

Development of a new cellulose-based thermal insulating material

Desarrollo de un nuevo material aislante térmico a base de celulosa

Sergio Gonzalez-Serrud¹, Dayana Saavedra², Nacarí Marín^{3*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Víctor Levi Sasso, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Panamá, sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

²Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Víctor Levi Sasso, Licenciatura en Ingeniería Civil, Panamá, dayana.saavedra1@utp.ac.pa

³Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá, nacari.marin@utp.ac.pa

Abstract– In practice, it is common to use thermal insulation to preserve the internal temperature of an enclosure, thus preventing energy exchanges with the external environment. However, the insulators found in the market have a high price and their production is not sustainable, since they generate polluting waste during this process.

The purpose of this research is therefore focused on the search for a new insulating material, whose manufacture is based on natural compounds, such as cellulose, which can be obtained from recycled newsprint and rice husks. In addition, borax is added to provide antiseptic properties. White rubber is used to bind all these components together.

While it is true that this manufactured insulating material must have a low thermal conductivity, it is also important that it has a certain degree of resistance, so the samples were subjected to tension, compression and density tests. Since the insulators are commonly placed in places that are susceptible to humidity, an evaluation of the absorption of water into the sample was also carried out. For each test, the respective mold was fabricated either with PVC or through 3D printing. With the results obtained, it is then proven that it is possible to obtain an effective thermal insulator made of recycled materials and even demonstrates that it has suitable physical and mechanical characteristics, becoming a viable alternative for the conservation of thermal energy in a given space.

Keywords– Thermal insulation, natural compounds, cellulose, thermal resistance, sustainable alternative.

Resumen– En la práctica, es común utilizar aislantes térmicos para preservar la temperatura interna de un recinto cerrado, evitando con esto que se den intercambios de energía con el ambiente externo. No obstante, los aislantes que se encuentran en los mercados tienen un precio elevado y su producción no es sostenible, pues generan desechos contaminantes durante este proceso.

El objeto de esta investigación se centra entonces en la búsqueda de un nuevo material aislante, cuya fabricación sea a base de compuestos naturales, como la celulosa, la cual puede ser obtenida a través del papel periódico reciclado y de cascarillas de arroz. Además de esto, se le añade bórax para que otorgue propiedades

antisépticas. Para unir todos estos componentes se utiliza goma blanca.

Si bien es cierto, este material aislante fabricado debe tener una conductividad térmica baja, también es importante que cuente con cierto grado de resistencia, por lo que a las muestras les fueron aplicados ensayos de tensión, compresión y densidad. Dado que los aislantes son comúnmente colocados en lugares perceptibles a la humedad, se realizó igualmente una evaluación de la absorción del agua a la muestra. Para cada prueba se fabricó su respectivo molde ya sea con PVC o través de impresión 3D. Con los resultados obtenidos, se comprueba entonces que se es capaz de obtener un eficaz aislante térmico hecho de materiales reciclados e incluso demuestra que posee características físicas y mecánicas aptas, convirtiéndose en una alternativa viable para la conservación de la energía térmica en un espacio determinado.

Palabras claves– Aislantes térmicos, compuestos naturales, celulosa, resistencia térmica, alternativa sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

Mediante estudios, se ha comprobado que las fibras de origen vegetal han mejorado sus propiedades y características con el paso de los siglos [1]–[3]. Actualmente, se ha hecho popular la utilización de compuestos naturales para la fabricación de materiales, debido a que representan un recurso sostenible, dado que son considerados como desechos por ciertas industrias, por lo que constituyen una materia prima de bajo impacto ambiental. Además, poseen características particulares como conductividad térmica baja, son efectivos como aislante de vibraciones e incluso tienen propiedades mecánicas que pueden compararse a la del GFRP [4], [5]

