







EFFECTO DE LA ADICIÓN DE MATERIALES RECICLABLES EN LA MASILLA PARA CONSTRUCCIÓN LIVIANA RESPECTO A LA CAPACIDAD CALORÍFICA, AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO

Freddy Leonard Alfonso Moreno¹  , Vanessa Stephanie Ruiz Londoño²  , Daniel Felipe Amador Marroquín³  

Recibido: 12 de marzo de 2017, Aceptado: 07 de junio de 2018, Actualizado: 18 diciembre 2018

DOI: 10.17151/luaz.2019.47.3

RESUMEN

Este trabajo discute los resultados de la investigación experimental conducida para estudiar la inclusión de materiales reciclables como cascarilla de arroz, poliestireno expandido (icopor) y tereftalato de polietileno —PET— en la masilla para construcción liviana empleada para la fabricación de placas de Drywall como respuesta a la minimización del impacto ambiental y al aprovechamiento de las propiedades de los materiales desechados que son nuevamente introducidos en procesos productivos con el fin de obtener baja conductividad térmica, alta capacidad calorífica, alta capacidad de absorción sonora y cumplir con la normativa internacional para materiales de construcción; para ello se realizaron pruebas para medir cuatro propiedades como son el aislamiento térmico, capacidad calorífica y pruebas físico-mecánicas (resistencia a la flexión y resistencia a la tracción de clavo) por medio de probetas, teniendo en cuenta la normativa ASTM C 1396/C1396M-04 y ASTM C473-03, mientras que para la prueba de aislamiento acústico se utilizaron las normas ISO 16283-1 e ISO 717-1; los resultados obtenidos se procesaron aplicando un análisis estadístico multivariado empleando el software Statgraphics Centurion XVII que estableció los valores máximos y mínimos, la correlación de Pearson y ordinal de Spearman como método de análisis para el reporte del material más eficiente respecto a las cuatro propiedades medidas. La cascarilla de arroz, sustituyendo en un 60 % el peso del yeso en la masilla original, reportó los mejores resultados en cada una de las cuatro pruebas realizadas a lo largo de la investigación; de esta manera se confirma que es un material adecuado para la implementación en procesos de construcción liviana dado que demuestra que los materiales reciclables son eficientes y además poseen propiedades específicas como resistencia, liviandad y flexibilidad que le dan un valor agregado para ser utilizados nuevamente como reemplazo de materiales tradicionales.

PALABRAS CLAVE

Aislantes acústicos, aislantes térmicos, adición, reutilización de materiales, Drywall.

EFFECT OF THE ADDITION OF RECYCLABLE MATERIALS IN THE LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION MASTIC REGARDING THE CALORIFYING CAPACITY, AND THERMAL AND ACOUSTIC INSULATION

ABSTRACT

This paper discusses the results of the experimental research conducted to study the inclusion of recyclable materials such as rice husks, expanded polystyrene (Styrofoam), and polyethylene terephthalate (PET) in the mastic for lightweight construction used for the manufacture of Drywall plates in response to the minimization of the environmental impact, and the use of the properties of discarded materials that are, once again, introduced in productive processes to obtain low thermal conductivity, high heat capacity, high sound absorption capacity and that comply with international standards for construction materials. For this purpose, tests to measure four properties such as Thermal Insulation, Calorific Capacity and Physical-Mechanical Testing (Flexural Resistance and Nail Tensile Strength) were carried out by means of test pieces taking into account the ASTM C1396 / C1396M - 04 and ASTM C473 - 03, while ISO 16283-1 and ISO 717-1 were used for the acoustic insulation test. The results obtained were processed by applying a multivariate statistical analysis using the Statgraphics Centurion XVII-2015 software that established the maximum and minimum values, Pearson's correlation and Spearman's ordinal as the analysis method for reporting the most efficient material regarding the four measured properties. Rice husk, replacing by 60% the weight of plaster in the original mastic, reported the best results in each of the four tests carried out throughout the research. In this way, it is confirmed that it is a suitable material for the implementation in lightweight construction processes as it shows that recyclable materials are efficient and also have specific properties such as strength, lightness and flexibility that give an added value to be used again as a replacement of traditional materials.

KEY WORDS

Acoustic insulation, thermal insulators, addition, reuse of materials, Drywall.

INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía es un tema importante que en el mundo ha causado preocupaciones económicas y ambientales puesto que en países con estaciones y/o lugares con bajas y altas temperaturas prevalece la utilización de sistemas acondicionados (calefacción y aire), los cuales generan un gasto significativo en los niveles energéticos donde la mayor cantidad de energía se pierde o disipa sin uso alguno. La pérdida de energía de los edificios constituye alrededor del 33 % del consumo total, siendo la mitad de esta a través de las paredes. Según estándares y parámetros como la ubicación y el clima, el material utilizado en paredes debe tener un coeficiente de transferencia de calor entre 0,4-0,7 W/m²*K (Sutcu y Akkurt, 2009).

De acuerdo a las diferentes dinámicas que se presentan hoy por efecto del cambio climático (veranos e inviernos más fuertes), la generación excesiva de residuos a nivel mundial fue aproximadamente de 1300 millones de toneladas al año (Banco Mundial, 2012). En el caso de Colombia se tiene una estimación de 10'037500 toneladas de basura al año; de las cuales el 45 % de los residuos son materiales inorgánicos, siendo reciclables entre el 70 y 80 % de ellos (Alcaldía de Bogotá, 2011).

