



STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF RESISTANCE TO COMPRESSION AND CRUSHING IN CORRUGATED CARDBOARD PACKAGES IN ENVIRONMENTS WITH HIGH RELATIVE HUMIDITY

ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E AO ESMAGAMENTO EM EMBALAGENS DE PAPELÃO ONDULADO EM AMBIENTES COM ELEVADA UMIDADE RELATIVA

Carla E. T. Ritter ¹✉, Willian Barbosa¹

¹Centro Superior de Tecnologia TECBrasil, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul/RS, Brasil

✉ cetodero@gmail.com

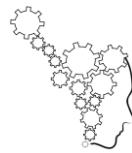
Received: 18 novembro 2020/Accepted: 06 dezembro 2020 / Published: 14 dezembro 2020

ABSTRACT. Cellulose has no natural barrier to water absorption, reducing its application as a package for frozen or chilled products requiring the application of water repellent. The study evaluated the resistance to compression and crushing in corrugated cardboard packaging under the condition of 90% RH and 5°C, with and without coatings. The relationship between corrugated cardboard with structures in virgin fibers and recycled fibers was also established, with variations in the mechanical properties of the packaging, within periods 3 to 96 hours and with water repellent concentrations of 13.5%, 17.5%, 24 %, 30% and 42%. It was observed that waterproofing with 42% non-volatile content showed lower water absorption content, reaching a difference of 60.24% for recycled cardboard and 57.70% for virgin cardboard (kraft) in relation to cardboard not waterproofed. For the compressive strength in corrugated cardboard, it was found that waterproofing with 42% non-volatile content is the concentration with the best result for both cardboard and for virgin cardboard, 17.5% and 24%. There were also variations in the results of compressive strength in air-conditioned boxes obtained with the McKee equation, of 20.57% for recycled cardboard and 33.87% for virgin cardboard.

Keywords: Corrugated Cardboard, Crushing, Compression, Water Repellent, Cardboard Boxes.

RESUMO. A celulose não possui barreira natural à absorção de água, reduzindo a sua aplicação como embalagem para produtos congelados ou resfriados necessitando de aplicação de hidrorrepelente. O estudo avaliou as resistências à compressão e ao esmagamento em embalagens de papelão ondulado sob a condição de 90% UR e 5°C, com e sem revestimentos. Também se estabeleceu a relação entre papelões ondulados com estruturas em fibras virgens e fibras recicladas, com as variações nas propriedades mecânicas das embalagens, dentro de períodos de 3 a 96 h e com concentrações do hidrorrepelente de 13,5%, 17,5%, 24%, 30% e 42%. Observou-se que a impermeabilização com 42% de teor de não voláteis apresentou menor teor de absorção de água, chegando à diferença de 60,24% para os papelões reciclados e 57,70% para os papelões virgens (kraft) em relação aos papelões não impermeabilizados. Para a resistência à compressão em papelão ondulado, verificou-se que a impermeabilização com 42% de teor de não voláteis é a concentração de melhor resultado para ambos os papelões e 17,5% e 24% para o papelão virgem. Também se verificou variações nos resultados de resistência à compressão em caixas climatizadas obtidas com a equação de McKee, de 20,57% para os papelões reciclados e 33,87% para os papelões virgens.

Palavras-chave: Papelão Ondulado, Esmagamento, Compressão, Hidrorrepelente, Caixas de Papelão.



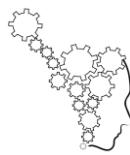
1 INTRODUÇÃO

O crescimento do mercado brasileiro de papelão ondulado nos segmentos de embalagens primárias demonstra que, além das embalagens de transporte (secundárias), o papelão ondulado é de grande utilidade ao mercado primário de alimentos, de plantas, de hortaliças e outros. Segundo Camilo (2018 apud RUIZ, 2018, p.134): “No Brasil, 73% das embalagens de papelão ondulado produzidas atendem aos setores de bens não duráveis e de primeira necessidade: 61% indústria alimentícia, 7% produtos de limpeza e 5% cuidados pessoais e produtos farmacêuticos”.

Através destes dados, entende-se a grande utilização do papelão ondulado nos setores de embalagens e de bens de consumo, porém, um fator limitador do aumento em sua utilização mundial está associado diretamente à característica da matéria-prima, pois esta não oferece a propriedade de barreira à condensação do vapor de água, oxigênio e outros gases, sem que seja aplicado algum revestimento em sua estrutura. Além disso, sofre redução de sua resistência mecânica quando exposto ao contato com líquidos. Essas características, entre outras, fizeram com que seu emprego fosse mais expressivo como embalagem secundária, quando comparado ao seu uso como embalagem primária, necessitando a aplicação de hidrorrepelentes para a redução dos impactos nas propriedades mecânicas (NOLETTTO, 2010, p.33).

Neste trabalho serão avaliadas as variações nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e resistência ao esmagamento em amostras e embalagens de papelão ondulado, abordando a aplicação de revestimentos hidrorrepelentes, a fim de compreender a sua eficiência como barreira frente à condensação de água e absorção de umidade sobre as embalagens armazenadas em condições de baixa temperatura e elevada umidade relativa em curtos períodos de tempo de exposição (3h, 6h, 12h, 24h, 48h e 96h), realizando a comparação entre papelões com bases de fibras recicladas e virgens.