Cerca del 10% de la energía eléctrica producida al nivel mundial va destinada al acondicionamiento de aire de edificios [6], por ello, es necesario el uso de aislantes térmicos que no solo son funcionales para controlar el ambiente interno de recintos, sino también para el transporte y almacenaje de productos termosensibles [7], [8]. Los aislantes térmicos comerciales (fibra de vidrio, lana de roca, poliestireno expandido, espuma de poliuretano, de poliestireno, fenólicas, entre otros materiales no biodegradables) [9] reemplazaron antiguamente a aislantes a base virutas de madera y papel

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

reciclado, los cuales dejaron de usarse por consecuencia de su rendimiento térmico bajo [10], [11]. No obstante, nuevamente se ha implementado la fabricación de aislantes térmicos a partir de materiales de origen animal y vegetal [12] con la finalidad de disminuir el impacto ambiental que producen los aislantes térmicos convencionales y mitigar el cambio climático a través del uso de materia renovable [13]–[16]. Así pues, se ha utilizado para este fin materiales tales como, papel periódico, estopa de coco, cascarilla de arroz y fibras de caña, para la obtención de celulosa gracias a sus excelentes propiedades térmicas [17]. El empleo de celulosa como aislante ha sido una práctica común en países del norte desde principios del siglo XX [11].

Es necesario considerar que, al emplear materia orgánica para elaborar el material compuesto, este será susceptible a la descomposición natural y a la oxidación [18]. Es por esto, que se le debe agregar aditivos como el bórax para retardar este proceso, cuya proporción en la mezcla variará de acuerdo con parámetros como el tipo de fibras naturales usadas, tipo de matriz y según el nivel de concentración de boro el cual dependerá del fabricante de dicho aditivo [19].

En este proyecto se plantea la creación de un nuevo material compuesto con el propósito de elaborar un aislante térmico factible a partir de celulosa como componente principal. Esta ha sido obtenida a través de desechos agrícolas (cascarilla de arroz) e industriales (papel periódico), quienes han sido estudiadas anteriormente en otras investigaciones internacionales según la bibliografía consultada. A dicho material compuesto se le estudiarán sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas a través de pruebas de tracción, compresión, densidad, conductividad térmica y porcentaje de absorción de agua, tomando en consideración todas las limitantes tecnológicas, geográficas y económicas presentes en la República de Panamá.

II. MATERIALES Y EQUIPOS

Para la elaboración de las distintas muestras a las cuales se les aplicó una serie de ensayos, se emplearon los siguientes materiales: Cascarilla de arroz triturada, papel periódico triturado, cola blanca utilizada como aglutinante; bórax, como antiséptico y retardante al fuego [1]. Los dos primeros materiales mencionados, son catalogados como residuos de la agricultura y de la industria, respectivamente. Los instrumentos usados fueron: Moldes para la creación probetas de densidad, absorción de agua, de compresión, tensión, de conductividad térmica; balanza digital, pie de rey, llana, mezclador de morteros, lijas de agua #100, #300, #400, la placa del Arduino uno y el sensor DHT22.

Por otra parte, los equipos usados se nombran a continuación:

Para el ensayo de aislamiento térmico: caja de conductividad térmica según la norma ASTM C177 [16].

Para el ensayo de tensión: Se utilizó la máquina universal “Autograph AGS-J, Type Universal Tester”. Para la creación de las probetas se utilizó la norma ASTM C 209-20.

Para el ensayo de compresión: Se utilizó una máquina (hidráulica) de ensayo para materiales a la compresión. Para la creación de las probetas se empleó la norma ASTM C39.

Para el ensayo de densidad y de absorción de agua: Se utilizó una balanza de precisión Gram precisión SVA-220, un vaso químico de 600 mL y una freidora de aire (solo para el ensayo de absorción de agua).

III. METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

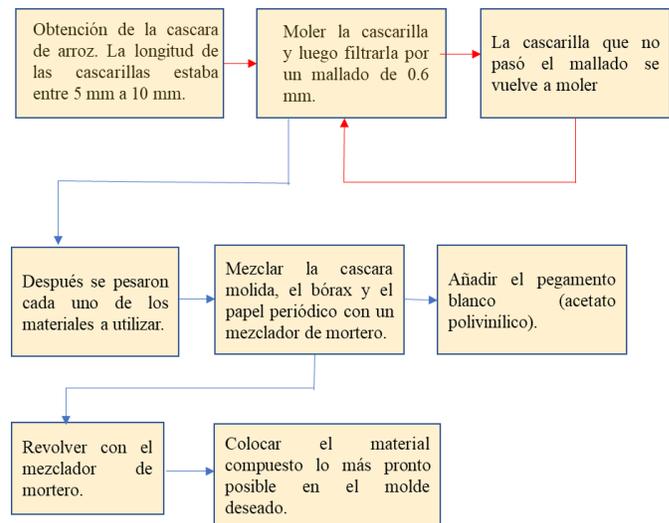


Fig. 1. Pasos realizados para obtener el material compuesto.

El porcentaje másico en el cual fueron elaboradas las muestras fue el siguiente: cascarilla de arroz 9%, papel periódico 14%, 15% de bórax y 62% de pegamento.

IV. RESULTADOS

A. Ensayo de conductividad térmica

Se llevó a cabo la prueba en la placa fabricada con el porcentaje ya mencionado anteriormente para evaluar su conductividad térmica (ver Tabla 1):

TABLA I
Propiedades térmicas de la placa.

| | | |
|---------------------------|-------|-----------------------|
| Q (Potencia) | 85 | Watt |
| DT | 347 | K |
| T1 | 125 | °C |
| T2 | 52 | °C |
| X(Espesor) | 0.015 | m |
| A (área) | 0.09 | m ² |
| K (Conductividad térmica) | 0.041 | W/m*K |
| R (Resistencia térmica) | 4.078 | (m ² *K)/W |

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Q, representa la potencia del bombillo incandescente, DT la diferencia de temperaturas; T1 la temperatura dentro de la caja térmica, T2 la temperatura en la cara de la placa que da hacia el exterior; x, el espesor de la placa.

Con los valores de k (coeficiente de conductividad térmica) y R (resistencia térmica), se determina entonces si el material elaborado cumple con lo necesario para ser un aislante térmico eficaz.

B. Ensayo de tensión o tracción

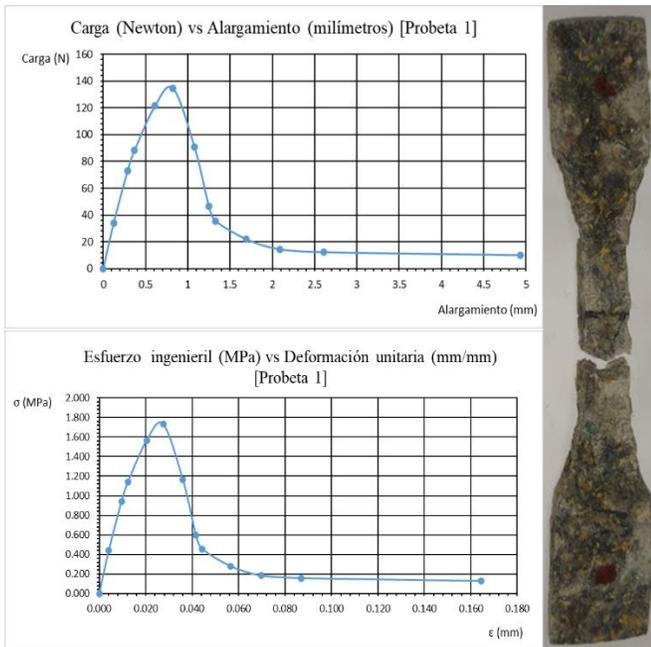


Fig. 2. Gráficas donde se observan la curva de fuerza ingenieril y la curva de esfuerzo ingenieril. Probeta después del ensayo destructivo de tracción.