La inclusión de materiales reciclables nuevamente en procesos de producción y el aprovechamiento de propiedades importantes como la capacidad calorífica, la baja conductividad térmica y la capacidad de absorción del ruido hacen que la adición de materiales como el icopor (que generó más de 10,4 millones de kilogramos/año en 2013) (Arriola y Velásquez, 2013), el tereftalato de polietileno —PET— (cuya proyección es de 19,1 millones de toneladas en 2017) (El Mejjatti et al., 2014) y la cascarilla de arroz (con una generación de 82 toneladas/día) (Sierra, 2009), sean utilizados para la elaboración de la masilla para construcción liviana.

La masilla para construcción liviana empleada para la fabricación de las placas de Drywall hace parte de un procedimiento moderno que es versátil, fácil y rápido de instalar. La dureza de la roca de yeso, unida a otros componentes, confiere a las placas una particular solidez (Eternit, 2003); además le permite mantener cada ambiente con su propia temperatura, evitando pérdidas de energía. Las normas y estándares nacionales califican a la masilla para Drywall como un material acústico (León, 2008); todo esto da como resultado un material liviano, versátil, recuperable, durable y económico.

El artículo muestra el desarrollo de un material de construcción liviana donde se destacan propiedades específicas como la alta capacidad calorífica y la baja conductividad térmica (aislamiento térmico), de modo que retenga el calor y proporcione una sensación térmica agradable; asimismo, se busca que tenga alta capacidad de absorción sonora (aislante acústico) con el fin de evitar que el ruido generado exteriormente se reduzca al interior del recinto. A partir de los resultados obtenidos de los tres ensayos mencionados se realizó un análisis estadístico de tipo multivariado mediante el software Statgraphics Centurion XVII para determinar el material más eficiente. Finalmente con este material se realizaron las pruebas físico-mecánicas (resistencia a la flexión y resistencia a la tracción de clavo), teniendo en cuenta la normativa ASTM C 1396/C1396M-04 y ASTM C473-03.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Masilla para construcción liviana empleada para la fabricación de placas de Drywall

Es un sistema moderno no convencional de tabiques ligeros compuestos de placas de yeso moduladas con ejes de fácil estructuración e instalación que es utilizado para interiores y exteriores. El nombre 'Drywall' es usado porque estos materiales requieren poca o ninguna utilización de agua para su aplicación. Puede ser utilizado en toda clase de proyectos tanto residenciales, industriales, comerciales e institucionales ya sea en obras nuevas, remodelaciones o ampliaciones (Mejía, 2009).

Propiedades de la masilla

Resistencia a los esfuerzos: la dureza natural de la roca de yeso unida a la resistencia de algún compuesto orgánico, como láminas de recubrimiento, confiere a las placas una particular solidez (aumenta su dureza) (Eternit, 2003).

Acústica: las normas estándares nacionales e internacionales califican a la masilla como un material altamente acústico (León, 2008).

Térmica: permite mantener temperaturas constantes, evitando pérdidas de energía en recintos, debido a su propiedad de aislamiento térmico con una conductividad de $0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Sub Gerencia de Evaluación Tecnológica, Gerencia de Planeamiento y Evaluación de Inversiones y Oficina Central de Planificación y Desarrollo, 2009)

Incombustible: esta masilla está compuesta por un 20 % de agua cristalizada que al entrar en contacto con el fuego disminuyen y reducen notablemente su propagación (Mejía, 2009).

Ventajas de la masilla

Liviana: su peso promedio es menor a 25 kg/m^2 comparada con un tabique de albañilería (ladrillo hueco) que es de 182 kg/m^2 , siendo entre 7 y 10 veces menos pesada (Sub Gerencia de Evaluación Tecnológica, Gerencia de Planeamiento y Evaluación de Inversiones y Oficina Central de Planificación y Desarrollo, 2009)

Recuperable: por sus características se puede recuperar hasta el 80 % del material para emplearlo nuevamente dentro de la masilla (Sub Gerencia de Evaluación Tecnológica, Gerencia de Planeamiento y Evaluación de Inversiones y Oficina Central de Planificación y Desarrollo, 2009)

Durabilidad: la masilla al secarse es dimensionalmente estable, no se expande ni se contrae con los cambios de temperatura ni de humedad. Es inmune a hongos y polillas (Mejía, 2009).

Rápida ejecución: los plazos de obra se reducen sustancialmente con respecto a la construcción tradicional, reduciendo los costos de estos entre un 30 y un 35 % (Mejía, 2009).

La estimación del porcentaje de composición de los materiales utilizados en la masilla varía de acuerdo a la industria que la fabrique, en las siguientes [tablas \(1-7\)](#) se pueden observar los porcentajes de composición según diferentes autores y empresas; esto con el fin de poder estimar la composición para realizar la masilla de la presente investigación.

