

Bending and compression characterization of hollow structural elements made of recycled Tetra Pak®-Based Boards (RTPBB) and an approximated calculation of the carbon footprint involved in their production

Caracterización de la flexión y compresión de elementos estructurales huecos fabricados con láminas de Tetra Pak® reciclado y cálculo aproximado de la huella de carbono producida en su elaboración

M. Quintero *, P. Rodríguez *, J. Rubio *, L. Jaramillo *, F. Nuñez-Moreno ^{1*}

* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 16/03/2017

Fecha de Aceptación: 25/09/2017

PAG 131-148

Abstract

The present research summarizes the test results of mechanical capacity of built-up structural elements, intending to introduce the possibility of using RTPBB as material for creating structural solutions for temporary housing, and for small houses. Hollow columns and beams models helped in understanding theoretical behavior by using nonlinear stress-strain relations of the material, and finite element models (FEM) to determine the areas where stresses and deformations are principal. Optimum thickness boards of about 15mm helped to build the specimens, which afterwards were failed using and MTS testing machine, following monotonic loads. Tests performed, mainly focused on compression and bending, using hinged supports and a central two-points-loading arrangement respectively. Additionally the research presents a basic comparison of mechanical results to those reported by technical manuals of commercial plywood in Colombia. In a parallel analysis, a functional unit defined, helped in the estimation of the carbon dioxide footprint equivalent for various steps of the production processes of the base material. Results show that although the RTPBB has a low elastic behavior, stresses remain below the ultimate stress. Column failure tends to be brittle compared to that failure for the bending resistant elements. However, the presence of local buckling suggests also the means needed to improve said capacity. Failure loads are similar to those reported for commercial plywood in Colombia, however, experiencing larger deformations. The carbon footprint was determined to be reduced about 20% (production of the material used in this research), compared to commercial plywood material in Colombia.

Keywords: TetraPak based boards, hollow structural elements, mechanical properties of plywood, carbon footprint, eco-materials

Resumen

Este trabajo resume los resultados de los ensayos sobre la capacidad mecánica de elementos estructurales contruidos, con la intención de introducir el uso de las láminas de Tetra Pak reciclado como material para la creación de soluciones estructurales destinadas a viviendas temporales y de tamaño pequeño. Se usaron vigas y columnas huecas como modelo las que ayudaron a comprender el comportamiento teórico, mediante relaciones tensión-deformación no lineales del material y modelos de elementos finitos (MEF) para determinar las principales áreas dónde se produce la tensión y deformación. Las muestras se fabricaron con las láminas de 15mm, un espesor óptimo; luego se sometieron a falla usando una máquina de ensayo MTS, con cargas monotónicas. Para los ensayos realizados, enfocados principalmente a la flexión y compresión, se usaron apoyos articulados y un dispositivo central de carga en dos puntos. La investigación presenta además una comparación básica entre los resultados de los ensayos mecánicos realizados con los descritos en los manuales técnicos para madera laminada colombianos. Un análisis paralelo, con una unidad funcional definida, ayudó a estimar la huella de dióxido de carbono equivalente para las diversas etapas del proceso de producción del material de base. Los resultados muestran que a pesar de que la lámina de Tetra Pak reciclado tiene un comportamiento elástico menor, las tensiones se mantienen bajo la tensión última. La falla en la columna tiende a ser frágil comparada con aquella de los elementos resistentes a flexión. Sin embargo, la presencia de pandeo local sugiere también los medios para mejorar dicha capacidad. Las cargas para falla son similares a las informadas para la madera laminada colombiana, sin embargo, presentaron mayores deformaciones. Se determinó que la huella de carbono se redujo en un 20% (para la producción del material utilizado en esta investigación) en comparación con el producido para fabricar la madera laminada comercial en Colombia.

Palabras clave: Láminas de Tetra Pak reciclado, láminas en base a Tetra Pak, elementos estructurales huecos, propiedades mecánicas de la madera laminada, huella de carbono, materiales ecológicos

1. Introducción

En la actualidad, uno de los grandes desafíos para la ingeniería civil es lograr el desarrollo de un material de construcción que sea sustentable y resistente a la vez. Además, si con ese material, que se pudiera reciclar lo más posible, los diseñadores pueden investigar elementos estructurales para viviendas temporales, entonces se lograría

el objetivo de una solución habitacional temporal sustentable Arslan (2007). Esa fue la motivación que nos condujo a caracterizar mecánicamente una serie de elementos estructurales elaborados con Tetra Pak® reciclado, mejorando los conocimientos mecánicos de una serie de ensayos de resistencia a la tracción realizados en el pasado por el fabricante. A la vez, también fue importante el análisis básico sobre el impacto ambiental de su producción en términos de la huella de carbono.

¹ Autor de correspondencia:

Director Grupo de Investigación ESTRUCTURAS & CONSTRUCCION.

Miembro activo ASCE. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

E-mail: fnunez@javeriana.edu.co



Estas láminas se están fabricando en todo el mundo. Tetra Pak® ha impulsado su uso en Europa, especialmente en Alemania donde ha logrado reciclar un 69% de los envases usados producidos. En 1997, la Agencia China para la Protección Medioambiental aceptó este material como una tecnología recomendada para la protección del medio ambiente Chung (2003) y, al año siguiente, el mismo material fue señalado como un material de construcción confiable y sustentable por la National Committee for Science and Technology Betancourt-García (2009). Its primary use is still nowadays to create furniture pieces. Actualmente, se usa mayormente para fabricar muebles. Las láminas de Tetra Pak® reciclado empleadas en esta investigación se caracterizan por su alta capacidad contra la humedad, impactos y temperatura, ésta última debido principalmente a que su rango de degradación térmica varía entre los 210° y 470°C, Figen et al. (2013) y por sus características termo plegables y termo acústicas.

El proceso de producción se inicia desgarrando y refinando los envases Tetra Pak usados. El material polimérico y las partes de aluminio del Tetra Pak (denominado polialuminio) se pesan en proporción de 75% -25%. Este material se lleva a un molino donde se tritura y refina R.-I. RIORION-Ltda (2005), de acuerdo al procedimiento estándar para el reciclaje mecánico de desechos plásticos sólidos Van Geem (2017). Las partículas producidas tienen un tamaño que varía entre los 3 y 5mm. A continuación, se realiza un proceso de compactación, en el que las partículas sueltas se extienden sobre una superficie plana que calienta y comprime el material, teniendo como resultado el material que usamos en esta investigación. La parte polimérica del material trabaja como matriz de confinamiento para las partículas de aluminio. Para finalizar el proceso, las láminas se enfrían a -4°C para rigidizar el material y quedan preparadas para ser cortadas de

acuerdo a los requerimientos del cliente. La Figura 1 presenta un esquema del proceso.

Según una investigación anterior realizada por la compañía local que elaboraba estas láminas, el comportamiento mecánico básico del material compuesto por Tetra Pak reciclado es similar al de la madera laminada de 3 capas rigidizada poliméricamente que existe en Colombia para la construcción R.-I. RIORION-Ltda (2005).

Los ensayos realizados por un estudio reciente sobre este mismo tipo de material, muestran un comportamiento que se puede considerar lineal, incluso para el comportamiento elástico esperado, con pequeñas deformaciones por flexión Carrillo et al. (2014). La principal diferencia entre ese estudio y el nuestro es la magnitud de las muestras usadas para flexión. De acuerdo a dicha referencia, se debería usar una relación espesor-sección transversal de 24:1 para alcanzar el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad aparente ASTM D1037 (2012). Sin embargo, para nuestra investigación, el objetivo de los ensayos era un elemento estructural real, donde esa relación era cercana a 10.

La Tabla 1 muestra el promedio de los parámetros mecánicos informados para un producto colombiano fabricado en base a Tetra Pak (Ecoplak), en comparación con una plancha típica fabricada con madera aglomerada; ambas comparadas según la norma colombiana NTC-2261 para la producción de planchas elaboradas con partículas aglomeradas para aplicaciones no estructurales I. C. de N. T. y C. (ICONTEC) (2003). Estos parámetros fueron importantes como referencia para nuestros modelos comparativos, el MEF y para el material en base a madera aglomerada y Tetra Pak reciclado. Los parámetros señalan que este material Ecoplak posee cualidades comparables a las de los materiales en base a madera aglomerada.