Para a produção do papelão, primeiramente faz-se necessária a produção do papel. O papel é estruturado através do elevado agrupamento de fibras celulósicas de diversas dimensões, entrelaçadas entre si e posteriormente prensadas, gerando lâminas planas (ROBERT, 2007, p.3). Naturalmente, a celulose possui característica hidrofílicas, sendo um polissacarídeo formado por unidades β -D-glucose, dos quais facilitam a geração de pontes de



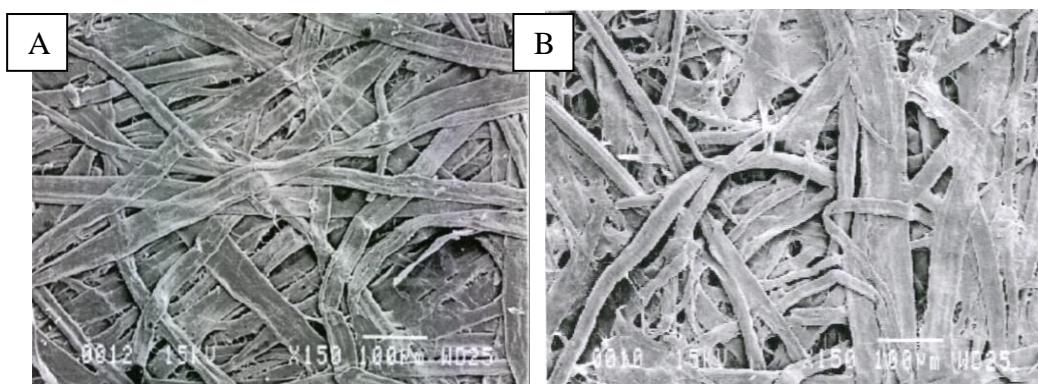
hidrogênio que se estabelecem inter e intramolecularmente. Devido a isso, a celulose apresenta elevada interação com a água (hidrogênio e oxigênio), inclusive na condição de vapor (MOURAD, 2013, p. 1).

Para a fabricação do papel virgem, o mercado nacional utiliza, principalmente, dois tipos específicos de madeira: duras (Eucalipto) e moles (Pinus). As madeiras moles possuem fibras alongadas, resultando em um papel com maior resistência mecânica ao rasgamento e ao tracionamento, porém menos liso. Já as madeiras duras, possuem fibras curtas, resultando em papéis de menor resistência, porém mais lisos, garantindo maior qualidade de impressão no processo de conversão em embalagens (NOLLETO, 2010 apud MOURAD, 2010, p.31).

Já os papéis reciclados são provenientes do reaproveitamento de embalagens utilizadas, onde estas são prensadas e transformadas em aparas de papelão para posterior reprocessamento. Este tipo de papel possui impurezas presentes na sua superfície, provenientes da incompleta eliminação de materiais não celulósicos durante o processamento inicial da massa, apresentando pontos escuros entre as fibras de celulose.

A Figura 1 (A) demonstra as fibras de celulose dos papeis *kraft* e reciclados (B) obtidas através de microinspeção por varredura com aumento de 150 vezes, onde é possível observar no papel virgem, a uniformidade e alinhamento de fibras com pequenos espaçamentos entre si, além de fibras alongadas, das quais proporcionam maior resistência física do papel frente à compressão e ao arrebentamento. Já no papel reciclado (Figura 1 (B)) é possível observar o desordenamento estrutural, assim como, o aumento nos espaçamentos entre fibras em relação ao papel *kraft*. Também é possível observar fibras curtas e quebradas, das quais proporcionam menor resistência física do papel frente à compressão.

FIGURA 1 - MEV (MICROINSPEÇÃO POR VARREDURA) AMPLIAÇÃO DE 150X.



FONTE: Ardito (2000)



Após a produção dos papéis, há a conversão em papelão ondulado. O papelão ondulado possui diversas configurações de miolos ondulados centrais, chamados de ondas, representadas por uma letra correspondente. Dentre os principais tipos de ondas produzidas em 2017 no Brasil, evidenciou-se a onda B como a principal em volume de produção, com o resultado anual de 2,61 bilhões de m², representando 47,46% do total produzido, seguido pelas ondas C e BC (onda dupla obtida com a junção da onda B com a onda C), das quais possuem as produções de 1,57 bilhões de m² e 1,01 bilhão de m², e com representatividades de 28,49% e 18,48% do total produzido, respectivamente (ABPO, 2017) (Tabela 1):

TABELA 1 – DISTRIBUIÇÃO DA PRODUÇÃO POR TIPO DE ONDA - 2017

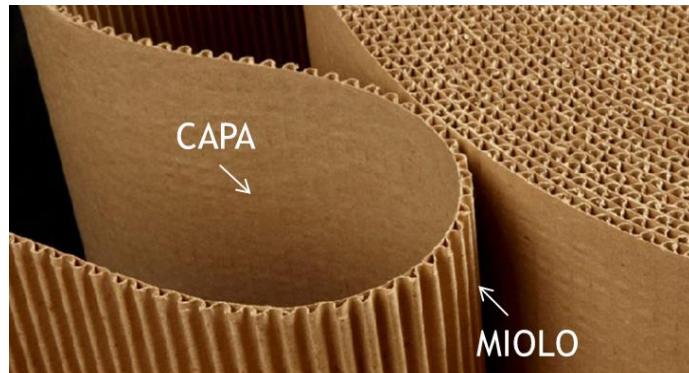
Distribuição da Produção por Tipo de Onda - 2017*		
Tipo	Mil m ²	%
B	2.610.006	47,46
C	1.566.743	28,49
BC	1.016.505	18,48
E	100.043	1,82
AC	95.291	1,73
BE	4.115	0,07
EC	4.085	0,07
BCE	2.380	0,04
A	978	0,02
Outros	98.982	1,80
Total	5.499.128	100,00

FONTE: ABPO (2017)

A formação do papelão ondulado é definida como: Estrutura formada por um ou mais elementos ondulados (miolos) fixados a um ou mais elementos planos (capas) por meio de adesivo aplicado no topo das ondas. Dentro dessa configuração, podem-se definir três bases principais para o papelão ondulado. São elas: Capa externa, miolo (s) e capa interna (também conhecida como forro) (ABPO, 2018) (Figura 2).