TABLA II
Resultados del ensayo de tracción

| | | |
|---------------------------------|-------|--------|
| Carga última a la tensión | 135 | Newton |
| Carga de rotura | 9.96 | Newton |
| Resistencia última a la tensión | 1.73 | MPa |
| Resistencia a la rotura | 0.128 | MPa |

$$\% \text{ Elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} 100\% \quad (1)$$

Fórmula para obtener el porcentaje de elongación de la probeta.

$$\% \text{ Elongación} = \frac{34.931 - 30}{30} 100\% = 16.437\% \quad (2)$$

Porcentaje de elongación de la probeta .

C. Ensayo de compresión

La resistencia última a la compresión se da mediante (3):

Donde s, representa el esfuerzo a compresión en MPa, P es la carga última aplicada en kN y A, representa el área de la sección transversal en mm².

El área de sección transversal de la probeta fue de 2495.00 mm².

TABLA III
Datos obtenidos después de realizado el ensayo de compresión.

| Probeta | |
|---------------------------------|----------|
| Carga aplicada | 53 kN |
| Resistencia última a compresión | 21.2 MPa |
| Longitud inicial | 98.1 mm |
| Longitud final | 78.0 mm |
| (ΔL) Compresión residual | 20.1 mm |

La carga aplicada al espécimen no corresponde a la carga última que puede resistir. Esta prueba fue detenida debido a que el pistón (de la máquina de compresión) sobrepasó el límite permitido de calibración.

D. Ensayo de densidad

Para la obtención de la densidad del material compuesto se construyeron 3 probetas para realizar 3 ensayos de densidad para posteriormente hacer un promedio, norma ASTM C303. Se empleó el principio de flotabilidad de Arquímedes, el cual establece que al sumergir un objeto en un fluido, éste experimenta una fuerza de empuje hacia arriba. Dicha fuerza tiene una magnitud igual al peso del fluido que es desalojado por el objeto y actúa en dirección vertical ascendente.

TABLA IV
Datos necesarios para obtener la densidad promedio.

| | Masa (gramos) | Volumen 1 (mL) | Volumen 2 (mL) | Densidad (g/mL) |
|----|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| P1 | 38.18778 | 200 | 260 | 0.6365 |
| P2 | 34.67762 | 200 | 248 | 0.7225 |
| P3 | 27.58828 | 200 | 245 | 0.6131 |
| | | | Valor promedio | 0.6573 |

D. Ensayo de absorción de agua

Para la obtención de la densidad del material compuesto se construyeron 3 probetas para realizar 3 ensayos de densidad para posteriormente hacer un promedio, norma ASTM C1763.

$$\% \text{ de absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (1)$$

Donde,

M_h = masa de la muestra después de exponerla a la humedad.

M_s = masa de la muestra seca.

TABLA V
Datos necesarios para obtener la absorción de agua promedio.

| | Masa seca (g) | Masa húmeda (g) | Absorción de agua (%) |
|----|----------------|-----------------|-----------------------|
| P1 | 23.98 | 39.72 | 65.63 |
| P2 | 33.76 | 58.67 | 73.77 |
| P3 | 31.00 | 51.08 | 64.79 |
| | Valor promedio | | 68.06 |

V. DISCUSIÓN

A. Ensayo de conductividad térmica

El valor de la conductividad térmica está por debajo de lo establecido en la literatura consultada (<0.08 W/m K), esto quiere decir que cumple con los requisitos para ser un aislante térmico. Por otro lado, el valor de la resistencia térmica es elevado. En otras palabras, el espécimen estudiado tiene la capacidad de que el gradiente de temperatura necesario para que el sistema llegue al equilibrio sea un proceso retardado, pues la resistencia térmica obstruirá en lo posible el paso de calor.

TABLA VI

Comparación de la conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado con el material desarrollado en este artículo.

| Material | Conductividad térmica (W/m*K) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Aserrín[20] | 0.092 |
| Lino [21] | 0.055 |
| Cáñamo [21] | 0.067 |
| Lana de oveja [22] | 0.051 |
| Paja de avena [20] | 0.091 |
| Papel picado [20] | 0.091 |
| Celulosa [23] | 0.045 |
| Cascarilla de arroz [24] | 0.070 |
| Cartón corrugado [20] | 0.065 |
| Tamo de café [24] | 0.076 |
| Poliuretano rígido [25] | 0.032 |
| EPS foam slab [25] | 0.0375 |
| Material construido | 0.0410 |

Se puede observar que el mejor aislante térmico es el poliuretano rígido [25], el segundo mejor aislante es el EPS foam slab [25] y el tercer mejor aislante es material desarrollado en esta investigación.