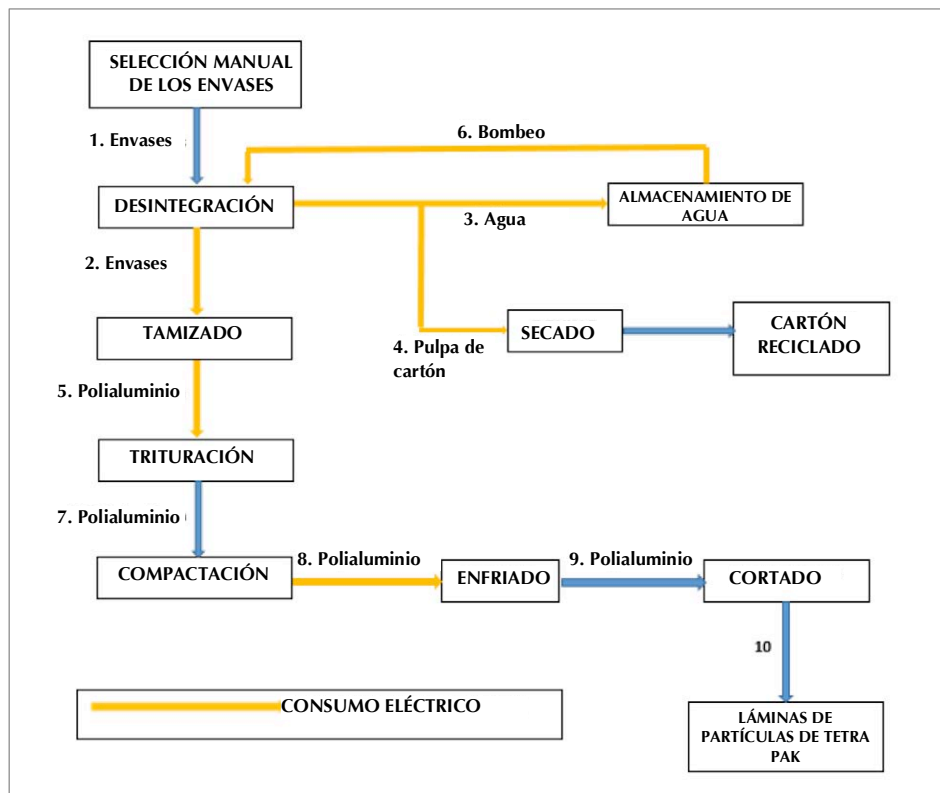


Figura 1. Esquema del proceso de producción de las láminas de Tetra Pak reciclado y de los subproductos

Tabla 1. Promedio de los parámetros mecánicos de un producto comercial ECOPLAK®, comparado con el de las planchas en base a madera, y el mínimo aceptable según la norma colombiana NTC-2261 R.-I. RIORION-Ltda. (2005)

| Parámetro | Unidad | Ecoplak ® | En base a madera | NTC 2261 |
|-----------------------|-------------------|-----------|------------------|----------|
| Módulo de ruptura | MPa | 20 | 17,6 | 14,5 |
| Módulo de elasticidad | MPa | 1.489 | 2.000 | 1.500 |
| Flexión perpendicular | N | 726 | 1.100 | 550 |
| Flexión paralela | N | 852 | 700 | 650 |
| Humedad máxima | % | 4 | 5-6 | 6 |
| Densidad | kg/m ³ | 1.070 | 600 | >800 |

2. Materiales y métodos

Tres tipos de muestra ayudaron a comprender las características básicas del material y la respuesta estructural de los elementos principales (vigas y columnas) fabricadas con Tetra Pak reciclado. Muestras en forma de hueso de perro ayudaron a obtener la respuesta básica de tensión-deformación en tensión; en cambio. Para los elementos estructurales, se prepararon muestras de 2m de largo, 0,2m de lado de la sección transversal cuadrada hueca, con espesor de la lámina de 15mm, con dos sistemas constructivos diferentes. El ensayo de estas muestras, tanto en compresión como flexión, ayudó a comprender los dos tipos de sistemas constructivos usados, y ensayando dos tipos de conexión de las piezas:

1. Conexión mecánica: tornillos de acero de 5cm (2") de largo
2. Conexión mecánica-química: tornillos de acero de 5cm + adhesivo sintético PL285 a lo largo de los cantos.

Unos atiesadores adicionales colocados en los puntos tercios de las muestras de vigas y columnas ayudaron a evitar el pandeo lateral de los miembros de los elementos no atiesados. Los atiesadores también tenían 15mm de espesor.

Se realizaron seis ensayos monotónicos (desplazamiento controlado) de las vigas y seis de las columnas construidas con láminas Tetra Pak reciclado, usando un actuador dinámico MTS y aplicando una velocidad de 0,05mm/seg hasta su falla. Se construyeron elementos estructurales de sección transversal de 0,20m x 0,20m y 2m de largo, con unión atornillada (con tornillo de acero) y/o química (con adhesivo industrial) de piezas cortadas a la medida para formar un elemento estructural hueco. El ensayo terminó cuando el elemento ya no fue capaz de soportar otro incremento de carga (a compresión o flexión) o se produjo agrietamiento o pandeo. Los sensores MTS registraron la carga y el desplazamiento de la información entregada por el actuador (carga aplicada y desplazamiento). Los Modelos de Elementos Finitos (MEF) de ambos materiales, en base a Tetra Pak y a madera aglomerada, fueron útiles para comparar el comportamiento resultante para una misma geometría, con los resultados obtenidos de los ensayos.

3. Diagrama tensión-deformación del material a base de Tetra Pak reciclado

A pesar de que se disponía de datos promedios para materiales en base a Tetra Pak reciclado, un ensayo directo tensión-deformación usando las muestras en forma de hueso de perro fabricadas con este material entregó ideas sobre su comportamiento lineal y no lineal. Para el ensayo, se usó un Marco de Carga INSTRON 3369 a la medida con una celda de carga de 50kN. Las muestras usadas para los ensayos a tracción directa y la configuración experimental para una falla típica se aprecian en la Figura 2. Los resultados ayudaron a determinar el módulo de elasticidad promedio, y la simulación del análisis de elementos finitos, incluyendo el comportamiento no lineal del material y las grandes deformaciones.

4. Configuración experimental

Para los ensayos a flexión la solución fue acoplar al cabezal del actuador MTS® un dispositivo de carga en dos puntos para aplicar la carga en el tercio central de la luz de una viga simplemente apoyada (Véase Figura 3). Esto creó un área de flexión pura que era el principal objetivo del ensayo.

La Tabla 2 y la Tabla 3 muestran el código asignado a cada muestra según el tipo de conexión empleado. Se aplicó la carga a una velocidad de 3mm/min de desplazamiento de la cruceta tanto para flexión como para compresión. Ambos ensayos se detuvieron cuando se produjo alguno de los dos estados límite, deformación excesiva o colapso.

Para los ensayos a compresión, se usó un solo apoyo fijo en un extremo para aplicar la carga tratando de evitar en lo posible una flexión no considerada. En la Figura 4 se aprecia la muestra bajo compresión. Se realizó una verificación previa del ensayo para evitar la deformación inicial bidireccional.



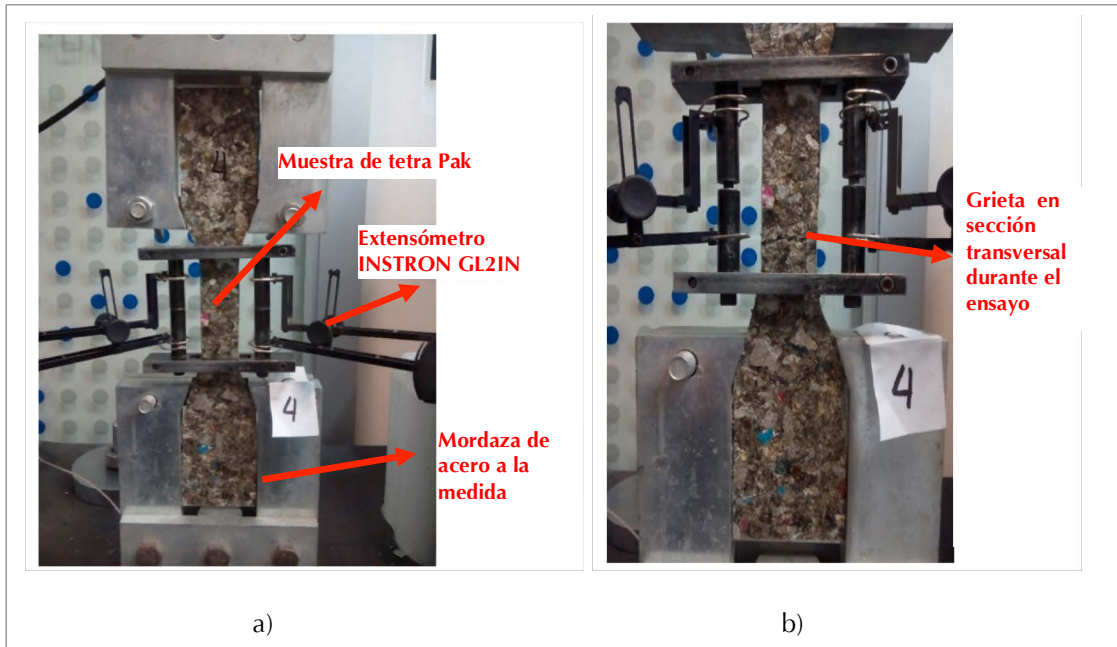


Figura 2. Ensayos de tracción directa para determinar el diagrama tensión-deformación para el material en base a Tetra Pak. a) Muestra bajo ensayo a tracción en una máquina INSTRON® 3369, b) Falla típica en tracción