FIGURA 2 – COMPOSIÇÃO DO PAPELÃO ONDULADO



FONTE: Trombini Embalagens (2019)

Cada elemento do papelão ondulado possui uma característica específica, da qual deve atuar mecanicamente ou esteticamente, junto às chapas, caixas ou acessórios que posteriormente serão projetados. Os principais efeitos de cada elemento, bem como as possíveis fibras utilizadas na composição do papel são apresentados no Quadro 1 (JORGE, 2013, p.137):

QUADRO 1 – ELEMENTOS E PRINCIPAIS EFEITOS NA ESTRUTURA DO PAPELÃO

ELEMENTOS	MATERIAL	EFEITOS
Capa	Confere rigidez Resistência ao arrebentamento Resistência ao rasgamento Suporte de impressão	Fibra virgem ou Fibra reciclada
Miolo	Resistência ao esmagamento Resistência ao choque Resistência à compressão	Fibra virgem (Semiquímicos) ou Fibra reciclada

FONTE: Jorge (2013)

Em relação aos ensaios laboratoriais: O ensaio de esmagamento a ABPO (2018, p.40) define conceitualmente como: a medida necessária de força para esmagar as ondas de uma amostra de papelão ondulado. Assim como os demais ensaios, este ensaio deve ser realizado em aparelho adequado, com a aplicação de carga uniformemente crescente e perpendicular à superfície das amostras.

Já a resistência à compressão de coluna é definida por Noletto (2010, p.7) como: a força máxima suportada pelo material por unidade de comprimento, quando colocado sob o esforço de compressão. Para isso, faz-se necessário a colocação das ondas do papelão



perpendiculares aos planos que contém as placas compressoras do equipamento. O aparelho utilizado neste tipo de ensaio deve possuir placas com superfícies planas e lisas, livres de ondulações ou rugosidades expressivas. Assim como, o aparelho deve atender a todos os requisitos da norma NBR NM-ISO 187 (2000). Para a aplicação do conceito em caixas de papelão montadas, a ABPO (2018, p.30) descreve: “Resistência oferecida pela caixa de papelão ondulado a força uniformemente crescente, aplicada nos sentidos vertical, lateral ou longitudinal, por uma prensa apropriada, estando à caixa selada e, usualmente, sem conteúdo”.

Em caixas de papelão ondulado, para que se obtenham melhores valores de aproveitamento de resistência à compressão, as ondulações do papelão devem estar paralelas às direções em que se espera ter maiores valores de carga. Ou seja, as ondas servem como estruturas para resistir à força de empilhamento aplicada nas caixas (TWEDE, 2010; GODDARD, 2010).

Além das direções das ondas, é necessária a aplicação de fatores de perda no projeto, para que possa ser garantida a prevenção contra situações de manuseio, tempo de estoque, umidade, quantidade de empilhamento e forma de empilhamento (NOLETTTO, 2010 Apud GARCIA, 2010 & BORDIN 2010). A resistência à compressão remanescente pode ser verificada através da Tabela 2, do qual apresenta os resultados de acordo com cada situação de manuseio da embalagem.



TABELA 2 – FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS A EMBALAGENS 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)

2 MÉTODO

O presente trabalho limitou-se a abordagem de embalagens fabricadas de papelão ondulado, com estruturas de papéis *kraftliner* (KL) e papéis reciclados (R), com configurações de ondas definidas pela letra B, sendo a sua seleção justificada pelo maior consumo nacional em volume (47,46% - registro de 2017 (Tabela 1)), compostas com e sem a aplicação de revestimento hidrorrepelente em sua capa interna.

As descrições dos papelões fornecidos para a realização do presente estudo (Quadros 2 e 3) são expressas de acordo com o padrão: PO 3150 RR B; PO 3780 KK B.

Onde:

PO: Papelão ondulado.



XXXX (Quatro algarismos consecutivos às letras PO): Descrição utilizada pelo fabricante;

RR: Papelão com capa interna e externa com fibras recicladas (R);

KK: Papelão com capa interna e externa com fibras *kraft* ou *Kraftliner* (K);

B: Onda do papelão ondulado.

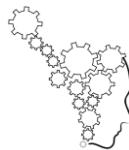
Assim, o papelão PO 3150 RR B (Quadro 2) representou os papelões reciclados, enquanto o papelão PO 3780 KK B (Quadro 3) representou os papelões com fibras virgens.

QUADRO 2 – ESPECIFICAÇÃO DE PAPELÃO ONDULADO - RECICLADO

ESPECIFICAÇÃO DE PAPELÃO ONDULADO - 3150 RR B		
PAPÉIS		DESCRIÇÃO
Capa interna	R 120	Papel reciclado com gramatura de 120 gramas / m ²
Miolo	R 120	Papel reciclado com gramatura de 120 gramas / m ²
Capa externa	R 120	Papel reciclado com gramatura de 120 gramas / m ²
PROPRIEDADES MECÂNICAS		
DADOS		RESULTADOS
Onda		B
Espessura (mm)		2,9 ± 0,5
Compressão (Edge Crush Test) (kN/m)		5,0 ± 0,8
Esmagamento (kPa)		260 ± 80

FONTE: Trombini Embalagens (2019)

Observou-se que ambos os papelões possuem papéis com fibras recicladas no miolo central. Isto ocorre, pois o miolo corrugado não necessita das características estéticas existentes no papel virgem, desta maneira, o papel reciclado de maiores gramaturas atende a necessidade de resistência mecânica mantendo o baixo custo final do papelão produzido. Ou seja, o papelão virgem (Quadro 3) possuía papéis virgens nas capas e papel reciclado no miolo, sendo esta uma prática comum dentro do mercado de embalagens (ABPO, 2018).