B. Ensayo de tensión o tracción

TABLA VII

Resistencia última a la tensión de materiales polímeros, naturales y reciclados versus el material desarrollado.

| Material | Resistencia última a la tensión (MPa) |
|------------------------|---------------------------------------|
| Yute [26] | 400 |
| Yute [27] | 306 |
| Henequen [28] | 398.8 |
| Cáñamo [29] | 285 |
| Soft wood Kraft [30] | 1000 |
| Cotton [31] | 496 |
| Corn stover [32] | 500 |
| Banana [33]–[36] | 355.0 |
| Bagasse [33]–[36] | 20.0-290.0 |
| Coir [33]–[36] | 220.0 |
| Abaca [33]–[36] | 980.0 |
| Flax [33]–[36] | 800.0-1500.0 |
| Kenaf (bast) [33]–[36] | 295.0 |
| Sisal [33]–[36] | 60.0-700.0 |
| Hemp [33]–[36] | 550.0-900.0 |
| Pineapple [33]–[36] | 170.0-1627.0 |
| Sugar palm [33]–[36] | 42.1 |
| Material construido | 1.73 |

Se observa que el material desarrollado en comparación con otras fibras naturales no posee una buena resistencia a la tracción. Esto debido principalmente, a que el material desarrollado posee fibras cortas, mientras que materiales como el yute y el cáñamo poseen fibras largas (hilos) lo que permite que tenga alta resistencia a la tracción (330 MPa) [37].

C. Ensayo de compresión

El material propuesto en este artículo posee la capacidad de absorber la energía o carga cuando está sometido a compresión. En un futuro podría ser competidor de materiales compuestos como el cáñamo que en la actualidad es utilizado para la creación de tacones y suelas de zapatos.

TABLA VIII

Resistencia última a la compresión de materiales polímeros, naturales y reciclados versus el material desarrollado.

| Material | Resistencia última a compresión (MPa) |
|---|---------------------------------------|
| Saccharum cilliare reforzada con resorcinol-formaldehído [38] | 45-71 |
| Fibras textiles con Ecovio [39] | 12 |
| Caucho reciclado granulado [40] | 2.56 |
| Fibra de madera utilizando un método de espumado líquido [41] | 0.17 |

| | |
|---|-------------|
| Fibra de celulosa de pasta quimiotermomecánica blanqueada (CTMP) [42] | 0.025-0.043 |
| Cáscara de arroz con Ecovio [39] | 14 |
| Cascarilla de trigo con Ecovio [39] | 17.5 |
| Material propuesto | 21.2 |

D. Ensayo de densidad

TABLA IX

Comparación de la densidad en materiales poliméricos, fibras naturales y orgánicas con el material desarrollado en este artículo.

| Material | Densidad (kg/m ³) |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Caucho de silicona [43] | 1100 |
| Caucho natural [44] | 910 |
| Corcho [44] | 120 |
| Fibra de vidrio [44] | 220 |
| Filtro de lana [43] | 200 |
| Madera [43] | 840 |
| PEHD Polietileno alta densidad [43] | 980 |
| PELD Polietileno baja densidad [43] | 920 |
| Poliuretano en espuma [43] | 40 |
| Material propuesto | 657 |

E. Ensayo de absorción de agua

TABLA X

Comparación del porcentaje de absorción de agua en materiales aislantes naturales y de reciclado con el material desarrollado en este artículo.