Tabla 1. Composición masilla para Drywall según United States Gypsum (2003)

Componente	Número identificación USA	Porcentaje de peso (%)
Sulfato de calcio hidratado	26499-65-0	>60
Caliza o dolomita	1317-65-3 16389-88-1	<10
Perlita expandida	93763-70-3	<10
Mica	12001-26-2	<10

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 2. Composición masilla para Drywall según United States Gypsum (2008)

Componente	Número identificación USA	Porcentaje de peso (%)
Sulfato de calcio	1317-65-3	>50
Agua	7732-18-5	<35
Arcilla de atapulgita	12174-11-7	<5
Acetato de vinilo	93763-70-3	<5
Sílice cristalina	93763-70-3	<2
Talco	14807-96-6	<5

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 3. Composición masilla para Drywall según Hamilton Drywall Products (2005)

Componente	Número identificación USA	Porcentaje de peso (%)
Sulfato de calcio	1317-65-3	<65
Acetato de vinilo	108-05-4	<5
Arcilla de atapulgita	12174-11-7	<3
Sílice cristalina	14808-60-7	<3
Perlita	93763-70-3	<2

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 4. Composición masilla para Drywall según Petrus y Lusvardi (2006)

Componente	Porcentaje de peso (%)
Sulfato de calcio o carbonato de calcio	61
Arcilla de atapulgita	2
Mica	3
Dispersión de látex	2,5
Propilenglicol	0,35
Espesante	0,30
Agua	30,6

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 5. Composición masilla para Drywall según Ayambem y Ferretti (2015)

Componente	Porcentaje de peso (%)
Agua	41,71
Sulfato de calcio o carbonato de calcio	34,12
Acetato polivinílico	2,75
Perlita	7,76
Preservantes	0,24
Arcilla	1,67
Mica	4,69
Talco	5,14

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 6. Composición masilla para Drywall según Podlas (2007)

Componente	Porcentaje de peso (%)
Sulfato de calcio	60-63
Arcilla de atapulgita	1,5-2,5
Mica	2-6
Perlita	-----
Acetato polivinilico	2-2,5
Espesante	0,4-0,6
Agua	30-32

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 7. Composición masilla para Drywall según LAFARGE (2013)

Componente	Porcentaje peso (%)
Sulfato de calcio o carbonato de calcio	<65
Arcilla de atapulgita	<3
Acetato de vinilo	<5
Sílice cristalina	<3
Perlita	<2
Limosita o dolomita	<10
Agua	<35

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Aislamiento térmico

La conductividad térmica se refiere a la respuesta de un material al aplicarle calor debido a que los sólidos absorben energía en diferentes formas donde su temperatura y dimensiones aumentan. La energía puede ser transportada a las regiones más frías del objeto o material si existen gradientes de temperatura (Callister, 2008). Existen diferentes factores que afectan la conductividad térmica tales como la temperatura ambiente, la densidad y humedad del material, por lo que se debe tener en cuenta la estructura interna de los materiales. En otras palabras, "el valor de la conductividad

térmica se caracteriza por la capacidad de un cuerpo físico en transmitir la energía térmica de un punto a otro, si entre los mismos se crea una diferencia de temperatura” (Cárdenas, 2005 p 2).

El coeficiente de conductividad térmica (λ) caracteriza la cantidad de calor necesario por m² que atraviesa durante un tiempo, y que en 1 metro de material homogéneo se obtenga una diferencia de 1 °C de temperatura entre las dos caras.

En mayor o menor medida, todos los materiales oponen resistencia al paso del calor a través de ellos. Los metales son los que tienen menor resistencia, por ello se dice que tienen buena conductividad térmica, entretanto los materiales de construcción (yesos, ladrillos, morteros) tienen una resistencia media. Los materiales tienen una propiedad resistiva que depende directamente del espesor e inversamente del coeficiente de conductividad térmica; al igual que de otra propiedad capacitiva que es directamente proporcional al calor específico, al espesor y a la densidad (Martín, 2012; Cárdenas, 2005).

Por su parte lo que conlleva a la utilización de materiales con muy baja conductividad térmica es: mejorar el confort y el bienestar para el usuario, siendo expresado como una sensación térmica con respecto al ambiente tanto en invierno como en verano; disminuir las emisiones de gases efecto invernadero (principalmente CO₂). Así pues, una casa bien aislada térmicamente contribuye a reducir el consumo de energía (Consejería de Economía y Hacienda de Madrid, 2012).

Aislamiento acústico

La capacidad que presenta un material o un obstáculo para oponerse al paso de la energía sonora a través del mismo (transmisión) se conoce como aislamiento. El mayor o menor aislamiento depende fundamentalmente del espesor, rigidez, amortiguación y la masa superficial del material utilizado (Segués, 2007). Es por ello que el aislamiento acústico es la capacidad que tienen los elementos constructivos para disminuir la transmisión del sonido, ya que particularmente este se ocupa de reducir la transmisión del ruido entre un recinto y otro (Texsa, 2009).

Existen dos medidas que establecen el nivel de aislamiento acústico que puede tener un elemento constructivo:

(i) **el aislamiento acústico bruto** de un local respecto a otro es equivalente al aislamiento acústico específico del elemento separador de los dos locales, este se define mediante la siguiente expresión:

$$D = L1 - L2 \text{ (dB)} \quad (1)$$

En donde L1 es el nivel de intensidad acústica en el local emisor en decibeles (dB) y L2 es el nivel de intensidad acústica en el local receptor en decibeles (dB) (Menéndez, 2008).