QUADRO 3 – ESPECIFICAÇÃO DE PAPELÃO ONDulado - VIRGEM

ESPECIFICAÇÃO DE PAPELÃO ONDulado - 3780 KK B		
PAPÉIS		DESCRIÇÃO
Capa interna	KL 175	Papel virgem com gramatura de 175 gramas / m ²
Miolo	R 175	Papel reciclado com gramatura de 175 gramas / m ²
Capa externa	KL 210	Papel virgem com gramatura de 210 gramas / m ²
PROPRIEDADES MECÂNICAS		
DADOS		RESULTADOS
Onda		B
Espessura (mm)		3,1 ± 0,5
Compressão (Edge Crush Test) (kN/m)		8,0 ± 0,8
Esmagamento (kPa)		300 ± 80

FONTE: Trombini Embalagens (2019)

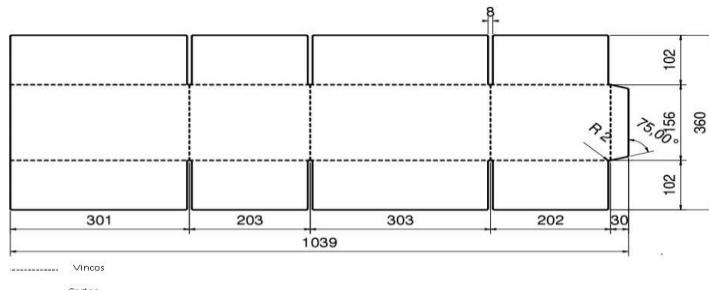
Para a realização dos ensaios nos papelões com a nomenclatura PO 3150 RR B (fibras recicladas) e 3780 KK B (Fibras virgens – *Kraftliner*) respectivamente, foram necessárias 1008 amostras de papelão ondulado totais, sendo 504 amostras de cada papelão analisado (72 amostras para cada tempo de análise), com sua divisão realizada de acordo com cada tempo de exposição em câmara fria. Os ensaios foram realizados em 0, 3, 6, 12, 24, 48 e 96h.

As concentrações de teores de não voláteis do revestimento hidrorrepelente utilizadas nos ensaios foram 0%, 13,5%, 17,5%, 24%, 30% e 42% (massa/volume).

A caixa de papelão utilizada para o ensaio de compressão em caixas (*Box Compression Test*) foi uma caixa do grupo 02 (código ABNT 0201), denominada popularmente como caixa normal ou maleta (Figura 3). A escolha deste estilo deu-se através da maior utilização dentro do mercado nacional de embalagens, sendo o estilo com maior venda percentualmente pela indústria fornecedora dos papelões para a realização do presente trabalho (57,2%) (Trombini Embalagens S/A, 2018).



FIGURA 3 – PROJETO DA CAIXA UTILIZADA NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO



FONTE: O autor (2020)

O revestimento hidrorrepelente foi caracterizado como emulsão líquida a base de água de um copolímero acrílico com a coloração branca (Quadro 4).

QUADRO 4 – PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO HIDRORREPELENTE

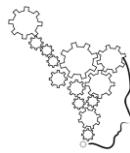
PROPRIEDADES - REVESTIMENTO HIDRORREPELENTE		
Característica	Mínimo	Máximo
pH a 25 °C	8	10
Viscosidade Brookfield (kg/(ms))	0,08	0,15
Teor de não voláteis (%)	13,5	42
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
Composição	Copolímero acrílico	
Aspecto físico	Emulsão líquida, branca	
Ponto de ebulição	> 98 °C	
Caráter iônico	Aniônico	
Toxicidade	Classificado como não tóxico	

FONTE: Trombini Embalagens (2019)

Todas as amostras de papelão ondulado cortadas foram pré-acondicionadas em laboratório por um período de 24 h na temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $50 \pm 2\%$ de umidade relativa (UR), conforme norma ABNT NM-ISO 187, afim de estabiliza-las, antes dos ensaios, em um mesmo percentual de umidade (climatização).

Através destes materiais, foram realizados os seguintes ensaios, divididos entre: amostras de papelão sem impermeabilização, amostras e caixas de papelão impermeabilizadas com diferentes concentrações de teor de não voláteis do revestimento hidrorrepelente:

- Análise de gramatura: Conforme normas ISO 536 e TAPPI 410 om-08;
- Análise de umidade: Conforme normas ISO 287 e TAPPI 412 om-06;



- Ensaio de resistência ao esmagamento: Conforme norma ABNT NBR 6736;
- Ensaio de resistência à compressão de coluna (*Edge Crush Test*): Conforme norma ABNT NBR 6737;
- Ensaio de resistência à compressão de caixas (*Box Compression Test*): Conforme norma ABNT NBR 6739.

3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DE UMIDADE

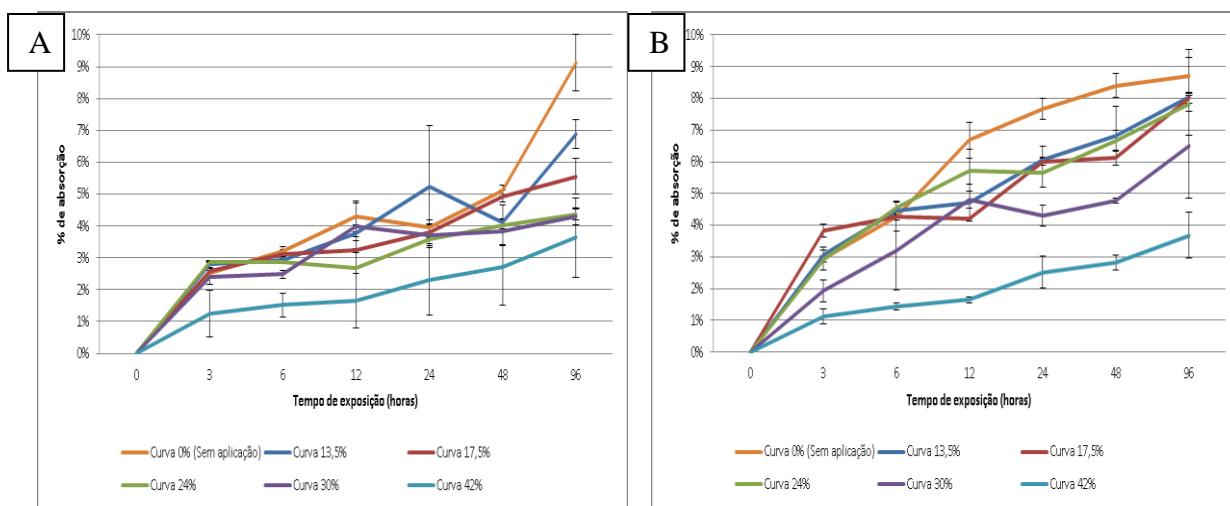
Para o papelão reciclado (Figura 4 (A)) observou-se que a não impermeabilização resulta em maiores percentuais de absorção em relação às demais análises. Entre o período de 0 a 6 horas, observou-se que a impermeabilização com 42% de teor de não voláteis é a mais indicada frente à repelência hídrica, sendo, posteriormente a este período, as concentrações de 30% e 24% equivalem-se estatisticamente a esta concentração, possuindo semelhantes resultados de absorção mássicos ao final do período de 96 horas.

