

## **Obtención de cartón para cores, medio para corrugar y testliner a partir de cajas corrugadas recicladas. Parte 2. Optimización**

**J.D. Sabatier<sup>1</sup>, A.J. Abril<sup>2</sup>**

(Recibido 13/10/2014 / Aceptado 7/07/2015)

### **RESUMEN**

El objetivo del trabajo consistió en establecer una formulación para la producción de cartones de diversos usos a partir de cajas recicladas de cartón corrugado. En esta segunda etapa se optimizó la técnica y económicamente la formulación papelera, además se verificaron los resultados de laboratorio. Los cartones obtenidos cumplieron las especificaciones de este tipo de productos, dando valores superiores a la mayoría de los cartones comerciales.

**Palabras clave:** Reciclado, carboximetilcelulosa, cartón, cores, medio para corrugar, test liner, programación lineal.

### **Obtaining paperboard cores, corrugating medium and test liner from recycled corrugated boxes Part 2. Optimization.**

### **ABSTRACT**

This work was conducted to find out a formulation for manufacturing paperboards of different qualities from recycled kraft boxes. This second stage of the research was carried out for optimizing technically and economically the formulation and verifying the laboratory results. Paperboards obtained at this stage not only were in compliance with the specifications for this type of materials but also showed higher standards than most of commercial paperboards available.

**Keywords:** Recycling, carboxymethylcellulose, paperboard, cores, corrugating medium, test liner, linear programming.

---

1 Consultor Senior y Gerente General, "BioPolymersConsulting"; Profesor, Facultad de Ciencias, Universidad Peruana Cayetano Heredia y Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. E-mail: jsabatier@bio-polimeros.com

2 Director de Química, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), La Habana, Cuba.

## I. INTRODUCCIÓN

La utilización de los papeles reciclados es una tendencia sólidamente establecida en la industria papelera, debido a sus ventajas económicas y ecológicas. Las pulpas vírgenes tienen costos elevados, incluyendo ecológicos, por lo que una alternativa atractiva es la utilización de papeles reciclados de los distintos tipos existentes en el mercado. Los papeles reciclados de superiores propiedades de resistencia usualmente tienen una mejor composición fibrosa y un mayor costo<sup>[1]</sup> por lo que, para lograr una formulación papelera más adecuada desde el punto de vista técnico-económico, se debe optimizar la composición fibrosa. La optimización de las formulaciones paperas se puede realizar aplicando técnicas de programación lineal, para lo cual frecuentemente se plantean funciones objetivo económicas (costo, ganancia, etc.) y se usan como restricciones las propiedades que se desean garantizar en los papeles. El incremento de la potencia de cálculo ha permitido el planteamiento de funciones objetivas y restricciones no lineales en las variables<sup>[2,3]</sup>, aunque el uso

de ecuaciones lineales facilita la aplicación exitosa de esta herramienta.

Este trabajo se realizó con el objetivo final de definir una formulación adecuada para la producción de cartón para cores, medio para corrugar y test liner a partir de cajas corrugadas recicladas de diferente calidad. En una primera parte del trabajo<sup>[4]</sup> se determinaron los modelos matemáticos que relacionaban las distintas propiedades del cartón con la composición del reciclado utilizado y la dosis añadida de carboximetilcelulosa (CMC). Esta segunda etapa se realizó con la finalidad de optimizar desde un punto de vista técnico-económico la formulación papelera, utilizando para ello la programación lineal, así como verificar los resultados del estudio de laboratorio.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la optimización técnico-económica de las formulaciones se utilizó la programación lineal, lo que implicó utilizar modelos descodificados que describieran el comportamiento de las propiedades de interés en función de los valores reales de las variables independientes analizadas, las que se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 1: Variables independientes estudiadas.

Variable	Codif. <sup>(a)</sup>	Descod. <sup>(b)</sup>	Rango	Valor central	Semi- intervalo
Dosis CMC, % b.f.s. <sup>(c)</sup>	X1	CMC	0,5-1,0	0,75	0,25
Fracción unitaria Reciclado 2da (en mezcla con Reciclado 1ra)	X2	R2da	0-1	0,50	0,25

(a) Codif.: Codificada (b) Descod.: Descodificada (c) base fibra seca

En la primera parte del trabajo<sup>[4]</sup> se obtuvieron modelos codificados para las distintas propiedades del cartón, los que para la optimización fueron convertidos en sus equivalentes descodificados mediante la relación:

$$\text{Variable codificada} = \frac{\text{Variable descodificada} - \text{Valor central}}{\text{Semi - intervalo}}$$

Para los modelos descodificados se fijó la dosis de CMC en 1% atendiendo a su influencia en las propiedades analizadas<sup>[4]</sup>. Las ecuaciones lineales codificadas y descodificadas así obtenidas se muestran en la Tabla 2. Por otro lado, en la Tabla 3 se muestran las especificaciones de cartón para cores de una empresa fabricante.

