	CV (%)	M	CV (%)	M	CV (%)
VL205	203	0,7	0,312	1,3	31,1	11,1
RL205	196	2,0	0,305	1,4	38,1	4,1
VM127	126	1,5	0,225	1,8	2100,3	6,0
RM127	125	1,5	0,211	2,0	1623,7	4,1

M = Média referente a 10 determinações

CV = Coeficiente de variação (Desvio-Padrão/Média)

* Tempo de ensaio 120 segundos

Os valores de gramatura encontrados são semelhantes aos valores nominais de cada papel capa e papel miolo utilizados. Variações de até 5% do valor nominal são aceitos comercialmente para a gramatura (ARDITO *et al.*, 1988).

A taxa de absorção de água do papel miolo normalmente é mais alta que a do papel capa, devido ao tipo de fibra e processo de fabricação empregados. Para papéis *kraft* virgens a taxa de absorção de água máxima é ao redor de 40g/m² (ARDITO *et al.*, 1988).

A Tabela 4 apresenta a rigidez à flexão dos papéis capa, na direção de fabricação (DF) e na direção transversal (DT), a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR.

TABELA 4. Rigidez à flexão dos papéis capa.

Papel	UR (%)	Direção	Rigidez à Flexão (mN.m)	
			M	CV (%)
VL 205	50	DF	10,72	3,1
		DT	4,56	2,5
RL 205		DF	6,61	2,8
		DT	3,10	5,0
VL 205	90	DF	8,68	3,8
		DT	2,85	5,3
RL 205		DF	4,80	2,5
		DT	2,02	8,8

M = Média referente a 10 determinações.

A comparação dos valores de rigidez à flexão obtidos para o papel capa virgem (VL205) e para o papel capa reciclado (RL205) demonstrou que o papel capa virgem, com mesma gramatura que o papel capa reciclado, apresentou rigidez à flexão significativamente superior ($p < 0,05$) para as duas direções ensaiadas (DF e DT). Esse comportamento foi observado a 50 e 90% UR, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8.

Para a direção DF, o papel capa virgem (VL205) apresentou menor perda de rigidez à flexão com o aumento da umidade relativa do que o papel capa reciclado (RL205), não havendo entretanto, interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa para essa direção do papel. Para a direção DT, o papel capa virgem (VL205) apresentou maior perda de rigidez à flexão com o aumento da umidade relativa do que o papel capa reciclado (RL205), havendo interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa para essa direção ($p < 0,05$).

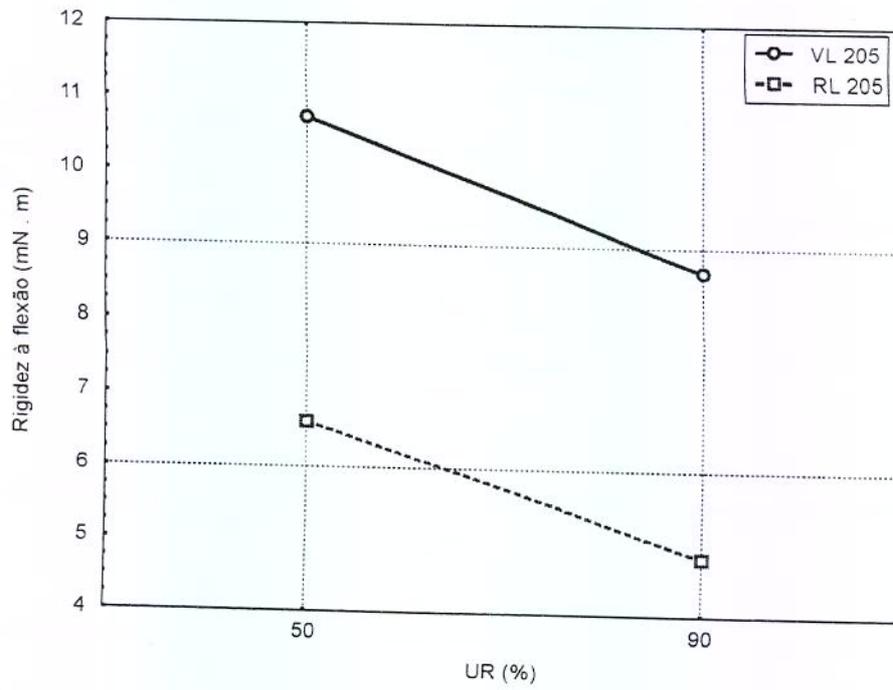


FIGURA 7. Rigidez à flexão dos papéis capa na direção DF.

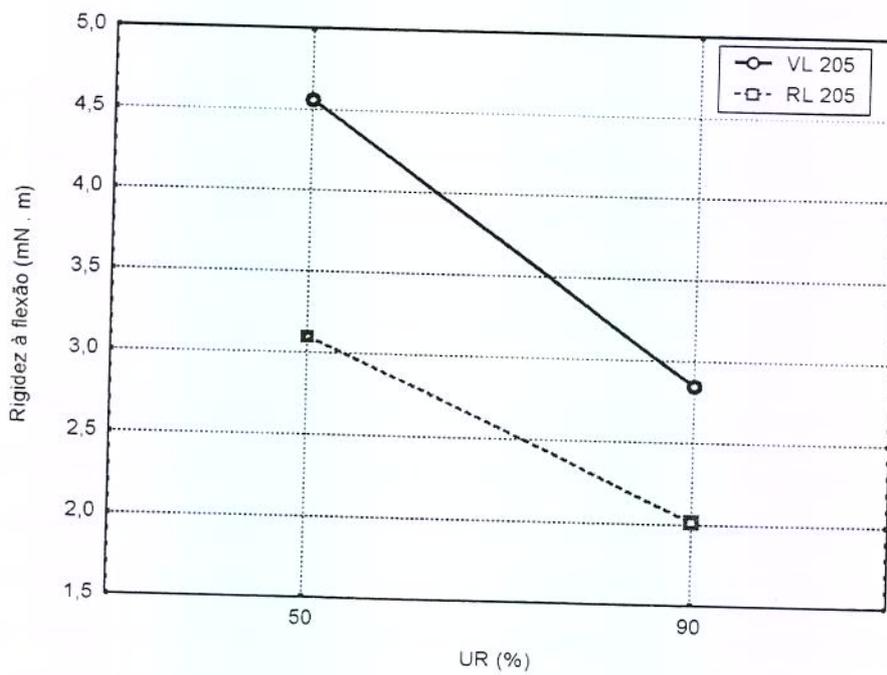


FIGURA 8. Rigidez à flexão dos papéis capa na direção DT.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, porcentagem de alongamento e rigidez à compressão para o papel capa virgem (VL205) e para o papel capa reciclado (RL205), na direção de fabricação (DF) e na direção transversal (DT), realizados a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR.

TABELA 5. Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão dos papéis capa para as condições constantes de 50 e 90% UR.

Papel	UR (%)	Direção	Resistência à Compressão (kN/m)		Alongamento (%)		Rigidez à Compressão (kN/m)	
			M	CV (%)	M	CV (%)	M	CV (%)
			VL205	50	DF	4,247	3,4	0,337
DT	2,362	6,4	0,540		8,8	592	5,8	
RL205	50	DF	4,118	4,4	0,442	6,6	1228	4,9
DT		2,503	4,1	0,671	7,7	502	1,8	
VL205	90	DF	2,706	3,1	0,301	8,1	1323	3,1
DT		1,600	4,9	0,537	8,8	459	4,9	
RL205	90	DF	2,499	3,6	0,518	8,8	845	6,6
DT		1,579	6,6	0,706	13,2	357	4,9	

M = média referente a 10 determinações.

Pela análise dos dados da Tabela 5 verifica-se que, para a direção DF, a resistência à compressão do papel capa virgem (VL205) foi maior que a do papel capa reciclado (RL205) a 50% UR mantendo esse comportamento a 90% UR, não havendo interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa ($p = 0,5824$). Para a direção DT, a 50% UR a resistência à compressão do papel capa reciclado (RL205) foi maior que a do papel capa virgem (VL205), invertendo essa situação para a condição de 90% UR, havendo uma interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa para essa direção ($p = 0,0365$). No entanto, a análise de variância, ao nível de 5%, mostrou não existir diferença significativa entre a resistência à compressão para os dois papéis capa, nessa direção, para as duas condições de umidade ensaiadas ($p = 0,1201$). A resistência à

compressão do papel capa virgem (VL205) e do papel capa reciclado (RL205) é mostrada na Figura 9 para a direção DF e Figura 10 para a direção DT.

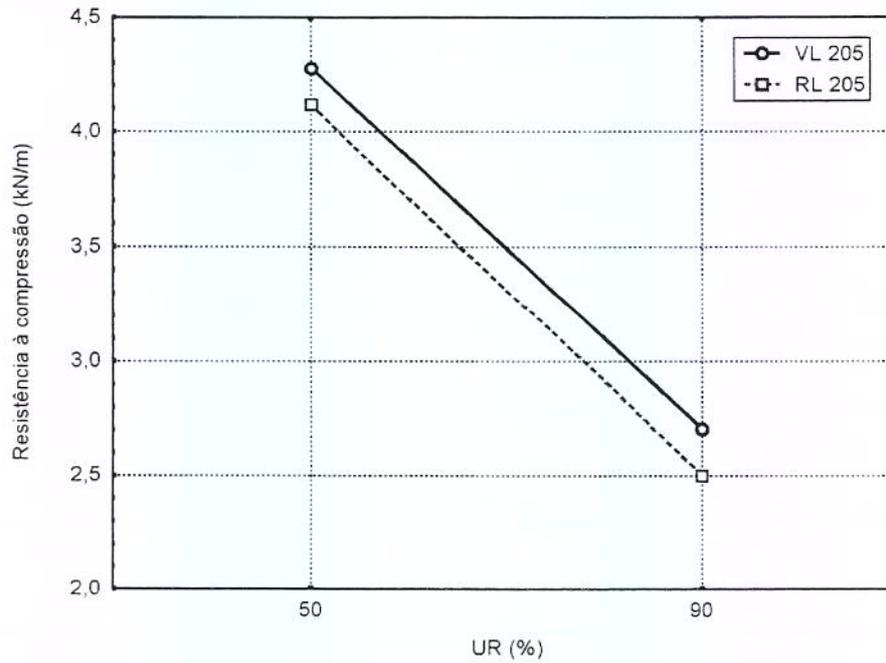


FIGURA 9. Resistência à compressão dos papéis capa na direção DF.

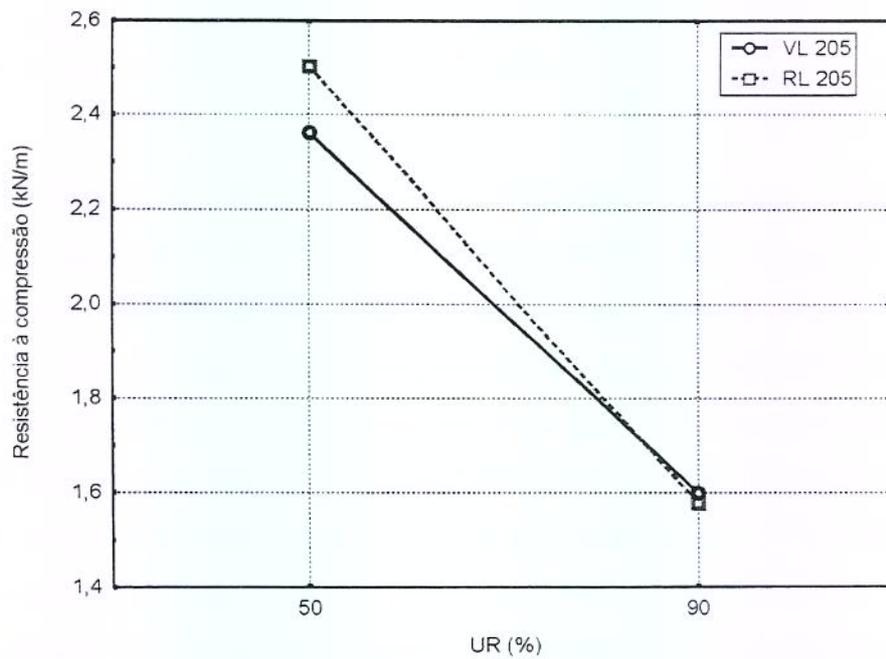


FIGURA 10. Resistência à compressão dos papéis capa na direção DT.

O alongamento dos papéis capa é mostrado na Figura 11, para a direção DF e na Figura 12, para a direção DT. A porcentagem de alongamento do papel capa reciclado (RL205) foi estatisticamente maior ($p < 0,05$) que a do papel capa virgem (VL205), para a direção DF e para a direção DT, para as duas condições de ensaio (50 e 90% UR). Para o papel capa reciclado a porcentagem de alongamento aumentou com o aumento da umidade relativa, enquanto para o papel capa virgem houve um ligeiro decréscimo. Entretanto, para os dois tipos de papéis capa a mudança na porcentagem de alongamento com o aumento da umidade relativa não foi significativa, ao nível de 5%.

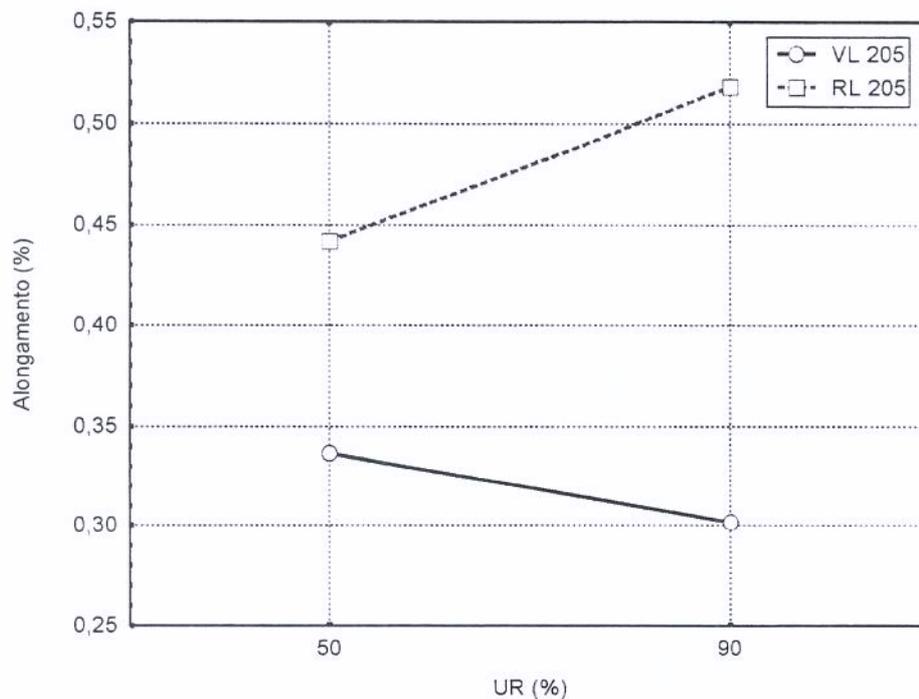


FIGURA 11. Alongamento dos papéis capa, na direção DF.