(ii) **El aislamiento acústico específico** de un elemento constructivo es la reducción de la intensidad acústica cuando un sonido atraviesa un elemento constructivo, el aislamiento acústico específico es adimensional (Menéndez, 2008).

$$R=10*\log (1/\tau) \quad (2)$$

$$R=10*\log (P_i/P_t) \quad (3)$$

$$\tau =P_t/P_i \quad (4)$$

En donde R es el índice de aislamiento acústico, τ factor de transmisión sonora, P_i potencia o energía incidente (dB) y P_t potencia o energía transmitida (dB).

Capacidad calorífica

El concepto de calor es fundamental para entender la capacidad calorífica, por ello el calor se expresa como (Q) la energía en tránsito que fluye de la parte de un sistema a otra o de un sistema a otro en virtud únicamente de una diferencia de temperatura (Medina, 2009). Entrando en contexto, la capacidad calorífica de un cuerpo es la razón de la cantidad de calor que cede a ese cuerpo en una transformación cualquiera con la correspondiente variación de temperatura; esta depende de la masa del cuerpo, de su composición química, de su estado termodinámico y del tipo de transformación durante la cual se le cede el calor (Sigaut y Knoblauch, 2001).

Cuanto mayor es la capacidad calorífica del sistema, menor es la variación de temperatura para un flujo determinado; y, en realidad, haciendo la capacidad calorífica lo suficientemente grande, la variación de temperatura puede hacerse tan pequeña como se desee (Callister, 2008). Las unidades que se utilizan son normalmente julios o calorías (unidades de energía más utilizadas). La equivalencia entre ambas es 1 cal = 4,18 J. En términos matemáticos, la capacidad calorífica C se expresa como sigue:

$$C=dQ/Dt \quad (6)$$

En donde dQ es la energía necesaria para producir un cambio dT en la temperatura.

Generalmente la capacidad calorífica se expresa por mol de material (por ejemplo, J/mol-K o cal/mol-K). También se emplea la expresión calor específico que representa la capacidad calorífica por unidad de masa y tiene diferentes unidades (J/kg-K, cal/g-K, Btu/lbm-°F) (Callister, 2008).

Pruebas físico-mecánicas

Los materiales de ingeniería son sometidos a una amplia variedad de ensayos mecánicos para medir su resistencia, flexión y otras propiedades, así como su rendimiento en una variedad de condiciones de uso y ambientes reales. Los resultados de estas pruebas se utilizan generalmente para dos propósitos: (i) diseño en la ingeniería (teoría de errores en la resistencia o de flexiones basadas en constantes elásticas y geometría de componentes) y (ii) control de calidad con el fin de verificar procesos (Jenkins, 2001).

Las pruebas generalmente se inician con exámenes no destructivos —END—; no excluyendo por supuesto a las pruebas destructivas como tensión, compresión, flexión, torsión, perfil de dureza (de núcleo hacia afuera) y de impacto en caso de requerirse tal como la prueba de tensión: que es cuando un material se somete a una carga o fuerza externa donde sufrirá inicialmente una deformación de tipo elástica, si la carga sigue aumentando la deformación pasará a ser de tipo plástica (Cisneros, 1995).

Debido a la necesidad de comparar los resultados obtenidos y el rendimiento de estos materiales se utilizan métodos de prueba estandarizados tales como los desarrollados por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) y la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés). Estas normas establecen el método a través del cual se preparó y probó la muestra de ensayo, así como la forma en que se analizaron los resultados de la prueba. Los ensayos mecánicos a trabajar implican la deformación o rotura de muestras del material llamadas probetas (Jenkins, 2001).

MATERIALES

La presente investigación busca establecer la viabilidad para la reutilización de materiales reciclables en la masilla para construcción liviana empleada para la fabricación de las placas de Drywall; para ello se usaron cascarilla de arroz, poliestireno expandido (icopor) y PET, estos materiales fueron previamente triturados en un molino ideal para materiales blandos y semiduros obteniendo así un tamaño de partícula menor a 100 micras; de igual manera fueron mezclados con sulfato de calcio (yeso), agua, acetato polivinílico, arcilla atapulgita, espesante (hidroxipropilmetilcelulosa) que son los compuestos más usados para la fabricación de la masilla; tal como se observa en la [tabla 8](#) donde se ilustra la estimación del porcentaje en peso que cada material requiere para conformar la masilla. Una vez este conformada la masilla se ejecutaran las pruebas de aislamiento térmico, capacidad calorífica, aislamiento acústico y pruebas físico-mecánicas (resistencia a la flexión y resistencia a la tracción de clavo).

Tabla 8. Composición estimada total de masilla para Drywall

Componente	Porcentaje peso (%)
Sulfato de calcio (yeso)	54,87
Agua	33,46
Acetato polivinílico	3,49
Arcilla atapulgita	2,86
Perlita expandida	4,94
Espesante (hidroxipropilmetilcelulosa)	0,38

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Luego de establecer el porcentaje de composición se realizó la sustitución del componente en mayor cantidad, el yeso, para la inclusión de los tres materiales a trabajar (tablas 9, 10, 11).