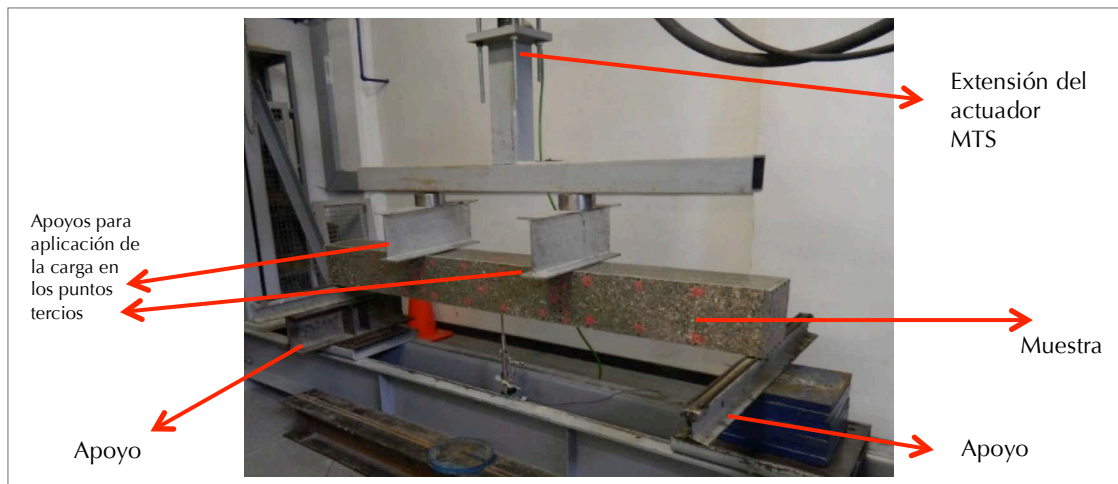


Figura 3. Muestra bajo ensayo a flexión usando una carga central en dos puntos

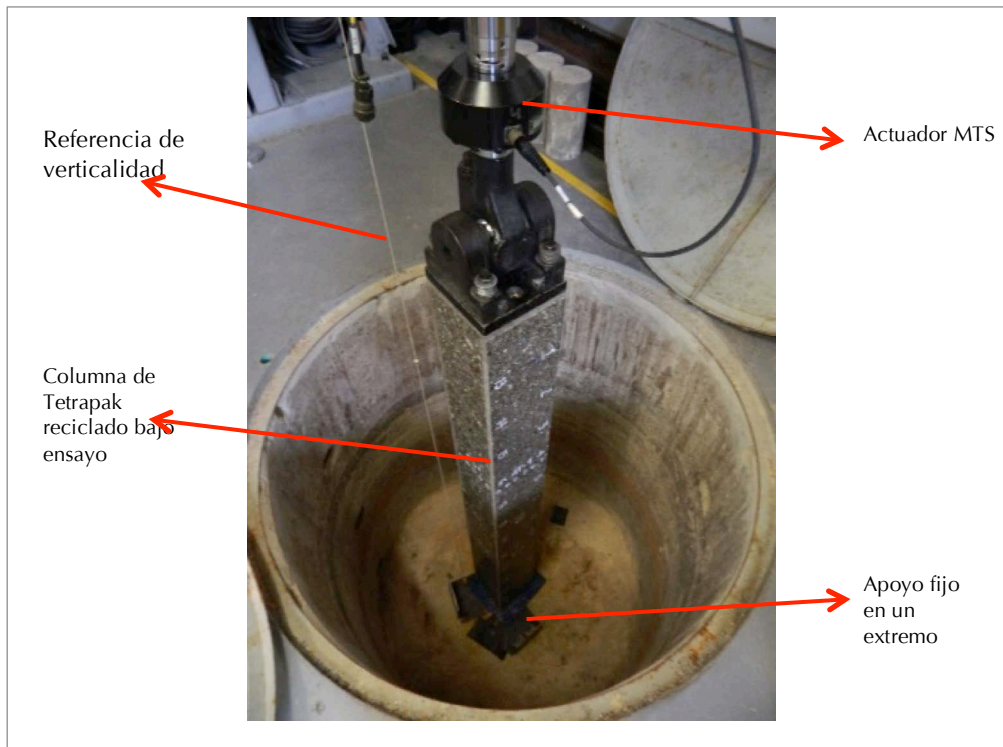


Figura 4. Muestra bajo ensayo a compresión usando condiciones de apoyo simples

Tabla2. Códigos de las muestras para los ensayos a flexión

| ITEM | Tipo de conexión | |
|-----------|---------------------|-------------------------------|
| | Tornillos de acero | Tornillos de acero + Adhesivo |
| # Muestra | 3 | 3 |
| Código | vg-01, vg-02, vg-05 | vg-03P, vg-04P, vg-06P |

Tabla 3. Códigos de las muestras para los ensayos a compresión

| ITEM | Tipo de conexión | |
|-----------|--------------------|-------------------------------|
| | Tornillos de acero | Tornillos de acero + Adhesivo |
| # Muestra | 3 | 3 |
| Código | C-01, C-04, C-05 | C-02P, C-03P, C-06P |



5. Resultados

Los resultados están disponibles desde tres puntos de vista: i) El comportamiento tensión-deformación del material, ii) el registro visual de la falla típica para los dos tipos de carga aplicada y iii) el registro de los datos y de los análisis correspondientes a los datos obtenidos de los ensayos. Luego, se compararon los resultados con los modelos MEF, hubo poca concordancia entre los datos teóricos y los experimentales.

5.1 Comportamiento tensión-deformación del material en base a Tetra Pak

La curva tensión-deformación para una de las muestras mostró un comportamiento no lineal con dos

comportamientos lineales iniciales. Se estableció un módulo de elasticidad promedio primario de $E_{\text{prim}}=747,2\text{MPa}$ que duró un rango de esfuerzo de entre $0,0002\text{mm/mm}$ y $0,000475\text{mm/mm}$, esfuerzo en el que un comportamiento lineal secundario se mantuvo para un rango mayor de esfuerzos ($E_{\text{seg}}=238,02\text{MPa}$). El material (debido a la naturaleza de las partículas que lo componen) no tiene un punto de fluencia. Más bien tiene un comportamiento no lineal hasta que alcanza el esfuerzo que rompe la sección transversal con el avance de una grieta perpendicular al eje de carga (Véase Figure 2, parte b). Los datos se muestran en la Table 4.

Table 4. Módulo de elasticidad (primario y secundario) para el material en base a Tetra Pak reciclado

| Ensayo | Módulo de elasticidad del Tetra Pak reciclado | |
|---------------------|---|------------------|
| | Primario (MPa) | Secundario (MPa) |
| 1 | 719.23 | 181.94 |
| 2 | 765.85 | 296.96 |
| 3 | 756.50 | 235.18 |
| Valor Medio | 747.19 | 238.02 |
| Desviación estándar | 24.66 | 57.56 |
| Coef. de variación | 0.033 | 0.241 |

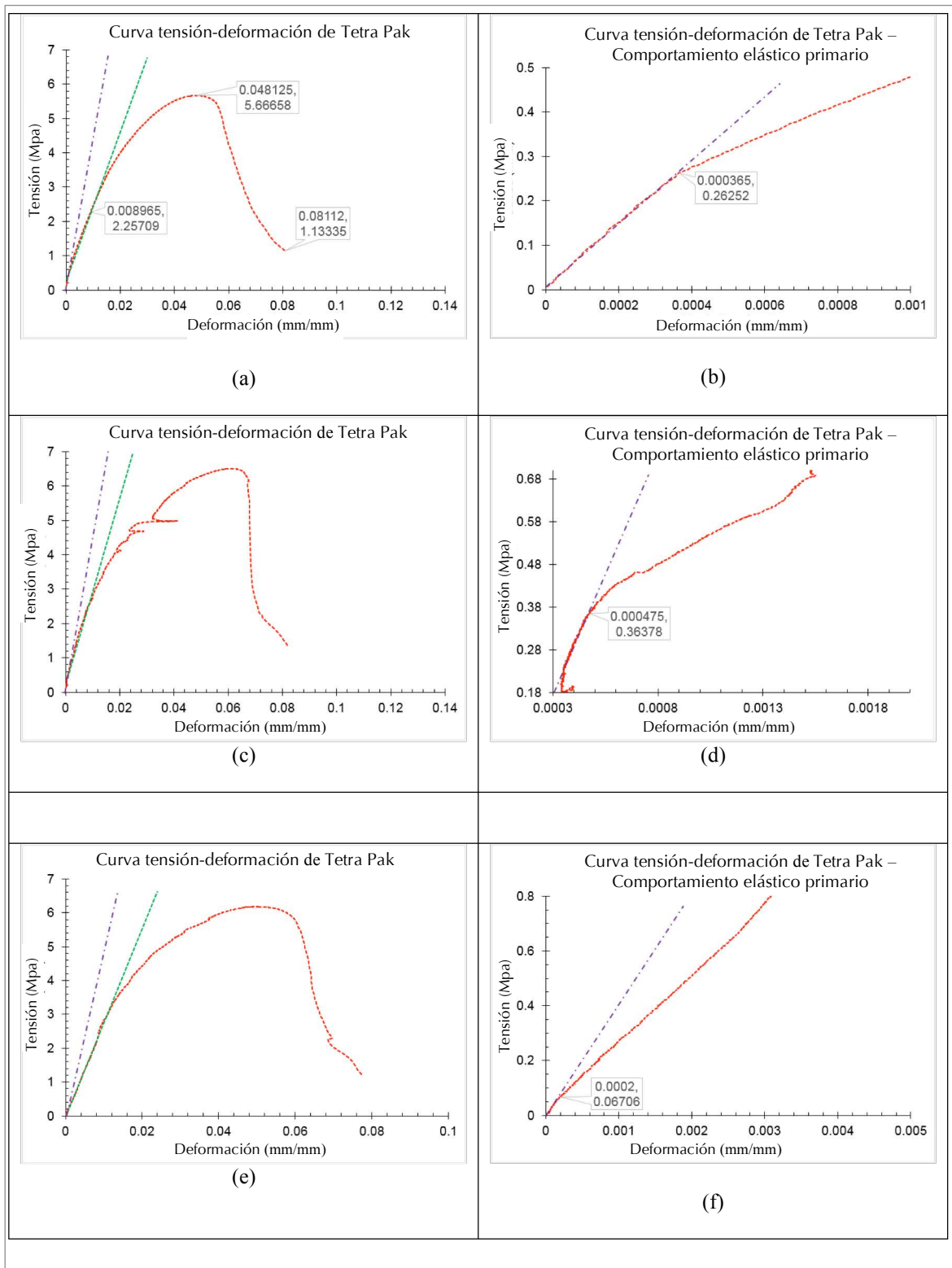


Figure 5. (a) Ensayo Nro 1 Curva tensión-deformación, (b) Ensayo Nro 1 Comportamiento elástico primario, (c) Ensayo Nro 2 Curva tensión-deformación, (d) Ensayo Nro 2 Comportamiento elástico primario, (e) Ensayo Nro 3 Curva tensión-deformación, (f) Ensayo Nro 3 Comportamiento elástico primario



