



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



DISEÑO DE ECOCUBIERTAS EN MATERIAL PLÁSTICO RECICLADO REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE (*FURCRAEA ANDINA*) PARA UNA VIVIENDA SUSTENTABLE EN EL SECTOR RURAL DE TOCAIMA, COLOMBIA

María Paula Aranzales Sánchez

**Universidad Piloto de Colombia
Girardot, Colombia**

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene origen en dos de las problemáticas globales de mayor preocupación en la actualidad: la primera, es la contaminación y los impactos ambientales generados por la acumulación masiva de residuos plásticos y por los materiales empleados en la construcción; la segunda, es el déficit de vivienda y los problemas de calidad de materiales y estructuración en las mismas, principalmente en las poblaciones rurales de Colombia, víctimas de las crisis de desplazamiento, violencia, fenómenos naturales y falta de atención e inversión por parte de las entidades gubernamentales, factores que infieren significativamente en el desarrollo del país.

Los materiales bioconstructivos surgen como una necesidad para enfrentar dichas problemáticas, optando y sustentándose en las soluciones más competentes, por medio de la implementación de nuevos materiales y la reducción de los residuos, buscando la sostenibilidad y optimización de los recursos económicos y las materias primas disponibles. Por esta razón, la presente investigación tiene como objetivo diseñar una Ecocubierta a partir del reciclaje de termoplásticos post-consumo fabricados en polietileno de alta densidad (PEAD), cloruro de polivinilo (PVC) y polietileno tereftalato (PET) reforzados con fibra de fique (*Furcraea andina*) para una vivienda sustentable del sector rural en el municipio de Tocaima-Colombia, de manera que se pueda crear una opción viable en la reutilización de los residuos plásticos y de construcción, reduciendo el impacto ambiental generado por estos.

Para este propósito, se implementó una metodología de carácter descriptivo y experimental con método científico y enfoque mixto, en cuya primera fase, se realizó un proceso riguroso de investigación sobre las propiedades físicas y mecánicas del HDPE, el PVC y el PET: su comportamiento, funcionalidad y resistencia, así como las características físico-mecánicas de la fibra de fique. En la segunda fase, se desarrolló un prototipo resultante de la fusión de los plásticos reciclados y la fibra de fique, determinando el comportamiento mecánico de los compuestos a partir de ensayos de resistencia a la tracción, compresión y flexión, calor y estabilidad, analizando la capacidad estructural del material, cumpliendo con la carga portante y el funcionamiento requerido.

Palabras clave: infraestructura; desarrollo sostenible; reciclaje

Abstract

The present research work originates in two of the global problems of greatest concern today: the first, is the pollution and the environmental impacts generated by the massive accumulation of plastic waste and the materials used in construction; the second, is the housing deficit and the problems in the quality of the materials and the structuring in them, mainly in the rural populations of Colombia, victims from the displacement crisis, violence, natural phenomena and the lack of attention and investments by government entities, factors that significantly influence the development of the country.

*The bio-constructive materials emerge like a need to face these problems, opting and supporting for the most competent solutions, through the implementation of new materials and the reduction of waste, searching for the sustainability and optimization of economic resources and the raw materials available. For this reason, the present research has as an objective to design a deck in bio-constructive materials from the recycling of post-consumer thermoplastics fabricated in high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC) and polyethylene terephthalate (PET) reinforced with fique fiber (*Furcraea andina*) for a sustainable housing of the rural sector in the municipality of Tocaima, Colombia, by way of creating a viable option in the reuse of plastic wastes, reducing the environmental impact generated by these.*

For this purpose, a descriptive and experimental methodology with a mixed approach was implemented, in the first phase a rigorous research process was carried out on the physical and mechanical properties of HDPE, PVC and PET: their behavior, functionality and resistance, as well as the physic-mechanical characteristics of the fique fiber. In the second phase, a prototype resulting from the fusion of recycled plastics and fique fiber will be developed., determining the mechanical behavior of the compounds from tests of tensile strength, compression and bending, heat and stability, analyzing the structural capacity of the material, fulfilling with the load support and the required operation.