Já o papelão virgem (Figura 4 (B)) apresentou a concentração com 42% de teor de não voláteis como a principal impermeabilização. Seu período de maior absorção percentualmente em relação ao tempo de exposição ocorreu entre o período de 0 a 3 horas, assim como as demais concentrações, porém em menores proporções e ao final das 96 horas de exposição verificaram-se menores resultados finais, mesmo com seu elevado desvio padrão no ponto de 96 horas.

Ao final das análises observou-se que ambos os papelões (reciclado e virgem) apresentaram curvaturas semelhantes com a impermeabilização com 42% de teores de não voláteis (sendo a mais indicada no caso de concentração única. Ou seja, nos casos onde somente se possa ter uma especificação do revestimento hidrorrepelente), demonstrando que a película do produto aplicada com esta concentração possui maior uniformidade, assim como, apresentam semelhante repelência hídrica entre diferentes estruturas de fibras do papelão. Tais condições permitem que as embalagens produzidas de ambos os papelões, possam permanecer por mais tempo em câmaras frias, mantendo suas propriedades físicas e assim, preservando por maiores períodos o alimento ou produto armazenado.



FIGURA 4 – ANÁLISE DE UMIDADE EM PAPELÃO ONDULADO VIRGEM COM VARIAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DO REVESTIMENTO HIDRORREPELENTE.



FONTE: O autor (2020)

3.2 ENSAIO DE ESMAGAMENTO

Nas 96h de exposição do ensaio com papel reciclado (Figura 5 (A)) e em função do desvio padrão, pode-se afirmar que não há diferença significativa da absorção de água na resistência ao esmagamento nas amostras de diferentes concentrações de hidrorrepelente (inclusive sem impermeabilização).

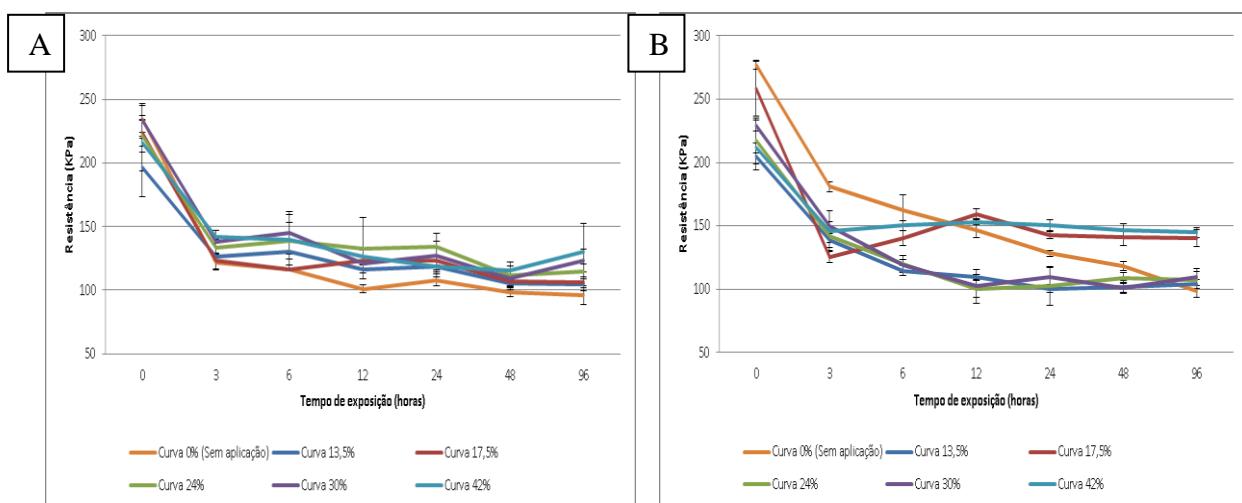
Diferentemente da condição observada no papelão reciclado, o papelão virgem (Figura 5 (B)) apresenta como principais impermeabilizações as concentrações de 42% e 17,5%, das quais apresentaram, estatisticamente, resultados finais de resistência ao esmagamento semelhantes entre si, porém superiores as demais curvas.

Observou-se assim, juntamente com o ensaio de absorção realizado anteriormente, que o aumento de umidade tem relação direta com a redução de resistência ao esmagamento, principalmente no período entre 0 e 3 horas de exposição (período crítico na redução da resistência ao esmagamento para ambos os papelões), pois é o período onde há maior absorção pelo miolo corrugado do papelão (principal elemento de resistência ao esmagamento do papelão), sendo que nos períodos posteriores a umidade possui menor influência nesta propriedade mecânica, pois a concentração hídrica passa a ser distribuída entre todos os elementos, sendo sua concentração com maior intensidade nas capas internas e externas (alojamento hídrico superficial). Tal condição foi verificada por Mourad (2013, p.1), do qual mencionou que: “[...] as fibras de celulose ao absorverem água, tornam-se inchadas, mais



flexíveis e, apresentam redução da maioria de suas propriedades físico-mecânicas". Ou seja, conforme houve o aumento da flexibilidade do papelão ondulado, consequentemente, houve a redução de sua rigidez, o que influenciou diretamente a resistência ao esmagamento e também à compressão, pois houve variação estrutural do papelão, fazendo com que houvesse variação na estrutura dimensional das ondas do papelão, reduzindo a sua capacidade de suporte de carga horizontal (esmagamento).