5.2 Falla típica de los elementos sometidos a flexión

Las muestras sometidas a flexión fallaron mayoritariamente debido a la propagación de una grieta que se originó en el área de la sección lateral (perpendicular al atiesador). Más específicamente, la grieta se inició en el orificio creado por el tornillo de acero. La Figura 6 muestra la grieta típica y el estado de deformación final de las muestras

5.3 Falla típica de los elementos sometidos a compresión

La falla principal de estos elementos fue el pandeo local en las secciones laterales de la columna. A pesar de la

presencia de atiesadores en los puntos tercios, el resto de la distancia no apoyada era lo suficientemente larga para permitir que estos elementos se pandearan. Después de que estos elementos alcanzaran el estado límite, las columnas perdieron su capacidad de carga debido a la formación de mecanismos de inestabilidad. En la Figura 7. se aprecia la columna pandeada. Aunque se supone que el pandeo es un problema elástico, al momento de terminar el ensayo, se produjo el pandeo del elemento no atiesado junto con el avance de las grietas por tracción.



Figura 6. a) Elemento estructural hueco en Tetra Pak reciclado con grieta típica que comienza en el tornillo inferior, b) Viga con falla en su estado final, donde la grieta avanza en el costado sometido a compresión de la sección lateral

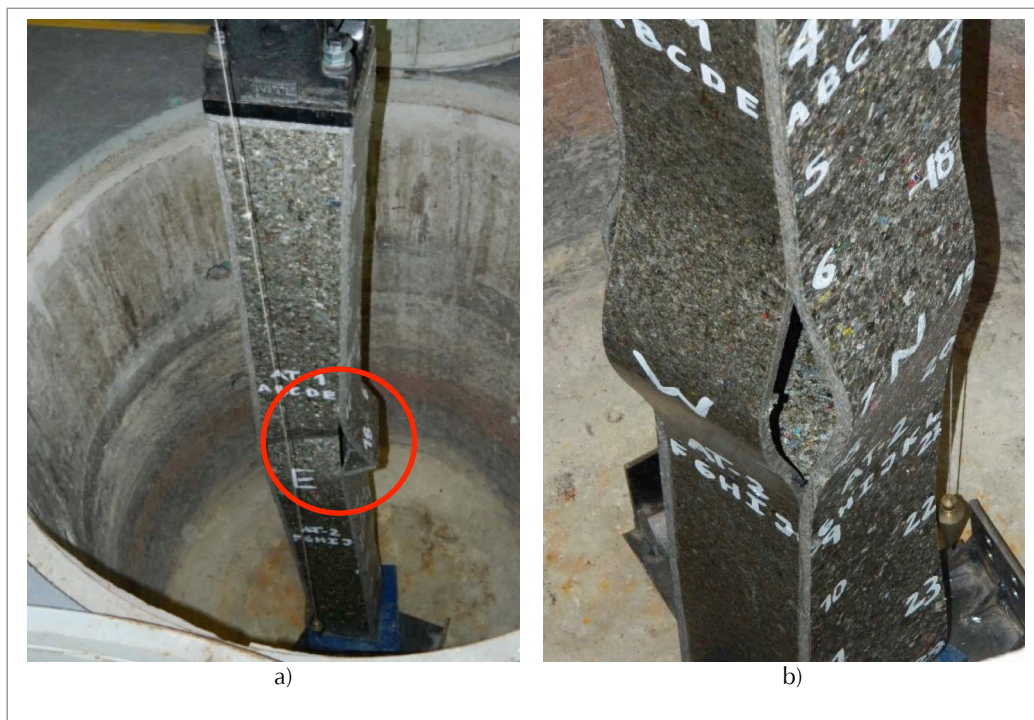


Figure 7. a) Pandeo de la sección lateral a media altura del elemento sometido a compresión, b) Estado final del pandeo de los dos elementos no atiesados

5.4 Resultados de los elementos estructurales fabricados con Tetra Pak reciclado sometidos a flexión

Las lecturas de las cargas y desplazamiento se tomaron directamente de los sensores MTS. La Figura 8 y la Figura 9 presentan los gráficos de estas variables para las tres muestras y para cada tipo de conexión. Los datos registrados muestran dos tipos de comportamiento: i) un comportamiento lineal inicial y ii) un comportamiento inestable con componentes no lineales antes y después de alcanzar la carga máxima. Sin embargo, el comportamiento no lineal después de la carga máxima parece ser caótico y sugiere una falla semi frágil del elemento estructural, representando el avance rápido de la grieta observada en la Figura 6 parte b

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos de las muestras sometidas a flexión usando únicamente tornillos de

acero como medio de sujeción de las piezas elaboradas con Tetra Pak reciclado. La deflexión máxima fue el resultado del avance de la grieta en el material, con un Coeficiente de Variación de 0,018.

La Figura 9 señala el comportamiento de las vigas de Tetra Pak reciclado unida con tornillos de acero y adhesivo industrial PL285. A pesar de que el comportamiento no es tan estable durante la parte lineal del comportamiento del material, aún se parece al primer grupo de muestras ensayadas.

La Tabla 6 indica las cargas y deflexiones máximas de las muestras sometidas a flexión usando tornillos de acero y adhesivo PL285 a lo largo de los cantos de los elementos conectores.

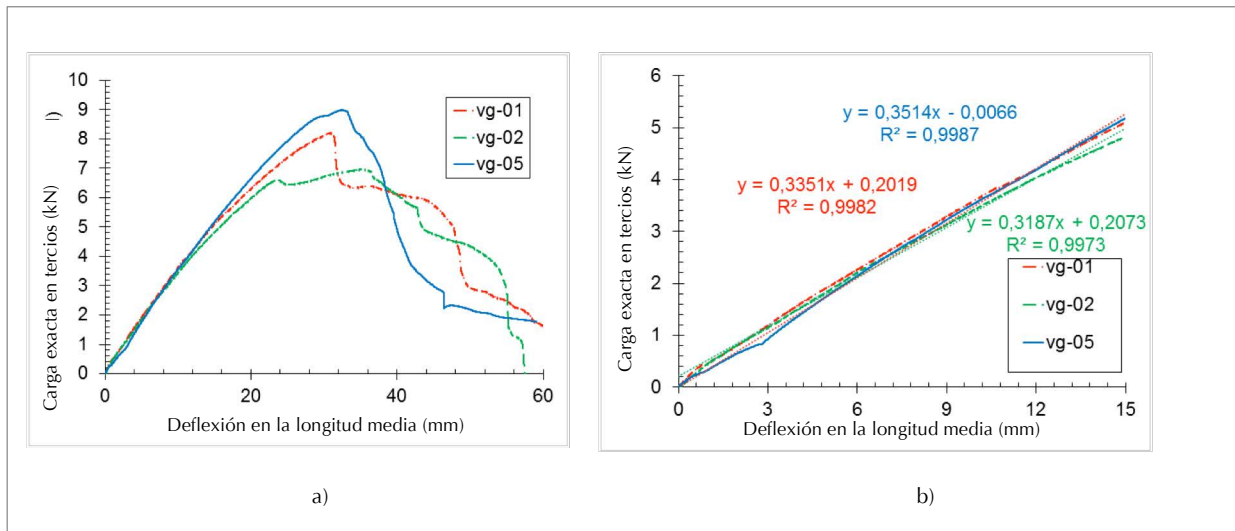


Figura 8. Gráfico carga-desplazamiento de la muestra sometida a flexión usando tornillos de acero como único elemento de unión. a) Comportamiento durante todo el ensayo, b) Comportamiento lineal de las tres muestras en ensayo. La curva es similar para las tres muestras

Tabla 5. Carga y deflexión máximas de vigas fabricadas con placas de Tetra Pak reciclado unidas únicamente por tornillos de acero

| Vigas unidas únicamente con tornillos de acero | | | |
|--|-------------------|-----------------------------|-----------------------|
| No. | Carga máxima (kN) | Tenacidad indirecta (kN-mm) | Deflexión máxima (mm) |
| vg-01 | 8.20 | 285.89 | 59.99 |
| vg-02 | 6.96 | 272.41 | 57.77 |
| vg-05 | 8.98 | 222.04 | 59.10 |
| Promedio | 8.05 | 260.11 | 58.95 |
| Desv. estándar | 1.021 | 33.65 | 1.12 |
| Coef. de variación | 0.126 | 0.129 | 0.018 |