Keywords: infrastructure; sustainable development; recycling

1. Introducción

El calentamiento global representa uno de los problemas medio ambientales de mayor preocupación en la actualidad, alterando drásticamente el ciclo normal de los ecosistemas. Existen dos factores fundamentales que tienen gran incidencia en la manifestación de este fenómeno: el primero, es la producción y acumulación masiva de plásticos en los entornos naturales, que, debido a sus características físicas y químicas, posee un alto índice de duración, que a priori puede perdurar intacto por cientos de años como basura, y que, durante su degradación produce la liberación de metano y etileno, gases fundamentales en la generación del efecto invernadero.

La evolución en los procesos de industrialización, ha incrementado la oferta y demanda de bienes de consumo y consigo la generación de residuos contaminantes y basuras, conformada en gran parte por desechos plásticos, que, de acuerdo con un estudio publicado en el 2017 por la revista indexada Science Advances suponen alrededor del 40% del neto de las basuras acumuladas, de los cuales aproximadamente el 9% se recicla, el 12% se incinera y el 79% se acumula en vertederos o en entornos naturales (Geyer, Jambeck, & Law, 2017).

Como segundo factor, se encuentran los impactos ambientales causados por los materiales utilizados en la construcción, tales como el cemento, el acero y el concreto, ya que su producción implica el uso representativo de energía, diversos tipos de maquinarias y la explotación de recursos naturales, así como los desechos que generan. Estadísticas demuestran que el sector de la construcción es responsable de: “un 12-16 % del consumo de agua; un 25% de la madera cosechada; un 30-40 % del consumo energético; un 40% de los materiales vírgenes extraídos y un 20-30% de las emisiones de gases de efecto invernadero” (Macozoma, 2002); (Enshassi, Kochendoerfer, & Rizq, 2014).

Por otra parte, el déficit de vivienda y los problemas en las mismas, especialmente en las poblaciones de los sectores rurales de Colombia, víctimas de las crisis de desplazamiento, violencia, fenómenos naturales y la falta de atención e inversión por parte de las entidades gubernamentales, infieren significativamente en el desarrollo del país. Este es el caso de las zonas rurales del Municipio de Tocaima; de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2005: “de 1159 familias con cálculo de logros, en 1015 se presentan problemas de materiales adecuados de la vivienda, 553 tienen problemas de hacinamiento, 289 tienen pisos de tierra y en 848 hay problemas de iluminación, ventilación natural y privacidad.” (Concejo Municipal de Tocaima Cundinamarca, 2012, pág. 36).

Debido a los aspectos mencionados, los ingenieros se ven en la necesidad y la obligación de promover actitudes y soluciones estratégicas que forjen relaciones responsables con el medio ambiente y las poblaciones más vulnerables, a través del diseño de proyectos de desarrollo alternativos y sostenibles, que integren un equilibrio entre la economía, la sociedad, la ecología y el uso moderado y equitativo de los recursos disponibles.

En la Ingeniería Civil los materiales constituyen una de las áreas más importantes en el desarrollo de infraestructuras, por ello es de vital importancia ahondar en la tecnología de las materias primas empleadas en la industria de la construcción, optimizando los residuos reciclables y reutilizables

para la generación de nuevos materiales, que contribuyan positivamente a los impactos ambientales y optimicen los recursos económicos.

Como propuesta para asumir estos desafíos surge una alternativa que busca sustituir las cubiertas tradicionales fabricadas en fibrocemento, arcilla, metal, entre otros, denominada Ecocubiertas, diseñada a partir del reciclaje de termoplásticos post-consumo fabricados en polietileno de alta densidad (PEAD), cloruro de polivinilo (PVC) y polietileno tereftalato (PET) reforzados con fibra de fique (*Furcraea andina*), que permita la recolección y aprovechamiento de las aguas lluvias para implementarlo en la construcción de una vivienda sustentable del sector rural de Tocaima, Colombia.