Tabla 9. Composición elaboración masilla para Drywall introduciendo la cascarilla de arroz en porcentajes diferentes

Componente	Porcentaje peso masilla corriente	Porcentaje peso sustitución cascarilla de arroz al 20 %	Porcentaje peso sustitución cascarilla de arroz al 40 %	Porcentaje peso sustitución cascarilla de arroz al 60 %
Sulfato de calcio	54,87	43,896	32,922	21,948
Agua	33,46	33,46	34,46	34,46
Acetato polivinílico	3,49	3,49	3,49	3,49
Arcilla atapulgita	2,86	2,86	2,86	2,86
Perlita Expandida	4,94	4,94	4,94	4,94
Espesante (hidroxipropilmetilcelulosa)	0,38	0,38	0,38	0,38
Cascarilla de Arroz		10,974	21,948	32,922

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 10. Composición elaboración masilla para Drywall introduciendo PET en porcentajes diferentes

Componente	Porcentaje peso masilla corriente	Porcentaje peso sustitución PET al 20 %	Porcentaje peso sustitución PET al 40 %	Porcentaje peso sustitución PET al 60 %
Sulfato de calcio	54,87	43,896	32,922	21,948
Agua	33,46	33,46	33,46	33,46
Acetato polivinílico	3,49	3,49	3,49	3,49
Arcilla atapulgita	2,86	2,86	2,86	2,86
Perlita expandida	4,94	4,94	4,94	4,94
Espesante (hidroxipropilmetilcelulosa)	0,38	0,38	0,38	0,38
PET		10,974	21,948	32,922

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 11. Composición elaboración masilla para Drywall introduciendo el icopor en porcentajes de peso diferentes

Componente	Porcentaje peso (%) masilla corriente	Porcentaje peso sustitución icopor al 20 %	Porcentaje peso sustitución icopor al 40 %	Porcentaje peso sustitución icopor al 60 %
Sulfato de calcio	54,87	43,896	32,922	21,948
Agua	33,46	33,46	33,46	33,46
Acetato polivinilico	3,49	3,49	3,49	3,49
Arcilla atapulgita	2,86	2,86	2,86	2,86
Perlita expandida	4,94	4,94	4,94	4,94
Espesante (hidroxipropilmetilcelulosa)	0,38	0,38	0,38	0,38
Icopor		10,974	21,948	32,922

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

METODOLOGÍA

La metodología que se desarrolló a lo largo de esta investigación tiene como punto de partida la recolección de información por medio de bases de datos como ScienceDirect y Scopus de las cuales se obtuvieron artículos científicos y libros, a partir de estos se determinaron los materiales más usados con su respectiva composición para la fabricación de la masilla para construcción liviana; se consultó sobre los materiales reciclables críticos para poder analizar sus propiedades y el impacto ambiental que se generaba con su desecho; estos materiales mencionados anteriormente poseen baja conductividad térmica, alto aislamiento acústico y alta capacidad calorífica. Con esta información teórica se procedió a la realización de un análisis para determinar la composición.

Análisis de la mejor composición

De acuerdo a la información bibliográfica se compilaron diferentes composiciones de la masilla para construcción liviana (tablas 1-7), con estos valores se determinó la composición media de los materiales más usados para la fabricación de la masilla (tabla 8); de igual manera se determinó que el material a sustituir por la cascarilla de arroz, icopor y PET era el yeso debido a su porcentaje dentro de la elaboración de la masilla.

Determinación de sustitución de sulfato de calcio

Con base al material a sustituir se concluyó que la sustitución de la cascarilla de arroz, icopor y PET sería del 20, 40 y 60 % dentro de la masilla para construcción liviana puesto que: si es menor al 20

%, los análisis serán determinados por el yeso; y si es superior al 60 %, las placas no tendrán la suficiente adherencia con el yeso y no tendrán dureza ni estabilidad (tablas 9-11). Finalmente para hacer la comparación se realizó la muestra en blanco (sin ningún compuesto reciclado).

Condiciones para la elaboración de las probetas o muestras

Las condiciones para la elaboración de las probetas están basadas en las normas ASTM C1396/C1396M-04 y ASTM C473-03 que mencionan una temperatura entre 85 +/- 15 °F (29,5 +/- 8,5 °C), una humedad relativa de 50+/-2 % y un peso constante. Una vez elaboradas las probetas se utilizaron para la ejecución de las pruebas de aislamiento térmico, capacidad calorífica, aislamiento acústico, pruebas físico-mecánicas (resistencia a la flexión y resistencia a la tracción de clavo) y análisis estadístico de tipo multivariado.

Tabla 12. Materiales y porcentajes de sustitución de las muestras

Muestras	
Cascarilla de arroz al 20 %	Icopor al 20 %
Cascarilla de arroz al 40 %	Icopor al 40 %
Cascarilla de arroz al 60 %	Icopor al 60 %
PET al 20 %	Mezcla 20 % cada uno (PET, icopor y cascarilla)
PET al 40 %	Muestra blanco
PET al 60 %	

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Prueba de conductividad térmica

El ensayo de conductividad térmica con el que se determinó el aislamiento térmico que poseen las placas se realizó de acuerdo al porcentaje de sustitución de los materiales; para ello se elaboraron 11 ensayos con un total de 11 probetas con dimensiones de 10 cm de largo x 10 cm de ancho x 1 cm de espesor y un peso de 100 g; ya que como regla general cuanto más aislante sea un material más delgada debe ser la muestra para poder calcular la conductividad térmica, de lo contrario el tiempo para realizar el procedimiento aumentará significativamente. De modo que el tiempo de medición óptimo es de 15 minutos, pues en ese período de tiempo se presenta un flujo de calor estable (Jaroslav and Anton, 2012).