Tabla 2: Modelos ajustados para las propiedades estudiadas en el cartón.

Propiedad	Modelo matemático	
	Codificado	Descodificado
Índice Tensión, N m/g	IT = 49,11 – 4,87 X2	IT = 58,85 – 19,48 R2da
Índice Reventamiento, kPa. m <sup>2</sup> /g	IE = 3,166 + 0,138 X1 – 0,356 X2	IE = 4,016 – 1,424 R2da*

\* Para CMC = 1 %.

Tabla 3: Especificaciones del cartón para cores.

Propiedad \ Gramaje	200 g/m <sup>2</sup>	290 g/m <sup>2</sup>	320 g/m <sup>2</sup>
Rango de gramaje, g/m <sup>2</sup>	190-215	270-315	310-340
Índice de tensión, N m/g	Min. 30	Min. 23,5	Min. 22,5
I. Reventamiento, kPa. m <sup>2</sup> /g	Min. 1,15	Min. 0,85	Min. 0,95

Para la optimización se procedió a minimizar la función “costo” de las formulaciones para los tres tipos de productos (cores, medio para corrugar y test liner) utilizando como restricciones las ecuaciones halladas para las distintas propiedades respuestas y el rango de variación de la variable que definía la composición fibrosa del sistema ( $0 \leq R2da \leq 1$ ).

Las ecuaciones obtenidas para las respuestas fueron transformadas en inecuaciones que actuaron como restricciones, aplicando como límites inferiores los valores establecidos por las especificaciones de los distintos productos, según se reflejan en la Tabla 4.

Tabla 4: Especificaciones mínimas utilizadas para las restricciones.

	Cores	Medio para corrugar	Liner
Índice de Tensión, N m/g	30	-	48
Índice de Reventamiento, kPa. m <sup>2</sup> /g	1,15	1,80	1,95

La función objetivo “costo” a minimizar se planteó en dependencia de la composición fibrosa, ya que la dosis de CMC se mantuvo constante en la optimización, quedando como:

$$\text{Función costo} = C_1 Z_1 + C_2 Z_2$$

Donde “C<sub>1</sub>” representa los costos correspondientes de cada reciclado, Z<sub>1</sub> es la fracción unitaria del reciclado de primera (R1ra) y Z<sub>2</sub> es la fracción unitaria del reciclado de segunda (R2da). Como la suma de ambas fracciones unitarias es la unidad, entonces  $Z_1 = 1 - Z_2$  de donde:

$$\text{Función costo} = C_1 (1 - Z_2) + C_2 Z_2$$

Al no influir los términos constantes en los resultados de la programación lineal, se llegó a:

$$\text{Función objetivo} = (C_2 - C_1) Z_2$$

Esto hizo que, en nuestro caso, la función objetivo a minimizar se ajustara a la expresión:

$$\text{Función objetivo} = -40 Z_2$$

Sobre la base de los resultados de la optimización se procedió a verificar a mayor escala (planta piloto) los resultados del estudio de laboratorio. Esta etapa se realizó de forma semejante al estudio de formulaciones a nivel de laboratorio<sup>[4]</sup>, con las diferencias siguientes:

- La escala de los experimentos fue de 0,5 kg de material fibroso.
- La refinación se realizó en un refinador de discos S-S (Oy. Santasalo-Sohlberg AB, Helsinki, Finlandia), con una potencia de 4000 W y 1435 rev/min.
- Se añadió una dosis fija de 1% CMC b.f.s.
- Se añadió como agente encolante una resina del tipo AKD (Basoplast LC 2030) y, para garantizar la acción del encolante, se secaron las hojas a 120°C por 5 minutos.
- Se formaron dos tipos de hojas diferentes: Una destinada a ser evaluada como cartón para cores (290 g/m<sup>2</sup>) y otra como medio para corrugar y/o test liner (135-140 g/m<sup>2</sup>). Las propiedades evaluadas fueron principalmente el Índice de tensión, el Índice de reventamiento y el encolado (Cobb).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Algunos resultados de las corridas de programación lineal, obtenidos mediante dos métodos de cálculo (Simplex estándar y Push and Pull), se muestran en la Tabla 5. En estos resultados se puede apreciar los valores obtenidos en la optimización

para la función objetivo (“value”) y para la variable independiente optimizada, en este caso la fracción unitaria del reciclado 2da, expresada como “Z(j)”. Este último valor se calcula igualando la expresión de la función objetivo con el valor optimizado obtenido, como se ejemplifica para el caso del liner a continuación:

