

Diseño de un proceso de separación de los componentes de residuos metaloplásticos de la fabricación de juntas para estanqueidad en la empresa FRACO S. A.*

Designing a Process for Separating Leftover Metoplastic Materials in the Production of Engine Gaskets at FRACO S.A.*

Desenho de um processo de separação dos componentes de resíduos metaloplásticos da fabricação de juntas de estanqueidade na empresa FRACO S. A.*

*Óscar Buitrago Suescún***

*Víctor Zambrano Gómez****

*Daniel Zambrano Arroyo*****

* Fecha de recepción: 13 de mayo de 2008. Fecha de aceptación para publicación: 14 de agosto de 2008. Este artículo presenta los resultados de la primera etapa del proyecto denominado *Proyecto de recuperación contingente en el marco de cooperación universidad-empresa-Estado*, con número de registro 7222-327-18487-CT-264-2006, financiado por Colciencias.

* Date of submission: May 13, 2008. Date of acceptance for publication: August 14, 2008. This article presents the results of the first stage of a project known as *Contingent Recovery under a University-Company-State Cooperation Framework*, registration number 7222-327-18487-CT-264-2006, financed by Colciencias.

* Data de recepção: maio 13, 2008. Data de aceitação para publicação: agosto 14, 2008. Este artigo apresenta os resultados da primeira etapa da pesquisa Projeto de recuperação contingente no marco da cooperação universidade-empresa-estado, com número de registro 7222-327-18487-2006, financiado por Colciencias.

** Ingeniero químico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesor de Ingeniería Industrial, Universidad Central de Colombia, Bogotá, Colombia. Asesor de la Universidad de Boyacá para el proyecto. Correo electrónico: osyesu@gmail.com.

*** Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Jefe de Investigación, Desarrollo y Calidad en la Fábrica Colombia de Repuestos Automotores (FRACO S. A.). Correo electrónico: victor.zambrano@fraco.com.co.

**** Ingeniero químico, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Profesor de Ingeniería Industrial, Universidad de Boyacá, Tunja, Colombia. Investigador principal del proyecto. Correo electrónico: danizambra@uniboyaca.edu.co.

Resumen

El presente artículo presenta los resultados de la primera etapa del *Proyecto de recuperación contingente en el marco de cooperación universidad-empresa-Estado*, financiado por Colciencias y ejecutado por la Universidad de Boyacá y la Fábrica Colombiana de Repuestos Automotores (FRACO S. A.), que consiste en buscar alternativas de reaprovechamiento para los materiales metaloplásticos sobrantes del proceso de elaboración de juntas de estanqueidad para motor. En esta fase de la investigación se estudió la forma de separar los materiales que conforman estos materiales para dos referencias de producto denominados FracoPlay y FracoPack. Se recurrió a un arduo trabajo de laboratorio, guiado por un estricto diseño estadístico, en el que se probaron dos agentes de separación a diferentes condiciones de concentración y temperatura. Los resultados obtenidos son exitosos y permiten iniciar la etapa de elaboración de nuevos materiales a partir de los separados.

Palabras clave

Materiales metaloplásticos, juntas de estanqueidad, materiales metaloplásticos.

Abstract

This article shows the results of the first stage of the project *Contingent Recovery under a University-Company-State Cooperation framework*, sponsored by Colciencias and carried out by the University of Boyacá and the Colombian Factory for Auto Parts (FRACO S.A.). This project seeks alternatives for re-usage of leftover metoplastic materials from the process of producing gaskets for engines. This phase of research deals with the manner of separating the components that form these materials, with reference to two of the products called FracoPlay and FracoPack. Extensive lab work was involved, guided by a well-planned statistical design in which the separation agents were tested at different conditions of concentration and temperature. The results obtained are satisfactory and allow the beginning of the development stage of new materials from the separated ones.

Key words

Metoplastic materials, gaskets, metoplastic materials.

Resumo

O presente artigo apresenta os resultados da primeira etapa do Projeto de recuperação contingente no marco de cooperação universidade-empresa-estado, financiado por Colciencias e executado pela Universidade de Boyaca e a Fabrica Colombiana de Peças Automotoras (FRACO S. A.), que consiste em buscar alternativas de reaproveitamento para os materiais metaloplásticos, sobre do processo de elaboração de juntas de estanqueidade para motor. Nesta fase da pesquisa foi estudada a forma de separar os materiais que conformam esses materiais para duas referências do produto denominados FracoPlay e FracoPack. O estudo recorreu um árduo trabalho de laboratório, guiado por um estricto desenho estadístico, no qual foram provados dois agentes de separação em diferentes condições de concentração e temperatura. Os resultados obtidos são exitosos e permitem iniciar a etapa de elaboração de novos materiais a partir dos separados.

Palavras dicas

Materiais metaloplásticos, juntas de estanqueidade.

Introducción

Debido a las funciones que deben cumplir las juntas para estanqueidad, su diseño hace que el aprovechamiento de las materias primas requeridas —por ejemplo, cartón libre de asbesto, hojalata, *cold rolled*, corcho elastómero y adhesivos— sea muy bajo, lo cual, en consecuencia, provoca que haya un gran volumen de material sobrante —aproximadamente 380 toneladas/año según cálculos de la Fábrica Colombiana de Repuestos Automotores (FRACO S. A)— que ni se reutiliza ni se procesa. El procedimiento seguido generalmente con estos residuos consiste en entregarlos a la compañía recolectora de basura para ser dispuestos en un relleno sanitario.