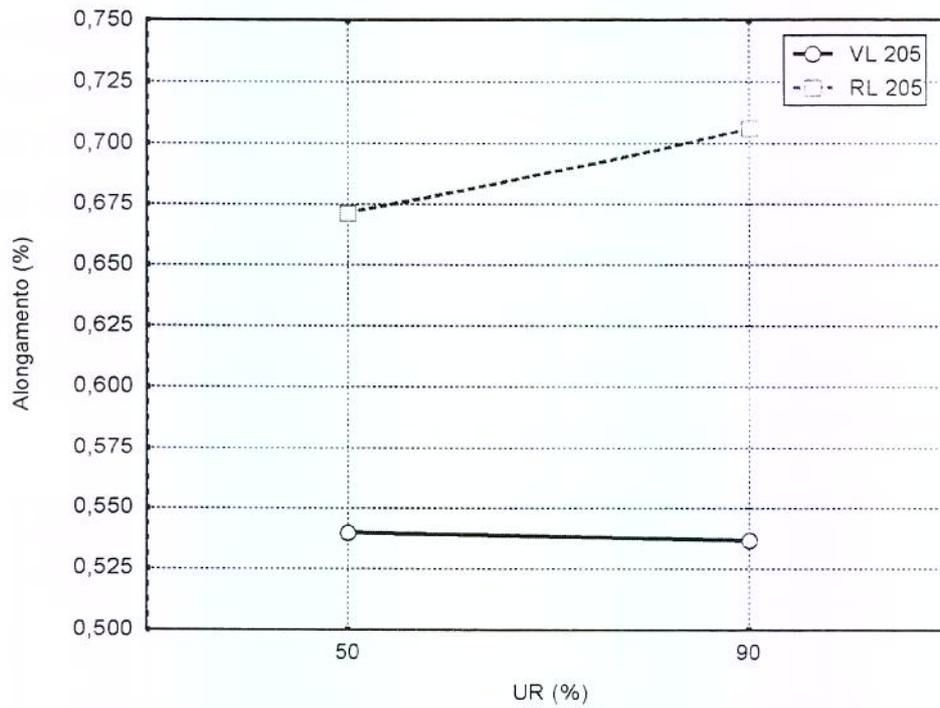


FIGURA 12. Alongamento dos papéis capa, na direção DT.

Conforme mostrado na Tabela 5 e nas Figuras 13 e 14, a rigidez à compressão do papel capa virgem (VL205) foi estatisticamente maior que a rigidez à compressão do papel capa reciclado (RL205), para as duas direções do papel, a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR, não havendo interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa. Para a direção DF, $p = 0,0739$ e para a direção DT, $p = 0,4219$. De acordo com URBANIK (1996b), o alto grau de refinação necessário para fabricar os materiais reciclados diminui sua rigidez à compressão.

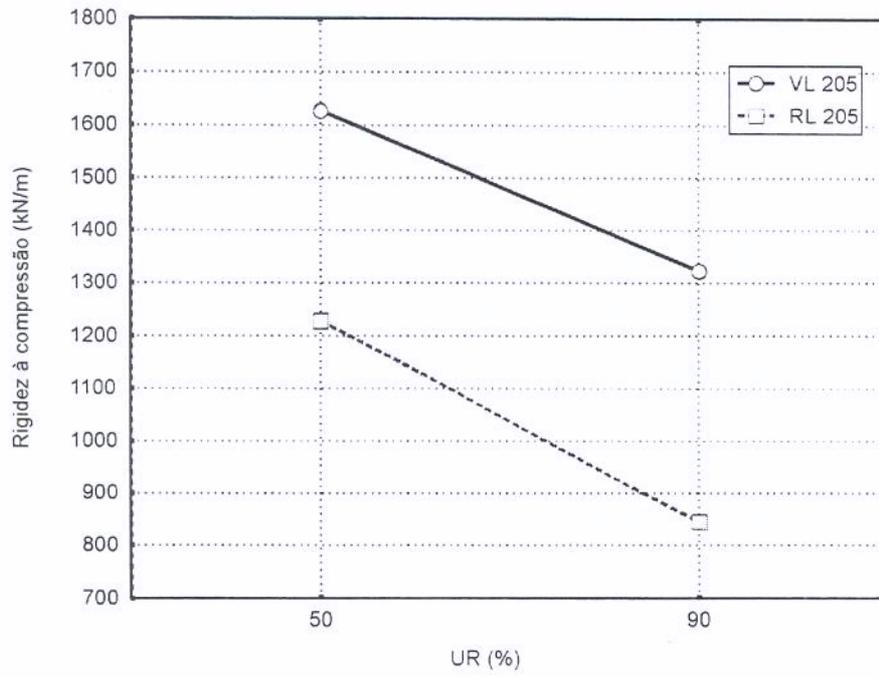


FIGURA 13. Rigidez à compressão dos papéis capa na direção DF.

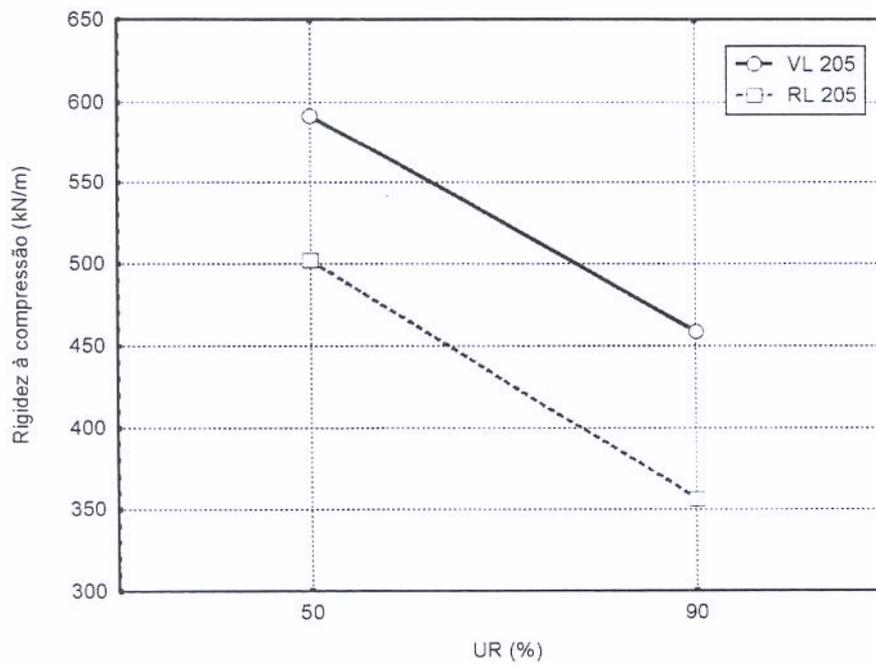


FIGURA 14. Rigidez à compressão dos papéis capa na direção DT.

O efeito da umidade relativa nas propriedades mecânicas dos papéis capa, conforme resultados apresentados na Tabela 5 e mostrados nas Figuras de 7 a 14, foi similar ao encontrado em trabalho realizado por CONSIDINE *et al.*(1992), no qual o aumento da umidade relativa do ambiente diminuiu a resistência e a rigidez à compressão de papéis virgens e reciclados. Os autores mostraram, também, que o aumento da umidade relativa acarretou um aumento na porcentagem de alongamento do papel, explicado pela melhora das propriedades de elasticidade das fibras papel.

O papel capa reciclado estudado (RL205) apresentou um aumento na porcentagem de alongamento com o aumento da umidade relativa do ambiente, entretanto, para o papel capa virgem (VL205), o aumento da umidade relativa provocou um ligeiro decréscimo na porcentagem de alongamento, embora a diferença não tenha sido significativa ($p > 0,05$). De acordo com CONSIDINE *et al.*(1992), a porcentagem de alongamento não é um parâmetro adequado para avaliar o desempenho de papéis à compressão.

Outra explicação para esse fato é a menor susceptibilidade dos papéis virgens ao aumento de umidade (MARCONDES, 1994, URBANIK 1996b), o que pode ser comprovado pela análise da Figura 10. Nessa Figura, verifica-se que embora o papel capa virgem (VL205) tenha apresentado menor resistência à compressão a 50% UR do que o papel capa reciclado (RL205), a 90% UR a situação foi inversa.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na determinação da rigidez à flexão do papel miolo virgem (VM127) e do papel miolo reciclado (RM127), para a direção de fabricação (DF) e para a direção transversal (DT), a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR.

TABELA 6. Rigidez à flexão dos papéis miolo.

Papel	UR (%)	Direção	Rigidez à Flexão (mN.m)	
			M	CV (%)
VM 127	50	DF	2,65	2,4
		DT	1,44	5,6
RM 127		DF	1,91	41
		DT	0,98	5,4
VM 127	90	DF	2,19	5,2
		DT	0,77	6,5
RM 127		DF	1,34	4,6
		DT	0,53	8,8

M = Média referente a 10 determinações.

A comparação entre a rigidez à flexão dos papéis miolo virgem (VM127) e reciclado (RM127) demonstrou que o papel miolo virgem, com mesma gramatura que o papel miolo reciclado, apresentou rigidez significativamente superior ($p < 0,05$) na direção DF e na direção DT. Este comportamento foi observado nos ensaios a 50 e 90% UR, não havendo interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa. Para a direção DF, $p = 0,0546$ e para a direção DT, $p = 0,0898$. A Figura 15 apresenta os resultados para a direção DF e a Figura 16 para a direção DT.

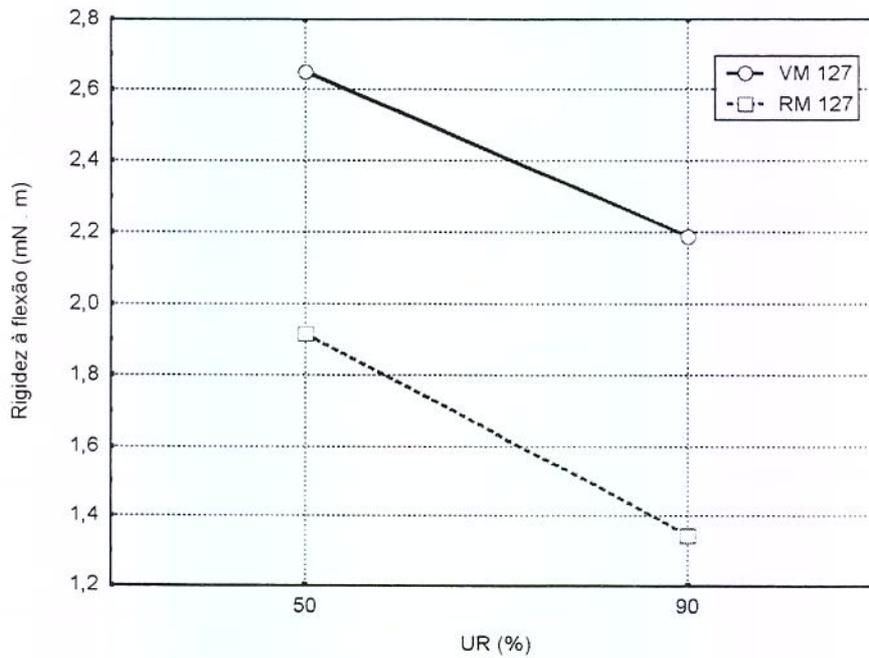


FIGURA 15. Rigidez à flexão dos papéis miolo na direção DF.

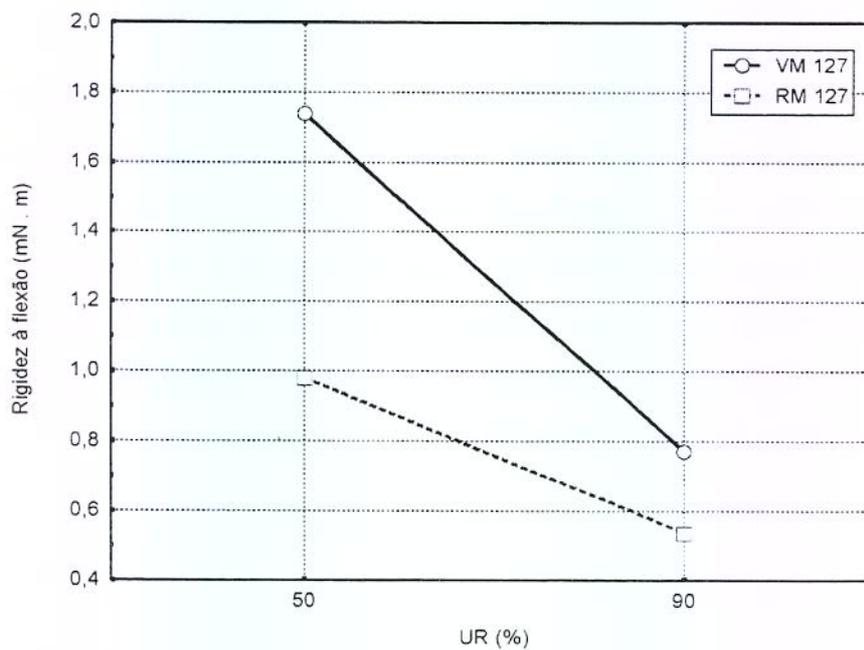


FIGURA 16. Rigidez à flexão dos papéis miolo na direção DT.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, porcentagem de alongamento e rigidez à compressão para o papel miolo virgem (VM127) e

para o papel miolo reciclado (RM127), para a direção de fabricação (DF) e para a direção transversal (DT), a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR.

TABELA 7. Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão dos papéis miolo a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR.

Papel	UR (%)	Direção	Resistência à Compressão (kN/m)		Alongamento (%)		Rigidez à Compressão (kN/m)	
			M	CV (%)	M	CV (%)	M	CV (%)
VM127	50	DF	2,783	6,5	0,346	9,8	984	5,7
		DT	1,749	4,6	0,524	8,0	402	2,5
RM127	50	DF	2,443	2,8	0,368	7,6	863	5,1
		DT	1,391	3,3	0,572	5,3	309	3,6
VM127	90	DF	1,716	6,4	0,350	11,5	789	5,4
		DT	1,203	7,5	0,465	13,4	340	6,2
RM127	90	DF	1,846	4,8	0,318	14,5	794	5,4
		DT	0,910	2,8	0,517	10,3	256	5,8

M = Média referente a 10 determinações.