Los materiales utilizados poseen conductividades térmicas bajas como cascarilla de arroz 0,036 W/m*K (Gutiérrez, Cadena y Bula, 2014), icopor 0,035 W/m*K (Consejería de Economía y Hacienda de Madrid, 2012) y PET 0,24 W/m*K (Reyes, 2009).

El equipo que se utilizó fue la Unidad h112n (dispositivo para la medición de la conductividad térmica en materiales de construcción) y la Unidad h112 (unidad de servicio de transferencia de calor) del Laboratorio de Tecnologías Apropriadas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Para el cálculo de la conductividad térmica en este procedimiento se tuvo en cuenta la siguiente fórmula dada por el manual de la Unidad h112n:

$$\lambda = (L_s \cdot [(k_1 + (k_2 \cdot T_{\text{promedio}})) + ((k_3 + (k_4 \cdot T_{\text{promedio}})) \cdot \text{HFM}) + ((k_5 + (k_6 \cdot T_{\text{promedio}})) \cdot \text{HFM}^2)]) / \Delta T \quad (7)$$

En donde λ es la conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), L_s es el espesor de la muestra (m), T_{promedio} es la temperatura promedio (K), HFM es la lectura del medidor de flujo de calor (mV), ΔT es la diferencia entre la temperatura 2 y la temperatura 1 (K) y k son las constantes de las pruebas (K1: -39,7872, K2: 0,464, K3: 6,9921, K4: 0,0228, K5: 0,238, K6: -0,0002).

Prueba capacidad calorífica

La obtención del valor para esta prueba en cada una de las muestras utilizadas se realizó de manera teórica por medio de los resultados y las variables obtenidas en la prueba de aislamiento térmico; de forma que se adaptó la ecuación básica de transferencia de calor por conducción obtenida de Levenspiel (1993) y Serth y Lestina (2007) donde mencionan que el flujo de calor estacionario se dirige en una sola dirección, el calor transmitido es proporcional al área perpendicular del flujo de calor, a la conductividad del material y a la diferencia de temperatura que a la vez es inversamente proporcional al espesor; también es conocida como **la ecuación de Fourier**. Es por ello que cada una de las variables obtenidas en la prueba de conductividad térmica es útil para el cálculo de la capacidad calorífica del material usado a través de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Q / \Delta t = k \cdot A \cdot \Delta T / \epsilon \quad (8)$$

En donde ΔQ es el calor transferido (W), Δt es el intervalo de tiempo (s), k es la conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), A es el área transversal del material (m^2), ΔT es la diferencia entre la placa caliente y la placa fría (K) y ϵ es equivalente al espesor del material (m).

Dado que el tiempo de inicio del estudio es cero y el calor transferido en el instante inicial de tiempo también es cero, estos datos terminan siendo innecesarios; por tanto, la ecuación tomó esta forma:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T / \epsilon \cdot t \quad (9)$$

En este caso t es el tiempo de medición que durante la prueba de conductividad térmica fue de 15 minutos y Q será el calor obtenido durante la prueba ($\text{W} \cdot \text{s}$ o J). Ahora bien, el resultado de Q es utilizado en la ecuación para obtener la capacidad calorífica de cada placa de la siguiente manera:

$$C = Q / \Delta T \quad (10)$$

En donde C es la capacidad calorífica en J/K, Q es el calor transferido durante el período de tiempo (J) y ΔT es la diferencia de temperatura entre la placa caliente y la placa fría (K).

Prueba aislamiento acústico

El ensayo consistió en realizar una serie de mediciones de ruido para evaluar si se genera aislamiento del mismo; este procedimiento está regido por la norma internacional ISO 16283-1 de 2014, que se refiere a la medición *in situ* del aislamiento acústico en edificios y elementos de construcción; para ello se necesitó el sonómetro marca Extech 407790 (analizador de bandas de octavas en tiempo real, que cumplía con las especificaciones de la norma) y el calibrador de sonidos Extech 407766 de 94/114 dB, antes de cada medición. Este equipo se empleó en modo Leq (nivel continuo equivalente), la recolección de los datos fue en 1/3 de octavas; finalmente la norma exige realizar mínimo 5 mediciones por material durante más de 5 segundos para generar un menor error, por lo que se realiza durante 1 minuto y la distancia entre la fuente del emisor y el receptor es de 1 metro según la norma ISO 16283-1.

La fuente generadora de ruido que se utilizó fue una bomba de membrana marca VACUUBRAND GMBH + CO KG modelo ME2 cuya función en el estudio era generar un ruido constante. El resultado se expresa como único valor, es decir en frecuencias totales basadas en la ISO 717-1 de 2013, ya que el objetivo es determinar su aislamiento general y no por cada frecuencia.

Para los cálculos del aislamiento acústico bruto y aislamiento acústico específico se utilizaron las ecuaciones (1) y (3).