En la primera fase de la investigación se realizó la documentación de toda la información referente al HDPE, PVC y el PET: su comportamiento frente al calor, funcionalidad y resistencia, así como las características físico-mecánicas de la fibra de fique. En la segunda fase, por medio del reciclaje de los plásticos post-consumo previamente identificados, se efectuará una fusión con la fibra de fique, determinando el comportamiento mecánico de los compuestos a partir de ensayos de resistencia a la tracción, la compresión y la flexión, estabilidad y resistencia al calor. A partir de los datos obtenidos, se desarrolla un análisis de la capacidad estructural que posee el material para el diseño de una cubierta, cumpliendo con la carga portante y el funcionamiento requerido, estableciendo una comparación a nivel económico y ambiental de los objetos de estudio respecto a los materiales de mayor demanda en el mercado nacional e internacional. En la tercera fase del proyecto se espera fortalecer el estudio y poder implementar estas innovaciones tecnológicas y reemplazar las materias primas no renovables para favorecer a las comunidades más vulnerables de las zonas rurales del país, buscando generar impactos sociales, ambientales y económicos axiomáticos en el desarrollo de la sociedad.

2. Antecedentes

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron como referencia diversos antecedentes nacionales e internacionales en la implementación de plásticos reciclados para el desarrollo de cubiertas: se resaltan las tejas desarrolladas en Brasil a partir de empaques de tetrabrik, compuestos por aluminio, cartón y plástico (Juliano, Rodrigo, José, & Antonio, 2009), los techos patentados en Europa por componentes de polietileno, polipropileno, áridos y caucho (Wege Road, Hortonville Patente n° 20090308009, 2009), la mezcla de partículas de caucho derivados de neumáticos desechados y polietileno reciclado para la construcción de techados en España (Navarro, Patal, Martínez-Boza, & Gallegos, 2010) y el aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra natural-vegetal en Pasto, Colombia (Cordoba, Mera, Martínez, & Rodríguez, 2010). Estos sirvieron como base para definir, analizar y comparar los métodos experimentales y los comportamientos manifestados en la implementación del polietileno y las fibras naturales en la construcción de cubiertas, así como sus características mecánicas y físicas.

3. Propiedades físico-mecánicas de los termoplásticos y la fibra de fique

Una de las mayores ventajas del plástico es la infinidad de usos que se le puede dar debido a las propiedades físicas y mecánicas que posee, entre las cuales se resaltan: su plasticidad o capacidad de moldearse sin fracturarse, su baja densidad, sus propiedades químicas que permiten que sea un aislante térmico y eléctrico, su facilidad para aplicarle pigmentaciones, su resistencia a diversas fuerzas y cargas, y su resistencia a la oxidación y corrosión.

Debido a la gran cantidad de polímeros sintéticos existentes, para el presente trabajo se escogieron aquellos que tienen mayor producción, uso y conforman la mayor cantidad de los desechos y por tanto generan un amplio impacto ambiental en la actualidad, y que además a comparación de otros plásticos poseen propiedades de resistencia físico-mecánicas mayores: el polietileno de alta densidad (PEAD), cloruro de polivinilo (PVC) y polietileno tereftalato (PET).

El PEAD es un polímero que se caracteriza por tener una amplia resistencia a la compresión, la tensión y a elementos químicos, bajo peso, flexibilidad, tenacidad y propiedades de aislamientos eléctricos (Botteselle D., 2007). El PVC posee una baja densidad ($1,4 \text{ g/cm}^3$) con gran resistencia mecánica, a la abrasión, al impacto y al calor, y que a la vez puede transformarse en un material rígido o flexible y moldeable sin necesidad de someterlo a altas temperaturas, lo cual permite que tenga diversas aplicaciones, así como una duración prolongada de hasta más ó décadas, además de ser un producto rentable y de bajo costo (Vélez B. & Mosquera G., 2012). El PET es un material de vasto uso en el mercado del empaque de productos de consumo y en la electrónica, puesto que tiene diversas propiedades que le aportan una gran resistencia a la tensión y los impactos, amplia rigidez e impresión, y una buena barrera a los gases (Guerrero, Lozano, González, & Arroyo, 2003).