Pela análise dos dados da Tabela 7 observa-se que, para a direção DF, a resistência à compressão do papel miolo virgem (VM127) foi significativamente maior que a resistência à compressão do papel miolo reciclado (RM127), a 50% UR. Para 90% UR, a situação se inverteu e a resistência à compressão do papel reciclado (RM127) foi maior que a do papel miolo virgem (VM127). Este fato indica uma maior sensibilidade do papel miolo virgem (VM127) à umidade, para a direção DF, havendo uma interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa ($p < 0,05$).

Para a direção DT, a resistência à compressão do papel miolo virgem (VM127) foi significativamente maior ($p < 0,05$) que a resistência à compressão do papel miolo reciclado (RM127), a 23°C/50% UR e a 23°C/ 90% UR, não havendo interação entre o papel e a umidade relativa para essa direção do papel ($p = 0,1435$).

A resistência à compressão do papel miolo virgem (VM127) e do papel miolo reciclado (RM127) é apresentada na Figura 17 para a direção DF e na Figura 18, para a direção DT.

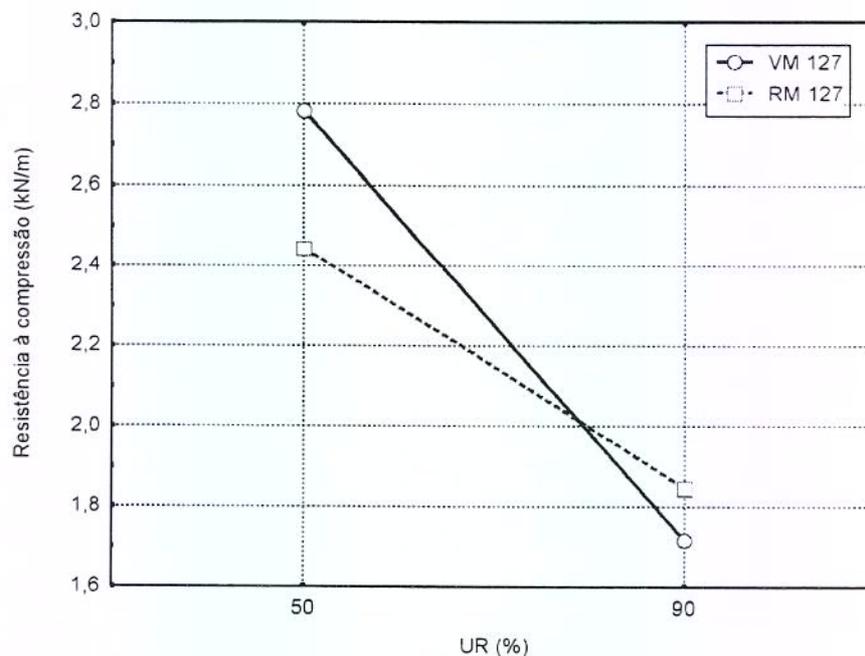


FIGURA 17. Resistência à compressão dos papéis miolo na direção DF.

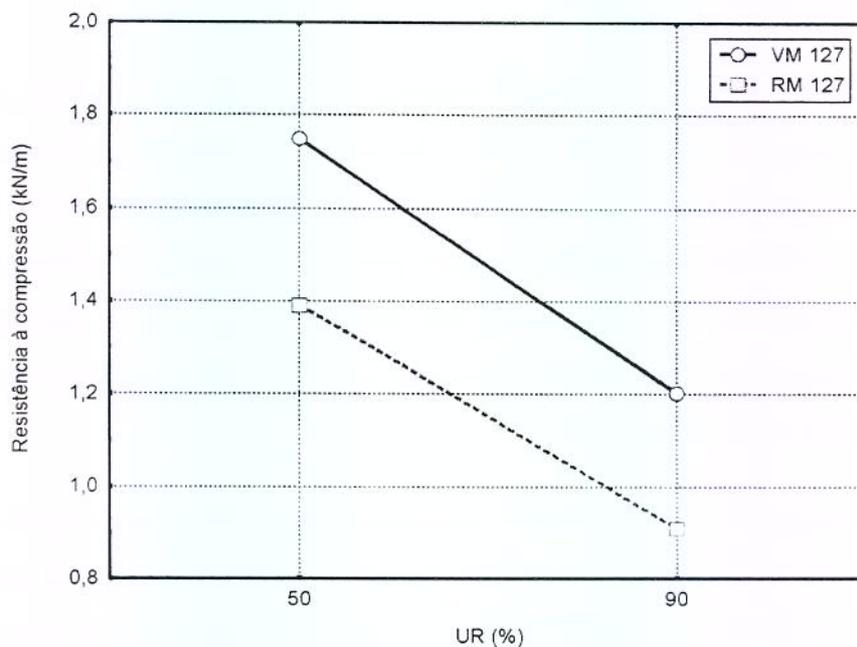


FIGURA 18. Resistência à compressão dos papéis miolo na direção DT.

A análise dos resultados obtidos para a porcentagem de alongamento dos papéis miolo mostrou que, para a direção DF, o alongamento do papel miolo reciclado (RM 127) foi maior que o alongamento do papel miolo virgem (VM127) na condição de 23°C/50% UR, mas a 23°C/90% UR a porcentagem de alongamento do papel miolo reciclado (RM127) foi menor, indicando haver uma interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa ($p = 0,0347$). Para a direção DT, o alongamento do papel miolo reciclado (RM127) foi estatisticamente maior que o alongamento do papel miolo virgem (VM127) para as duas condições de ensaio, não havendo interação sigificativa entre o tipo de papel e a umidade relativa ($p = 0,8978$). A porcentagem de alongamento do papel miolo virgem (VM127) e do papel miolo reciclado (RM127) é apresentada na Figura 19 para a direção DF e na Figura 20 para a direção DT.

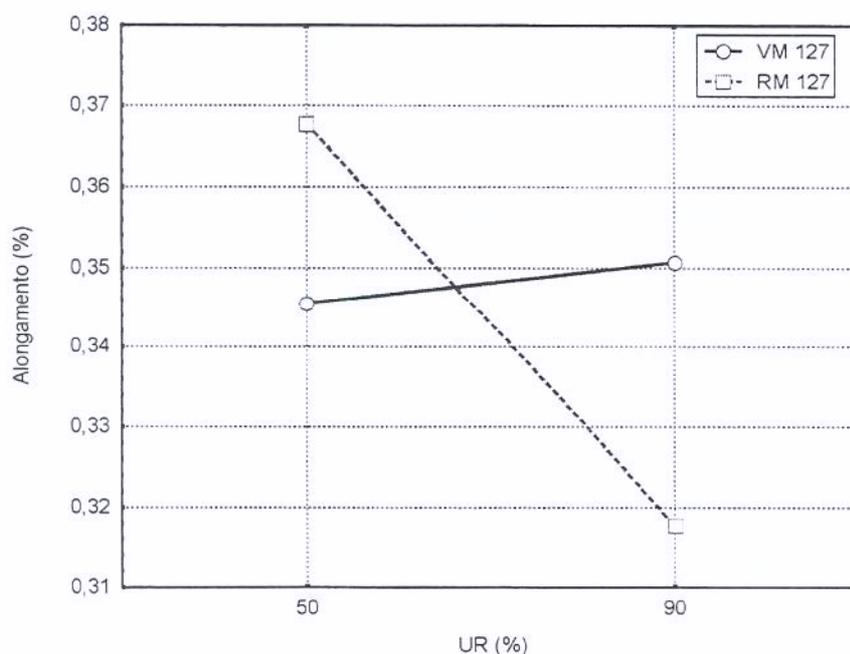


FIGURA 19. Alongamento do papel miolo na direção DF.

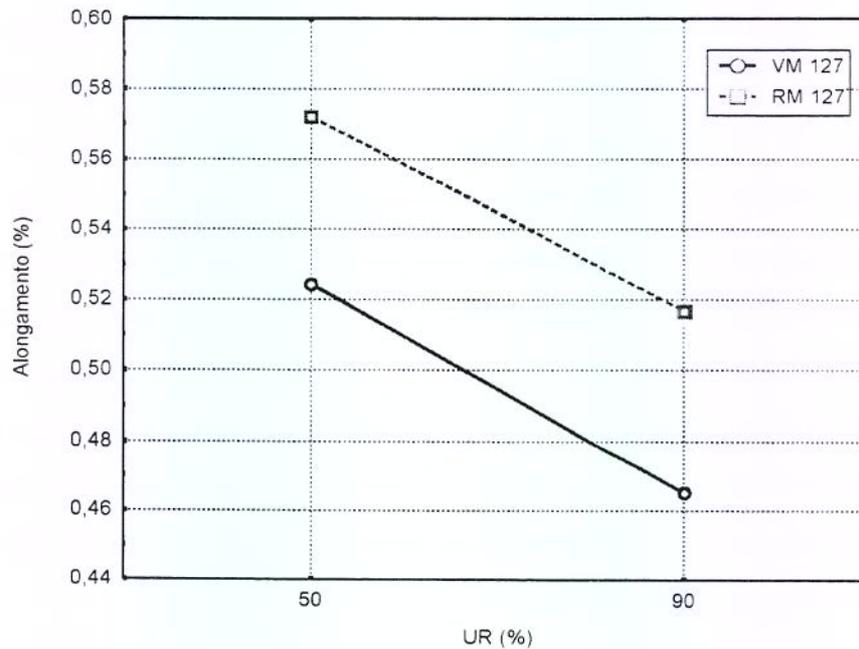


FIGURA 20. Alongamento do papel miolo na direção DT.

A análise dos resultados obtidos no ensaio de rigidez à compressão dos papéis miolo demonstrou que para a direção DF, a rigidez à compressão do papel miolo virgem (VM127) foi estatisticamente maior que a rigidez à compressão do papel miolo reciclado (RM127) a 23°C/50% UR ($p = 0,00024$), entretanto, a 23°C/90% UR a situação se inverteu e o papel miolo reciclado (RM127) apresentou rigidez à compressão ligeiramente maior que o papel miolo virgem (VM127), havendo uma interação significativa do tipo de papel com a umidade relativa para essa direção ($p = 0,00009$). Para a direção DT, a rigidez à compressão do papel miolo virgem (VM127) foi maior que a rigidez à compressão do papel miolo reciclado (RM127) nas duas condições de umidade relativa, não havendo interação significativa entre o tipo de papel e a umidade relativa ($p = 0,3842$).

A rigidez à compressão dos papéis miolo virgem (VM127) e reciclado (RM127), na direção DF é apresentada na Figura 21 e para a direção DT na Figura 22.

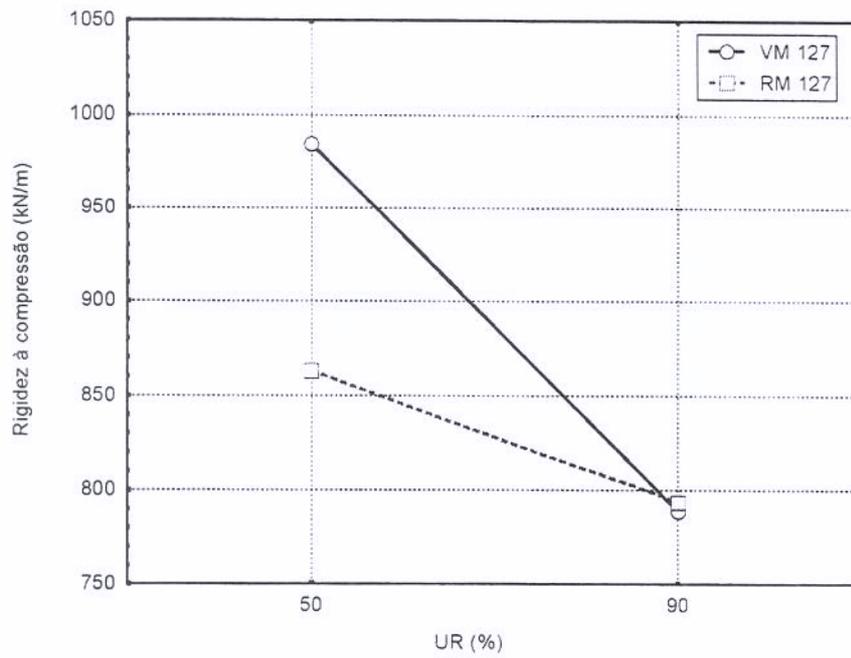


FIGURA 21. Rigidez à compressão dos papéis miolo na direção DF.

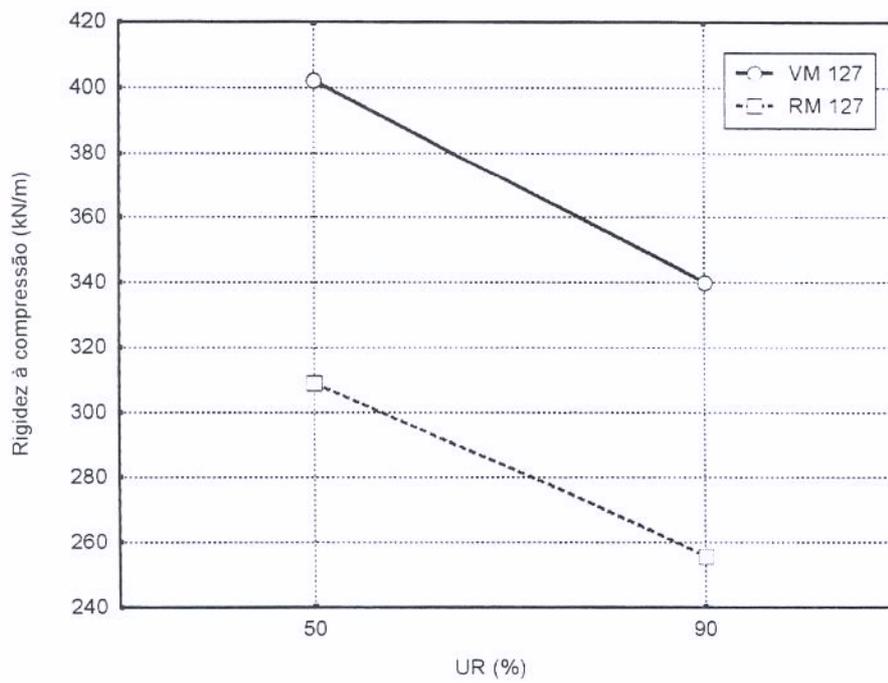


FIGURA 22. Rigidez à compressão dos papéis miolo na direção DT.

