

Obtención de cartón para cores, medio para corrugar y test liner a partir de cajas corrugadas recicladas.

Parte 1. Estudio de laboratorio

J.D. Sabatier¹, A.J. Abril²

(Recibido: 6/10/2014 / Aceptado: 7/02/2015)

RESUMEN

El objetivo del trabajo consistió en definir una formulación para la producción de cartones de diversos usos a partir de cajas recicladas de cartón corrugado de diferente calidad. Se determinaron modelos matemáticos de las propiedades del cartón en función de la composición del reciclado y la dosis de carboximetilcelulosa (CMC). Las propiedades estudiadas se incrementaron al aumentar el reciclado de primera y disminuyeron cuando aumentó el reciclado de segunda. La dosis de CMC sólo incrementó el índice de reventamiento.

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

Obtaining of paperboard for cores, flutting and test liner from recycled corrugated boxes

Part I. Laboratory study

Abstract

This work was carried out to find out a formulation for manufacturing paperboards of different qualities from recycled kraft boxes of different grades. Mathematical models expressing the relationships of the properties of paperboards with their composition and dose of CMC were determined. The studied properties improve when first grade recycled boxes increase but they decrease when increasing the percentage of second grade recycled boxes, meanwhile the CMC dose only influences the burst index.

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

1 Consultor Senior y Gerente General, "BioPolymers Consulting"; 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 atractiva alternativa es la utilización de papeles reciclados de las distintas calidades existentes en el mercado.

Los papeles reciclados de superiores propiedades de resistencia usualmente tienen una mejor composición fibrosa y un mayor costo^[1] por lo que, para lograr una formulación papelera más adecuada técnica y económicamente, se debe optimizar la composición fibrosa. Por otro lado, se ha reportado^[2-5] que la carboximetilcelulosa (CMC) incrementa el enlace entre las fibras, lo que posibilita su adición como aditivo con vistas a establecer formulaciones paperas más ventajosas desde el punto de vista técnico-económico.

La optimización de las formulaciones paperas se puede realizar aplicando técnicas de programación lineal, para lo cual frecuentemente se plantean funciones objetivo económicas y se usan como restricciones las propiedades que se desean garantizar en los papeles. Inicialmente, por limitaciones en la capacidad de cálculo, tanto las funciones objetivo como las restricciones debían ser lineales, pero el incremento de la potencia de cálculo ha permitido también el planteamiento de funciones objetivo y restricciones no lineales en las variables^[6-7].

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 (OCC). En esta etapa, la finalidad consistió en la determinación a nivel de laboratorio de los modelos matemáticos que expresaran la relación de las distintas propiedades del cartón obtenido con la composición del reciclado utilizado y la dosis añadida de CMC para, en una segunda etapa, realizar un estudio de optimización de la formulación papelera mediante programación lineal.

II. SECCIÓN EXPERIMENTAL

El estudio se realizó tomando como materias primas de partida a cajas kraft recicladas (OCC) de dos diferentes calidades (1ra y 2da) y un cartón reciclado de la producción de cores, las que fueron inicialmente caracterizadas, obteniéndose los resultados que se reflejan en la tabla 1. El trabajo experimental fue realizado en las instalaciones del laboratorio de pulpa y papel de la facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Estos reciclados mostraron valores de densidad superiores a 438 kg/m³, índice de tensión cercano o superior a 25 N.m/g e índice de reventamiento igual o superior a 1,89 kPa.m²/g. Estos valores fueron comparados con los indicados en las normas de calidad del cartón de varias empresas fabricantes y se comprobó que los reciclados seleccionados inicialmente garantizaban los índices de tensión y reventamiento necesarios, mientras que la densidad no resultaba una preocupación, ya que la misma puede ser aumentada mediante el prensado en la fabricación del papel.

Tabla 1. Resultados de la caracterización inicial de las muestras de reciclado utilizadas.