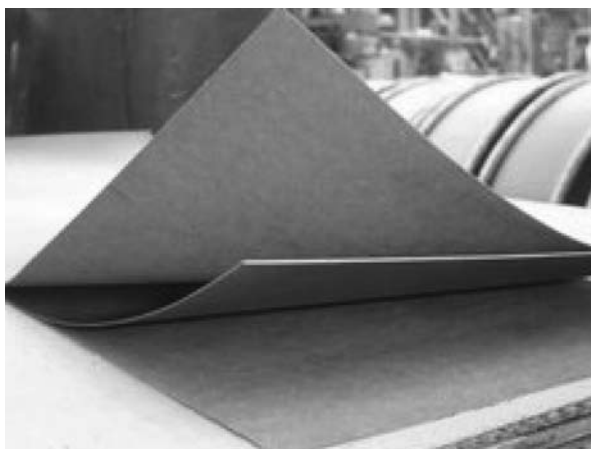
En FRACO S. A. se han propuesto soluciones para el reaprovechamiento de dos residuos específicos: el corcho y el *cold rolled*. El primero se mezcla con otros materiales para obtener un nuevo material que se emplea en algunas líneas de productos, básicamente juntas para tapas de válvulas, y el segundo es enviado por venta directa a la fundición. Sin embargo, las características del cartón libre de asbesto y de la hojalata, así como el proceso al que son sometidos, el cual hace que se mezclen algunas veces con adhesivos, lleva a que la separación de los materiales constituyentes y el posterior reaprovechamiento sean muy complicados.

Adicionalmente, en el mundo actual la preocupación por el medio ambiente es una necesidad que debe ser satisfecha para bien de toda la sociedad. Ya no es un simple discurso que suena bien y que no es de obligatorio cumplimiento; en esta época se tiene el deber de aportar a la conservación del entorno (Colombia, Ministerio del Medio Ambiente, 1999). Si se logra una solución efectiva al problema de aprovechar eficientemente los sobrantes, se tendrán beneficios que van desde la disminución del impacto ambiental, pasando por la generación de conocimiento, el fortalecimiento de las relaciones universidad-industria-Estado, la aplicación real de la actividad investigativa, el incremento de la productividad y competitividad, hasta la consecuente generación de nuevos empleos.

Por ello FRACO S. A., la Universidad de Boyacá y Colciencias han aunado sus esfuerzos para el desarrollo de un proyecto tendiente a aprovechar los residuos metaloplásticos que resultan de fabricar juntas de estanqueidad. El proyecto inició en febrero de 2007 (duración de 17 meses), la etapa de separación se culminó en noviembre del mismo año y la culminación total del proyecto se proyectó para agosto de 2008.

En cuanto a qué hacer con estos materiales, se tienen varias opciones: reprocesarlos, utilizarlos en mezclas con asfaltos, etc. Sin embargo, la mayoría de ellas son inviables si no se logran separar los materiales que conforman el material metaloplástico. Este es un material compuesto, formado por una lámina metálica lisa o perforada con cartón libre de asbesto a cada uno de sus lados, tal como el que se muestra en la Figura 1. La unión de las tres láminas puede ser química, en cuyo caso se denomina FracoPlay, o mecánica, que da como resultado la referencia FracoPack.

Figura 1. Estructura del material metaloplástico: una lámina de metal rodeada por dos de cartón libre de asbesto



Fuente: presentación propia de los autores.

En este artículo se presentan los resultados de la primera etapa de la investigación, cuyo propósito es lograr la separación de los componentes de estos materiales. Una vez alcanzado este fin, la parte metálica se enviará a empresas de fundición para su disposición final, y con los cartones libres de asbesto separados se estudiará el diseño de nuevos materiales. Por lo tanto, es fundamental realizar pruebas para determinar si el proceso de separación afecta las propiedades físicas y mecánicas del cartón libre de asbesto. Estas se realizaron en los laboratorios de

FRACO S. A., mientras las pruebas para lograr su separación se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad de Boyacá, con sede en Tunja.

Los satisfactorios resultados obtenidos permiten dar por concluida la etapa de separación de los constituyentes del residuo y se inició otra, consistente en el diseño de nuevos materiales y alternativas de aprovechamiento de los componentes separados.

1. Planteamiento del problema

FRACO S. A. es una sociedad anónima fundada en 1965, que en la actualidad atiende dos líneas de mercado de repuestos automotores: una corresponde a juegos de empaques y retenedores de aceite para motores que se instalan en equipo original, y la otra, a juntas que se utilizan en la reparación de un número significativo de los diferentes tipos de vehículos que componen el parque automotor con que cuenta el país. La compañía atiende el mercado interno colombiano y exporta a países vecinos y Estados Unidos.

En la actualidad, la empresa afronta un problema en sus procesos: sólo aprovecha un 40%¹, en promedio, de sus materias primas importadas, la mayor parte de las cuales son necesarias para fabricar las juntas o empaquetaduras para estanqueidad y, por lo mismo, originan residuos sólidos, como los mostrados en la Figura 2. Estos, al no ser utilizados o reutilizados, generan volúmenes importantes de basura (alrededor de 380 toneladas/año) que congestionan los servicios de aseo y contaminan el medio ambiente.

A partir de esto surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿cuáles son las alternativas para separar los componentes de los residuos sólidos metaloplásticos? ¿Cómo recuperar esos residuos de modo que se conviertan en nueva materia prima para hacer empaquetaduras o cualquier otro producto de posible fabricación por la empresa, en primer lugar o subsidiariamente por otras empresas? ¿Cómo lograr disminuir los residuos que se vuelven basura y en virtud de esa disminución el que su efecto contaminante sea lo menor posible, para acceder a una producción limpia?

Para identificar caminos de respuesta a estos interrogantes generales es indispensable explicitar los elementos que conforman la complejidad del problema. Para fabricar las juntas de estanqueidad se ensamblan materiales metálicos, como hojalata en distintos calibres, con nuevos materiales blandos, denominados genéricamente cartones libres de asbesto, que sustituyeron las láminas de asbesto que anteriormente se utilizaban con estos productos.