Pelos dados apresentados na Tabela 7 e mostrados nas Figuras 17 a 22, verifica-se que o efeito da umidade relativa no desempenho à compressão dos papéis miolo estudados foi similar ao encontrado por CONSIDINE *et al.*(1992) para as propriedades de resistência e rigidez à compressão de papéis. Entretanto, o aumento na porcentagem de alongamento com o aumento da umidade relativa, conforme verificado por CONSIDINE *et al.* (1992), só foi observado para o papel miolo virgem (VM127) na direção DF. Conforme mencionado, embora a porcentagem de alongamento forneça uma boa indicação do desempenho de papéis à tração, ela não é um bom parâmetro para estudar o desempenho de papéis à compressão.

De maneira geral, o papel miolo virgem (VM127) apresentou maior susceptibilidade ao aumento na umidade relativa que o papel miolo reciclado (RM127). Uma explicação pode ser o fato do papel miolo reciclado (RM127) conter fibras longas obtidas por processo químico, provenientes do papel capa do papelão de origem, enquanto o papel miolo virgem (VM127) contém 100% de fibras curtas. Este fato pode explicar, também, a maior porcentagem de alongamento do papel miolo reciclado (RM127) na direção DF a 50% UR (Figura 19) e na direção DT a 50 e 90% UR (Figura 20).

5.2 Avaliação das estruturas de papelão ondulado

A Tabela 8 apresenta os dados de resistência à compressão de coluna das estruturas a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR. A relação entre os resultados obtidos a 50 e a 90% UR é apresentada como perda de resistência em porcentagem nessa mesma Tabela. A Figura 23 apresenta a comparação estatística entre as estruturas estudadas. As barras cortadas pela mesma linha indicam as estruturas que não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5%, no teste de comparação múltipla de Bonferroni.

TABELA 8. Resistência à compressão de coluna das estruturas de papelão ondulado.

Estrutura	Código	Resistência à Compressão de Coluna (kN/m)				Perda de Resistência (%)
		50% UR		90% UR		
		M	CV (%)	M	CV (%)	
I	VVV	7,34	3,2	3,74	3,2	49,0
II	RRR	7,38	2,8	3,46	4,2	53,1
III	RVV	7,67	2,6	3,80	2,7	50,5
IV	VVR	7,81	2,6	4,01	3,3	48,7
V	VRR	7,13	3,6	3,52	3,0	50,6

M = Média referente a 16 determinações.

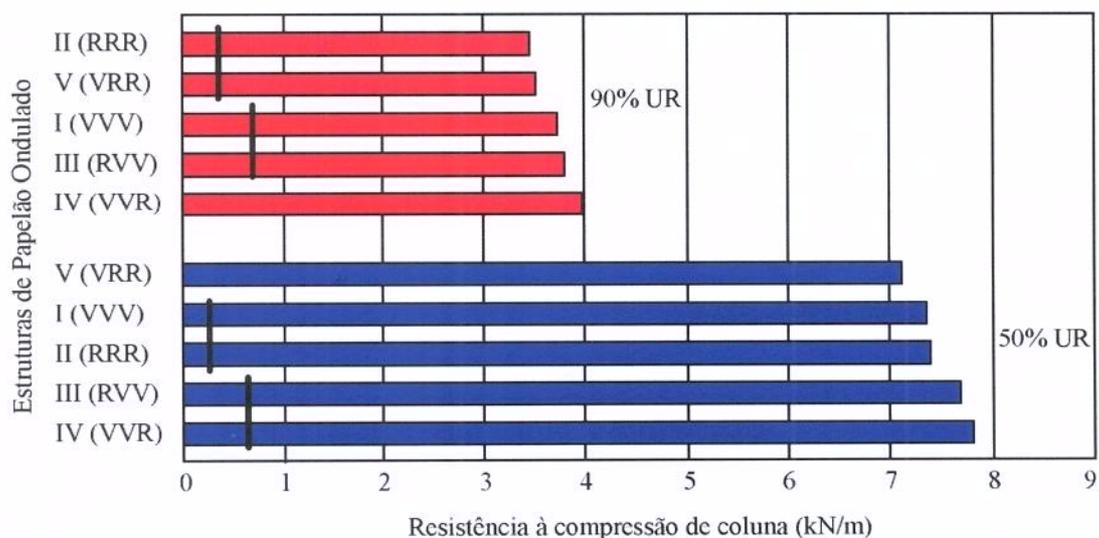


FIGURA 23. Resistência à compressão de coluna das estruturas de papelão ondulado a 50 e a 90% UR.

A análise estatística dos dados, mostrada na Figura 23, indica que a resistência à compressão do material depende da umidade relativa, isto é, existe uma interação

significativa entre o material e a umidade relativa ($p = 0,0006$). Para 50% UR a ordem de resistência à compressão de coluna foi:

$$\overline{VRR} < \overline{VVV} < \overline{RRR} < \overline{RVV} < \overline{VVR}$$

As estruturas sob a mesma linha não diferem significativamente entre si ao nível de 5% (teste de comparação múltipla das médias por Ryan – Einot – Gabriel – Wesch).

Para 90% UR a ordem de resistência à compressão de coluna foi:

$$\overline{RRR} < \overline{VRR} < \overline{VVV} < \overline{RVV} < \overline{VVR}$$

As linhas indicam as estruturas que não podem ser distinguidas estatisticamente ao nível de 5% (teste de comparação múltipla das médias por Ryan – Einot – Gabriel – Welsch).

A causa dessa mudança de ordem pode ser atribuída às diferenças no comportamento de cada material com a umidade relativa. As estruturas RRR, RVV e VVR apresentaram maior decréscimo de resistência à compressão de coluna com a aumento da umidade de 50 para 90% UR que as estruturas VVV e VRR. O decréscimo de resistência das estruturas de I a V foi: 3,60; 3,92; 3,87; 3,80 e 3,61, respectivamente. A análise estatística dos decréscimos é apresentada a seguir:

$$\overline{VVV} < \overline{VVR} < \overline{VRR} < \overline{RVV} < \overline{RRR}$$

As estruturas sob a mesma linha não podem ser distinguidas estatisticamente, ao nível de 5% (teste de comparação múltipla de Bonferroni).

É importante notar que para o ensaio realizado na condição de 50% UR, a resistência à compressão de coluna da estrutura VVV (todos os componentes virgens) não diferiu significativamente, ao nível de 5%, da resistência à compressão de coluna da estrutura RRR (todos os componentes reciclados), sendo que as duas estruturas apresentaram valores baixos de resistência. Para a condição de 90% UR, a estrutura VVV apresentou resistência à

compressão de coluna estatisticamente superior à estrutura RRR, mas inferior às estruturas RVV e VVR, com componentes reciclados.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos na determinação da rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado, na direção de fabricação (DF) e na direção transversal (DT), a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR. A relação entre os resultados obtidos a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR é apresentada como perda de resistência em porcentagem. A Figura 24 mostra a análise estatística dos dados para a condição de 50% UR e a Figura 25 para a condição de 90% UR.

TABELA 9. Rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado.

Estrutura	Direção	Código	Rigidez à Flexão (N.m)				Perda de Resistência (%)
			50% UR		90% UR		
			M	CV (%)	M	CV (%)	
I		VVV	14,66	9,4	9,23	10,4	37,0
II		RRR	10,73	8,5	6,86	6,4	36,1
III	DF	RVV	14,85	14,2	8,43	5,7	43,2
IV		VVR	13,46	14,3	8,20	11,9	39,1
V		VRR	13,28	10,2	9,06	9,9	31,8
I		VVV	5,77	3,3	3,18	5,3	44,9
II		RRR	5,15	5,0	2,53	8,1	50,9
III	DT	RVV	5,74	3,3	3,01	4,7	47,6
IV		VVR	5,69	6,5	3,07	5,5	46,0
V		VRR	5,46	2,2	2,94	4,5	46,1

M = Média referente a 10 determinações.

O ensaio de rigidez à flexão mostrou diferença significativa entre as estruturas VVV e RRR nas duas direções DF e DT, a 23°C/50% UR e a 23°C/90% UR, conforme pode ser

visto nas Figuras 24 e 25. Este fato pode ser explicado pela diferença na rigidez à flexão dos papéis usados para formar as duas estruturas, conforme dados constantes nas Tabelas 4 e 6.

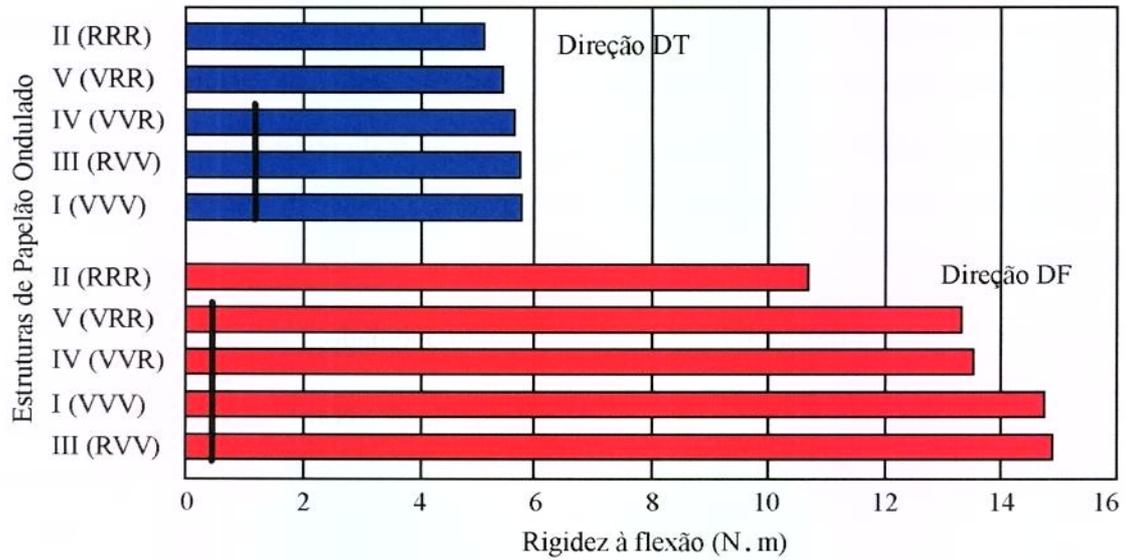


FIGURA 24. Rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado, nas direções DF e DT, a 50% UR.

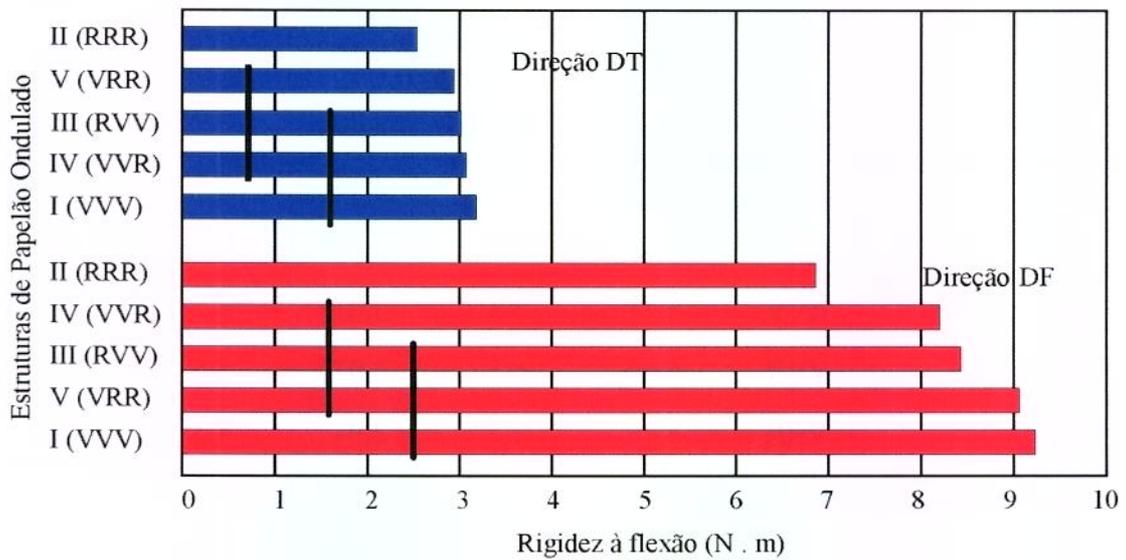


FIGURA 25. Rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado, nas direções DF e DT, a 90% UR.

Pela análise das Figuras 24 e 25 verifica-se que para a direção DF a rigidez à flexão das estruturas analisadas dependeu da umidade relativa, havendo uma interação significativa entre a estrutura e a umidade relativa para a direção DF ($p = 0,02$). Para a condição de 50% UR, na direção DF, a ordem foi:

$$\overline{RRR} < \overline{VRR} < \overline{VVR} < \overline{VVV} < \overline{RVV}$$

As estruturas sob a mesma linha não diferem significativamente ao nível de 5% (teste de comparação múltipla das médias de Ryan – Einot – Gabriel – Welch).

Para a condição de 90% UR, na direção DF, a ordem de rigidez à flexão foi:

$$\overline{RRR} < \overline{VVR} < \overline{RVV} < \overline{VRR} < \overline{VVV}$$

A provável causa dessa mudança de ordem deve-se ao fato do decréscimo da rigidez à flexão, com o aumento da umidade, ser maior para as estruturas VVV, RVV e VVR do que para as estruturas RRR e VRR. Os decréscimos foram 5,4; 3,9; 6,4; 5,3 e 4,2 para as estruturas de I a V, respectivamente. A ordem de decréscimo foi:

$$\overline{RRR} < \overline{VRR} < \overline{VVR} < \overline{VVV} < \overline{RVV}$$

As estruturas sob a mesma linha não diferem significativamente ao nível de 5% (teste de comparação múltipla de Bonferroni).

Para a direção DT, não houve interação significativa entre as estruturas e a umidade relativa ($p = 0,67$). Para a condição de 50% UR, na direção DT, a ordem dos valores de rigidez à flexão foi:

$$\overline{RRR} < \overline{VRR} < \overline{VVR} < \overline{RVV} < \overline{VVV}$$

Para a condição de 90% UR, na direção DT, a ordem de rigidez à flexão foi:

$$\overline{RRR} < \overline{VRR} < \overline{RVV} < \overline{VVR} < \overline{VVV}$$

As estruturas sob a mesma linha não diferem significativamente, ao nível de 5% (comparação múltipla das médias de Ryan – Einot – Gabriel – Welsch).