Reciclado / Propiedad	1ra	2da	Cores	Norma
Grado de molienda, °SR	48	45	44	Scan M3:65
Gramaje, g/m ²	60,1	58,6	56,8	Tappi T 410 om-98
Densidad, kg/m ³	531	438	484	Tappi T 411 om-97
Índice de tensión, N m/g	29,7	24,1	33,1	Tappi T 404 cm-92
I. Reventamiento, kPa. m ² /g	3,26	1,89	2,84	Tappi T 403 om-97

Para el trabajo experimental, se planificó un diseño factorial mezclado 2x5 variando la dosis añadida de CMC y la composición de la mezcla de cartones reciclados según muestran las tablas 2 y 3.

Una vez obtenidas estas respuestas (Y_i), se ajustaron modelos matemáticos para ellas en función de las variables independientes aplicando programas de regresión lineal multivariable. Los modelos ajustados incluyeron solo los términos lineales y su interacción o también adicionaron un término cuadrático respecto a la composición fibrosa, según se muestra a continuación:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \text{ CMC} + \beta_2 \text{ R2da} + \beta_{12} \text{ CMC} \cdot \text{R2da} + \beta_{22} (\text{R2da})^2$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las respuestas obtenidas en el bloque experimental se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados obtenidos en el estudio de formulaciones.

Exp. No.	Rev. PFI	t seg	Densidad kg/m ³	Índice de tensión N m/g	Índice de reventamiento kPa. m ² /g
1	220	94	608	53,0	3,71
2	160	69	537	52,3	3,40
3	120	52	486	50,8	2,88
4	120	52	479	40,4	2,79
5	95	42	467	39,5	2,36
6	210	91	581	65,0	4,05
7	160	68	519	53,7	3,90
8	150	63	500	52,4	3,06
9	130	55	480	42,8	2,83
10	100	41	435	41,2	2,68

Un análisis preliminar de estos resultados evidencia:

- Una aparente influencia de la composición fibrosa (% reciclado 1ra y 2da) sobre todas las respuestas. Se obtuvo mayor valor de ellas para mayor porcentaje de reciclado de primera.
- Efectos aparentes de la dosis de CMC sobre los índices de tensión y reventamiento, así como sobre la densidad; mientras que los valores requeridos de las revoluciones del PFI y el tiempo de molida no varían apreciablemente al variar la dosis de CMC. Los índices de tensión y reventamiento fueron mayores, y la densidad menor, para mayor dosis de CMC.

Los resultados obtenidos en el ajuste de los modelos se muestran en la tabla 5. Todos los modelos dieron coeficientes de variación (CV) del 10 % o menores, así como coeficientes de correlación (R) superiores a los valores críticos (R_c), aun para un intervalo de confianza (α) tan riguroso como 0,999. En general, los modelos ajustados presentaron la siguiente estructura:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \text{ CMC} + \beta_2 \text{ R2da} + \beta_{22} (\text{R2da})^2$$

El término cuadrático resultó seleccionado dentro de los modelos para las revoluciones PFI, el tiempo de molida y la densidad; no así para los modelos correspondientes a los índices de tensión y reventamiento. Por otro lado, aunque los modelos cuadráticos

presentan un ajuste ligeramente mejor, la diferencia con los modelos lineales es mínima, como evidencia el gráfico del tiempo de refinación necesario para alcanzar el grado de molida en el PFI (Fig. 1).

Esto sucedió para todas las respuestas analizadas, siendo especialmente esperable

para las revoluciones del PFI, por la relación lineal existente entre esta variable y el tiempo de molida, como evidencia la figura 2. Por esto, es posible describir las respuestas mediante modelos lineales, lo que facilita la ulterior optimización de la formulación papelera mediante programación lineal.

Tabla 5. Resultados obtenidos por modelación matemática.