Análisis estadístico multivariado

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de aislamiento térmico, capacidad calorífica y aislamiento acústico se realizó un análisis multivariado de los materiales con el fin de establecer que material tiene mejor rendimiento de manera correlacionada; un análisis de diferentes variables, medidas en elementos de un estudio (Peña, 2002), que son analizadas simultáneamente. Este análisis permite contener métodos apropiados para investigaciones científicas y tecnológicas donde los objetivos se determinan para minimizar las variables y obtener mejores resultados, claros y concretos (Johnson and Wichern, 1998).

Para el análisis multivariante se utilizó el software Statgraphics Centurión XVII como herramienta de análisis de datos; el cual está diseñado para resumir dos columnas o más de datos numéricos donde se calculan las estadísticas de resumen para cada variable, así como las varianzas y correlaciones entre las mismas.

Pruebas físico-mecánicas

El material que obtuvo las mejores condiciones por medio del análisis estadístico multivariado se utilizó para realizar las pruebas físico-mecánicas; para este caso fue necesario elaborar probetas de la masilla para construcción liviana empleada para la fabricación de las placas de Drywall y se elaboraron probetas de la muestra en blanco para comparar sus resultados.

Se realizaron los ensayos de resistencia a la flexión y resistencia a la tracción del clavo método A, que están regidos bajo la norma ASTM C 1396/C 1396M-04 y la norma C 473-03.

La primera prueba (resistencia a la flexión) se realizó para evaluar la capacidad que tienen las probetas para soportar tensiones de flexión con el fin de cumplir los parámetros de la normativa ASTM. Se efectuaron un número de 4 probetas, la norma sugiere triplicar la cantidad de probetas (para un total de 12) para la muestra en blanco y 12 para el mejor material; sin embargo para reducir el error en el resultado se utilizaron 20 probetas para cada una, estas tenían las siguientes dimensiones: 12 pulgadas (305 mm) de largo x 16 pulgadas (406 mm) de ancho, 10 probetas perpendiculares al borde y las 10 restantes paralelas al borde. Para esta prueba se necesitó la máquina universal de ensayo UH-50 A Shimadzu, esta aplica una carga de 1lbf/s (4,45 N/s) +/- 10 %; se debe calibrar la máquina teniendo en cuenta la norma ASTM E4, que refiere a la práctica para verificar la fuerza de las máquinas de ensayo. Los resultados de esta prueba se promediaron en libra-fuerza o newtons (N) de acuerdo a la posición, si están perpendiculares o paralelas al borde, el resultado fue redondeado al valor entero superior más cercano y se compararon con los valores referencia de la norma ASTM C 1396/C 1396M-04; además se hizo una comparación con la muestra en blanco (ASTM, 2003).

La segunda prueba (resistencia a la tracción del clavo) se efectuó para evaluar la capacidad de las probetas para resistir una carga que empuja un clavo que atraviesa la probeta con el fin de cumplir los parámetros de la normativa ASTM 1396/C 1396M-04. Con base en la norma ASTM C473-03 se utilizaron un número de 5 probetas, esta sugiere triplicar la cantidad de probetas para un total de 15 probetas para la muestra en blanco y 15 probetas del mejor material; sin embargo para reducir el error en el resultado se utilizaron 20 probetas para cada una de estas, las cuales tenían dimensiones de 6 pulgadas de ancho x 6 pulgadas de largo (152 mm x 152 mm). Al igual que la prueba anterior se recurrió a la máquina universal de ensayo UH-50 A Shimadzu y a la normativa ASTM E4 para la calibración de este tipo de máquinas. Los resultados de esta prueba calcularon la carga máxima promedio en libras-fuerza o N de acuerdo con cada resultado y se redondearon al valor entero superior más cercano. Finalmente se confrontó este resultado con la norma ASTM C 1396/C 1396M-04 y se hizo una comparación con la muestra en blanco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizadas las pruebas de conductividad térmica, capacidad calorífica y aislamiento acústico, el análisis estadístico multivariado y las pruebas físico-mecánicas se procede a presentar los resultados que se obtuvieron en cada una de ellas; además de su análisis, explicación y discusión por medio de tablas y figuras que darán paso a las conclusiones.

Conductividad térmica

En la [tabla 13](#) se ilustran los resultados de aislamiento térmico para los materiales y su composición de sustitución utilizando la [ecuación 7](#). El material con mejor conductividad térmica fue la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución que corresponde a $0,24437 \text{ W/m}^2\text{K}$; esto indica que el material se

encuentra por debajo de estándares y parámetros que, según Sutcu y Akkurt (2009), en paredes debe tener un coeficiente de transferencia de calor entre $0,4-0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

De igual manera al realizarse la comparación con la muestra en blanco que fue de $0,42441 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ se demuestra que la adición de la cascarilla de arroz en un 60 % de sustitución de la composición aumenta el doble la capacidad de aislamiento térmico, disminuye las pérdidas y aumenta el almacenamiento del calor.

Esto se debe a que su estructura presenta un volumen poroso del 54 %, lo que le confiere gran capacidad termoaislante; por ello estas cavidades permanecerán cerradas mientras no se someta a un proceso de combustión que le otorga la característica de componente principal en los sistemas de aislamiento térmico (Gutiérrez, Cadena y Bula, 2014).