¹ Según cálculos efectuados por el grupo de ingeniería de FRACO S. A.

Figura 2. Residuos de material metaloplástico a la salida de una línea de producción de FracoPlay



Fuente: presentación propia de los autores.

Los cartones libres de asbesto son importados y la información de las sustancias con que están elaborados es difícil de obtener, dado que los proveedores no la suministran y en el medio académico es escaso el interés por estudiarlos. De su ensamble con lámina *cold rolled* se obtienen los materiales metaloplásticos con los cuales se fabrican las empaquetaduras para los diferentes tipos de motores. Según cálculos de FRACO S. A., el 60% de estas materias primas generan desechos por razones de los cortes que ordenan los diseños geométricos de las juntas.

En resumen, los retos del proyecto están representados por la búsqueda de procedimientos tecnológicos para separar lo metálico del no asbesto y su posterior fundición y aglomeración o compactación en condiciones que los hagan reutilizables individualmente, o, por lo menos, procedimientos que permitan su compactación como mezcla, de modo que sirva para elaborar nuevos productos para el sector automotor u otros sectores demandados por el mercado nacional e internacional.

Los productos en los que se centra este trabajo son las juntas de estanqueidad denominadas FracoPlay y FracoPack, elaboradas a partir de material metaloplástico conformado por lámina *cold rolled* y cartón libre de asbesto referencia NI2098 y NI2095A. Dada la necesidad de determinar si el proceso de separación afecta las propiedades del cartón libre de asbesto, en la Tabla 1 se presenta

la caracterización de los cartones tal y como la reporta el fabricante (Interface Solutions, 2003).

**Tabla 1. Caracterización básica de los cartones sin asbesto
NI2095A y NI2098**

Propiedad	NI 2095A	NI2098
Densidad (g/cm ³)	1,15 mínimo	1,19 mínimo
Tracción transversal (MPa)	5,10 mínimo	1,72 mínimo
Compresibilidad 34,5 MPa (%)	15 a 30	15 a 30
Recuperación 34,5 MPa (%)	25 mínimo	25 mínimo

Fuente: presentación propia de los autores.

La principal diferencia entre los materiales compuestos es que el FracoPack tiene unas perforaciones en la lámina metálica para permitir una traba mecánica con el cartón libre de asbesto, mientras en el FracoPlay la unión entre la lámina metálica y las hojas de cartón se hace por medio de adhesivos.

2. Metodología

Con el propósito de tener resultados confiables y que permitieran un análisis estadístico objetivo, se planeó el trabajo experimental por medio del diseño de experimentos. Basándose en la información obtenida en patentes de procesos de separación de cartones (Textor, 1995; Zajons, s. f.; Weill y Cornell, 1922), se decidió probar con dos agentes de separación: uno es una solución alcalina, y el otro, una mezcla de ácidos orgánicos. Los otros factores considerados fueron la temperatura del proceso de separación y la concentración de los agentes de separación.

Tanto para la solución alcalina como para la mezcla de ácidos orgánicos, se eligió un diseño experimental en el que los factores temperatura (°C) y concentración (N) se estudiaron en tres niveles cada uno, es decir, un factorial 3², con dos copias. En adelante se referirá a cada uno de los niveles como alto, medio y bajo, tanto para temperatura como para concentración. Con el propósito de evaluar la efectividad de la separación se midió como variable de respuesta el tiempo requerido para separar cada una de las caras del cartón libre de asbesto de la lámina de *cold rolled*, ya que las dos no se desprenden de forma simultánea.

Una vez separadas las láminas de cartón libre de asbesto, se midieron la densidad, la resistencia a la tracción transversal, la resistencia a la tracción longitudinal, la compresibilidad y la recuperación elástica. Finalmente, a los resultados obtenidos se les hizo un análisis de varianza por medio del *software* Minitab.

2.1 Procesos de separación

El material libre de asbesto se introdujo en un baño con control de temperatura que contiene la solución del agente de separación. Se esperó hasta observar el desprendimiento total de alguna de las hojas del cartón libre de asbesto, se registró el tiempo requerido y se continuó la operación hasta que la segunda hoja de cartón se desprendió. En este momento se da por terminada la separación. Las pruebas se realizaron en las combinaciones de los factores concentración del agente separador y temperatura en los siguientes niveles:

- Concentraciones [alta], [media] y [baja], medidas en normalidad.
- Temperatura alta, media y baja, medida en °C.

Las condiciones se aplicaron de acuerdo con el diseño experimental planteado: 3^2 factoriales con dos bloques (Textor, 1995). Se realizaron 18 pruebas de separación por cada solvente y por cada tipo de residuo estudiado (Fracoplay y Fracopack), es decir, un total de 72 ensayos de separación. Las muestras separadas se sometieron a secado a temperatura ambiente y, posteriormente, se les midieron las propiedades físicas y mecánicas.

2.2 Medición de las propiedades físicas y mecánicas

Las mediciones de las propiedades físicas y mecánicas del cartón libre de asbesto separado se realizaron en los laboratorios de FRACO S. A., por parte de personal calificado y experto, bajo las normas reportadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Normas para la medición de las propiedades*

Propiedad	Norma
Densidad	ASTM F1315
Compresibilidad y recuperación a 34,5 MPa	ASTM F36
Recuperación a la tracción	ASTM F152

*(ASTM International, 2004).

Fuente: presentación propia de los autores.

3. Resultados y discusión

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la fase de separación y medición de propiedades.

3.1 Separación de residuos de FracoPack con mezclas de ácidos orgánicos

En la Tabla 3 se reportan los resultados del análisis de varianza para el tiempo requerido en lograr que una de las dos caras del cartón libre de asbesto se desprendiera de los discos de FracoPack.