Parámetro	Rev. PFI		Tiempo molida		Densidad		I. Tensión	I. Reventamiento
	Lineal	Cuad.1	Lineal	Cuad.1	Lineal	Cuad.1	Lineal	Lineal
β_0	146,5	136,5	62,7	58,29	509,2	495,271	49,11	3,166
β_1	-	-	-	-	-	-	-	0,138
β_2	-27,0	-27,0	-11,75	-11,75	-33,55	-33,55	-4,87	-0,356
β_{22}	-	5,0	-	2,1786	-	6,9643	-	-
R ²	0,8943	0,9373	0,9032	0,9467	0,8842	0,9376	0,8134	0,9384
R	0,9457	0,9681	0,9504	0,9730	0,9403	0,9683	0,9019	0,9687
N	10	10	10	10	10	10	10	10
f(N-p)	8	7	8	7	8	7	8	7
α	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
Rc	0,872	0,898	0,872	0,898	0,872	0,898	0,872	0,898
Error Std.	14,67	12,09	6,08	4,82	19,19	15,07	3,69	0,16
CV %	10,02	8,85	9,71	8,28	3,77	3,04	7,51	5,05

¹Cuadrático

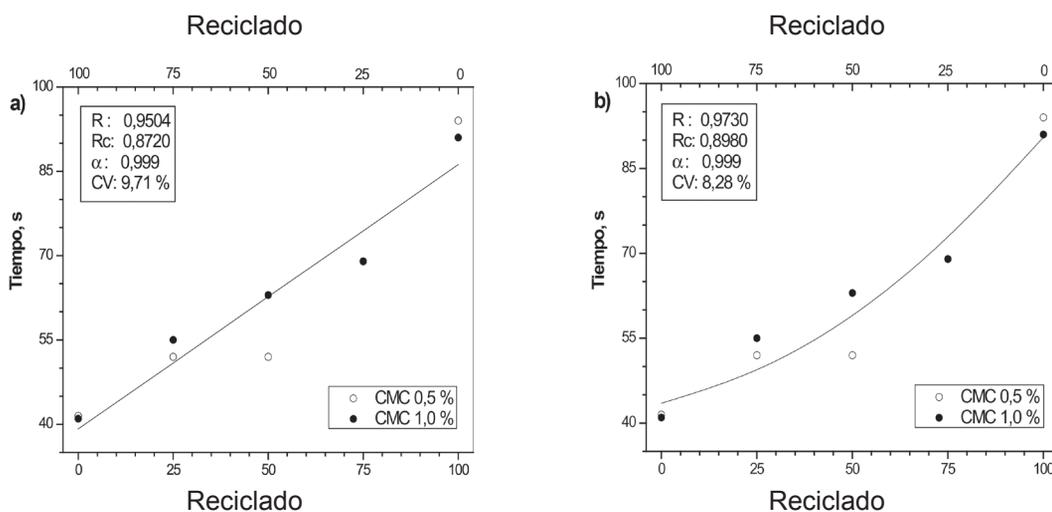


Figura 1. Dependencia del tiempo de refinación en PFI con la composición de la mezcla fibrosa: a) Modelo lineal, b) incluyendo el término cuadrático.