| Material | Absorción de agua (%) | Referencia |
|--------------------------------|-----------------------|------------|
| Used paper | 322.3 | [44] |
| News paper | 355.2 | |
| Egg tray | 380.8 | |
| Rice husk/Ecovio® composites | 43 | [39] |
| Wheat husk/Ecovio® composites | 55 | |
| Wood fibers/Ecovio® composites | 65 | |
| Material propuesto | 68.10 | |

VI. CONCLUSIÓN

Se desarrolló un nuevo material aislante térmico a base de cascarilla de arroz (desecho agrícola) y papel periódico reciclado. Con la implementación de este material, no solo se contribuye de manera positiva al mantenimiento de la temperatura requerida para el confort en una edificación, sino que también al emplear materiales cuya utilización es casi nula, se disminuye el costo de producción, teniendo entonces, una considerable ventaja con respecto a los aislantes tipo comercial. Las nuevas técnicas destinadas a controlar y reducir los impactos ambientales de la cadena de construcción han cobrado importancia, en particular en lo que respecta a los materiales de construcción. En este escenario, el uso de materiales de desecho reciclados como componentes de construcción es una buena solución.

Para demostrar lo dicho anteriormente, se sometieron a distintas pruebas físicas y mecánicas al nuevo material compuesto elaborado a partir de cascarilla de arroz molida y papel periódico triturado, comparando su rendimiento con otras fibras de materia orgánica. Con ello se encontró, que el material construido es útil como aislante térmico al poseer una conductividad térmica baja. En cuanto a sus propiedades mecánicas, su resistencia a la tensión es muy baja en consecuencia de la poca longitud de sus fibras; posee resistencia a la compresión moderada quedando solo por debajo de fibras de madera y caña de azúcar. Otro aspecto estudiado fue su capacidad de absorción del agua, dando cerca del 68%, comparable a la de fibras textiles y de madera.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, se desea expresar agradecimiento al Doctor Arthur James por su invaluable contribución en el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se agradece al Señor Camilo Santos por su generosa provisión de materiales. De igual manera, se extiende el reconocimiento al Licenciado Jorge Frago del Centro de Investigación de la Universidad Tecnológica de Panamá, Sede Azuero, por haber llevado a cabo el ensayo de compresión, y al Ingeniero Ernesto Escobar de LABAICA, por su valiosa colaboración en el ensayo de tensión.

REFERENCIAS

- [1] F. Abedom, S. Sakthivel, D. Asfaw, B. Melese, E. Solomon, and S. S. Kumar, "Development of Natural Fiber Hybrid Composites Using Sugarcane Bagasse and Bamboo Charcoal for Automotive Thermal Insulation Materials," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, pp. 1–10, Jul. 2021, doi: 10.1155/2021/2508840.
- [2] M. Asrofi, S. M. Sapuan, R. A. Ilyas, and M. Ramesh, "Characteristic of composite bioplastics from tapioca starch and sugarcane bagasse fiber: Effect of time duration of ultrasonication (Bath-Type)," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 1626–1630, 2021.