FIGURA 5 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO EM PAPELÃO COM VARIAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DO REVESTIMENTO HIDRORREPELENTE



FONTE: O autor (2020)

3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE COLUNA

Para o papelão reciclado (Figura 6 (A)) observou-se que a concentração de 42% de teor de não voláteis é a mais indicada, visando a manutenção da resistência à compressão de coluna, uma vez que, seus resultados ao final do período de 96 horas foram superiores aos demais resultados. Ou seja, esta concentração possui melhores características para manter a resistência à compressão do papelão ondulado, frente ao objetivo de repelência hídrica causada pelo uso do produto.

Observou-se comportamento similar na redução à resistência à compressão para as amostras com e sem impermeabilização em diferentes concentrações nos papelões virgem (Figura 6 (B)) e reciclado (Figura 6 (A)) (salvo exceção da concentração de 42% para o papelão reciclado).

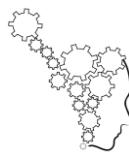
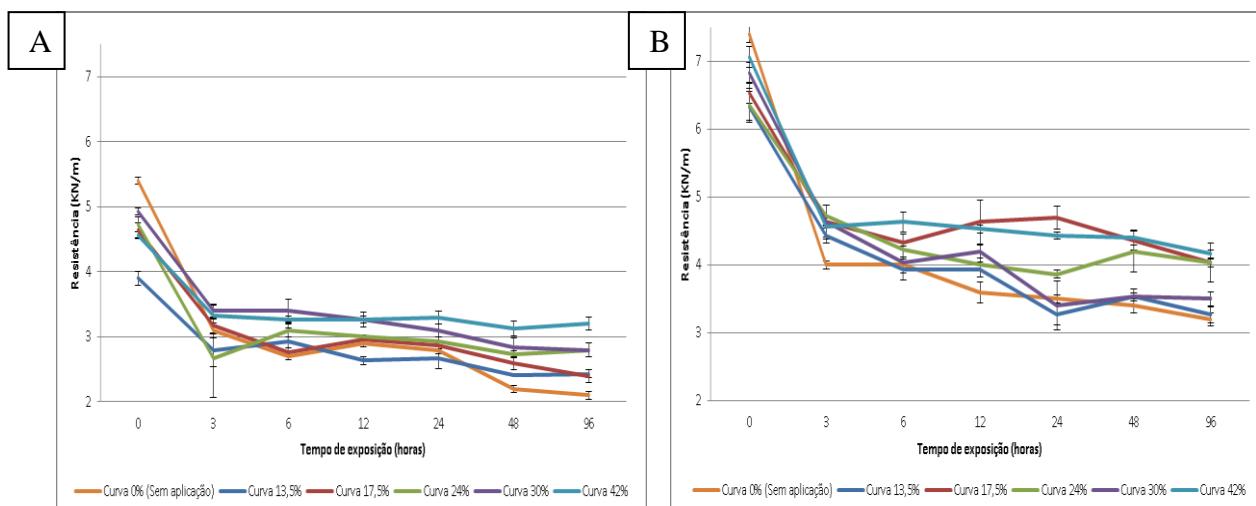


FIGURA 6 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE COLUNA EM PAPELÃO COM VARIAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DO REVESTIMENTO HIDRORREPELENTE



FONTE: O autor (2020)

Por fim, verificou-se que os aumentos nos percentuais mássicos do papelão, ocasionados pela absorção de umidade, reduzem a resistência à compressão, pois as fibras de celulose, ao ocorrer à penetração de água, deformam-se volumetricamente, perdendo percentuais de força no entrelaçamento das fibras construtoras do papel, o que, consequentemente, ocasiona o enfraquecimento da resistência mecânica à compressão dos papelões (miolo corrugado) (NOLLETO, 2010, p.58). Tais reduções são mais evidentes nos papelões reciclados, pois o entrelaçamento de fibras possui menor força, devido aos elevados percentuais de impurezas (materiais apolares) presentes no papel, ocasionado pelo processo de reciclagem.

3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CAIXAS

Inicialmente, foram realizados os cálculos teóricos de *McKee*, obtendo-se os valores de compressão, de acordo com as medidas perimétricas e especificação da caixa e papelões das amostras. Para a realização dos cálculos foram avaliados, através das extremidades de especificações do ensaio de compressão de coluna dos papelões (mínimo, nominal e máximo) (Quadros 2 e 3), juntamente com o perímetro calculado (1024 mm), obtendo-se assim os valores teóricos de compressão: RCC Mínimo, RCC Nominal e RCC Máximo (Tabela 3):