Os resultados médios obtidos na determinação da taxa mínima de fluência (*minimum creep rate*) e da amplitude da higroexpansão das estruturas estudadas, para a condição cíclica de 50 a 90% UR, com variação senoidal a cada 12 horas, são apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

TABELA 10. Taxa mínima de fluência das estruturas de papelão ondulado.

Estrutura		Ensaio				
		1	2	3	4	5
I (VVV)	M	-0,00667 ^c	-0,0009 ^a	-0,00134 ^c	-0,00261 ^b	-0,00295 ^b
II (RRR)	M	-0,01429 ^c	-0,00243 ^b	-0,00497 ^c	-0,0027 ^b	-0,00451 ^c
III (RVV)	M	-0,00884 ^c	-0,00124 ^c	-0,00195 ^b	-0,00264 ^c	-0,00291 ^a
IV (VVR)	M	-0,00685 ^b	-0,00127 ^c	-0,00355 ^b	-0,00252 ^b	-0,00307 ^c
V (VRR)	M	-0,01426 ^b	-0,00236 ^b	-0,00382 ^c	-0,0040 ^b	-0,00432 ^a

M = média referente a: (a) = 4; (b) = 5 e (c) = 6 determinações.

TABELA 11. Valores de amplitude da higroexpansão das estruturas de papelão ondulado.

Estrutura		Ensaio				
		1	2	3	4	5
I (VVV)	M	0,071 ^c	0,052 ^a	0,051 ^c	0,049 ^b	0,051 ^b
II (RRR)	M	0,082 ^c	0,058 ^b	0,059 ^c	0,047 ^b	0,058 ^c
III (RVV)	M	0,073 ^c	0,051 ^c	0,055 ^b	0,049 ^c	0,050 ^a
IV (VVR)	M	0,062 ^b	0,052 ^c	0,054 ^b	0,049 ^b	0,055 ^c
V (VRR)	M	0,080 ^b	0,057 ^b	0,056 ^c	0,052 ^b	0,057 ^a

M = Média referente a: (a) = 4; (b) = 5 e (c) = 6 determinações.

Nota-se que os maiores valores de taxa de fluência estão associados às estruturas II (RRR) e V (VRR), com exceção dos resultados do ensaio 4 para a estrutura II (RRR), e os menores às estruturas IV (VVR), III (RVV) e I (VVV). Os valores de amplitude de higroexpansão seguem a mesma ordem, ou seja, as estruturas II (RRR) e V (VRR) que apresentaram taxa de fluência mais alta, também apresentaram maior valor para a amplitude de higroexpansão.

Verifica-se, pelos dados das Tabelas 10 e 11, que as estruturas que possuem em sua composição apenas papéis virgens (VVV) e/ou menor proporção de papel reciclado (RVV e VVR) apresentaram melhor desempenho, enquanto as estruturas com todos os componentes reciclados (RRR) e/ou maior proporção de componentes reciclados (VRR) apresentaram pior desempenho.

A análise estatística dos dados é apresentada nas Tabelas 12 e 13. Para evitar o efeito da posição e do número de corpos-de-prova durante cada ensaio, as médias não foram

comparadas diretamente, mas foram calculados os valores dos mínimos quadrados das médias (*least square mean*). As Tabelas 12 e 13 apresentam os valores dos mínimos quadrados e os valores da comparação pareada entre as estruturas estudadas. Valores de $p < 0,05$ indicam que existe diferença significativa entre as estruturas, ao nível de 5% de erro.

TABELA 12. Taxa mínima de fluência das estruturas de papelão ondulado e comparação pareada das estruturas.

Estrutura	Taxa Mínima de Fluência (<i>l.s.mean</i>)	Valores de p				
		I (VVV)	III (RVV)	IV (VVR)	V (VRR)	II (RRR)
I (VVV)	-0,00227	—	0,0291	0,005	0,0001	0,0001
III (RVV)	-0,00281	0,0291	—	0,4199	0,0001	0,0001
IV (VVR)	-0,00306	0,005	0,4199	—	0,0001	0,0001
V (VRR)	-0,00472	0,0001	0,0001	0,0001	—	0,3172
II (RRR)	-0,00524	0,0001	0,0001	0,0001	0,3172	—

TABELA 13. Amplitude de higr expansão das estruturas de papelão ondulado e comparação pareada das estruturas.

Estrutura	Amplitude de Higr expansão (<i>l.s.mean</i>)	Valores de p				
		I (VVV)	III (RVV)	IV (VVR)	V (VRR)	II (RRR)
I (VVV)	0,0545	—	0,3083	0,0380	0,0001	0,0001
III (RVV)	0,0556	0,3083	—	0,2498	0,0001	0,0001
IV (VVR)	0,0570	0,0380	0,2498	—	0,0074	0,0001
V (VRR)	0,0604	0,0001	0,0001	0,0074	—	0,0674
II (RRR)	0,0626	0,0001	0,0001	0,0001	0,0674	—

Os valores dos mínimos quadrados das médias, apresentados nas Tabelas 12 e 13, foram também analisados por meio da comparação múltipla de Bonferroni. Os resultados estão representados na Figura 26 para a taxa mínima de fluência e na Figura 27 para a amplitude de higroexpansão. As barras cortadas pela mesma linha indicam as estruturas que não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de erro.

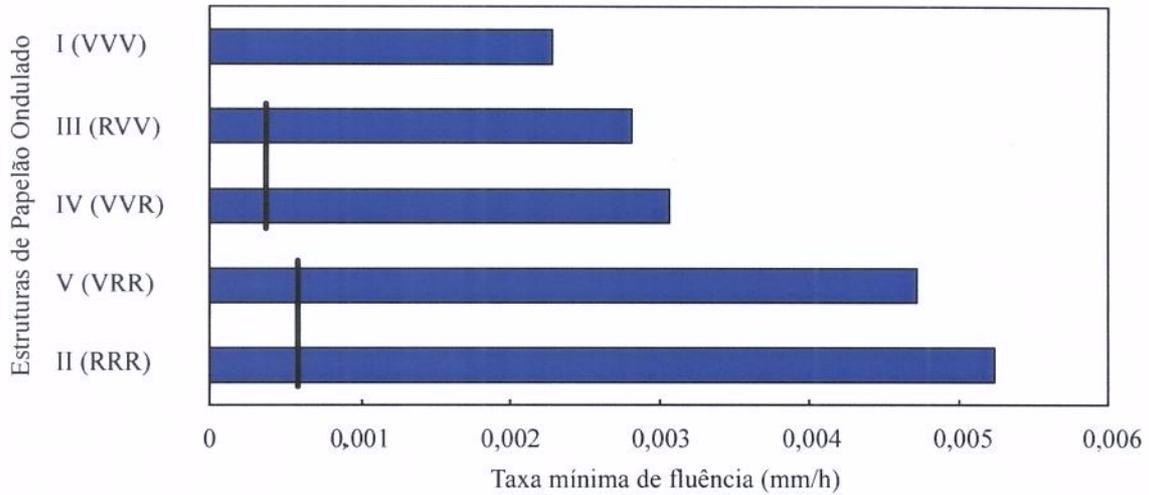


FIGURA 26. Taxa mínima de fluência das estruturas de papelão ondulado.

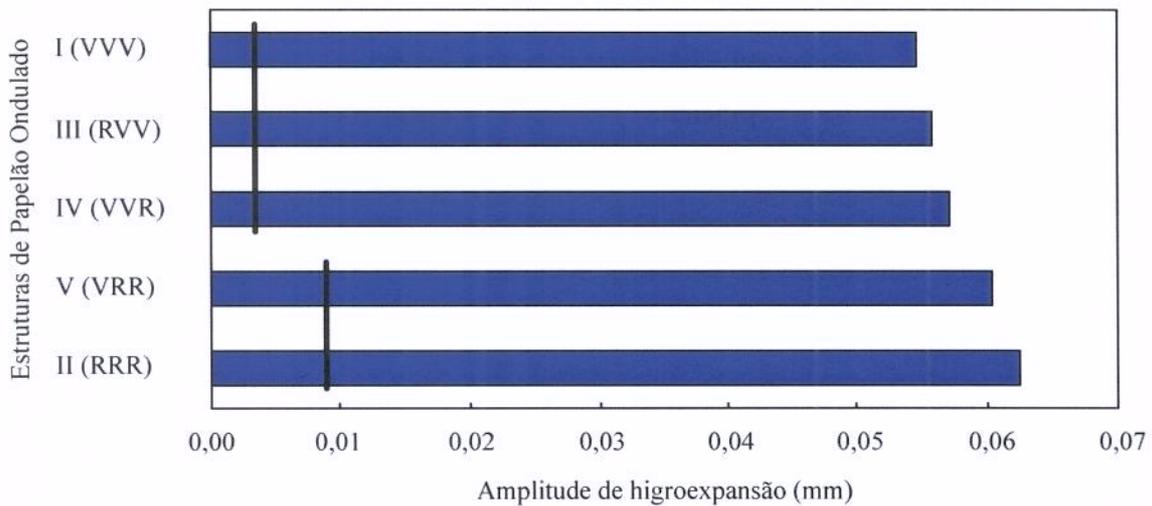


FIGURA 27. Amplitude de higroexpansão das estruturas de papelão ondulado.

A análise das Figuras 26 e 27 mostra que, sob compressão, a amplitude de higroexpansão e a taxa de fluência da estrutura são controladas em primeiro lugar pela qualidade da capa interna, em segundo pela qualidade do miolo e em terceiro pela qualidade da capa externa.

5.3 Avaliação das embalagens de papelão ondulado

O ensaio de resistência à carga vertical foi realizado com o objetivo de determinar o valor da carga a ser aplicada no ensaio de fluência das embalagens (tubos). O ensaio foi efetuado na condição de 23°C/50% UR, sendo os resultados apresentados na Tabela 14.

TABELA 14. Resistência à compressão das embalagens de papelão ondulado.

Estrutura	Código	Resistência à Compressão (kN/m)	
		M	CV (%)
I	(VVV)	4,59	12,6
II	(RRR)	4,32	4,2
III	(RVV)	4,85	11,0
IV	(VVR)	5,30	5,9
V	(VRR)	4,93	6,4

M = Média referente a 10 determinações.

A análise dos dados apresentados na Tabela 14 mostram que as embalagens fabricadas com as estruturas de composição de extrema diferença, I (VVV) e II (RRR), obtiveram os valores mais baixos de resistência à compressão. Nota-se, também, que a embalagem da estrutura I (VVV) apresentou o maior coeficiente de variação dos resultados e a embalagem da estrutura II (RRR) o mais baixo.

A Figura 28 apresenta os dados de resistência à carga vertical das embalagens, juntamente com a análise estatística dos dados, realizada por meio da comparação múltipla de Bonferroni, ao nível de 5% de erro.

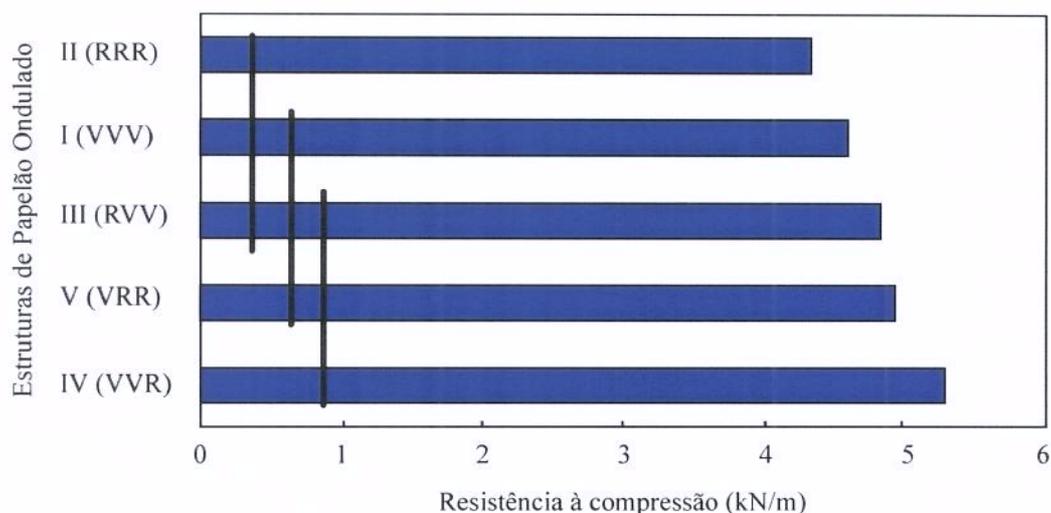


FIGURA 28. Resistência à compressão das embalagens (tubos) de papelão ondulado a 23°C/50% UR.

Pela análise da Figura 28, verifica-se que os resultados de resistência à compressão das embalagens, determinada por meio de ensaio padronizado a 23°C/50% UR, não mostraram diferença significativa entre as estruturas I (VVV) e II (RRR). Estes dados estão de acordo com os resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão de coluna realizado a 23°C/50% UR e apresentados na Figura 23. Nota-se na Figura 23, que os valores de compressão de coluna das estruturas também foram baixos para as estruturas I(VVV) e II (RRR), não diferindo significativamente entre si, ao nível de 5% de erro.

A Tabela 15 apresenta os resultados dos onze ensaios para determinação da taxa de fluência das embalagens de papelão ondulado. Cada ensaio foi realizado para seis embalagens simultaneamente, entretanto, nem todos os sessenta e seis dados foram aceitáveis. Na Tabela 15 são apresentados apenas os dados utilizados na análise estatística.

Os valores da taxa mínima de fluência, apresentados na Tabela 15, correspondem à taxa de fluência no tempo igual a $5 \times \sigma$. A amplitude de higroexpansão é a média da amplitude obtida pela curva de deformação para três ciclos próximos ao tempo da taxa mínima de fluência (URBANIK, 1994).

TABELA 15. Taxa de fluência das embalagens de papelão ondulado.