- [3] V. Vidyashri, H. Lewis, P. Narayanasamy, G. T. Mahesha, and K. S. Bhat, "Preparation of chemically treated sugarcane bagasse fiber reinforced epoxy composites and their characterization," *Cogent Eng*, vol. 6, no. 1, p. 1708644, 2019.
- [4] H. Takagi, "Review of Functional Properties of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites: Thermal Insulation, Biodegradation and Vibration Damping Properties," *Advanced Composite Materials*, vol. 28, no. 5, pp. 525–543, Sep. 2019, doi: 10.1080/09243046.2019.1617093.
- [5] M. Ramesh, K. Palanikumar, and K. H. Reddy, "Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 558–584, 2017.
- [6] M. S. Al-Homoud, "The Effectiveness of Thermal Insulation in Different Types of Buildings in Hot Climates," *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 27, no. 3, pp. 235–247, Jan. 2004, doi: 10.1177/1097196304038368.
- [7] R. Dylewski and J. Adamczyk, "Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls," *Build Environ*, vol. 46, no. 12, pp. 2615–2623, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.023.
- [8] B. P. Jelle, "Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities," *Energy Build*, vol. 43, no. 10, pp. 2549–2563, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- [9] F. P. La Mantia and M. Morreale, "Green composites: A brief review," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 42, no. 6, pp. 579–588, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.01.017.
- [10] D. Bozsaky, "Nature-Based Thermal Insulation Materials From Renewable Resources – A State-Of-The-Art Review," *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 52–59, Mar. 2019, doi: 10.2478/sjce-2019-0008.
- [11] D. W. Yarbrough and K. E. Wilkes, "Thermal properties and use of cellulosic insulation produced from recycled paper," Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 1996.
- [12] B. Abu-Jdayil, A.-H. Mourad, W. Hittini, M. Hassan, and S. Hameedi, "Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview," *Constr Build Mater*, vol. 214, pp. 709–735, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102.
- [13] T. Hassan *et al.*, "Acoustic, Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural Fibers Waste," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 654, Mar. 2020, doi: 10.3390/polym12030654.
- [14] A. Korjenic, V. Petránek, J. Zach, and J. Hroudová, "Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources," *Energy Build*, vol. 43, no. 9, pp. 2518–2523, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.06.012.
- [15] C. Quintaliani, F. Merli, C. V. Fiorini, M. Corradi, E. Speranzini, and C. Buratti, "Vegetal Fiber Additives in Mortars: Experimental Characterization of Thermal and Acoustic Properties," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1260, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031260.
- [16] H. S. S. Shekar and M. Ramachandra, "Green Composites: A Review," *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 1, pp. 2518–2526, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.034.
- [17] S. A. Lavrykov and B. V. Ramarao, "Thermal Properties of Copy Paper Sheets," *Drying Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 297–311, Mar. 2012, doi: 10.1080/07373937.2011.638148.
- [18] M. Day, T. Suprunchuk, and D. M. Wiles, "The Fire Properties of Cellulose Insulation," *Journal of Thermal Insulation*, vol. 4, no. 3, pp. 157–170, Jan. 1981, doi: 10.1177/109719638100400301.
- [19] M. Day, T. Suprunchuk, and D. M. Wiles, "A Combustibility Study of Cellulose Insulation," *Journal of Thermal Insulation*, vol. 3, no. 4, pp. 260–271, Apr. 1980, doi: 10.1177/109719638000300404.
- [20] J. A. Gutiérrez and A. D. González, "Determinación experimental de conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, vol. 16, pp. 41–48, 2012.
- [21] H.-R. Kymäläinen and A.-M. Sjöberg, "Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations," *Build Environ*, vol. 43, no. 7, pp. 1261–1269, 2008.
- [22] Z. Ye, C. M. Wells, C. G. Carrington, and N. J. Hewitt, "Thermal conductivity of wool and wool-hemp insulation," *Int J Energy Res*, vol. 30, no. 1, pp. 37–49, Jan. 2006, doi: 10.1002/er.1123.
- [23] R. J. Murphy, A. Norton, and S. K. Campus, "Life cycle assessments of natural fibre insulation materials," *London: National Non-Food Crops Centre*, 2008.
- [24] C. Buratti, E. Belloni, E. Lascaro, F. Merli, and P. Ricciardi, "Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials," *Constr Build Mater*, vol. 171, pp. 338–349, May 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089.
- [25] I. Zabalza Bribián, A. Valero Capilla, and A. Aranda Usón, "Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential," *Build Environ*, vol. 46, no. 5, pp. 1133–1140, May 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.12.002.
- [26] N. J. V. Ortiz, J. P. V. Diaz, and N. M. H. Esteban, "Caracterización mecánica y determinación de la resistencia a la tracción de fibras de caña brava para uso en construcciones rurales," *INVENTUM*, vol. 16, no. 31, pp. 78–84, 2021.
- [27] M. E. A. Fidelis, T. V. C. Pereira, O. da F. M. Gomes, F. de Andrade Silva, and R. D. Toledo Filho, "The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 149–157, 2013.
- [28] F. X. Espinach, F. Julian, M. Alcalà, F. Vilaseca, F. Carrasco, and P. Mutjé, "Effective Tensile Strength Estimation of Natural Fibers through Micromechanical Models: The Case of Henequen Fiber Reinforced-PP Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 22, 2022, doi: 10.3390/polym14224890.
- [29] S. M. Velásquez Restrepo, G. J. Peláez Arroyave, and D. H. Giraldo Vásquez, "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos," 2016.
- [30] A. K. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Prog Polym Sci*, vol. 24, no. 2, pp. 221–274, 1999.