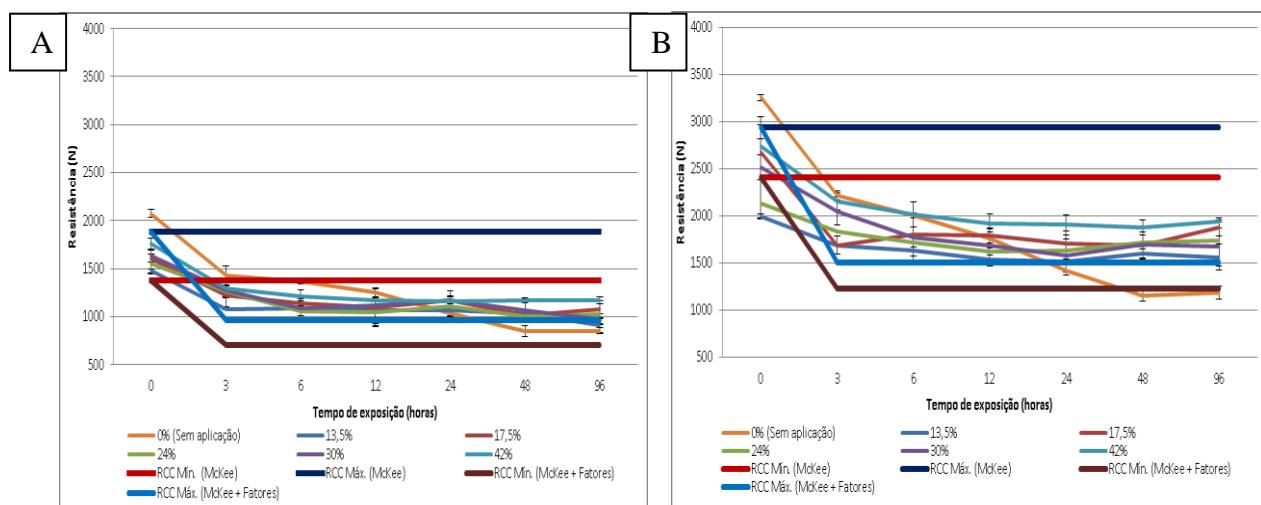
TABELA 3 – CÁLCULO DE COMPRESSÃO DE CAIXAS COM O USO DE EQUAÇÃO DE MCKEE

RESULTADOS COM O USO DA EQUAÇÃO DE MCKEE		
RCC (N)	PO 3150 RR B (Reciclado)	PO 3780 KK B (Virgem)
RCC Mínimo	1373	2413
RCC Nominal	1589	2639
RCC Máximo	1884	2943

FONTE: O autor (2020)

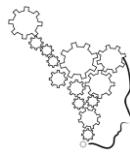
Os dados das médias encontradas nos ensaios (triplicatas) de resistência a compressão em caixas de papelão ondulado (PO), realizados nas amostras com concentrações de teores de não voláteis do revestimento hidrorrepelente de 0% (Sem aplicação), 13,5%, 17,5%, 24%, 30% e 42%, através das variações de tempos de exposição dos papelões reciclado e virgem, juntamente com as curvas de resistência à compressão de caixas calculados teoricamente com a equação de *McKee* e as curvas de resistência calculadas com a equação de *McKee* associadas aos fatores de segurança abordados por Bordin & Garcia (Tabela 2), são apresentados através da Figura 7 (A) (papelão reciclado) e 7 (B) (papelão virgem).

FIGURA 7 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CAIXAS DE PAPELÃO COM VARIAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DO REVESTIMENTO HIDRORREPELENTE



FONTE: O autor (2020)

Observou-se que, assim como no ensaio de resistência à compressão de coluna (*Edge Crush Test*) a resistência à compressão em caixas de ambos os papelões possui maior queda no período de 0 a 3 h, havendo menor variação nos períodos posteriores.

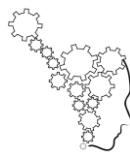


Com isso, notou-se que a impermeabilização com 42% de teor de não voláteis, foi a principal dentre as opções analisadas, partindo do ponto inicial. Apesar de, inicialmente, a aplicação do revestimento hidrorrepelente nesta condição, fazer com que as amostras apresentassem queda inicial em relação ás amostras de papelão não impermeabilizado (queda de 15,35% para o papelão reciclado e 16,04% para o papelão virgem), comparado com as demais concentrações do revestimento hidrorrepelente, a impermeabilização dos papelões com esta concentração resultou em maiores resultados finais de compressão de caixas de papelão ondulado (assim como evidenciado nos ensaios de compressão de coluna), sendo 37,41% superior para o papelão reciclado e 64,46% para o papel virgem. Também se verificou que, para ambos os papelões, ocorreu a estabilização na queda de resistência à compressão após 12 horas de exposição.

4 DISCUSSÃO

Através dos cálculos de *McKee* teóricos, observou-se que os resultados não são compatíveis com os dados reais dos ensaios de compressão, uma vez que as curvas das amostras dos papelões com a aplicação de revestimentos hidrorrepelentes expostas à umidade relativa de 90% romperam os limites mínimos e máximos das análises teóricas da equação de *McKee* (sem aplicação de fatores de segurança). Ou seja, ao romper a linha de RCC mínimo (*McKee*) os dados demonstram que o cálculo teórico subdimensiona a necessidade de compressão, uma vez que, expõe a resistência à compressão superior aos dados reais obtidos nas caixas. Desta maneira, o uso de somente este tipo de cálculo no dimensionamento da embalagem, ocasionaria o possível rompimento da caixa e consequente danificação do produto, pois a equação de *McKee* informaria a resistência da caixa superior ao que é evidenciado na prática para ambos os papelões analisados.

Já o uso de fator de segurança como correção ao ambiente de exposição das embalagens (umidade relativa de 90% e temperatura de 5°C) abordado por Bordin & Garcia associado à equação de *McKee* ocasionaria o superdimensionamento das caixas durante o projeto, pois as curvas dos papelões com a aplicação de revestimentos hidrorrepelentes apresentaram valores superiores aos valores teóricos evidenciados com a associação da equação de *McKee* com o fator de segurança para ambos os papelões. Ou seja, verificou-se que os valores reais mínimos não atingiram as curvaturas de RCC máximo (*McKee* + Fatores) o que consequentemente, ocasionaria o superdimensionamento de compressão necessário.



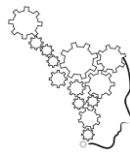
Através destas duas análises (*McKee* e *McKee* + Fatores) verificou-se que o uso de dados reais é o mais indicado no dimensionamento das embalagens frente à resistência à compressão vertical.

5 CONCLUSÃO

As análises de umidades demonstraram que ambos os papelões (fibras virgens (*kraft*) e fibras recicladas) possuem crescimentos nos percentuais de umidade quando, sem aplicação de revestimentos hidrorrepelentes, há aumento no tempo de exposição a umidade relativa de 90%. A aplicação do produto reduz os percentuais de absorção, cumprindo o seu propósito de repelência hídrica. Em relação às variações nas composições do revestimento hidrorrepelente, observou-se que a impermeabilização com 42% de teor de não voláteis é a composição com melhores propriedades frente à redução de absorção de água, chegando à diferença de 60,24% para os papelões reciclados e 57,70% em relação aos papelões virgens (*kraft*). Estes valores são de grande importância para a indústria de embalagens, pois permitem a avaliação de melhores composições do revestimento hidrorrepelente frente às necessidades de exposição à elevadas umidades relativas, juntamente com o incentivo no uso de papelões sustentáveis (reciclados).