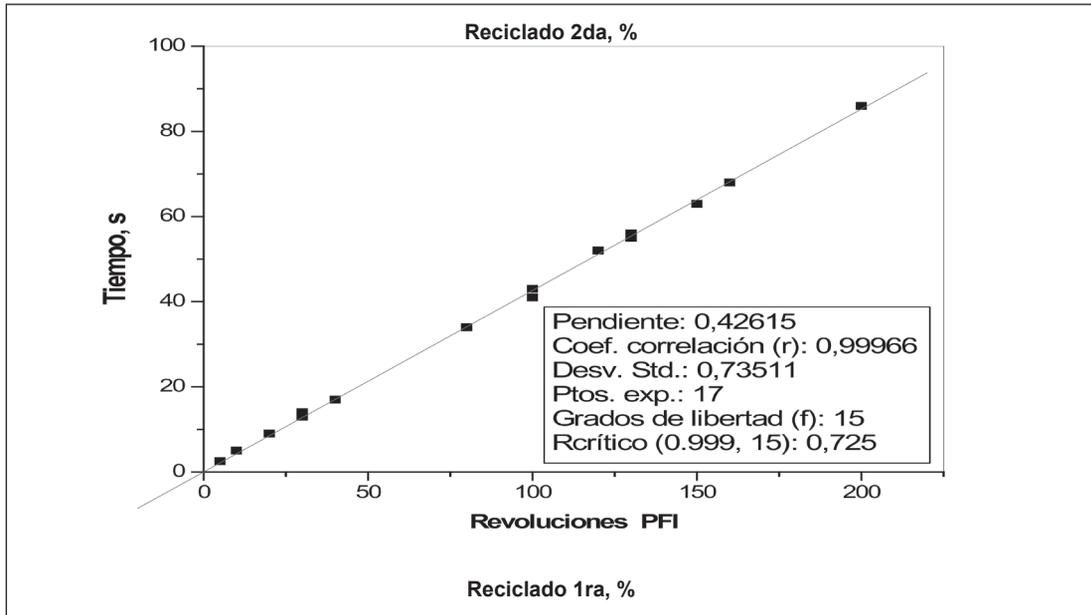


Figura 2. Relación lineal entre el tiempo de refinación y las revoluciones en el PFI.

La composición fibrosa influyó sobre todas las respuestas analizadas. Sin embargo, la dosis de CMC solo presentó influencia estadísticamente significativa sobre el índice de reventamiento, por lo que este término únicamente aparece en el modelo de esta respuesta. En la figura 3 se puede apreciar el efecto de la composición fibrosa (expresada como el porcentaje de los diferentes recicla-

dos) sobre la densidad del cartón producido, mostrándose un incremento de la densidad al aumentar el reciclado de primera y una disminución cuando aumenta el reciclado de segunda, lo cual evidencia la mayor atracción entre las fibras del reciclado de primera; mientras que la dosis de CMC no influye significativamente sobre la densidad.

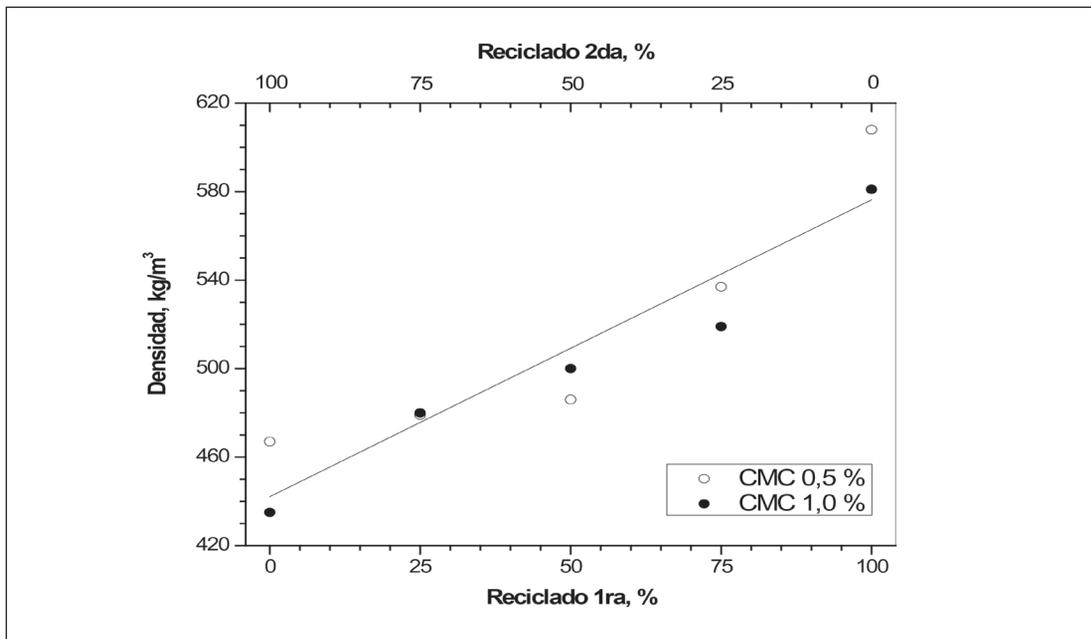


Figura 3. Influencia de la composición fibrosa sobre la densidad del cartón.