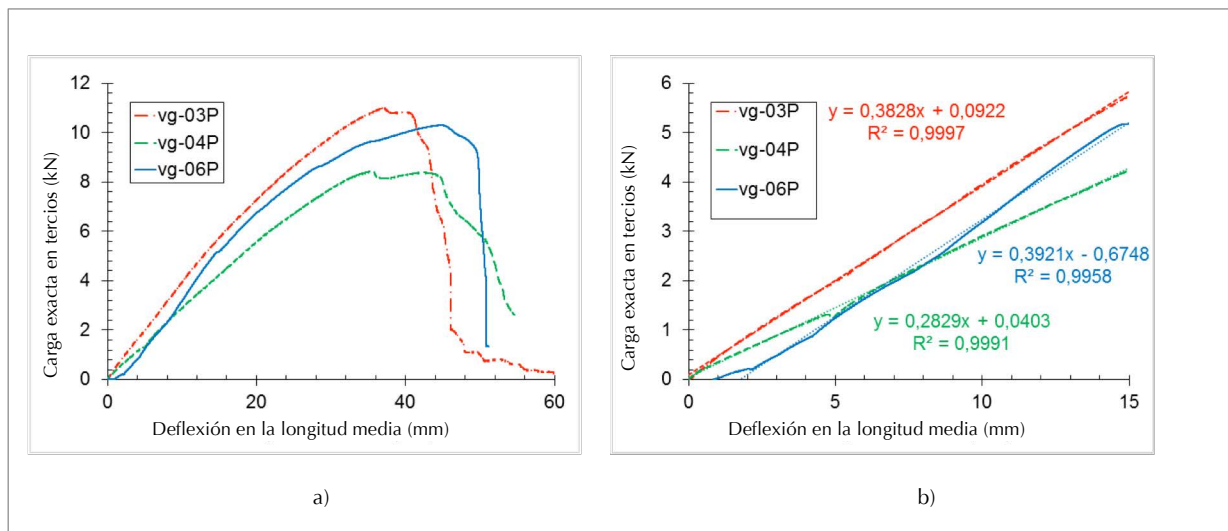


Figura 9. Gráfico carga-desplazamiento de las muestras sometidas a flexión usando tornillos de acero y adhesivo PL285. a) Comportamiento durante todo el ensayo, b) Comportamiento lineal de las tres muestras ensayadas. La curva es similar solo para las muestras vg-03P y vg-06P

Tabla 6. Cargas y deflexiones máximas de las muestras sometidas a flexión usando tornillos de acero y adhesivo PL285

| Vigas unidas con tornillos de acero y adhesivo PL285 | | | |
|--|-------------------|-----------------------------|-----------------------|
| No. | Carga máxima (kN) | Tenacidad indirecta (kN-mm) | Deflexión máxima (mm) |
| vg-03P | 11.00 | 331.79 | 59.99 |
| vg-04P | 8.43 | 228.87 | 54.61 |
| vg-06P | 10.30 | 309.14 | 51.18 |
| Promedio | 9.91 | 289.93 | 55.26 |
| Desv. estándar | 1.33 | 54.08 | 4.44 |
| Coef. de Variación | 0.134 | 0.186 | 0.080 |

En la Tabla 5 y 6, el Coeficiente de Variación tiene un máximo de 0,186 para cargas y desplazamientos. Las tablas, además, indican que para los elementos sometidos a flexión, la adición de adhesivo PL285 como medio complementario de unión, mejoró un 23,1% la carga máxima para la falla. El efecto no fue así para las deflexiones de colapso, reduciendo su magnitud en un 6,26%.

Con los datos disponibles fue posible hacer una estimación de dos parámetros complementarios: ductilidad promedio $-\Omega-$ (Ec. 1) y medición de la tenacidad promedio indirecta (Ec. 2). Estos parámetros fueron importantes para comparar los dos tipos de uniones usadas para formar las secciones. Los resultados de esos parámetros se encuentran en la Tabla 7. Una definición de ductilidad es:

$$\Omega = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\text{elástico}}} \quad (1)$$

donde Δ_{\max} corresponde a la deflexión máxima en la que el elemento colapsa, y $\Delta_{\text{elástica}}$ corresponde a la deflexión en que se perdió el comportamiento lineal primario.

En el caso de la tenacidad indirecta, la estimación proviene de la solución numérica de la siguiente integral:

$$\zeta = \int_0^{\Delta_{\max}} \mathbf{P}(\Delta_i) d\Delta_i \quad (2)$$

SPANISH VERSION.....

donde $P(\Delta_i)$ corresponde a la curva que describe el cambio de carga como función del desplazamiento.

La Tabla 7 indica la forma en que las vigas formadas con tornillos de acero y adhesivo PL285 mejoraron la tenacidad, en parte debido a la mayor carga alcanzada. Sin embargo, el área lineal de la respuesta del material es menor en las vigas que usaron tornillos y adhesivo. En otras

palabras, el comportamiento atiesador que entrega el adhesivo al elemento estructural parece afectar la relación entre las deflexiones elástica y máxima.

Las deflexiones a lo largo de la viga estructural hueca fabricada con Tetra Pak reciclado están representadas en colores, como se aprecia en la Figura 10.

Tabla 7. Resumen de los parámetros adicionales obtenidos de los ensayos a flexión para los dos tipos de viga

| ITEM | Viga con tornillos de acero | Viga con tornillos de acero + PL285 |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|
| Carga máxima de todos los ensayos (kN) | 8.98 | 11.00 |
| Deflexión máxima (mm) | 59.99 | 59.99 |
| Ductilidad promedio - Ω | 3.74 | 2.98 |
| Tenacidad indirecta mayor ζ (kN-mm) | 285.89 | 331.79 |

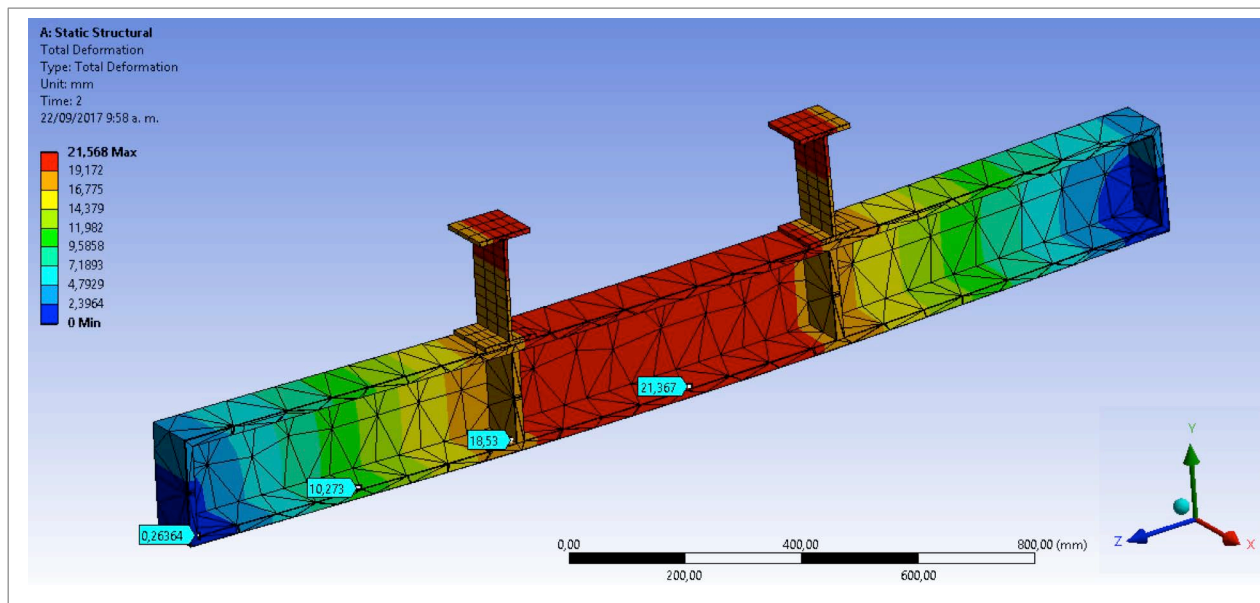


Figura 10. Deflexiones a lo largo de la viga para un MEF de la viga experimental (atiesadores a la vista). De acuerdo con el modelo, la deflexión máxima es de alrededor de 21,56. Unidades en mm.



5.5 Resultados de los elementos estructural en Tetra Pak reciclado sometidos a compresión

De manera similar, las cargas y deflexiones registradas de los elementos sometidos a cargas de compresión para los dos tipos de uniones usadas, muestran diferencias en los ensayos realizados. La Figura 11 y Figura 12 presentan los resultados, con un comportamiento semi frágil en comparación con los de los elementos sometidos a flexión.

En la Figura 11 parte b, la curvas del comportamiento lineal representan un comportamiento lineal predecible para las columnas armadas sólo con tornillos de acero. En todos los casos ensayados, después de alcanzar una carga máxima promedio de 49,37kN, con un Coeficiente de Variación de 0,0293 (Véase el óvalo punteado de la Figura 11 b), el componente estructural deja de comportarse en forma lineal.

De igual modo, en la Figura 12 parte b, el comportamiento representa un comportamiento lineal predecible para las columnas unidas con tornillos y adhesivo PL285. En todos los casos ensayados, después de alcanzar una carga máxima promedio de 42,27kN, con un Coef. de

Variación 0,0884 (Véase el óvalo punteado de la Figura 12 b), el componente estructural deja de comportarse en forma lineal. Sin embargo, en los ensayos C-02P y C-03P, el comportamiento lineal se extiende hasta una carga máxima superior a 55kN.

Las curvas muestran un comportamiento relativamente similar para los dos tipos de muestra. Estos elementos estructurales en compresión tienen un comportamiento semi frágil, debido principalmente al pandeo de los elementos no rigidizados (Véase Figura 7). Además, prácticamente no se produce un efecto sobre la capacidad de las columnas cuando se arman con adhesivo industrial (tipo PL285) y tornillos. De hecho, los datos de la Tabla 9 y Tabla 10, indican un comportamiento perjudicial de las estructuras armadas con ambos elementos.

Considerando los dos sistemas de unión de las columnas, la linealidad en el comportamiento de los elementos estructurales en compresión (gráfico carga-desplazamiento) fue similar en ambos casos según las curvas de los modelos lineales de mejor ajuste a los datos experimentales (Véase Tabla 8).