- [31] M. K. Kompella and J. Lambros, "Micromechanical characterization of cellulose fibers," *Polym Test*, vol. 21, no. 5, pp. 523–530, 2002.
- [32] Q. Tarrés and M. Ardanuy, "Evolution of interfacial shear strength and mean intrinsic single strength in biobased composites from bio-polyethylene and thermo-mechanical pulp-corn stover fibers," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 6, p. 1308, 2020.
- [33] M. R. M. Asyraf *et al.*, "Potential Application of Green Composites for Cross Arm Component in Transmission Tower: A Brief Review," *Int J Polym Sci*, vol. 2020, pp. 1–15, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/8878300.
- [34] S. S. Bhagawan, D. K. Tripathy, and S. K. De, "Stress relaxation in short jute fiber-reinforced nitrile rubber composites," *J Appl Polym Sci*, vol. 33, no. 5, pp. 1623–1639, Apr. 1987, doi: 10.1002/app.1987.070330517.
- [35] R. Burgueño, M. J. Quagliata, A. K. Mohanty, G. Mehta, L. T. Drzal, and M. Misra, "Hybrid biofiber-based composites for structural cellular plates," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 36, no. 5, pp. 581–593, May 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.08.004.
- [36] M. S. Huda, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and M. Misra, "Effect of chemical modifications of the pineapple leaf fiber surfaces on the interfacial and mechanical properties of laminated biocomposites," *Compos Interfaces*, vol. 15, no. 2–3, pp. 169–191, Jan. 2008, doi: 10.1163/156855408783810920.
- [37] M. El Messiry, *Natural fiber textile composite engineering*. Apple academic press, 2017.
- [38] A. S. Singha and V. K. Thakur, "Mechanical, Morphological, and Thermal Characterization of Compression-Molded Polymer Biocomposites," *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 15, no. 2, pp. 87–97, Feb. 2010, doi: 10.1080/10236660903474506.
- [39] R. Muthuraj, C. Lacoste, P. Lacroix, and A. Bergeret, "Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation," *Ind Crops Prod*, vol. 135, pp. 238–245, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.053.
- [40] J. Fadul, J. Batista, and N. Marín, "Análisis de ensayo de compresión a material elastómero a base de caucho reciclado granulado," *Revista de Iniciación Científica*, vol. 8, no. 2, pp. 64–68, Jul. 2022, doi: 10.33412/REV-RIC.V8.2.3674.
- [41] Y. Xie, Q. Tong, Y. Chen, J. Liu, and M. Lin, "Manufacture and properties of ultra-low density fibreboard from wood fibre," *Bioresources*, vol. 6, no. 4, pp. 4055–4066, 2011.
- [42] C. Zheng, D. Li, A. Ottenhall, and M. Ek, "Cellulose fiber based fungal and water resistant insulation materials," *Holzforschung*, vol. 71, no. 7–8, pp. 633–639, 2017.
- [43] Erica-Aislamiento-Estanqueidad, "AISLAMIENTO TERMICO CONDUCTIVIDAD | CALOR ESPECIFICO | TRANSFERENCIA DE CALOR," <http://www.eric.es/aislamiento-termico/>, 2019.
- [44] S. Noor, T. Yao, K. Muhammad, and N. Yahya, "Thermal Insulation Improvement in Wall using Recycled Cellulose as An Alternative and its Physical Properties," *Journal of Advanced Research in Engineering Knowledge*, vol. 9, no. 1, pp. 26–31, 2019.