El efecto de la composición fibrosa sobre el índice de tensión del cartón se evidencia en la figura 4, en la que se puede apreciar como para el índice de tensión sucede igual que para la densidad, o sea se incrementa cuando aumenta el reciclado de primera y disminuye cuando aumenta el reciclado de segunda, así como que el incremento de la dosis de CMC no influye significativamente. Lo anterior resulta más evidente al ver la cercanía del modelo lineal ajustado con los valores promedios del índice de tensión para las dos dosis de CMC. En esta figura se puede apreciar que no hay diferencias

significativas entre las tensiones alcanzadas para ambas dosis de CMC, excepto para 100 % de reciclado de 1ra, lo cual estaría sujeto a comprobación.

El efecto de la composición fibrosa y de la dosis de CMC sobre el índice de reventamiento se muestra en la figura 5. El índice de reventamiento disminuye cuando se incrementa el reciclado de segunda, mientras se incrementa al aumentar el CMC y el reciclado de primera, lo cual significa que estos dos últimos factores favorecen altas propiedades de resistencia en el cartón.

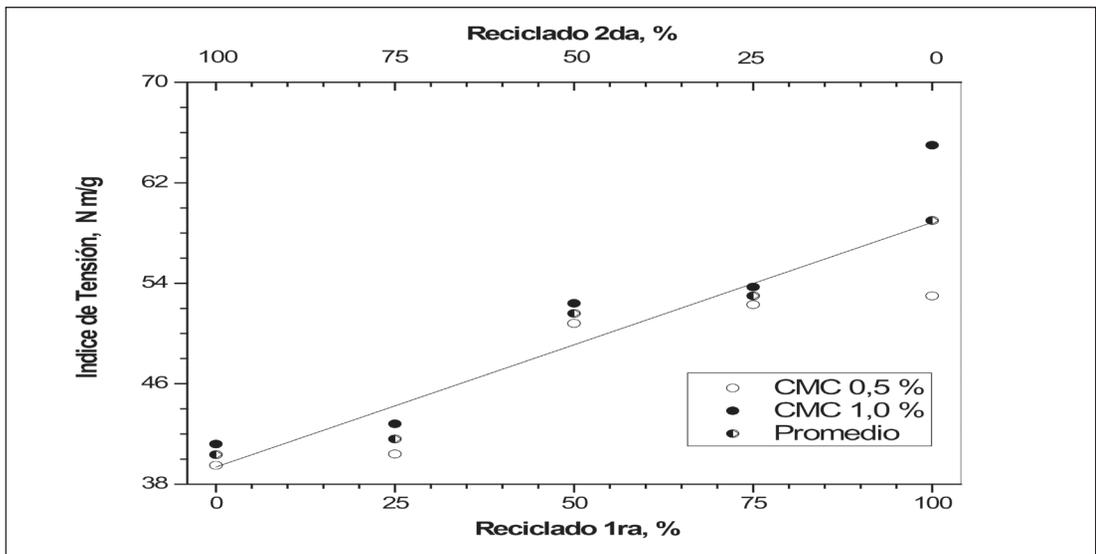


Figura 4. Efecto de la composición fibrosa sobre el índice de tensión del cartón.