Tabla 3. Valores p para los tiempos de separación de la primera cara del desecho de FracoPack con ácidos orgánicos

Factor	Temperatura	Concentración	Interacción
Tiempo de separación de la primera cara	0,081	0,427	0,827
Tiempo de separación de la segunda cara	0,209	0,365	0,726
Densidad	0,478	0,940	0,582
Compresibilidad	0,202	0,780	0,919
Recuperación	0,255	0,067	0,271
Tracción transversal	0,194	0,175	0,005
Tracción longitudinal	0,731	0,164	0,184

Fuente: presentación propia de los autores.

El valor p^2 de la temperatura indica que el nivel de este factor puede influir en el tiempo de separación. Los efectos de la concentración y de la interacción concentración-temperatura no son significativos.

Dado que la interacción no muestra un efecto significativo, se recalcula el efecto de los factores individuales y se obtiene un valor de p de 0,04 para la temperatura. Esto confirma que la temperatura sí influye en el tiempo de separación (por lo menos para una significancia $\alpha=0,05$). Los promedios del tiempo de separación de la primera cara para cada nivel de temperatura son: 16,83 minutos para bajo, 12 minutos para medio y 11,33 minutos para alto.

² En la formulación de una hipótesis nula H_0 que proponga que el efecto de todos los factores estudiados es cero, "el valor p se define como el menor nivel de significancia que llevaría a rechazar esta hipótesis" (Montgomery, 2005), caso en el cual al menos uno de los factores afecta significativamente el valor de la variable de respuesta estudiada. En resumen, valores muy cercanos a cero permiten rechazar con seguridad H_0 , mientras que con valores muy cercanos a uno no se deberá rechazar H_0 .

Esto indica que para separar la primera cara de cartón libre de asbesto lo más conveniente es realizar esta tarea en el nivel medio, ya que no es una temperatura muy elevada, el tiempo promedio es cercano al obtenido en el nivel alto y reduce en un 28,7% el lapso de la separación efectuada con nivel bajo de temperatura.

Es interesante anotar que para los tiempos de separación de la segunda cara (la última en desprenderse), los valores de p son elevados para los dos factores considerados y la interacción. Se puede decir que no hay una diferencia significativa entre utilizar uno u otro valor de temperatura y concentración. Esto puede deberse a que para separar la segunda cara del residuo se debió haber separado la primera y, por lo tanto, el solvente ha tenido más tiempo para difundirse y efectuar la separación.

Debido a que la respuesta que indica la duración total de la separación de los componentes del residuo es el tiempo en el cual se desprende la segunda cara, se puede decir que es indiferente el nivel de temperatura y concentración que se decida utilizar en el proceso.

3.2 Propiedades físicas y mecánicas

En cuanto a las propiedades mecánicas medidas, ni la temperatura ni la concentración tienen efecto en los valores de dichas propiedades. En las interacciones se observa que, salvo el caso de la tracción transversal, tampoco afectan significativamente el valor de las respuestas. Para la tracción transversal, la interacción concentración del agente de separación-temperatura es significativa.

Esto se resume en que no importa bajo qué condiciones se realicen los procesos de separación, el valor de las propiedades físicas y mecánicas de los cartones separados no se ve afectado por estas. En la Tabla 4 se reportan los valores promedio de las propiedades mecánicas medidas.

Tabla 4. Promedios de las propiedades físico-mecánicas de FracoPack separadas con ácidos orgánicos

Propiedad	Promedio
Densidad (g/cm ³)	1,09
Compresibilidad (%)	28,84
Recuperación (%)	19,19
Tracción transversal (MPa)	2,75
Tracción longitudinal (MPa)	3,74

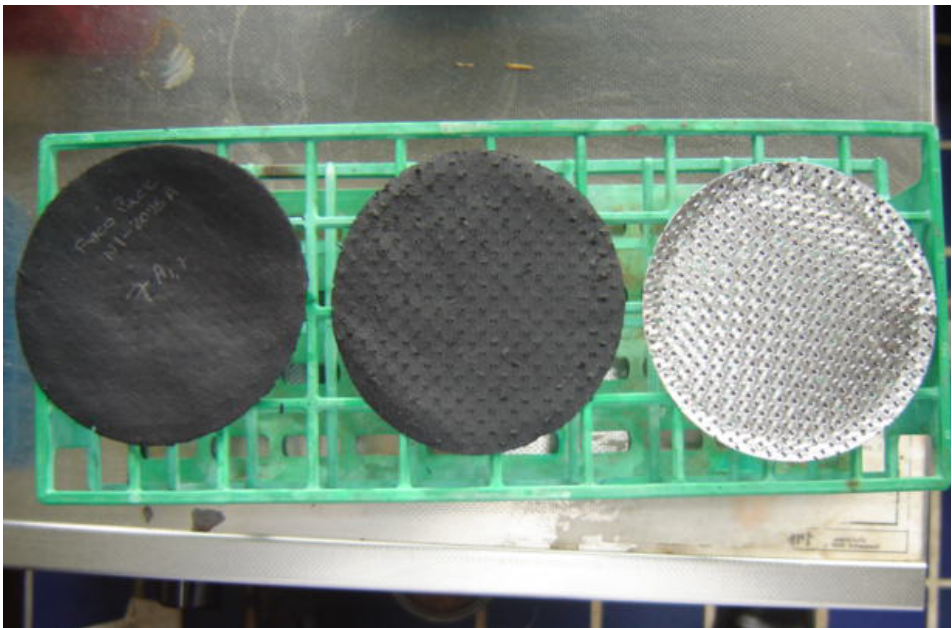
Fuente: presentación propia de los autores.