Por otra parte, las fibras naturales son materiales renovables y de abundante disponibilidad, cuyas propiedades sirven como sustituyente de materias primas no renovables, tales como: baja densidad, alta dureza, buenas propiedades térmicas, facilidad de separación, resistencia a la corrosión, disminución en los equipos de procesamientos y el uso de energía, renovación y biodegradabilidad y, por tanto, una reducción en los impactos ambientales. (Muñoz, Hidalgo, & Mina, 2014). La fibra escogida fue el fique, primero porque es la fibra de mayor producción en Colombia, lo que trae consigo una amplia oportunidad laboral y económica para las zonas rurales del país. Y segundo, debido a sus propiedades físicas y mecánicas, con resistencias al calor de hasta $220 \text{ }^\circ\text{C}$ y bajas densidades, con una significativa resistencia a la tracción de 237 Mpa, obteniendo deformaciones del 6% hasta la falla (Delvasto, Toro, Perdomo, & Mejía de Gutierrez, 2010).

4. Procedimiento constructivo y experimental

Para la elaboración de los prototipos de las cubiertas se emplearon tres tipos de materiales termoplásticos post-consumo: Polietileno de Alta Densidad (PEAD) obtenido de botellas de detergentes y productos de limpieza; Cloruro de Polivinilo (PVC) obtenido de botellas de aceites y residuos de construcción (tuberías y accesorios); y Polietileno tereftalato (PET) obtenido de botellas de gaseosas y otras bebidas.

El componente utilizado como refuerzo fue fibra de fique procedente de las plantas de género *Furcraea andina*, la cual necesito un procedimiento previo de acondicionamiento y adecuación que implico las fases de triturado, secado y tamizado obteniendo tamaños de 1 a 3 mm.

Los materiales de PEAD, PVC y PET previamente seleccionados, fueron triturados hasta obtener fragmentos de tamaños variables entre 2 a 6 mm y consecutivamente lavados con cloro para eliminar los residuos contaminantes. Para el caso del PVC obtenido de tuberías y accesorios de construcción, debido a ser un material mucho más fuerte y difícil de triturar, inicialmente se fragmentaron con una pulidora y posteriormente triturados hasta obtener los tamaños deseados.

Se realizaron pruebas con proporciones aleatorias experimentales con mezclas de PEAD, PVC y PET en porcentajes de 33.3-33.3-33.3, 25-50-25, 25-60-15, respectivamente, sin fibra y con 5% de fibra, para un total de 6 especímenes. Posteriormente, estas muestras atraviesan un proceso de fusión alcanzando temperaturas entre 250-270 °C hasta obtener una mezcla completamente maleable y homogénea, para posteriormente ser transportada y dispuesta en moldes cerámicos en donde adquieren la forma de ondulación de la teja.

Luego, el espécimen se desmolda y se deja en un bastidor de madera para que se enfríe evitando que se generen deformaciones y fracturas. Al finalizar su etapa de enfriamiento se procede a realizar las respectivas pruebas mecánicas tomando como referencia la NTC 3201 "métodos de ensayo normalizados para determinar las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y de materiales aislantes eléctricos" y la NTC 4017 "Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla" por la cual se implementan ensayos similares a los realizados a las tejas de arcilla. La elaboración de los ensayos se llevó a cabo en la *Universidad Piloto de Colombia, Seccional Alto Magdalena* en el laboratorio de resistencia de materiales.

4. Discusión y análisis de resultados

Los especímenes desarrollados poseen un peso menor comparado con las tejas tradicionales, con una masa que varía de 1,14 kg a 1,18 kg para cada muestra con un espesor de 4 mm, lo cual brinda una característica fundamental a la hora de implementarlo en una vivienda puesto que va a tener menor incidencia de carga en las estructuras y cimentaciones que la soporta, ahorrando en costos y materiales.