**Función objetivo = value**

$$-40 Z_2 = -22,27926\dots$$

$$Z_2 = -22,27926\dots / -40 \approx 0,557$$

De esta manera, la composición fibrosa optimizada para el liner tiene un 55,7 % de

reciclado 2da y 44,3 % de reciclado 1ra. En la Tabla 6 se resumen los resultados obtenidos en la optimización de los tres productos. Estos resultados son más favorables, en cuanto a utilización de materias primas fibrosas de menor costo, que los utilizados por un fabricante de estos productos, según se puede inferir de la Tabla 7. Como se evidencia en esta tabla, dicho fabricante utiliza mayores porcentajes de materias primas fibrosas de mayor costo con vistas a garantizar productos competitivos de buena calidad. Sin embargo, nuestras formulaciones pueden alcanzar las propiedades de estos productos con fibras de menor costo.

Tabla 5: Resultados de las corridas de programación lineal:

A) Cores, B) Medio para corrugar y C) Liner.

A) name: Cores	B) name: Medio para corrugar	C) name: Liner
----- objective: MIN m: 4 s: 1 C(j): -40 constraints: (1): 19.48 < 28.85 (2): 1.424 < 2.866 (3): 1 < 1 (4): 1 > 0 -----	----- objective: MIN m: 3 s: 1 C(j): -40 constraints: (1): 1.424 < 2.216 (2): 1 < 1 (3): 1 > 0 -----	----- objective: MIN m: 4 s: 1 C(j): -40 constraints: (1): 19.48 < 10.85 (2): 1.424 < 2.066 (3): 1 < 1 (4): 1 > 0 -----
method: PUSH AND PULL status: OPTIMAL value: -40 bvs(i): 2 3 5 1 Z(j): 1 degeneracy: NO iterations: 2 adds/subs: 58 mults/divs: 58 loops: 135 decisions: 164 testing: OK started: 2012-08-03 08:39:09 -----	method: PUSH AND PULL status: OPTIMAL value: -40 bvs(i): 2 4 1 Z(j): 1 degeneracy: NO iterations: 2 adds/subs: 38 mults/divs: 39 loops: 102 decisions: 126 testing: OK started: 2012-07-21 03:02:09 -----	method: PUSH AND PULL status: OPTIMAL value: -22.2792607802875 bvs(i): 5 3 4 1 Z(j): .556981519507187 degeneracy: NO iterations: 2 adds/subs: 58 mults/divs: 58 loops: 136 decisions: 164 testing: OK started: 2012-08-03 08:42:54 -----
method: STD. SIMPLEX status: OPTIMAL value: -40 bvs(i): 2 3 5 1 Z(j): 1 degeneracy: NO iterations: 2 adds/subs: 152 mults/divs: 173 loops: 176 decisions: 162 testing: OK started: 2012-08-03 08:39:09 -----	method: STD. SIMPLEX status: OPTIMAL value: -40 bvs(i): 2 4 1 Z(j): 1 degeneracy: NO iterations: 2 adds/subs: 100 mults/divs: 118 loops: 120 decisions: 124 testing: OK started: 2012-07-21 03:02:09 -----	method: STD. SIMPLEX status: OPTIMAL value: -22.2792607802875 bvs(i): 5 3 4 1 Z(j): .556981519507187 degeneracy: NO iterations: 2 adds/subs: 152 mults/divs: 173 loops: 176 decisions: 162 testing: OK started: 2012-08-03 08:42:54 -----

Tabla 6: Resumen de datos y resultados obtenidos en la optimización.

	Cores	Medio para corrugar	Test Liner
<b>Restricciones:</b>			
Indice de tensión, N.m/g	$\geq 30$	-	$\geq 48$
Indice de reventamiento, kPa.m <sup>2</sup> /g	$\geq 1,15$	$\geq 1,80$	$\geq 1,95$
Reciclado de 2da (fracciónunitaria)	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0$
Reciclado de 2da (fracciónunitaria)	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
<b>Función objetivo</b>	<b>-40Z</b>		
<b>Resultados optimización:</b>			
Abundancia reciclado 1ra, %	0	0	44,3
Abundancia reciclado 2da, %	100	100	55,7

Tabla 7: Formulaciones de productos de un fabricante.

	OCC, %	DKL, %	PK, %
<b>Cores</b>	100	-	-
<b>Medio para corrugar</b>	80	20	-
<b>Liner</b>	30	60	10

Debe tenerse en cuenta que el reciclado referido como OCC tiene un costo semejante a nuestro reciclado de mayor costo (reciclado 1ra), mientras que la pulpa kraft (PK) virgen es más costosa y el reciclado de kraftliner (DKL) tiene un costo intermedio entre ambos.