Al comparar los resultados promedio de las propiedades mecánicas medidas a los materiales separados con los reportados por el fabricante (Tabla 1), se puede decir:

- Después de efectuar la separación, la densidad del material es inferior un 5,2% con respecto al valor original.
- La compresibilidad se encuentra cercana al límite superior especificado por el fabricante (30%).
- La recuperación es un 5,81% inferior al 25% mínimo especificado por el fabricante.
- La tracción es un 35,4% inferior a los 5,79 MPa especificados por el fabricante.

Se puede decir que el material separado sufre un deterioro notable en el valor de sus propiedades mecánicas, debido a que al fabricar FracoPack, el cartón se perfora y al separarlo ya no se obtiene una lámina compacta de cartón libre de asbesto, sino una con agujeros distribuidos en toda su área (Figura 3).

Figura 3. Láminas de cartón libre de asbesto y lámina metálica separadas de un residuo metaloplástico de FracoPack



Fuente: presentación propia de los autores.

3.3 Separación de FracoPack utilizando solución alcalina

En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a las pruebas efectuadas con solución alcalina.

Tabla 5. NI-2095A FracoPack: valores de p para los tiempos de separación de la primera cara de la muestra

Factor	Temperatura	Concentración	Interacción
Tiempo de separación de la primera cara	0,0721	0,317	0,847
Tiempo de separación de la segunda cara	0,919	0,334	0,845
Densidad	0,384	0,646	0,645
Compresibilidad	0,932	0,119	0,298
Recuperación	0,834	0,002	0,080
Tracción transversal	0,650	0,303	0,069
Tracción longitudinal	0,762	0,239	0,165

Fuente: presentación propia de los autores.

En cuanto a los tiempos requeridos para lograr la separación de la primera cara, al analizar los resultados con un valor predeterminado de $\alpha=0,05$ se encontró que ninguno de los factores estudiados ni su interacción son significativos. Los valores recalculados sin tener en cuenta la interacción son: $p=0,70$ para la temperatura y $p=0,28$ para la concentración, y ratifican este hecho.

En cuanto a los tiempos de separación de la segunda cara, los resultados coinciden con los obtenidos al estudiar los tiempos de separación de la primera cara, es decir, ninguno de los factores o su interacción son significativos. En términos concretos, lo anterior indica que da lo mismo trabajar a cualquier nivel de temperatura y de concentración del hidróxido de sodio.

Con respecto a las propiedades mecánicas (utilizando $\alpha=0,05$), se tiene que la única propiedad afectada por alguno de los factores es la recuperación. En este caso, el factor significativo es la concentración del agente de separación. En la Tabla 6 se muestran los valores promedio para esta propiedad en cada uno de los niveles de concentración del agente de separación.

Tabla 6. NI-2095A FracoPack: valores de la recuperación para los diferentes niveles de concentración de solución alcalina

Concentración	Baja	Media	Alta
Recuperación (%)	17,68	16,41	12,6

Fuente: presentación propia de los autores.

La concentración de solución alcalina que resulta en un valor significativamente diferente del porcentaje de recuperación es en nivel alto. En la Tabla 7 se reportan los valores promedio de las propiedades físicas y mecánicas, medidos a los cartones después de lograr la separación.

Tabla 7. NI-2095A FracoPack: valores promedio de las propiedades físicas y mecánicas (muestras separadas con solución alcalina)

Propiedad	Promedio
Densidad (g/cm ³)	1,12
Compresibilidad (%)	31,24
Recuperación (%)	15,56
Tracción transversal (MPa)	3,70
Tracción longitudinal (MPa)	4,55

Fuente: presentación propia de los autores.

Las comparaciones de los valores de la Tabla 7 con los de la Tabla 1 dan como resultado:

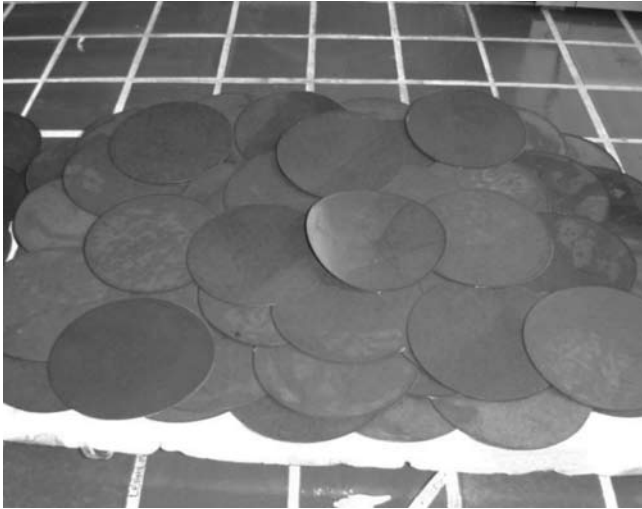
- La densidad está por debajo del 1,25 g/cm³ especificado.
- La compresibilidad está por fuera del intervalo especificado (cerca al límite superior).
- La recuperación está lejos del 25% mínimo especificado por el fabricante.
- La tracción está por debajo del mínimo especificado.

Al igual que el FracoPack separado con ácidos orgánicos, en este caso el valor de las propiedades físicas y mecánicas se ve notoriamente afectado después de realizada la separación. Esto se debe a las perforaciones propias del diseño del producto y no a un efecto del solvente.

3.4 Separación de residuos de FracoPlay con mezclas de ácidos orgánicos

A continuación se presentan los análisis de los resultados obtenidos de los tiempos requeridos para lograr la separación de la primera y la segunda cara (la que desprendió de último) de cartón libre de asbesto de la lámina metálica. En la Figura 4 se puede observar que aparentemente las láminas de cartón no sufren deterioro por el proceso de separación.

Figura 4. Láminas de cartón libre de asbesto separadas de residuos metaloplásticos de FracoPlay



Fuente: presentación propia de los autores.