Para determinar el comportamiento respecto a la absorción al agua los especímenes fueron dispuestos en un recipiente con agua durante 24 horas, manifestando un comportamiento adecuado debido a que absorbieron una cantidad de agua despreciable, con un porcentaje del 0,25%, esto gracias a las propiedades que aporta cada uno de los materiales, que al estar en su estado seco no permiten el paso ni absorción de agua sin alterar su masa inicial.

Para la resistencia al impacto, es decir, la resistencia del material a la fractura por el choque instantáneo o variaciones de una carga externa, que podría ser el caso en que se presentaran fuertes lluvias con granizo, las muestras desarrolladas mostraron un comportamiento favorable

puesto que no mostraron daños superficiales como: astillados, microfisuración superficial, cráteres, fracturas ni grietas, lo cual las hace aptas para soportar cargas externas y climáticas.

En cuanto a la resistencia a la flexión se pudo observar que las muestras con un 5% de fibra tienen una resistencia un poco menor con respecto a las mismas sin porcentaje de fibra, pero presentan mayor ductilidad. Asimismo, se determinó que la mezcla con proporciones 25% PEAD, 60% PVC, 15% PET y 5% de fibra manifestó un comportamiento mecánico superior en comparación con las otras, con una resistencia a cargas de hasta más de 3000 N pero con deformaciones significativas. Para la resistencia a la compresión y la tensión, se manifestó un comportamiento similar al de la flexión, puesto que cuando las muestras poseen el 5% de refuerzo de fibra de fique la falla a la rotura es mucho menor y presentan mayor estabilidad en el momento en que se genera la deformación.

De igual forma, el material desarrollado tiene una gran eficiencia como aislante térmico, una alta resistencia al fuego y a los productos químicos, propiedades aportadas por las características físicas de los materiales reciclados, y además presenta una gran impermeabilidad al agua y al aire, actuando como barrera de seguridad ante los agentes climáticos como lluvias, fuertes vientos y altas temperaturas.

5. Conclusiones

Debido a las distintas problemáticas ambientales, económicas y sociales que se viven actualmente, es necesario buscar opciones que aporten soluciones viables y sustentables para un progreso a futuro, por lo cual este trabajo aporta hacia nuevas tecnologías que fortalezcan un equilibrio entre la construcción, el desarrollo de infraestructuras y la conservación del medio ambiente.

Con respecto a los ensayos, conocimientos y experiencias obtenidas durante la investigación, los especímenes realizados poseen varias ventajas que orientan a un desarrollo sostenible: son ecológicas, contribuyen a la gestión de residuos, al aprovechamiento de los recursos y las materias primas disponibles, promoviendo un impacto ambiental positivo y disminuyendo la contaminación generada por los residuos plásticos y de construcción. Además de esto, son materiales más livianos, resistentes a los agentes climáticos (granizo, lluvias, altas temperaturas) y con mejores propiedades dúctiles con respecto a las tejas tradicionales.

El material con proporción 25% de PEAD, 60% de PVC, 15% de PET y 5% de fibra de fique fue el que presentó mejores resultados mecánicos, obteniendo resistencias mayores a las demás mezclas, puesto que se empleó una mayor cantidad de PVC y PET como el menor porcentaje debido a las propiedades físico-mecánicas determinadas previamente.

En cuanto a los comportamientos a la flexión, compresión y tensión, se determinó que la fibra no aumenta su resistencia, pero si su capacidad de deformarse sin incurrir a la rotura, lo cual puede aprovecharse para elementos que soliciten ser más dúctiles y livianos. Sin embargo, para propósitos del trabajo y buscando obtener un material estructural con resistencias mayores, se realizarán

modificaciones a las muestras, reduciendo el porcentaje de fibra de fique a un 4% y 3%, además se probará un espécimen con un material aglutinante que aporte un porcentaje de resistencia.