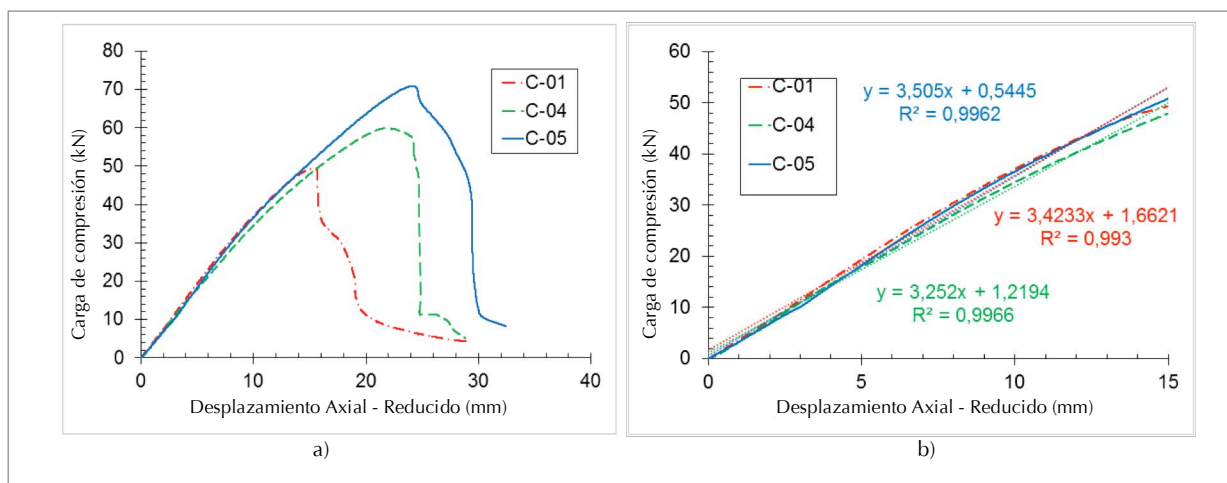


Figura 11. Gráfico carga-desplazamiento de las muestras sometidas a compresión usando únicamente tornillos de acero como elementos de unión. a) Comportamiento durante todo el ensayo, b) Comportamiento lineal de las tres muestras en ensayo. La curva es similar para las tres muestras

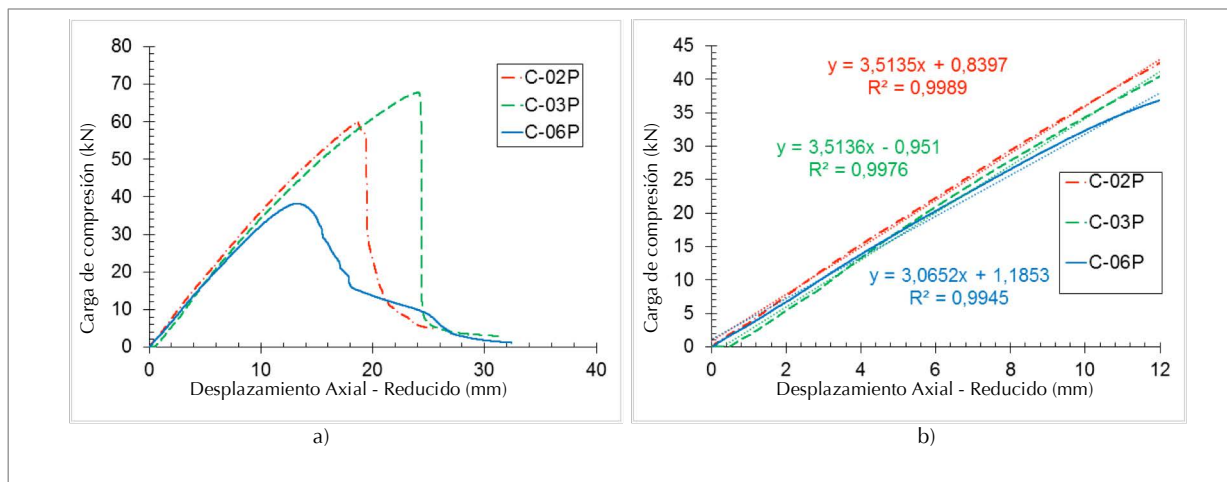


Figura 12. Gráfico carga-desplazamiento de las muestras sometidas a compresión usando tornillos de acero y adhesivo PL285. a) Comportamiento durante todo el ensayo, b) Comportamiento lineal de las tres muestras en ensayo. La curva es similar para las tres muestras

Tabla 8. Curva de comportamiento lineal de los elementos fabricados con Tetra Pak reciclado sometidos a compresión. El Coeficiente de Variación de 0,0543 representa un comportamiento lineal estable de los dos tipos de sistemas de unión ensayados

| Ensayo | Curva de Modelo lineal de mejor ajuste (kN-mm) |
|--------------------------|--|
| C-01 | 3.423 |
| C-04 | 3.252 |
| C-05 | 3.505 |
| C-02P | 3.513 |
| C-03P | 3.513 |
| C-06P | 3.065 |
| Media (kN-mm) | 3,378 |
| Desv. estándar (kN-mm) | 0,1835 |
| Coeficiente de variación | 0,0543 |

Tabla 9. Carga máxima y acortamiento de las columnas fabricadas con Tetra Pak reciclado unidas únicamente con tornillos de acero

| Columnas unidas con tornillos de acero y adhesivo tipo PL285 | | | |
|--|-------------------|--------------------|-------------------|
| No. | Carga máxima (kN) | Carga máxima (ton) | Acortamiento (mm) |
| C-01 | 49.56 | 4.95 | 28.91 |
| C-04 | 59.93 | 5.99 | 28.82 |
| C-05 | 70.88 | 7.08 | 32.43 |
| Promedio | 60.12 | 6.01 | 30.05 |
| Desv. estándar | 10.66 | 1.06 | 2.06 |
| Coef. de variación | 0.177 | 0.177 | 0.068 |

Tabla 10. Carga máxima y acortamiento de las columnas fabricadas con Tetra Pak reciclado unidas con tornillos de acero y adhesivo tipo PL285

| Columnas unidas con tornillos de acero y adhesivo tipo PL285 | | | |
|--|-------------------|--------------------|-------------------|
| No. | Carga máxima (kN) | Carga máxima (ton) | Acortamiento (mm) |
| C-02P | 60.18 | 6.02 | 25.33 |
| C-03P | 67.71 | 6.77 | 31.89 |
| C-06P | 38.23 | 3.82 | 32.39 |
| Promedio | 55.37 | 5.53 | 29.87 |
| Desv. estándar | 15.31 | 1.53 | 3.94 |
| Coef. de variación | 0.276 | 0.276 | 0.132 |



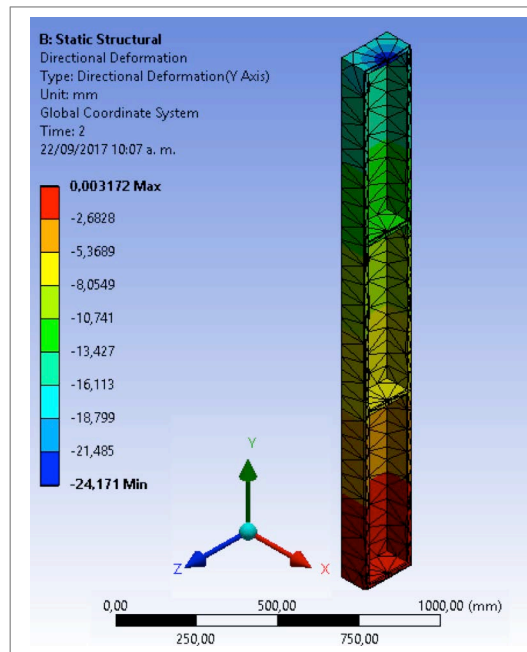


Figura 13. Acortamiento por compresión en un MEF para elementos estructurales fabricados con Tetra Pak reciclado. El acortamiento máximo observado es de 24,17mm

6. Definición de Unidad Funcional para el cálculo aproximado de la huella de carbono de elementos fabricados en madera y Tetra Pak reciclados

Para calcular la huella de carbono, el elemento funcional definido, tenía la misma geometría que los elementos ensayados en esta investigación. El volumen total de material involucrado, de acuerdo a la geometría de las muestras es de $0,0264\text{m}^3$. Se consideró el mismo volumen independientemente del material empleado (madera o Tetra Pak reciclado). Sin embargo, como las densidades de ambos materiales en discusión son diferentes, se fijó un coeficiente de relación para los cálculos posteriores. Para las muestras de Tetra Pak reciclado, con una densidad de 1.070 kg/m^3 aproximadamente, la masa total de material es de $28,25\text{kg}$ y, para los elementos de madera (no fabricados para esta investigación) con una densidad de 600kg/m^3 aproximadamente, la masa total de material sería de $15,84\text{kg}$. Entonces, el coeficiente de relación es $0,56$ para el Tetra Pak reciclado/madera.

7. Discusión sobre los resultados de la deformación modelada versus los resultados de la deformación obtenida en los ensayos

Considerando el módulo de elasticidad primaria (E_{prim}) informado en este documento, y creando un MEF de la viga ensayada, se obtiene como resultado una geometría

deformada aproximada del elemento estructural. Un MEF resultó mejor que un modelo de elemento marco debido a la sección transversal hueca; además, para considerar los atiesadores colocados en los tercios de la luz. Los resultados de la deformación máxima para la carga máxima registrada durante los ensayos (Véase Tabla 7), de 60mm , es mayor a la deformación informada por los MEF.