Los datos reportados en la Tabla 8 indican que a un nivel de significancia del 5%, para la separación de la primera cara de cartón libre de asbesto sólo la temperatura presenta un efecto significativo. En cuanto al tiempo requerido para lograr la separación de la segunda cara, es decir completar la separación, ninguno de los factores es significativo.

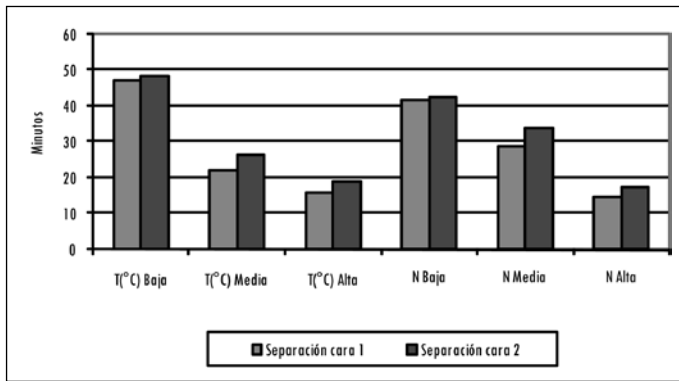
Tabla 8. Valores de p para los tiempos de separación de la primera cara de la muestra de NI-2098 FracoPlay

Factor	Temperatura	Concentración	Interacción
Cara 1	0,029	0,071	0,653
Cara 2	0,067	0,127	0,755

Fuente: presentación propia de los autores.

Al combinar los resultados de la Figura 5 y la Tabla 8 se tiene que para desprender la primera cara es más conveniente trabajar a temperatura alta y concentración alta, porque a estas condiciones se obtienen los menores tiempos de separación. No obstante, se debe considerar que en un proceso de separación sólo cuando se retire la segunda cara se puede decir que se logró la separación total de los componentes del residuo.

Figura 5. Promedios de los tiempos de separación a diferentes condiciones para las dos caras de la muestra NI-2098 FracoPlay



Fuente: presentación propia de los autores.

La Figura 5 deja ver que no hay una diferencia apreciable entre los tiempos requeridos para separar cada una de las caras de cartón libre de asbesto en ninguna de las condiciones; sin embargo, los promedios más bajos se logran a temperatura y concentración altas.

3.5 Propiedades físicas y mecánicas

En la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis de varianza para las propiedades físicas y mecánicas. Para ninguna de las propiedades medidas hay efecto significativo de alguno de los factores, es decir, el valor de las propiedades físicas y mecánicas de los cartones de FracoPlay separados con ácidos orgánicos no se ve afectado por las condiciones de proceso. Sin embargo, para la propiedad recuperación se presenta interacción significativa entre la concentración del ácido y la temperatura de operación. Los promedios de los valores de las propiedades físicas y mecánicas se muestran en la Tabla 10.

Tabla 9. NI-2098 FracoPlay: significancias de los factores y sus interacciones con respecto a las propiedades físicas y mecánicas

Factor	Temperatura	Concentración	Interacción
Densidad	0,855	0,242	0,184
Compresibilidad	0,526	0,672	0,162
Recuperación	0,394	0,377	0,036
Tracción transversal	0,933	0,707	0,861
Tracción longitudinal	0,999	0,555	0,188

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 10. NI-2098 FracoPlay: valores promedio de las propiedades físicas y mecánicas

Propiedad	Promedio
Densidad (g/cm ³)	1,31
Compresibilidad (%)	19,80
Recuperación (%)	27,37
Tracción transversal (MPa)	3,58
Tracción longitudinal (MPa)	4,74

Fuente: presentación propia de los autores.

La comparación de estos valores promedio con los valores reportados por el fabricante (Tabla 1) permiten decir que:

- Después de efectuar la separación, la densidad no disminuye.
- La compresibilidad se encuentra dentro del rango especificado (15%-30%).
- La recuperación es 2,37% superior al valor mínimo (25%) especificado por el fabricante.
- La tracción es 1,86 veces la mínima especificada por el fabricante.

Se observa que los valores de las propiedades físicas y mecánicas del material se mantienen después de que es sometido al proceso de separación con ácido acético. Esto es importante, porque para la elaboración de nuevas láminas se va a partir de un material que no se ha deteriorado, por lo menos en cuanto a las propiedades medidas.

3.6 Separación de FracoPlay utilizando solución alcalina

En la Tabla 11 se muestran los diferentes valores de p de cada uno de los factores estudiados y su interacción para cada una de las variables de respuesta.

Tabla 11. NI-2098 FracoPlay: valores de p para los diferentes factores de la primera cara (muestra separada con solución alcalina)

Factor	Temperatura	Concentración	Interacción
Tiempo de separación de la primera cara	0,548	0,371	0,751
Tiempo de separación de la segunda cara	0,623	0,209	0,980
Densidad	0,244	0,152	0,466
Compresibilidad	0,624	0,694	0,894
Recuperación	0,614	0,984	0,835
Tracción transversal	0,194	0,283	0,737
Tracción longitudinal	0,934	0,093	0,500

Fuente: presentación propia de los autores.

Al analizar los tiempos de separación de la primera cara, se puede decir que ni el factor temperatura, ni la concentración de la solución alcalina, ni la interacción temperatura-concentración influyen de forma significativa en los tiempos de separación de la primera cara de los residuos de FracoPlay.

Los valores de p obtenidos para el tiempo de separación de la segunda cara confirman lo que sucedió en los tiempos de separación de la primera cara, es decir, para separar las caras de cartón libre de asbesto del metal en los residuos de FracoPlay es indiferente a qué niveles de temperatura y de concentración se efectúen tales procesos utilizando solución alcalina como agente de separación.