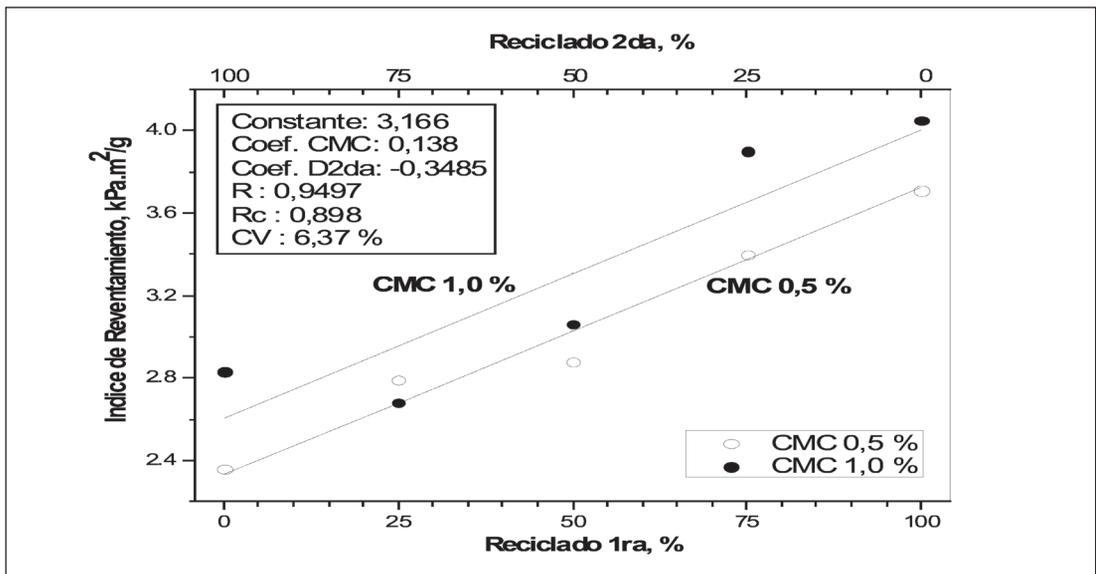


Figura 5. Influencia de la composición fibrosa sobre el índice de reventamiento del cartón.

En resumen, las formulaciones que favorecen las mejores propiedades de resistencia del cartón conllevan elevados porcentajes de reciclado de primera, lo que indica que el aspecto económico sería el decisivo. La dosis de CMC solo influyó significativamente sobre el reventamiento, en cuyo caso se encontró que adiciones de CMC del 0,5 % resultaron suficientes para lograr valores satisfactorios de reventamiento, no siendo necesario incrementar la dosis hasta el 1%.

IV. CONCLUSIONES

La composición fibrosa influyó sobre todas las respuestas analizadas. Sin embargo, la dosis de CMC solo presentó influencia estadísticamente significativa sobre el índice de reventamiento. Todas las propiedades analizadas (densidad, tensión y reventamiento) se incrementan al aumentar el reciclado de primera y disminuyen cuando aumenta el reciclado de segunda, lo cual evidencia las diferencias entre ambas calidades de reciclado, mientras que la dosis de CMC no influye significativamente sobre la densidad ni la tensión pero sí sobre el reventamiento, obteniéndose un valor ligeramente superior para adiciones mayores de CMC. Todos los modelos ajustados presentaron coeficientes de variación satisfactorios y coeficientes de correlación muy superior al crítico aun para un intervalo de confianza tan riguroso como 0.999. Las diferencias entre los modelos lineales y cuadráticos fueron mínimas, por lo que los modelos lineales resultan apropiados

para la ulterior optimización mediante programación lineal. Las formulaciones que favorecen las mejores propiedades de resistencia del cartón conllevan elevados porcentajes de reciclado de primera, lo que indica que el aspecto económico sería el decisivo.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zanuttini M. Reciclado celulósico. 1a ed. Buenos Aires: Ed. Santa Fe; 2012.
- [2] Abril A., Rodríguez M., Hernández A. CMC como aditivo de molienda y agente de resistencia en el papel. *Revista El Papel*. 2002; (98): 5-6.
- [3] Hubbe M.A. Bonding between cellulosic fibers in the absence and presence of dry strength agents. A Review. *Bioresources*. 2006; 1 (2): 281-318.
- [4] Walecka J.A. An Investigation of Low Degree of Substitution Carboxymethylcelluloses. *TAPPI Journal*. 1956; 39 (7): 458-463.
- [5] Watanabe M., Gondo T., Kitao O. Advanced wet end system with CMC. *TAPPI Journal*. 2004; (3, 5): 36-48
- [6] 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.
- [7] Powell M.J.D. Karmarkar's algorithm: A view from non linear programming. *Bull. Inst. Math. Appl.* 1990; 26: 165-181.