Para ello se estudiarán las propiedades y afectaciones que puedan tener materiales reciclados como el aluminio o el caucho (empleados en los antecedentes referenciados previamente) en conjunto con el PEAD, el PVC y el PET y la fibra de fique, y como inciden en el comportamiento estructural de los compuestos desarrollados buscando mejorar las características mecánicas de los mismos. De igual forma, se realizarán compuestos similares al fibrocemento sustituyendo la fibra de vidrio por PEAD, PVC, PET y fibra de fique con cantidades de cemento menores para no incrementar significativamente su peso.

Con esto se espera observar cual es el espécimen y los materiales adecuados respecto a los análisis obtenidos inicialmente para obtener una teja que sirva como cubierta para las viviendas de las poblaciones más vulnerables, buscando mejorar las condiciones estructurales de sus hogares y su calidad de vida, optimizando en costos y materiales, reduciendo el déficit de viviendas en las zonas rurales, la contaminación ambiental generada por los residuos y la mala gestión y disposición de los mismos, contribuyendo así a la implementación de nuevas tecnologías que vayan en conjunto con los entornos sociales y ambientales encaminados una infraestructura sostenible para el desarrollo del país.

6. Bibliografía

- Boor, B. J. (2009). *Wege Road, Hortonville Patente n° 20090308009*. Obtenido de <http://proxy.web-oke.nl/index.php?qx=aHR0cHM6Ly9wYXRlbnRpbWFnZXMuc3RvcnFnZS5nb29nbGVhcGlzLmNvbS9hNi8yZC83MC9hNDJjMjU3MDIxNzhkOC9XTzlwMDkxNTlyMTNBMS5wZGY%3D>
- Botteselle D., A. (2007). *Materiales eléctricos "El polietileno"*. Universidad de Chile. Santiago de Chile: Facultad de ciencias físicas y matemáticas.
- Concejo Municipal de Tocaima Cundinamarca. (2012). *PLAN DE DESARROLLO 2012 – 2015, "Inclusión para la prosperidad de Todos"*. Tocaima, Cundinamarca, Colombia: Municipio de Tocaima.
- Cordoba, C., Mera, J., Martínez, D., & Rodríguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad, reforzados con fibra vegetal, tétera (*Stromanthe Stromathoides*). *Revista Iberoamericana de Polímeros*.
- Delvasto, S., Toro, E., Perdomo, F., & Mejía de Gutierrez, R. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 187-192.
- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction projects. *Ingeniería de Construcción*, 29(3), 234-254.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, Obtenido de: <http://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782>.

- Guerrero, C., Lozano, T., González, V., & Arroyo, E. (abril - junio de 2003). Morfología y propiedades de politereftalato de etilen-glicol y polietileno de alta densidad. *Ciencia UANL*, VI(2).
- Juliano, F., Rodrigo, I. V., José, A. M., & Antonio, A. D. (2009). Avaliação da eficiência térmica de telha reciclada à base de embalagens longa vida. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(2), 204-209.
- Macozoma, D. S. (2002). *Construction site waste management and minimization*. South Africa: International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB). Recuperado el 18 de Marzo de 2019, de <http://site.cibworld.nl/dl/publications/Pub278/06Construction.pdf>
- Muñoz, M. F., Hidalgo, M. A., & Mina, J. H. (Diciembre de 2014). Fibras de Fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2), 60-70.
- Navarro, F. J., Partal, P., Martínez-Boza, F. J., & Gallegos, C. (2010). Novel recycled polyethylene/ground tire rubber/bitumen blends for use in roofing applications: Thermo-mechanical properties. *Elsevier*, 588-595.
- Vélez B., V. E., & Mosquera G., B. A. (2012). *Reciclaje de plásticos*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/5136/1/T207.pdf>

Sobre los autores

- **María Paula Aranzales Sánchez:** Estudiante de Ingeniería Civil, VIII Semestre, Semillero de investigación SENTRAM de energías renovables y materiales bioconstructivos, Universidad Piloto de Colombia. mariaaranzales@gmail.com

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)