En cuanto a las propiedades físicas y mecánicas, se llega a la misma conclusión respecto a los tiempos de separación: ni los factores temperatura, concentración o su interacción influyen de forma significativa en el valor de las propiedades mecánicas que se les mide a los cartones libre de asbesto una vez lograda la separación (nuevamente con $\alpha=0,05$). En la Tabla 12 están los valores medios de las propiedades mecánicas con los que se realizaron las comparaciones en relación con los valores originales.

Tabla 12. NI-2098 FracoPlay: valores promedio de propiedades físicas y mecánicas de los cartones separados

Propiedad	Promedio
Densidad (g/cm ³)	1,28
Compresibilidad (%)	24,79
Recuperación (%)	21,54
Tracción transversal (MPa)	2,47
Tracción longitudinal (MPa)	3,48

Fuente: presentación propia de los autores.

Los valores promedio de las propiedades físicas y mecánicas del material separado frente al del material virgen (Tabla 1) hacen ver que:

- La densidad está por encima de la reportada por el fabricante.
- La compresibilidad se encuentra dentro del rango especificado (15%-30%).
- La recuperación es 1,54% superior al valor mínimo (20%) especificado por el fabricante.
- La tracción es superior a los 1,72 MPa especificados por el fabricante.

El proceso de separación de FracoPlay con solución alcalina no deteriora el valor de las propiedades físicas y mecánicas del cartón libre de asbesto. Este resultado es similar a los resultados de la separación del mismo material con ácidos orgánicos. Como se mencionó, esto es importante, pues permite que la elaboración de láminas a partir de material separado se realice a partir de cartón libre de asbesto de características similares al material virgen.

3.7 Comparación entre los dos agentes de separación para cada uno de los materiales

Se realizó una diferencia de medias, con el fin de determinar para cada tipo de residuo cuál de los dos agentes de separación es más adecuado. Esto en el caso de que exista una diferencia significativa entre los tiempos de separación que se obtienen con cada sustancia.

3.7.1 Residuos de FracoPack

Los datos presentados en la Tabla 13 se analizaron con un valor $\alpha=0,05$. En cuanto al tiempo de separación, el valor de p para la diferencia de medias de 0,703 indica que sólo considerando el agente de separación es indiferente cuál de los dos se utilice.

Tabla 13. FracoPack: respuestas promedio obtenidas para cada agente de separación

Respuesta	Ácidos orgánicos	Solución alcalina	Valor de p diferencia de medias
Tiempo de separación	18,39 min	19,60 min	0,703
Densidad	1,0929 (g/cm ³)	1,1248 (g/cm ³)	0,066
Compresibilidad	28,843%	31,25%	0,016
Recuperación	19,186%	15,57%	0,000
Tracción transversal	2,751 MPa	3,700 MPa	0,001
Tracción longitudinal	3,749 MPa	4,550 MPa	0,004

Fuente: presentación propia de los autores.

En cuanto a las propiedades mecánicas, para todas hay una diferencia significativa en su valor promedio, excepto para la densidad. Los promedios más altos se encuentran cuando se utiliza una solución alcalina, salvo en el caso de la recuperación, que se ve favorecida si se utiliza como agente de separación la mezcla de ácidos orgánicos.

3.7.2 Residuos de FracoPlay

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos al someter residuos de FracoPlay al proceso de separación con cada uno de los agentes estudiados. Al calcular el valor de p para la diferencia de medias de los tiempos de separación, se obtiene un valor de 0,000. Esto indica que es mejor utilizar ácidos orgánicos, porque permite una separación mucho más rápida.

En cuanto a las propiedades físicas y mecánicas, es evidente que en todos los casos hay una diferencia significativa entre utilizar ácidos orgánicos o solución alcalina. Los mejores valores promedio se presentan siempre para las muestras separadas con ácido, menos en la compresibilidad, en cuyo caso los cartones separados con solución alcalina tienen un valor promedio superior.

Lo anterior permite concluir que para separar los residuos de FracoPlay es más conveniente utilizar ácidos orgánicos que solución alcalina. Ello no sólo por lograr separaciones más rápidas, sino para obtener mejores valores de las propiedades físicas y mecánicas.

Tabla 14. FracoPlay: respuestas promedio obtenidas para cada agente de separación

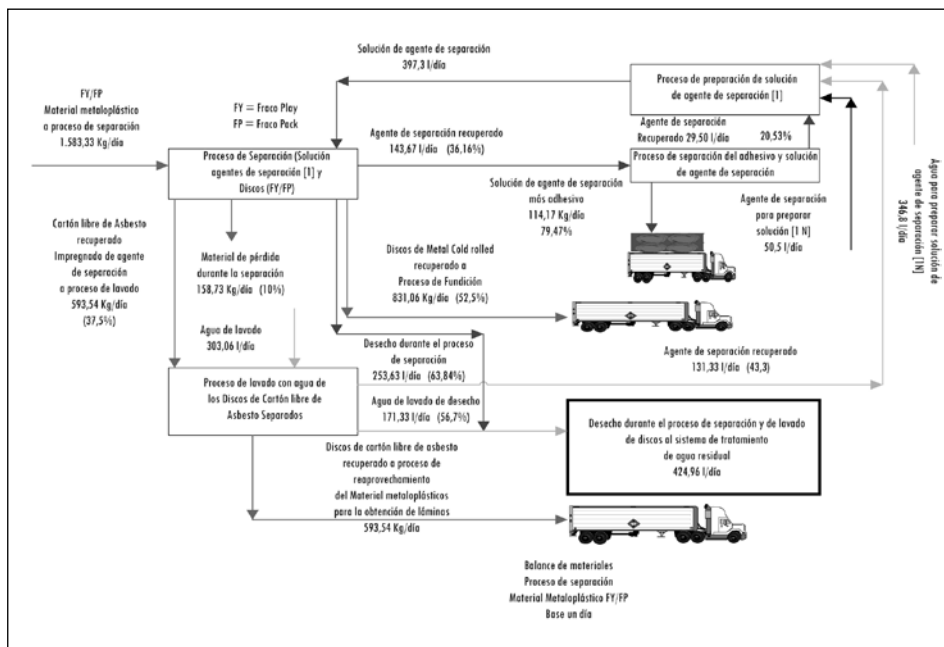
Respuesta	Ácidos orgánicos	Solución alcalina	Valor de <i>p</i> diferencia de medias
Tiempo de separación	31,10 min	120,90 min	0,000
Densidad	1,3175 (g/cm ³)	1,2858 (g/cm ³)	0,025
Compresibilidad	19,80%	24,79%	0,000
Recuperación	27,36%	21,54%	0,000
Tracción transversal	3,579 MPa	2,473 MPa	0,000
Tracción longitudinal	4,744 MPa	3,48 MPa	0,000