Sobre esa base se seleccionaron las alternativas para la verificación de resultados a mayor escala. Esta etapa fue concebida para obtener un material fibroso satisfactorio para la producción de liner y sobradamente bueno para la producción de cores y medio para corrugar. Con esta finalidad, se seleccionó una composición fibrosa de 60% reciclado 1ra y 40% reciclado 2da. Algunos resultados obtenidos en las determinaciones realizadas

a las muestras así obtenidas se reflejan en la tabla 8.

Tabla 8: Propiedades físico mecánicas de las muestras obtenidas en el escalado.

Muestra	Liner/Medio para corrugar 140 g/m <sup>2</sup>	Cores 290 g/m <sup>2</sup>
<b>Gramaje, g/m<sup>2</sup></b>	149	290
<b>Calibre, mm</b>	0,3	0,56
<b>Densidad, kg/m<sup>3</sup></b>	497	518
<b>I. Reventamiento, kPa.m<sup>2</sup>/g</b>	2,43	2,17
<b>Cobb 60", g/m<sup>2</sup></b>	39	32

Los cartones obtenidos reprodujeron los resultados a nivel de laboratorio y cumplieron con las propiedades estipuladas para los distintos productos, como puede comprobarse en la tabla anterior. Otra evaluación del cartón producido para cores (290 Cores) arrojó los resultados que se indican en la Tabla 9, los que se comparan con las propiedades del mismo tipo de producto de otros fabricantes.

Tabla 9: Comparación de propiedades de diferentes cartones industriales con la muestra de cores obtenida en el escalado (290 Cores).

Muestra	CL 290 A	300Gr B	290Gr C	CE 290 D	CL 300 E	290 CORES
Gramaje, g/m <sup>2</sup>	291	320	291	302	291	296
Calibre, mm	0,5	0,65	0,47	0,52	0,5	0,53
I. Reventamiento, kPa.m <sup>2</sup> /g	1,23	1,06	1,63	1,06	1,06	1,15
Cobb 60", g/m <sup>2</sup>	40	20	40	50	30	30
Cobb 120", g/m <sup>2</sup>	60	40	90	70	40	70
I. Tensión, N.m/g	24,0	21,4	34,0	16,3	20,8	28,4

Un análisis de estos resultados permite plantear las consideraciones siguientes:

El cartón obtenido (290 Cores) satisface los requerimientos establecidos en las especificaciones para cores a 290 g/m<sup>2</sup>, como puede apreciarse por comparación con la Tabla 3.

- Este cartón es superior en propiedades a los restantes de la Tabla 9, con la única excepción del cartón C. No obstante, no puede olvidarse que es posible esperar en nuestra muestra propiedades aún mejores, por tratarse de una muestra a escala de banco, ya que los resultados alcanzados a esta escala son generalmente mejorados al pasar a la escala industrial<sup>(1)</sup>.
- El medio para corrugar obtenido satisface los requisitos para este tipo de producto, como se evidencia al comparar las propiedades logradas (Tabla 8) con las especificaciones (Tablas 4 y 6).
- El Índice de tensión mostrado en la Tabla 9 para el cartón "290 Cores" es inferior a las especificaciones mostradas en las Tablas 4 y 6 para cartón liner. Esto sugiere la necesidad de incorporar a las formulaciones para liner un mayor porcentaje de reciclado de 1ra. Como fue demostrado en el estudio de laboratorio <sup>[4]</sup>, si se fabrica un liner con 100 % de nuestro reciclado de primera, se cumplirán las mencionadas especificaciones para el Índice de tensión y el liner fabricado será menos costoso que la formulación planteada en la Tabla 7.

#### IV. CONCLUSIONES

Las corridas de optimización técnico-económicas mediante programación lineal permitieron definir alternativas óptimas para el escalado y la comprobación de resultados. Los cartones obtenidos en esta etapa reprodujeron los resultados a nivel de laboratorio y cumplieron con las especificaciones estipuladas para estos cartones, dando propiedades superiores a la mayoría de los cartones comerciales. Sobre esta base se puede realizar una ulterior etapa de evaluación económica.

#### V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zanuttini M. Reciclado celulósico. 1a ed. Buenos Aires: Ed. Santa Fe; 2012.
- [2] Konno H, Kawada N, Tuy H. Cutting plane algorithms for non linear semi-definite programming problems with applications. J. Global Optim. 2003; 25: 141-155.
- [3] Powell MJD. Karmarkar's algorithm: A view from non linear programming. Bull. Inst. Math. Appl. 1990; 26: 165-181.
- [4] Sabatier J, Abril A. Obtención de cartón para cores, medio para corrugar y test liner a partir de cajas corrugadas recicladas. Parte 1. Estudio de laboratorio. Rev. Peruana Quím. e Ing. Química. 2014; 17(2): 49-56.