Estrutura	Código	Taxa Mínima de Fluência (mm/h)	Amplitude de Hígroexpansão (mm)	Tempo de Término ou Falha (h)	Falha
I	VVV	-0,00213	0,5361	187,07	
		-0,00347	0,4848	359,10	
		-0,00270	0,4410	282,65	
		-0,00565	0,4820	269,43	F
		-0,00390	0,4517	359,09	
		-0,00443	0,4696	356,84	F
		-0,00194	0,4186	397,00	
		-0,00226	0,4016	238,56	
		-0,00624	0,4343	166,71	
		-0,00347	0,4083	166,71	
		-0,00187	0,3857	397,00	
<i>l.s.mean</i>		-0,00479	0,4370		
II	RRR	-0,01080	0,5320	174,87	F
		-0,00700	0,6706	222,07	F
		-0,00539	0,5688	269,37	F
		-0,00575	0,5041	65,80	F
		-0,00783	0,5312	221,92	F
		-0,00830	0,5251	282,65	
		-0,00748	0,5600	238,56	
		-0,02667	0,5324	102,52	F
		-0,02356	0,5429	77,72	F
		-0,01497	0,5314	160,24	F
		-0,00299	0,5241	349,00	
<i>l.s.mean</i>		-0,01267	0,5420		

Estrutura	Código	Taxa Mínima de Fluência (mm/h)	Amplitude de Higroexpansão (mm)	Tempo de Término ou Falha (h)	Falha
		-0,00464	0,4872	280,87	
		-0,00250	0,4192	282,65	F
		-0,01405	0,5182	189,89	
		-0,00527	0,4117	280,87	
		-0,00706	0,5219	184,20	
		-0,00967	0,4710	222,20	F
III	RVV	-0,00694	0,5096	184,20	
		-0,01606	0,4527	127,26	F
		-0,01124	0,5677	89,20	F
		-0,01209	0,5247	113,50	F
		-0,00287	0,4324	262,59	
		-0,00168	0,4440	166,78	
		-0,00116	0,3973	166,70	
	<i>l.s.mean</i>	-0,00481	0,4500		
		-0,01588	0,4804	186,10	F
		-0,00537	0,5186	359,10	
		-0,00862	0,5136	210,00	
		-0,00543	0,4307	280,92	
		-0,01457	0,4114	189,90	
IV	VVR	-0,01193	0,5595	174,27	F
		-0,00383	0,4714	359,10	
		-0,00551	0,4095	280,98	
		-0,00771	0,4669	234,66	F
		-0,02075	0,5211	77,29	F
		-0,00440	0,4583	397,00	
		-0,00370	0,4631	397,00	
	<i>l.s.mean</i>	-0,01016	0,4790		

Estrutura	Código	Taxa Mínima de Fluência (mm/h)	Amplitude de Higroexpansão (mm)	Tempo de Término ou Falha (h)	Falha
		-0,00456	0,5185	280,98	
		-0,01307	0,4970	138,30	F
		-0,00475	0,4880	221,68	F
		-0,00472	0,5383	238,56	
		-0,00931	0,5446	244,47	F
V	VRR	-0,00491	0,5058	184,19	
		-0,03147	0,6573	89,10	F
		-0,01548	0,5707	101,76	F
		-0,00201	0,4110	349,00	
		-0,02195	0,5119	125,96	F
		-0,00334	0,4396	348,70	
		<i>l.s.mean</i>	-0,00924	0,5300	

F = colapso do material

Os dados da Tabela 15 foram estatisticamente analisados e os valores dos mínimos quadrados são apresentados nas Tabelas 16 e 17, para a taxa mínima de fluência e para a amplitude de higroexpansão, respectivamente. O valor dos mínimos quadrados foi ajustado para diferenças na posição dos corpos-de-prova durante o ensaio e número de replicatas. Cada Tabela contém o valor do mínimo quadrado e a comparação pareada entre as embalagens. Valores de $p < 0,05$ indicam que não existe diferença significativa entre as embalagens, ao nível de 5% de erro.

Os valores dos mínimos quadrados das médias, apresentados nas Tabelas 16 e 17, mostram que as embalagens da estrutura I (VVV) apresentaram menor taxa de fluência e menor amplitude de higroexpansão e as embalagens da estrutura II (RRR), maior taxa de fluência e maior amplitude de higroexpansão. Estes dados estão de acordo com os obtidos no ensaio de fluência realizado nas estruturas.

TABELA 16. Taxa mínima de fluência das embalagens de papelão ondulado e comparação pareada entre as embalagens.

Estrutura	Taxa Mínima de Fluência (<i>l.s.mean</i>)	Valores de p				
		I (VVV)	III (RVV)	V (VRR)	IV (VVR)	II (RRR)
I (VVV)	-0,00479	—	0,9939	0,0461	0,0204	0,0056
III (RVV)	-0,00481	0,9939	—	0,0464	0,0337	0,0043
V (VRR)	-0,00924	0,0461	0,0464	—	0,79931	0,3634
IV (VVR)	-0,01016	0,0204	0,0337	0,7931	—	0,5166
II (RRR)	-0,01267	0,0056	0,0043	0,3634	0,5166	—

TABELA 17. Amplitude de higroexpansão das embalagens de papelão ondulado e a comparação pareada entre as embalagens.

Estrutura	Amplitude de Higroexpansão (<i>l.s.mean</i>)	Valores de p				
		I (VVV)	III (RVV)	IV (VVR)	V (VRR)	II (RRR)
I (VVV)	0,437	—	0,5238	0,0335	0,0003	0,0001
III (RVV)	0,450	0,5238	—	0,1849	0,0002	0,0001
IV (VVR)	0,479	0,0335	0,1849	—	0,0243	0,0038
V (VRR)	0,530	0,0003	0,0002	0,0243	—	0,5904
II (RRR)	0,542	0,0001	0,0001	0,0038	0,5904	—

Os valores dos mínimos quadrados, apresentados nas Tabelas 16 e 17, foram também analisados por meio da comparação múltipla de Bonferroni. Os resultados são apresentados

na Figura 29, para a taxa de fluência e na Figura 30, para a amplitude de higroexpansão. As barras cortadas pela mesma linha não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de erro.

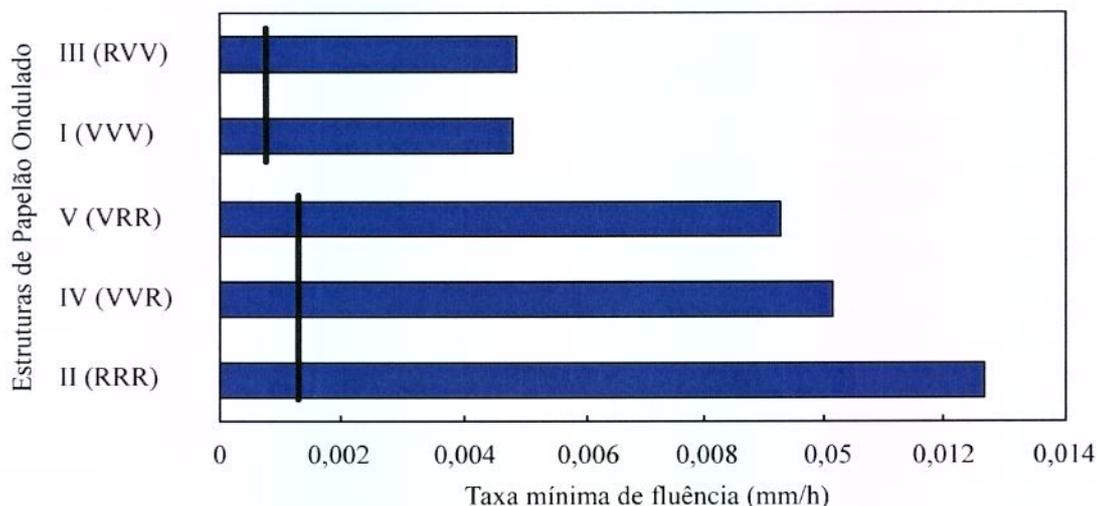


FIGURA 29. Taxa mínima de fluência das embalagens de papelão ondulado.

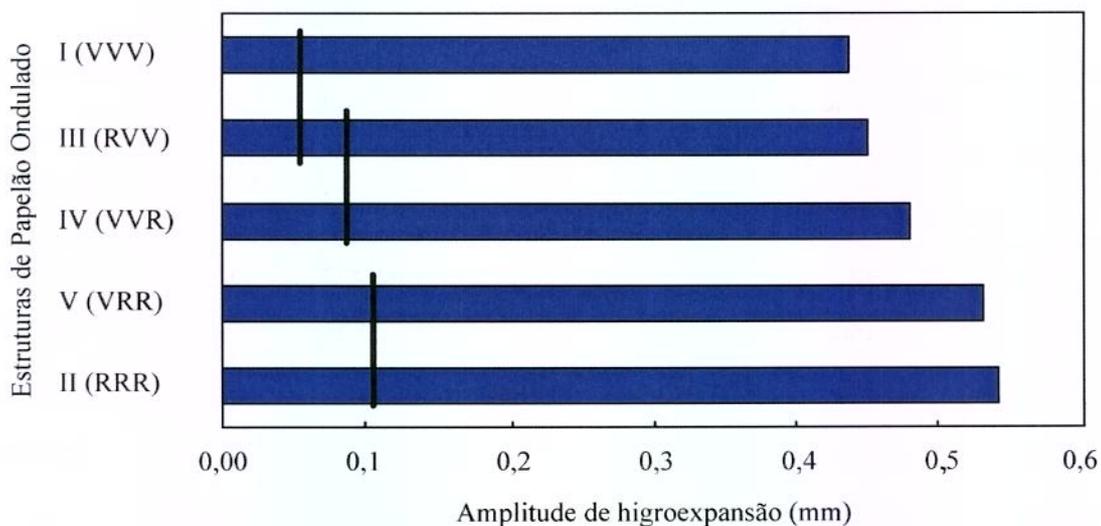


FIGURA 30. Amplitude de higroexpansão das embalagens de papelão ondulado.

Pela análise das Figuras 29 e 30, nota-se que a ordem de aumento da taxa mínima de fluência entre as embalagens estudadas foi semelhante à ordem de aumento da amplitude de

higroexpansão, invertendo a ordem entre a primeira e a segunda posição para as estruturas I (VVV) e III (RVV) e entre a terceira e a quarta posição para as estruturas IV (VVR) e V (VRR). É importante notar que embora tenha havido a inversão de posição para as estruturas I (VVV) e III (RVV), não houve diferença significativa ($p > 0,05$) na taxa de fluência e amplitude de higroexpansão dessas estruturas. Com base nos dados obtidos, pode-se afirmar que existe uma forte correlação entre a taxa de fluência das embalagens e sua amplitude de higroexpansão.

Com base nos dados da Tabela 15, pode-se afirmar, também, que o maior número de falhas ocorreu para as embalagens com maior número de componentes reciclados. A embalagem I (VVV) teve 2 falhas em 11 ensaios e a embalagem II (RRR) teve 8 falhas.

Com a finalidade de comparar a amplitude de higroexpansão das estruturas e embalagens estudadas com a amplitude de higroexpansão dos componentes de cada estrutura, cada papel usado na composição das estruturas foi submetido ao ensaio de higroexpansividade. Os resultados são apresentados na Tabela 18.

TABELA 18. Amplitude de higroexpansão dos papéis capa e miolo.

Papel	Higroexpansão na Direção DF (%)	Higroexpansão na Direção DT (%)
VL205	0,306	0,959
RL205	0,465	1,368
VM127	0,393	1,163
RM127	0,488	1,586

Pelos dados da Tabela 18 pode-se notar que existe uma considerável diferença entre a higroexpansividade dos materiais reciclados em relação aos materiais virgens. Para o papel capa, a diferença foi de 42%, na direção DT e 52% na direção DF. Para o papel miolo a diferença foi de 24% na direção DT e 36% na direção DF.

De acordo com URBANIK (1996b), o alto grau de refinação necessário durante a fabricação dos papéis reciclados aumenta sua higroexpansividade. Com base nos dados obtidos nesse estudo, pode-se afirmar que estruturas de papelão ondulado, fabricadas com papéis com alta amplitude de higroexpansão colapsam muito mais rapidamente quando expostas a esforços em ambientes de umidade cíclica.

Os dados obtidos nesse trabalho, permitem, ainda, concluir que os ensaios convencionais de resistência à compressão de coluna e resistência à compressão da caixa não traduzem o desempenho do papelão ondulado em umidade cíclica.

A análise dos dados de caracterização dos papéis usados na composição das estruturas de papelão ondulado demonstrou que o ensaio que melhor se relacionou com o desempenho do papelão ondulado em umidade cíclica foi o ensaio de rigidez à compressão determinado pelo gradiente da tangente da curva de tensão x deformação dos papéis. A Figura 31 mostra a relação entre rigidez à compressão de cada papel e sua amplitude de higroexpansão apresentada na Tabela 18. Cada linha da Figura 31 conecta o resultado obtido para o papel virgem (à esquerda) ao resultado obtido para o papel reciclado (à direita). Com exceção do resultado obtido para o papel miolo a 90% UR, na direção DF, o papel que apresentou maior rigidez foi aquele com menor valor de amplitude de higroexpansão. Portanto, o melhor desempenho dos papéis virgens no ensaio de fluência pode ser atribuído à maior rigidez à compressão desses papéis. Estes dados estão de acordo com CONSIDINE *et al.* (1992), que encontraram uma boa correlação entre a taxa de fluência do material e sua perda de rigidez.

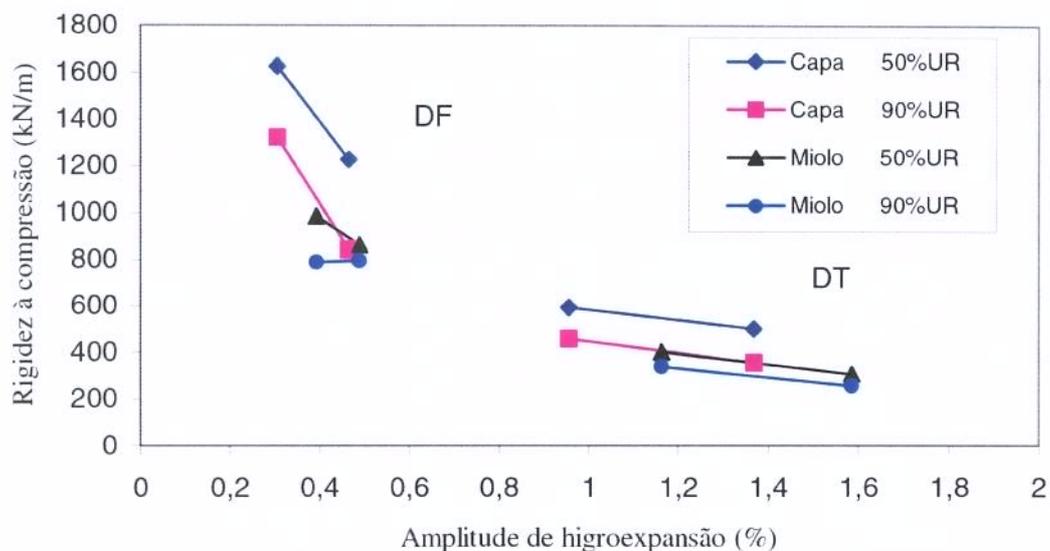


FIGURA 31. Relação entre a rigidez à compressão e a amplitude de higroexpansão de cada um dos papéis usados na composição das estruturas de papelão ondulado.