Cuando se usa la E_{prim} , el MEF informa una deformación máxima para las vigas de $21,56\text{mm}$ asumiendo que la carga mantendrá al elemento estructural dentro de los rangos elásticos. Sin embargo, si se usa el módulo de elasticidad informado en la Tabla 1, las deformaciones son de alrededor de $6,8\text{mm}$. Esto demuestra la forma en que el módulo de elasticidad encontrado en esta investigación se ajusta mejor (cuando se usa en el MEF para concordar de mejor forma con los datos de las deformaciones experimentales).

Para las vigas, el MEF para compresión ayudó a conocer cuál de los módulos de elasticidad modelaba mejor el comportamiento del elemento estructural observado en el laboratorio. Para la comparación se usó una carga a compresión de $70,88\text{kN}$. Los resultados señalan que para los parámetros mecánicos mencionados en la Tabla 1, el acortamiento máximo experimentado por el modelo es de unos $8,46\text{mm}$. Sin embargo, cuando el módulo de elasticidad obtenido en la investigación fue considerado en el modelo, el acortamiento resultó de $24,17\text{mm}$. Este es aún menor que el

acortamiento experimental de 32,43mm; se acerca más al orden de magnitud (74,52% con respecto al experimental).

Además, como una comparación básica de las tensiones y deformaciones soportadas por las vigas y columnas fabricadas en Tetra Pak reciclado y madera, los modelos MEF fueron sometidos a carga de la misma manera (con las cargas más altas), y se conservaron las secciones transversales de los elementos. Sin embargo, tanto el peso propio como el módulo de elasticidad son diferentes (Véase Tabla 1), lo que da como resultando un comportamiento estructural diferente. Los resultados para la simulación de vigas y columnas fabricadas con ambos materiales se encuentran en la Tabla 11 y Tabla 12

Los resultados de la MEF básica sugieren que las tensiones modeladas en los elementos de Tetra Pak reciclado son similares a los de los elementos construidos en madera. Sin embargo, las deformaciones son diferentes debido al módulo de elasticidad y a las variaciones en el peso por unidad cúbica.

8. Impacto ambiental aproximado de los elementos estructurales fabricados en madera y Tetra Pak reciclado

Para elaborar un elemento con lámina de Tetra Pak reciclado, no son necesarias las resinas fenólicas como lo son para las planchas de madera aglomerada. Esta es una característica medioambiental sustancialmente positiva, especialmente porque las resinas fenólicas son contaminantes clasificados por varias agencias medioambientales como la Agencia de Protección Medioambiental de los EEUU (USEPA) y el Centro para la Educación Medioambiental (CEE). Más específicamente, un estudio demostró la forma en que la tasa de degradación de dichos contaminantes aumenta con mayores

niveles de temperatura del agua o por la presencia de ciertos catalizadores controlados Saravia-Cortez et al. (2013), exigiendo la difícil tarea de eliminar los productos fenólicos del agua. Para elaborar un elemento con lámina de Tetra Pak reciclado, no son necesarias las resinas fenólicas como lo son para las planchas de madera aglomerada. Esta es una característica medioambiental sustancialmente positiva, especialmente porque las resinas fenólicas son contaminantes clasificados por varias agencias medioambientales como la Agencia de Protección Medioambiental de los EEUU (USEPA) y el Centro para la Educación Medioambiental (CEE). Más específicamente, un estudio demostró la forma en que la tasa de degradación de dichos contaminantes aumenta con mayores niveles de temperatura del agua o por la presencia de ciertos catalizadores controlados Wang et al. (2011), exigiendo la difícil tarea de eliminar los productos fenólicos del agua.

En Colombia, el año 2014, un total de 712 ton de envases de Tetra Pak® fueron recuperados de entre los desechos sólidos, lo que significa que el potencial uso de los envases de Tetra Pak como material de construcción puede disminuir la cantidad de desechos sólidos que llega directamente a los vertederos. Por otra parte, se debe considerar el consumo eléctrico en la formación de las láminas. Según un estudio sobre los materiales fungibles en la producción de estos tableros, el consumo eléctrico promedio de una sierra eléctrica es de 0,11 kWh/m² para dar forma a los láminas (Santos et al., 2014). El área superficial de una viga usada en la investigación es de 1,76 m². Por lo tanto, el consumo eléctrico total necesario para formar la viga a partir de las láminas es de 0,1936 kWh aproximadamente.

Usando la densidad, en la Tabla 13 se indican la cantidad de material necesario para fabricar un elemento estructural, la tasa de consumo promedio de gas, electricidad y agua.

Tabla 11. Deformación máxima y tensiones inducidas en los modelos de vigas MEF manteniendo la geometría hueca usada en esta investigación

| Material usado para vigas MEF | Tensión de flexión σ_{max} (MPa) | Tensión de corte τ_{max} (MPa) | Deformación máxima en el centro de la luz (mm) |
|-------------------------------|---|-------------------------------------|--|
| Plancha de madera | 1.65 | 0.23 | 6.93 |
| Lámina de Tetra Pak reciclado | 1.63 | 0.41 | 57.8 |

Tabla 12. Acortamiento máximo y tensiones inducidas en los modelos de columnas MEF, manteniendo la geometría hueca usada en esta investigación

| Material usado para columnas MEF | Tensión de compresión σ_{max} (MPa) | Tensión de corte τ_{max} (MPa) | Acortamiento máximo (mm) |
|----------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------|
| Plancha de madera | 7.50 | 0.27 | 6.32 |
| Lámina de Tetra Pak reciclado | 9.37 | 0.14 | 52.8 |

Table 13. Total resources quantity used to construct one functional unit used in this research

| MATERIA PRIMA NECESARIA PARA FABRICAR UNA UNIDAD FUNCIONAL | | | |
|--|-----------------------|--------------------|------------------------|
| Material | Gas (m ³) | Electricidad (kWh) | Agua (m ³) |
| Elemento estructural en madera aglomerada (15,84 kg) | 2.26 | 2.97 | 0.44 |
| Elemento estructural en Tetra Pak reciclado (28,248 kg) | 0.37 | 11.58 | 1.13 |



Según la Tabla 13, la fabricación neta de un elemento estructural en madera aglomerada como el usado para esta investigación, usa un 83,57% más de gas natural, pero a la vez, un 74,39% menos de electricidad en comparación con un elemento construido con Tetra Pak reciclado. En cuanto al consumo de agua, los elementos estructurales en madera requieren un 60,9% menos de agua que los fabricados con Tetra Pak reciclado para su elaboración.

Si por cada tonelada de material de Tetra Pak® reciclado, la producción ahorra 26.500L de agua aproximadamente, entonces para una unidad funcional de esta investigación, la fabricación ahorra 748L. Entonces, el consumo real no sería de 1,13m³ H₂O/elemento estructural sino más bien un consumo real de 0,377m³ H₂O/elemento estructural.

Usando los factores de emisión informados por la Universidad de Santander, Colombia U. de S.- UDES (2012)

resumidos en la Tabla 14 se informa en la Tabla 15 la emisión de dióxido de carbono aproximada para cada unidad funcional (fabricados con madera aglomerada y con Tetra Pak reciclado). Así, al producir una unidad estructural funcional de Tetra Pak reciclado se ahorra 1,04kg de CO₂ en comparación con la elaboración del mismo elemento con madera aglomerada.

Los resultados presentados en la Figura 14 muestran, en porcentaje, las fuentes más importantes de huella de carbono para cada una de las unidades funcionales fabricadas en madera aglomerada y Tetra Pak reciclado. El agua ahorrada en cada caso hace la diferencia en el análisis. El hecho de que, para el material de Tetra Pak, el reciclaje es la mejor fuente para que este material tenga una menor huella general de CO₂. La huella total de CO₂ para cada unidad funcional del material se encuentra en la Figura 15.

Tabla 14. Factor equivalente en CO₂ por recurso consumido

| Material fungible | Cantidad | Factor de emisión (kg de CO ₂) |
|---------------------|----------|--|
| Gas (m3) | 1 | 1.88 |
| Electricidad (kW/h) | 1 | 0.29 |

Tabla 15. Huella total de carbono por cada unidad funcional

| HUELLA TOTAL DE CARBONO (kg de CO ₂) | | | |
|--|------|--------------|-------|
| Material | Gas | Electricidad | Total |
| Elemento estructural fabricado con madera aglomerada (15,84 kg) | 4.25 | 0.86 | 5.12 |
| Elemento estructural fabricado con Tetra Pak reciclado (28,248 kg) | 0.69 | 3.35 | 4.04 |

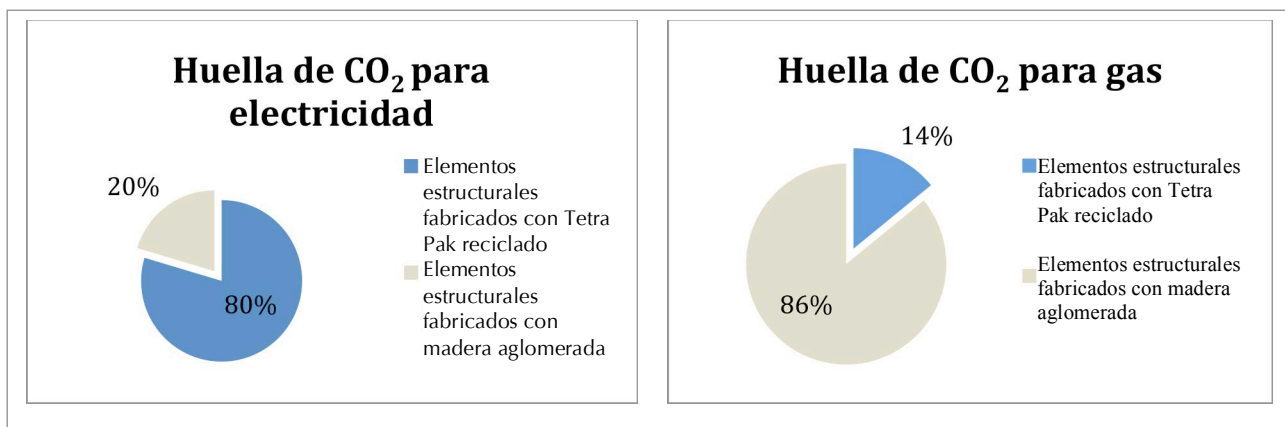


Figura 14. Huellas de carbón para la electricidad y gas; comparación de la fabricación de una unidad funcional (viga y columna)