Observou-se que as quedas de resistência ao esmagamento ocorrem, principalmente, nas primeiras 3 horas de exposição para ambos os papelões, sendo este o período de maior variação, não havendo diferenciação no comportamento das curvaturas de quedas entre a composição de fibras no período de 96 horas. Com isso, as 3 primeiras horas de exposição são o período crítico a ser acompanhado pelos projetistas de embalagens durante o desenvolvimento e dimensionamento de novos projetos, dos quais necessitem com grande relevância esta propriedade mecânica.

Para o papelão reciclado não há diferenciação expressiva entre as concentrações dos revestimentos hidrorrepelentes na manutenção da resistência ao esmagamento. Já para o papelão virgem, observou-se que a impermeabilização com 17,5%, juntamente com a impermeabilização com 42%, possui as melhores características, sendo 17,5% de teor de não voláteis do revestimento hidrorrepelente a concentração mais indicada para uso, devido aos menores percentuais de sólidos em sua composição, garantindo economia de recursos.



Em relação à compressão de coluna, observou-se que o período entre 0 e 3 horas é o período com maiores percentuais de queda de resistência, sendo este o principal tempo a ser analisado, tanto para os papelões reciclados, quanto para os papelões com base de fibras virgens. A aplicação do revestimento com 42% de teor de não voláteis é a mais indicada, frente à minimização nas quedas de resistência à compressão de papelões ondulados, sendo a aplicação com o revestimento hidrorrepelente com as concentrações de teores de não voláteis de 17,5% e 24% ótimas opções paralelas para o papelão virgem.

Os resultados nas compressões de caixas de papelão ondulado demonstraram a dispersão entre os dados teóricos calculados pela equação de *McKee* e os dados reais obtidos pelas compressões das caixas (climatizadas e sem revestimento hidrorrepelente), chegando às diferenças expressivas em ambos os papelões, ocasionando o subdimensionamento das embalagens durante a execução de novos projetos com o uso individualizado da equação de *McKee*. Também se verificou que a associação da equação de *McKee* com os fatores de segurança (resistência remanescente) de Bordin & Garcia (1992) ocasionam o superdimensionamento das embalagens, pois esta associação resulta em valores inferiores aos resultados reais observados nos ensaios de compressão. Com isso, demonstrando a necessidade de melhor avaliação da equação de *McKee* como ferramenta principal na análise de compressão e, consequentemente, empilhamento máximo calculado por projetistas no desenvolvimento de novas embalagens.

Para a impermeabilização, o revestimento hidrorrepelente com 42% de teor de não voláteis, foi a concentração com melhores resultados pontuais, frente às quedas de resistência à compressão em caixas de papelão. Apesar da aplicação do produto gerar a queda inicial de resistência (tempo de exposição igual a zero), ao final do período analisado (96 horas) observaram-se diferenças que justificam a sua aplicação.

Comprovou-se que o aumento mássico do papelão ocasionado pela absorção hídrica, através de elevada umidade relativa (90%), faz com que ocorram maiores quedas na resistência ao esmagamento e à compressão de papelões e caixas. Esta condição é minimizada com o uso do revestimento hidrorrepelente, porém faz-se necessária a avaliação das concentrações apresentadas frente aos custos do material e às necessidades aplicáveis a cada situação, visando à obtenção de ponto de equilíbrio das análises realizadas.



REFERÊNCIAS

- ARDITO, E.F.G. **Estudo do desempenho de papelão ondulado virgem e reciclado exposto a diferentes condições de umidade relativa.** 2003. 99 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NM-ISO 187**: Papel, cartão e pastas celulósicas – atmosfera normalizada para condicionamento e ensaio e procedimento de controle da atmosfera e condicionamento das amostras. Rio de Janeiro, 2000. 10p.
- _____. **NBR 6736**: Papelão ondulado de face simples e de parede simples – Determinação da resistência ao esmagamento. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 6737**: Papelão ondulado – Determinação da resistência à compressão de coluna. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 6739**: Embalagem de papelão ondulado – Embalagem de transporte vazia ou com o seu conteúdo – Ensaio de compressão usando aparelho de compressão. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 14575**: Papel e cartão – Descrição e calibração para o aparelho de compressão. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **NBR NM ISO 287**: Papel e cartão – Determinação do teor de umidade de um lote. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR NM ISO 536**: Papel e cartão – Determinação da gramatura. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAPELÃO ONDULADO. **ABPO. Referências**. São Paulo, 2019.
- _____. **ABPO. Embalagem de Papelão Ondulado: glossário**. São Paulo, 2018.
- _____. **Anuário Estatístico 2017**. São Paulo, 2017.
- BORDIN, M. R; GARCIA, A. E. **Fatores de correção para projeto de caixas de papelão ondulado**. Informativo CETEA, ITAL, Campinas, v4, n, 4, p.6-8, julho/agosto 1992.



- CAMILO, A. N, INSTITUTO DE EMBALAGENS. **Embalagens. Papelão Ondulado.** 1. ed. São Paulo: Barueri, 2018.
- JORGE, N. **Embalagens para Alimentos.** Cultura acadêmica: São Paulo: 2013.
- MOURAD, A. L. **Celulose: Absorção de umidade,** Revista o papel, 2013
- NOLETO, A. P. R. CETEA/ITAL. **Embalagens de papelão ondulado:** propriedades e avaliação da qualidade. 1. ed. São Paulo: Jd. Brasil. 2010.
- ROBERT, N. T. F. **Dossiê Técnico: Produção de embalagem de papel.** REDETEC: Rio de Janeiro. 2007.
- TAPPI TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **410 om-08.** Grammage of paper and paperboard (weight per unit area), Atlanta, 1998, 3p.
- TAPPI TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **412 om – 06.** Moisture in pulp, paper and paperboard, Atlanta, 3p.
- TWEDE, D; GODDARD, R. **Materiais para embalagens.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.