A análise dos dados obtidos nesse estudo evidenciam, ainda, uma relação entre a rigidez à flexão da estrutura de papelão ondulado e a taxa de fluência da embalagem construída com essa estrutura.

Comparando-se a ordem da taxa mínima de fluência e amplitude de higroexpansão das embalagens de papelão ondulado, apresentadas nas Tabelas 16 e 17, com a ordem da rigidez à flexão das estruturas de papelão ondulado, a 50% UR, apresentadas na Tabela 9, pode-se observar que a ordem foi:

Rigidez à flexão	DF –	RRR < VRR < VVR < VVV < RVV
	DT –	RRR < VVR < RVV < VRR < VVV
Taxa mínima de fluência		RRR > VVR > VRR > RVV > VVV
Amplitude de higroexpansão		RRR > VRR > VVR > RVV > VVV

Pode-se, portanto, verificar que existe uma relação inversa entre a rigidez à flexão da estrutura de papelão ondulado e a taxa de fluência e higroexpansão da embalagem.

Portanto, a fluência e a higroexpansão das caixas de papelão ondulado em umidade cíclica são fundamentalmente relacionadas a dois parâmetros de rigidez:

1. a rigidez de seus componentes (capa e miolo) determinada pelo gradiente da reta obtida na parte inicial da curva tensão x deformação, e

2. a tenuidade dos painéis da caixa (*universal slenderness*).

A tenuidade do painel é a medida da propensão dos painéis da caixa de papelão ondulado à flambagem e é função da rigidez à flexão da estrutura, da resistência à compressão de coluna da estrutura e da geometria do painel da caixa, conforme definido por URBANIK (1996b) e apresentado na Equação 11:

$$U = \sqrt{P_u / P_{cr}} \quad (11)$$

onde: U = tenuidade do painel

P_u = resistência à compressão de coluna (kgf/cm)

P_{cr} = carga crítica de flambagem (kgf/cm)

Para calcular a carga crítica de flambagem dos painéis dos tubos, podemos ignorar o efeito da altura e aplicar a Equação 12 sugerida por URBANIK (1996b):

$$P_{cr} = \frac{4 \pi^2 \sqrt{D_x D_y}}{l^2} \quad (12)$$

onde: D_x = rigidez à flexão na direção DF (kgf.m)

D_y = rigidez à flexão na direção DT (kgf.m)

l = largura do painel (m)

Os valores de U e os obtidos para a taxa mínima de fluência das embalagens de papelão estudadas são apresentados na Figura 32. Pela análise da Figura 32, observa-se que existe uma correlação entre a tenuidade do painel (U) e a taxa de fluência da caixa ($r^2 = 0,917$). Em outras palavras, a taxa de fluência parece ser o resultado direto do mecanismo pelo qual a energia de deformação, gerada com a compressão da caixa, se distribui nos painéis provocando a sua flambagem. Essa energia é função da tenuidade do painel da caixa.

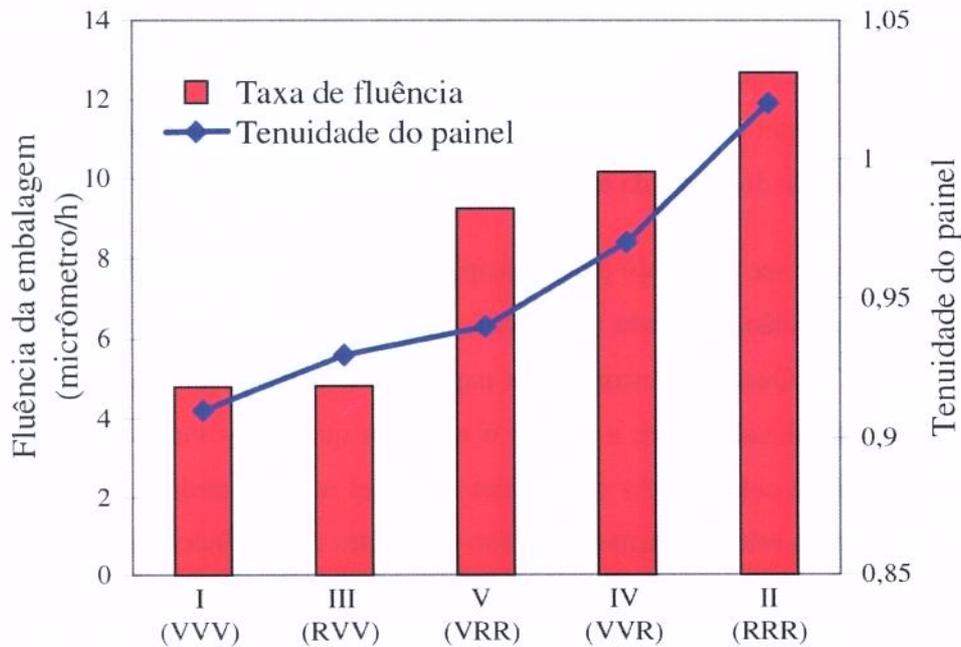


FIGURA 32. Correlação entre a taxa mínima de fluência das embalagens de papelão ondulado e a tenuidade do painel.

O melhor e o pior desempenho das estruturas I (VVV) e II (RRR), respectivamente, são função direta da maior e menor rigidez à compressão dos papéis capa e miolo usados nas estruturas.

O maior valor de U para a estrutura IV (VVR) em relação à estrutura III (RVV) pode ser atribuído ao menor valor de rigidez à compressão da capa interna da estrutura IV (VVR). Durante a flambagem do painel, antes do colapso da caixa, a capa interna da

estrutura é submetida à compressão e a capa externa à tração, portanto, o papel reciclado colocado no lado interno da estrutura resulta em pior desempenho em compressão. Após o componente interno falhar em compressão irá ocorrer a delaminação da estrutura, seguida de seu colapso (DE RUVO *et al.*, 1978).

A estrutura V (VRR) além de apresentar o papel capa reciclado como capa interna apresenta, também, o papel miolo reciclado, o que levaria a induzir que a embalagem da estrutura V (VRR) teria um desempenho pior do que a embalagem da estrutura IV (VVR), conforme verificado pelos resultados obtidos para os ensaios de compressão de coluna e compressão da caixa. Entretanto, pela análise da Figura 32 verifica-se que a taxa de fluência e a tenuidade do painel da embalagem da estrutura V (VRR) foram menores que a taxa de fluência e a tenuidade do painel da embalagem da estrutura IV (VVR).

Este fato pode ser explicado pelo princípio de divisão de carga entre os componentes da estrutura de papelão ondulado (KONING, 1978, URBANIK, 1981b e JOHNSON & URBANIK, 1987). Quando a estrutura de papelão ondulado é submetida à compressão, ocorrem falhas localizadas entre a capa e o miolo, o que dá ao material a aparência de “enrugado” antes de colapsar. As ondulações do papel miolo retardam a instabilidade da estrutura, tornando a estrutura mais rígida. Em ambientes de umidade cíclica, à medida que o papel capa ganha umidade e se torna menos rígido, passa a depender mais da rigidez do papel miolo. De acordo com JOHNSON & URBANIK (1987 e 1989) e URBANIK (1996a) a resistência do papel capa sob compressão na direção DT pode ser “aumentada” em até 1,75 vezes dependendo da rigidez oferecida pelo papel miolo. Entretanto, quando se aumenta a rigidez do papel miolo sem alterar os outros elementos da estrutura, este passa a contribuir mais na divisão da força de compressão com os papéis capa e, conseqüentemente, a resistência total da estrutura pode diminuir. De acordo com URBANIK (1981b) aumentar a rigidez do componente mais fraco da estrutura, aumentando sua contribuição na divisão de força de compressão, resultará em um menor valor da resistência da estrutura.

6. CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- Os resultados dos ensaios de resistência à compressão de coluna e resistência à compressão da caixa, realizados em condições padronizadas de 23°C/50% UR, não se correlacionam com o desempenho das caixas de papelão ondulado em umidade cíclica. Este fato é bastante preocupante para a indústria, uma vez que a especificação de caixas de papelão ondulado que serão submetidas a esforços de empilhamento é feita apenas com base nesses dois parâmetros.
- Existe uma relação direta entre a amplitude de higroexpansão dos componentes da estrutura de papelão ondulado e a taxa de fluência das caixas de papelão ondulado. Quanto menor a amplitude de higroexpansão dos papéis capa e miolo, maior o tempo para ocorrer o colapso da caixa. A amplitude de higroexpansão dos componentes da estrutura de papelão ondulado pode ser usada para prever o desempenho de caixas submetidas à umidade cíclica.
- Existe uma relação inversa entre a taxa de fluência e a rigidez do papelão ondulado. A taxa de fluência de caixas de papelão ondulado, submetidas à umidade cíclica, está relacionada a dois parâmetros de rigidez: 1) a rigidez à compressão de seus componentes, obtida pelo gradiente da curva tensão x deformação e 2) a tenacidade do painel da caixa (propensão à flambagem).
- Quanto maior a tenacidade do painel da caixa, maior a taxa de fluência das caixas de papelão ondulado em umidade cíclica ($r^2 = 0,917$). A tenacidade do painel da caixa é determinada facilmente com o uso de equipamentos convencionais usados para determinar a rigidez à flexão do papelão ondulado.
- Na composição de estruturas de papelão ondulado que misturam componentes virgens com reciclados, do ponto de vista de desempenho, é mais indicado o uso de papéis

reciclados no lado externo da estrutura (capa externa). Com essa composição, é possível melhorar o desempenho da estrutura sem adicionar mais fibras.

- Aumentar a rigidez do elemento mais fraco da estrutura, como é o caso do papel miolo, irá forçá-lo a carregar mais carga e, conseqüentemente, devido à sua menor resistência à compressão comparada com a do papel capa, resultará em diminuição da resistência da estrutura de papelão ondulado.
- Na fabricação de papéis reciclados para uso como componente de estruturas de papelão ondulado deve-se controlar os parâmetros que são de conhecimento que aumentam a higroexpansão do papel, tais como alta orientação das fibras (relação entre as propriedades do papel na direção DF/DT) e altas tensões geradas durante o processo de secagem.
- O desenvolvimento deste trabalho identificou que os componentes da estrutura de papelão ondulado, que apresentam alta amplitude de higroexpansão, resultam em maior número de colapso das caixas fabricadas com esses materiais. Verificou-se, também, que existe uma correlação entre as características de rigidez do painel da caixa e sua taxa de fluência em umidade cíclica.

7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Futuros trabalhos deverão se concentrar em estudar a relação entre a taxa de fluência em umidade cíclica e a tenacidade de cada um dos componentes da estrutura. Se for possível estabelecer uma correlação entre a taxa de fluência do papel capa e do papel miolo com sua tenacidade, obtida por meio de sua resistência à compressão e rigidez à flexão, a indústria poderá por intermédio do uso de equipamentos convencionais e testes padronizados caracterizar o papel e rapidamente determinar a propensão dos componentes do papelão ondulado colapsarem, devido a variações de umidade, ainda na fase de desenvolvimento da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Conditioning paper and paper products for testing**. Philadelphia: ASTM, 1997. v.15.09, p.43-44. ASTM D 685 – 93.
2. ARDITO, E. F. G.; GARCIA, A. E.; GARCIA, E. E. C. **Embalagens de papel, cartão e papelão ondulado para alimentos**. Campinas: ITAL, 1988. 201p.
3. ASSCO & FEFCO. **International fibreboard case code**. Paris, 1987. 20p.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **Condicionamento de produtos de papelão ondulado**. São Paulo: ABNT, 1983. 3p. NBR 6733.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **Embalagem de papelão ondulado – determinação da resistência à compressão**. São Paulo: ABNT, 1981a. 5p. NBR 6739.
6. 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**. São Paulo: ABNT, 1994. 8p. NBR 6740.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **Papelão ondulado – caixas e acessórios – classificação**. São Paulo: ABNT, 1974. 29p. NBR 5980.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **Papelão ondulado e caixas de papelão ondulado – terminologia**. São Paulo: ABNT, 1983. 12p. NBR 5985.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **Papelão ondulado – determinação da resistência ao arrebentamento**. São Paulo: ABNT, 1981b. 5p. NBR 6735.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **Papelão ondulado – determinação da resistência à compressão de coluna**. São Paulo: ABNT, 1981c. 4p. NBR 6737.
11. BACK, E. L. The relative moisture sensitivity of compression as compared to tensile strength. In: **STFI Meddelande** . Stockholm: STFI, 1985. 10p. (série A n. 934)

12. BENSON, R. E. Effects of relative humidity and temperature on tensile stress-strain properties of kraft linerboard. **TAPPI**, Atlanta, v.54, n.5, p.699-703, may 1971.
13. BORDIN, M. R.; GARCIA, A. E. Fatores de correção para projeto de caixas de papelão ondulado. **Informativo CETEA**, ITAL, Campinas, v.4, n.4, p.6-8, julho/agosto 1992.
14. BYRD, V. L. Effect of relative humidity changes on compressive creep response of paper. **TAPPI**, Atlanta, v.55, n.11, p.1612-1613, nov. 1972.
15. BYRD, V. L. Edgewise compression creep of fiberboard components in a cyclic-relative- humidity environment. **TAPPI Journal**, Atlanta, v.67, n.7, p.86-90, jul.1984.
16. BYRD, V. L.; KONING Jr.; J. W. Corrugated Fiberboards: edgewise compression creep in cyclic relative humidity environments. **TAPPI**, Atlanta, v.61, n.6, p.35-37, jun. 1978.
17. CEMPRE. **Papelão ondulado**. São Paulo: CEMPRE, 1999. 4p. (Ficha Técnica n.2)
18. CLAVIN, S.; FELLERS, C. A new method for measuring the edgewise compression properties of paper. **Svensk Papperstidning**, Stockholm, n.9, p.329-332, 1975.
19. CODY, R. P.; SMITH, J. K. **Applied statistics and the SAS programming language**. 3. ed. Englewood Cliffs: PRENTICE HALL, 1991. 403p.
20. CONSIDINE, J. M.; GUNDERSON, D. E.; THELIN, P.; FELLERS, C. Compressive creep behavior of paperboard in a cyclic humidity environment – exploratory experiment. **TAPPI Journal**, Atlanta, v.72, n.11, p.131-136, nov. 1989.
21. CONSIDINE, J. M.; STOKER. D. L.; LAUFENBERG, T. L.; EVANS, J. W. **Compressive creep behavior of corrugating components as affected by humidity environment**. Madison: Forest Products Laboratory, 1992. (Project 3686-1)
22. DATAMARK. **Pack'98 Brasil**: a indústria brasileira de embalagens. São Paulo, 1988. 263 p.
23. DE RUVO, A.; FELLERS, C.; ENGMAN, C. The influence of raw material and design on the mechanical performance of boxboard. **Svensk Papperstidning**, Stockholm, v.81, n. 18, p. 557- 566, 1978.
24. DE RUVO, A.; LUNDBERG, R.; MARTIN-LOF, S.; SOREMARK, C. Influence of temperature and humidity on elastic and expansional properties of paper and the constituent fiber. In: TRANSACTION of BPBIF symposium on fundamental properties of paper related to uses. [s.l.]: BPBIF, 1976. p. 785-806.