Fuente: presentación propia de los autores.

3.8 Diseño del proceso de reaprovechamiento de los residuos metaloplásticos

Basándose en los resultados obtenidos, se diseñó el proceso de reaprovechamiento de los residuos metaloplásticos considerados y su correspondiente balance de materia para un día de operación. Estos se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Proceso de separación para los componentes de residuos de FracoPlay y FracoPack



Fuente: presentación propia de los autores.

El anterior proceso está diseñado para tratar la totalidad de las 380 toneladas anuales de residuos de FracPack y FracoPlay generadas en la empresa. Tal como se muestra en la Figura 6, el agua requerida para el proceso de separación es recirculada hasta que deba ser enviada a una planta de tratamiento.

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en la etapa de separación de los componentes de los residuos metaloplásticos de FracoPlay y FracPack, se pueden obtener las siguientes conclusiones preliminares:

Cuando se utiliza una mezcla de ácidos orgánicos como agente de separación, los niveles de concentración y temperatura son importantes, pues influyen en los tiempos necesarios para lograr la separación de las láminas de cartón sin asbesto de la lámina metálica. Para los residuos de FracoPlay, los procesos de separación con ácidos orgánicos realizados a temperatura nivel alto y concentración alta arrojan menores tiempos de separación.

La separación de residuos efectuada con solución alcalina no se ve afectada de manera significativa por los niveles de temperatura y concentración que se utilicen. En ninguno de los procesos de separación estudiados se presenta una interacción significativa entre temperatura y concentración del agente de separación.

La separación de residuos de FracoPlay debe realizarse con ácidos orgánicos, pues permite obtener menores tiempos de separación que con solución alcalina. Además, el valor de las propiedades físicas y mecánicas no se deteriora en ninguno de los dos casos.

Para la separación de residuos de FracPack se pueden utilizar indiferentemente como agentes de separación ácidos orgánicos o solución alcalina, ya que no hay diferencia significativa entre los tiempos de separación obtenidos con cada uno de ellos. Sin embargo, por el mejor comportamiento promedio de las propiedades mecánicas, la inclinación es hacia el empleo de solución alcalina.

Las perforaciones propias del diseño del FracoPack hacen que después de efectuada la separación, independientemente del solvente empleado, el valor de las propiedades físicas y mecánicas disminuya.

Dado que el cartón libre de asbesto proveniente de la separación de FracoPlay no presenta deterioro de sus propiedades, las diferencias con respecto al material virgen que presenten las láminas fabricadas a partir de este cartón (separado de FracoPlay) se deberán a su proceso de elaboración.

Con las consideraciones anteriores se puede decir que para los estudios iniciales de la planta de producción de FRACO S. A. se logrará reducir el impacto ambiental de aproximadamente 380 toneladas anuales de residuos en el sistema de recolección de basuras de la ciudad de Bogotá D. C. De la misma manera, se generarán unos nuevos materiales que, como insumos o como materia prima, redundarán en la generación de nuevos conocimientos y mayor competitividad de los procesos productivos involucrados.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- Las directivas de FRACO S. A., por su constante colaboración y apoyo para el desarrollo del proyecto.
- Las directivas de la Universidad de Boyacá, por su interés y apoyo durante la ejecución del proyecto.
- Al ingeniero Juan Carlos Ospina y a todo el equipo de ingeniería de FRACO S. A., por su colaboración en la realización de las pruebas a los materiales separados.
- Al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas (Colciencias) y al Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena), por la financiación y contribución para el desarrollo del proyecto.

Referencias

- ASTM INTERNATIONAL. *Annual book of ASTM standards*. 2004, vol. 9, núm. 2, pp. 244, 247, 295 y 437.
- COLOMBIA, Ministerio del Medio Ambiente. *Políticas ambientales de Colombia*. Bogotá: Consejo Nacional Ambiental, 1999.
- INTERFACE SOLUTIONS. *NI-2095A/Standar nonasbesto cylinder head: specification data sheet*. Pensilvania, 2003.
- MONTGOMERY, D. *Desing and analysis of experiments*. 6a ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- TEXTOR, D. *Process and apparatus for treating composite packaging material and/or plastic wastes and use of the solid carbonaceous pyrolysis residue* [documento en línea]. 1995. <<http://www.freepatentsonline.com/EP0682099.html>> [Consulta: 25-01-2006].
- WEILL, M. K. and CORNELL, M. L. *Method of and apparatus for separating metal from paper* [documento en línea]. 1922. <<http://www.freepatentsonline.com/1406252.html>> [Consulta: 25-01-2006].
- ZAJONS, R. *Treatment of waste paper from the paper making industry and the automobile industry* [documento en línea]. s. f. <<http://v3.espacenet.com/origdoc>> [Consulta: 25-01-2006].