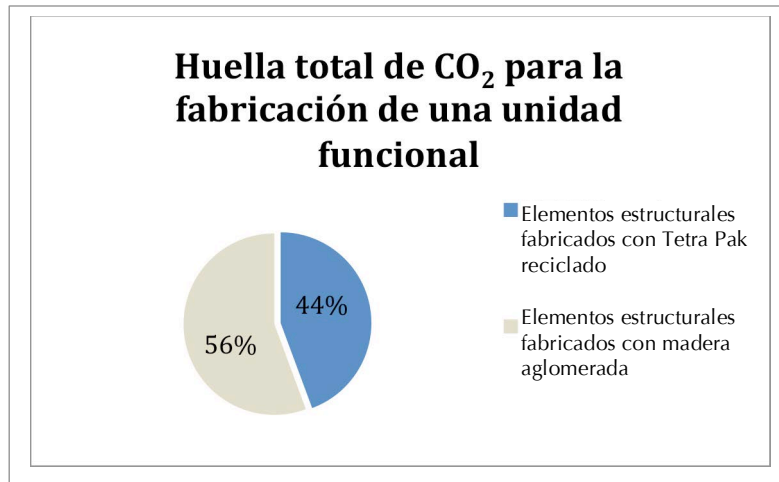


Figura 15. Huella total de CO₂ para cada unidad funcional de material

9. Conclusiones

- Un grupo de muestras demostró las capacidades de los elementos estructurales huecos fabricados con láminas de Tetra Pak reciclado bajo compresión y tensión. Los resultados mostraron la capacidad de estos elementos estructurales en cada caso, mostrando además un comportamiento lineal seguido por un comportamiento no lineal, que es menor en el caso de las columnas debido a los elementos no atiesados.
- A pesar de que los atiesadores en los puntos tercios forman parte integral del elemento estructural hueco para evitar el pandeo torsional lateral en el caso de los elementos sometidos a flexión, o pandeo lateral de los elementos no atiesados en el caso de los elementos sometidos a compresión, las tensiones e inestabilidades geométricas encuentran su comienzo en dichos elementos.
- Para las muestras sometidas a flexión, el tipo de conexión de las láminas influyó en la respuesta estructural, en términos de deformación y cargas máximas. Así, para las muestras que utilizaban tornillos de acero y adhesivo tipo PL285, mejoró su capacidad de carga en un 23,1% en promedio. Sin embargo, redujo un 6,67% la deformación máxima con respecto a las muestras que usaron solamente tornillos de acero.
- Las grietas por flexión encontraron su inicio en las discontinuidades como los orificios formados por los tornillos de acero usados para unir perpendicularmente los cantos. Dichas grietas avanzaron a lo largo de la placa lateral y continuaron hacia el lado en compresión de la viga (Véase Figura 6). Esto último porque las partículas de material son de gran tamaño y, en consecuencia, no son buenos elementos para detener el avance de la grieta. Es recomendable usar un número mayor de tornillos de acero a lo largo de la unión de los cantos y poner especial cuidado en su colocación porque si los tornillos se encuentran muy cerca del borde es perjudicial para la viga estructural.
- Al comparar la tenacidad de ambos sistemas de construcción de las muestras sometidas a flexión (Véase Tabla 7), el uso de tornillos de acero y adhesivo PL285 mejoró también la capacidad estructural porque las cargas deben remover la unión entre las caras adheridas además del cortante del material a medida que la grieta avanza. Sin embargo, en el caso de las muestras sometidas a compresión, esa mejora no existe. Lo anterior sugiere que el efecto de pandeo es importante en estos elementos estructurales. Un consejo para formar una columna más tenaz es el uso de atiesadores intermedios adicionales (en los quintos o sextos de la luz). Un número mayor de atiesadores acortará la longitud no soportada de la plancha y mejorará la capacidad general.
- De acuerdo a los resultados de la MEF, al comparar los elementos fabricados con madera aglomerada y Tetra Pak reciclado, la rigidez de los elementos en madera aglomerada es mayor porque las deformaciones modeladas en flexión y el acortamiento en compresión son ambas menores en comparación con los elementos estructurales elaborados con Tetra Pak reciclado (Tabla 11). Esto iguala la diferencia en el módulo de elasticidad entre los materiales. Sin embargo, tensiones comparables permiten un comportamiento estructural comparable y sugieren que los elementos estructurales fabricados con Tetra Pak reciclado pueden trabajar también como los elementos estructurales de un material tan conocido como las planchas de madera aglomerada.
- Entre los materiales necesarios para producir una unidad funcional (lo mismo para las muestras a flexión y muestras a compresión), el consumo de

gas y electricidad es menor para el material de Tetra Pak reciclado que para el de madera aglomerada (Tabla 13). Sin embargo, el consumo de agua es mayor. Si se considera el agua ahorrada durante el reciclaje, entonces el consumo de agua para producir elementos estructurales en base a Tetra Pak reciclado baja a cantidades competitivas respecto de los de madera aglomerada.

- La huella de carbono de la producción de una unidad funcional de material en base a madera aglomerada presumiblemente sea 26,7% mayor que la necesaria para producir una unidad funcional de material en base a Tetra Pak reciclado. Lo anterior

porque la huella de carbono del consumo de gas es mayor a la del consumo de electricidad o de agua.

- Los resultados abren la posibilidad de utilizar este material en partes específicas de un proyecto de construcción, ofreciendo el uso de un material con capacidades mecánicas adecuadas en comparación con los materiales en base a madera aglomerada, pero con los beneficios de una huella de carbono menor. Las aplicaciones pueden ser directas, por ejemplo, en viviendas de un solo piso, viviendas o albergues temporales en caso de eventos catastróficos donde la demanda de casas se presenta en un corto periodo de tiempo.

10. Referencias

- A. Chung (2003)**, "TECTÁN. RECICLANDO TETRA PACK," *Industrial Data*, vol. 6, no. 1. pp. 083–085.
- H. Arslan (2007)**, "Re-design, re-use and recycle of temporary houses," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 1, pp. 400–406, Jan..
- H. E. Betancourt-García (2009)**, "Plan de negocios para la creación de una planta de procesamiento de envases usados y desechos posindustriales de Tetrapak, para la producción de láminas aglomeradas de Tektan," [Online]. Available: <http://javeriana.edu.co/biblos/tesis/economia/tesis79.pdf>. [Accessed: 11-Mar-2016].
- A. K. Figen, E. Terzi, N. Yilgör, S. N. Kartal and S. Pişkin (2013)**, "Thermal degradation characteristic of Tetra Pak panel boards under inert atmosphere," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 878–890, Feb.
- R.-I. RIORION-Ltda (2005)**, "Láminas Ecoplak, Características Técnicas" [Online]. Available: http://www.riorion.com.co/descargas/Ecoplak_Ficha_Tecnica_Laminas_2009.pdf. [Accessed: 11-Mar-2016].
- R. Kim, L. Delva and K. Van Geem (2017)**, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste," *Waste Manag.*, Aug.
- J. G. Carrillo, D. A. P. Ventura, R. A. Gamboa and R. H. Cruz-Estrada (2014)**, "Improvement on Mechanical Properties of a Particle Board Made of Recycled Material Based on Tetra Brik®," *MRS Proc.*, vol. 1611, p. imrc2013-4a-009, Jul.
- ASTM D1037 (2012)**, "Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials," [Online]. Available: http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D1037+12. [Accessed: 14-Mar-2016].
- I. C. de N. T. y C. (ICONTEC) (2003)**, "Norma Técnica Colombiana NTC-2261. Tableros de partículas aglomeradas para aplicaciones interiores no estructurales." ICONTEC, Bogotá D.C.
- A. Saravia-Cortez, M. Herva, C. García-Diéguez and E. Roca (2013)**, "Assessing environmental sustainability of particleboard production process by ecological footprint," *J. Clean. Prod.*, vol. 52, pp. 301–308, Aug.
- P. Wang, X. Bian and Y. Li (2012)**, "Catalytic oxidation of phenol in wastewater — A new application of the amorphous Fe78Si9B13 alloy," *Chinese Sci. Bull.*, vol. 57, no. 1, pp. 33–40, Jan.
- M. F. N. dos Santos, R. A. G. Battistelle, B. S. Bezerra and H. S. A. Varum (2014)**, "Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum spp.*) and pine wood shavings (*Pinus elliotii*)," *J. Clean. Prod.*, vol. 64, pp. 345–355, Feb.
- U. de S.- UDES (2012)**, "Reporte Huella de Carbono Año 2012". [Online]. Available: http://www.udesverde.com/PDF/Info_HC.pdf. [Accessed: 16-Mar-2016].