25. FAHEY, D. J.; BORMETT, D. W. Recycled fibers in corrugated fiberboard containers. **TAPPI Journal**, Atlanta, v.65, n.10, p. 107-110, Oct. 1982.
26. FELLERS, C.; BRANGE, A.; KOPPARBERG, S. **The impact of water sorption on the compression strength of paper**. Stockholm: Swedish Forest Products Research Laboratory- Paper Technology Department, 1985. 10p.
27. FRIDLEY, H. J.; TANG, R. C.; SOLTIS, L. A. Creep behavior model for structural lumber. **Journal of Structural Engineering**, v.118, n. 8, p. 2261-2277, 1992.
28. GUNDERSON, D. Edgewise compression of paperboard: a new concept of lateral support. **Appita**, Australia, v.37, n.2, p.137-141, 1983.
29. GUNDERSON, D. E.; CONSIDINE, J. Measuring the mechanical behavior of paperboard of paperboard in a changing humidity environment. In: INTERNATIONAL PROCESS AND MATERIALS QUALITY EVALUATION CONFERENCE, 1986, Atlanta. **Proceedings**. Atlanta: TAPPI Press, 1986. p. 245-251.
30. GUNDERSON, D. E.; CONSIDINE, J. M.; SCOTT, C. T. The compressive load-strain curve of paperboard: rate of load and humidity effects. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 14, n.2, p. J37-J41, march 1988.
31. GUNDERSON, D. E.; LAUFENBERG, T. L. Apparatus for evaluating stability of corrugated board under load in cyclic humidity environment. **Experimental Techniques**, v.18. n.1, p.27-31, jan./feb. 1994.
32. GUNDERSON, D. E.; TOBEY, W. E. Tensile creep of paperboard - effect of humidity change rates. In: MATERIALS INTERACTIONS RELEVANT TO THE PULP, PAPER, AND WOOD INDUSTRIES, 1990, Pittsburgh. **Proceedings**. Pittsburgh: Materials Research Society, 1990. p.213-226.
33. HORN, R. A. What are the effects of recycling on fiber and paper properties? **Paper Trade Journal**, Madison, v.17, n.24, p.78-82, feb. 1975.
34. JANG, H. F.; SETH, R. S. Fibre characterization using confocal microscopy. In: THE EFFECTS OF RECYCLING – INTERNATIONAL PROGRESS IN PAPER PHYSICS, 1994, Atlanta. **Proceedings**. Atlanta: Institute of Paper Science and Technology, 1994. p.4- 2.
35. JÖNSON, G. **Corrugated board packaging: a Pira international packaging guide**. 2ed. Leatherhead: Pira International, 1999. 264p.
36. JOHNSON JR., M. W.; URBANIK, T. J. Analysis of the localized buckling in composite plate structures with application to determining the strength of corrugated

- fiberboard. **Journal of Composites Technology & Research**. v.11, n.4, p.121-127, 1989.
37. JOHNSON JR., M. W.; URBANIK, T. J. Buckling of axially loaded, long rectangular paperboard plates. **Wood and Fiber Science**, v.19, n.2, p. 135-146, apr.1987.
38. JOHNSON JR., M. W.;URBANIK, T. J. Maximizing top-to-bottom compression strength. **Paperboard Packaging**, Chicago, p. 98-108, apr. 1980.
39. KOEIJER, A. J. **Influence of conditioning on corrugated and solid board at moderate standard atmospheres**. Delft: Instituut TNO Voor Verpakling, 1979. 19p. (Project nr.800.112.520)
40. KONING JR., J. W. Compressive properties of linerboard as related to corrugated fiberboard containers: a theoretical model. **TAPPI**, Atlanta, v. 58, n.12, p.105-108, dec. 1975.
41. KONING JR., J. W. Compressive properties of linerboard as related to corrugated fiberboard containers: theoretical model verification. **TAPPI**, Atlanta, v.61, n.8, p. 69-71, aug. 1978.
42. KONING JR., J. W.; GODSHALL, W. D. Repeated recycling of corrugated containers and its effect on strength properties. **TAPPI**, Atlanta, v.58, n.9, p.146-150, sept. 1975.
43. KONING JR., J. W.; STERN, R. Long-term creep in corrugated fiberboard containers. **TAPPI**, Atlanta, v. 60, n.12, p.128-131, dec. 1977.
44. KROESCHELL, W. Fibra reciclada en contenedores corrugados. **MARI/ Board Converting News**, Medellin, v.5, n.3, p. 29-31, may/jun. 1992.
45. KUSKOWISKI, S. J.; CONSIDINE, J. M.; LEE, S. K. Corrugating components and their relationship to combined board performance. In: CONFERENCE OF MOISTURE- INDUCED CREEP BEHAVIOR OF PAPER AND BOARD, 1994, Stockholm. **Proceedings**. Stockholm: STFI, 1994. p.38.
46. LAUFENBERG, T. L. Characterization of paperboard, combined board, and container performance in the service moisture environment. In: INTERNATIONAL PAPER PHYSICS CONFERENCE, 1991, Atlanta. **Proceedings**. Atlanta: TAPPI Press, 1991. p.300-304.
47. LAW, K. N.; VALADE, J. L.; QUAN, J. Effects of recycling on paper making properties of mechanical and high yield pulps: Part I: Hardwood pulps. **TAPPI Journal**, Atlanta, v.79, n.3, p.167- 173, march 1996.

48. LEAKE, C. H. Measuring corrugated box performance. **TAPPI Journal**, Atlanta, v.71, n.10, p.71-75, oct. 1988.
49. LEAKE, C. H.; WOJCIK, R. Humidity cycling rates: how they influence container life spans. **TAPPI Journal**, Atlanta, p. 26-30, oct. 1993.
50. LUMIAINEN, J. Refining - a key to upgrading the papermaking potential of recycled fibre. **Paper Technology**, London, p.41-44, sept. 1994.
51. MARCONDES, J. **An introduction to fibreboard packaging**. Melbourne: Victoria University of Technology, 1994. 164p.
52. MILTZ, J.; DOODY, V. R. Effect of atmospheric environment on the performance of corrugated. **Packaging Technology**, Philadelphia, v.11, n.1, p.19-23, feb. 1981.
53. McKEE, R. C.; GANDER, J. W.; WACHUTA, J. R. **Compression strength formula for corrugated boxes**. Appleton: Institute of Paper Chemistry, 1963. 12p. (Project n. 1108-4 Report 79)
54. MOURAD, A. L.; GARCIA, A. E.; BORDIN, M. R.; ARDITO, E. F. G. **Embalagens de papel, cartão e papelão ondulado**. Campinas: ITAL, 1999. 282p.
55. NAZHAD, M. M.; PASZNER, L. Fundamental of strength loss in recycled paper. **TAPPI Journal**, Atlanta, v.77, n.9, p.171-179, sept. 1994.
56. NISKANEN, K. J.; KUSKOWSKI, S. J.; BRONKHORST, C. A. Dynamics of higoexpansion. In: CONFERENCE OF MOISTURE – INDUCED CREEP BEHAVIOR OF PAPER AND BOARD. 1994, Stockholm. **Proceedings**. Stockholm: STFI, 1994. p.31.
57. PARHAM, R. A.; KAUSTINEN, H. M. Papermaking materials. In: AN ATLAS of eletron micrographs. Appleton: The Institute of Paper Chemistry, 1974. 55p.
58. PERES, P. S. Tendências de embalagens de papelão ondulado. In: IOPP/CETEA-SEMINARIO INTERNACIONAL DE EMBALAGEM.1997, São Paulo. **Anais**. Campinas: CETEA/ITAL, 1997. 14p.
59. PHIPPS, J. The effects or recycling on the strength properties of paper. **Paper Technology**, London, v.35, n. 6, p.34-40, jul./aug. 1994.
60. PICHLER, E. F. **Caixas de papelão ondulado: desenvolvimento, especificação, controle de qualidade e utilização**. São Paulo: IPT, 1987. 71p.
61. POMMIER, J. C.; POUSTIS, J.; AZENS, J. J.; VILLENEUVE, P.; VIDAL, F. Influence of the orientation of the paper components on the vertical compression

- resistance of corrugated boxes. In: International Progress in Paper Physics - A Seminar. Atlanta: Institute of Paper Science and Technology, 1994. 1p. (Abstracts)
62. PRODUTOS florestais: papéis de embalagem. **BNDES – Informe setorial**, São Paulo, n.13, p.1-8, nov. 1997.
63. SENAI/IPT. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação de pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: SENAI/IPT, 1988. v.1. 559p.
64. SETH, S. Edgewise compressive strength of paperboard and the ring crush test. **Tappi Journal**, Atlanta, v.67, n.2, p.114-115, 1984.
65. SYMPOSIUM – CYCLIC HUMIDITY EFFECTS ON PAPERBOARD PACKAGING, 1992, Madison. **Proceedings**. Madison: Forest Products Laboratory, 1992. 171p.
66. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Compression test of fiberboard shipping containers**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994a. 4p. T 804 om - 89.
67. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Edgewise compressive strength of corrugated fiberboard (short column test)**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994b. 3p. T 811 om – 88.
68. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Flexural stiffness of corrugated board**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994c. 2p. T 820 cm -85.
69. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Grammage of paper and paperboard (weight per unit area)**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994d. 3p. T 410 om- 88.
70. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Ring crush of paperboard**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994e. 2p. T 818 om – 87.
71. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Standard condition and testing atmosphere for paper, board, pulp handsheets and related products**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994f. 3p. T 402 om-93.
72. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Stiffness of paper and paperboard (Taber-type stiffness tester)**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994g. 4p. T 489 om - 92.
73. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994h. 3p. T 411 om - 89.

74. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **Water absorptiveness of sized (no-bibulous) paper and paper board (Cobb Test)**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994i. 3p. T 441 om- 90.
75. UESAKA, T.; MOSS, C.; NANRI, Y. The characterization of higroexpansivity of paper. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 18, n.1, p.J11 - J16, jan. 1992.
76. UESAKA, T., QI; D. Higroexpansivity of paper - effects of fibre-to-fibre bonding. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v.20, n.6, p. J175 – 181, 1994.
77. URBANIK, T. J. **Effect of paperboard stress-strain characteristics on strength of singlewall corrugated fiberboard: a theoretical approach**. USDA. Madison: Forest Products Laboratory, 1981a. 15p. (Research paper FPL 401)
78. URBANIK, T. J. The principle of load-sharing in corrugated fiberboard. **Paperboard Packaging**, Chicago, v.66, n.11, p. 122-128, nov. 1981b.
79. URBANIK, T. J. **Hygroexpansion-creep model for corrugated fiberboard**. Madison: Forest Products Laboratory, 1994. 14p.
80. URBANIK, T. J. Machine direction strength theory of corrugated fiberboard. **Journal of Composites Technology & Research**, v.18, n. 2, p.80-88, apr. 1996a.
81. URBANIK, T. J. Method analyzes analogue plots of paperboard stress-strain data. **TAPPI**, Atlanta, v.65, n. 4, p.104-133, apr. 1982.
82. 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: ASME, 1996b. p. 85-94.
83. URBANIK, T. J.; LEE, S. K. Swept sine humidity schedule for testing cycle effects on creep. **Wood and Fiber Science**, v. 26, n. 4, p.134-144, 1994.
84. WALLIS, G. O novo cenário da indústria de embalagem no Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNATIONAL DE EMBALAGEM BRASIL/EUA, 1999, São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: PMMI/CETEA, 1999. 35p.
85. WINK, W. A. The effects of relative humidity and temperature on paper properties. **TAPPI**, Atlanta, v. 44, n. 6, p.171A-180A, jun. 1961.
86. WOODWARD, T. W. Recycled fiber types, processing history affect pulp behavior during papermaking. **Pulp & Paper**, Skokie, v.70, n.8, p. 81-83, aug. 1996.

ANEXO A



FIGURA A1. Equipamento VCA – Vacuum Compression Apparatus, desenvolvido no Forest Products Laboratory – Madison –WI.

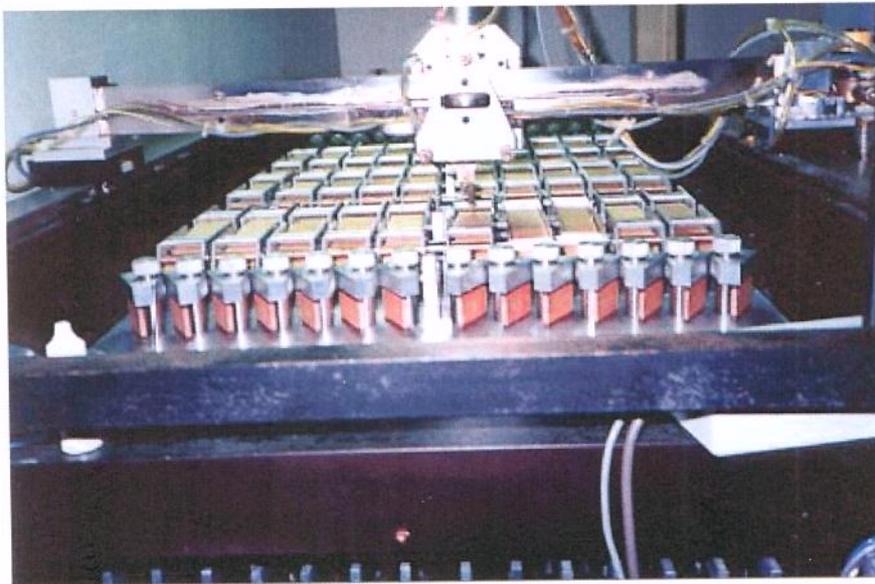


FIGURA A2. X-Y Table usada para determinação da taxa de fluência das estruturas de papelão ondulado (*ECT creep test*).