Tabla 13. Resultados de conductividad térmica de las 11 muestras estudiadas

Conductividad térmica									
Muestra	Espesor (m)	Temperatura placa caliente ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura placa caliente ($^{\circ}\text{K}$)	Temperatura placa fría ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura placa fría (K)	Temperatura promedio (K)	Diferencia de temperatura ΔT (K)	Fujo de calor (mV)	Conductividad Térmica ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
1	Cascarilla de arroz al 20 %	61,2	334,35	23,3	296,45	315,40	37,9	59,40	0,41325
2	Cascarilla de arroz al 40 %	59,9	333,05	23,9	297,05	315,05	36	52,60	0,37023
3	Cascarilla de arroz al 60 %	60,0	333,15	21,5	294,65	313,90	38,5	40,02	0,24437
4	Plástico PET al 20 %	59,3	332,45	23,6	296,75	314,60	35,7	59,30	0,42546
5	Plástico PET al 40 %	59,3	332,45	23,3	296,45	314,45	36	57,70	0,41840
6	Plástico PET al 60 %	59	332,15	22,6	295,75	313,95	36,4	52,80	0,37591
7	Icopor al 20 %	59	332,15	22,8	295,95	314,05	36,2	54,70	0,37725
8	Icopor al 40 %	59,6	332,75	21,5	294,65	313,70	38,1	47,10	0,30466
9	Icopor al 60 %	59,9	333,05	22,6	295,75	314,40	37,3	49,35	0,33096
10	Méscala 20 % cada uno	55,2	328,35	22,6	295,75	312,05	32,6	50,12	0,38247
11	Muestra blanco	58,1	331,25	23,8	296,95	314,10	34,3	56,20	0,42411

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Capacidad calorífica

En la [tabla 14](#) se representa la capacidad calorífica y capacidad calorífica específica de cada muestra evaluada que son obtenidas de manera teórica de las [ecuaciones 8, 9 y 10](#). Para este análisis se observa que el valor más alto corresponde al PET con un 20 % de sustitución en la composición de la masilla con un dato registrado de 2187,448 (J/Kg*K); esto se debe a que presenta una conductividad térmica de 0,24 W/m²*K, siendo esta una relación inversamente proporcional a la capacidad calorífica (Reyes, 2009). El resultado es alto dado que, para El Mejjatti et al. (2014), el PET es un poliéster semicristal no termoplástico con una estabilidad térmica apropiada.

Al comparar los resultados de la muestra en blanco 2120,528 (J/Kg*K) con la de PET en un 20 % de sustitución de la composición 2187,448 (J/Kg*K), no se observa un aumento significativo. Finalmente los valores más altos registrados dan similitud a los materiales que se sustitúan en un 20 % de su composición en la masilla, lo que puede indicar que el valor de la capacidad calorífica depende directamente del yeso dado que es lo que se sustituye.

Tabla 14. Resultados de la capacidad calorífica, capacidad calorífica específica y calor transferido de las 11 muestras estudiadas

Capacidad calorífica									
Muestra	Esesor (m)	Diferencia de temperatura ΔT (K)	Conductividad térmica (W/m ² *K)	Área material (m)	Tiempo (s)	Calor transferido (W*s) o (J)	Capacidad calorífica (J*K)	Capacidad calorífica específica (J/Kg*K)	
1	Cascarilla de arroz al 20 %	0,01	37,9	0,41323	0,01	500	7831,11	206,62565	2066,256
2	Cascarilla de arroz al 40 %	0,01	36	0,37023	0,01	500	6680,84	185,57902	1855,790
3	Cascarilla de arroz al 60 %	0,01	35,5	0,24437	0,01	500	4763,69	123,73229	1237,323
4	Plástico PET al 20 %	0,01	35,7	0,42546	0,01	500	7809,19	218,74476	2187,448
5	Plástico PET al 40 %	0,01	36	0,41840	0,01	500	7531,16	209,19883	2091,988
6	Plástico PET al 60 %	0,01	36,4	0,37591	0,01	500	6707,36	184,26806	1842,681
7	Icopor al 20 %	0,01	36,2	0,37723	0,01	500	7021,27	193,95783	1939,578
8	Icopor al 40 %	0,01	38,1	0,30466	0,01	500	5803,86	152,33231	1523,323
9	Icopor al 60 %	0,01	37,3	0,33096	0,01	500	6157,01	165,06733	1650,673
10	Mezcla 20 % cada uno	0,01	32,6	0,38247	0,01	500	6265,62	192,19684	1921,968
11	Muestra blanco	0,01	34,3	0,42411	0,01	500	7275,41	212,05276	2120,528

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Aislamiento acústico

En la [tabla 15](#) se muestra el resultado del aislamiento acústico bruto y el aislamiento acústico específico en frecuencias totales utilizando las [ecuaciones 1, 2 y 3](#) para determinar el aislamiento acústico de cada muestra evaluada. Se tomaron como referencia las 5 mediciones recomendadas en la norma ISO 717-1 de 2013.

El material con mejor índice de aislamiento acústico específico —que se aproximó a 1— fue la cascarilla de arroz en un 60 % de sustitución de la composición de la masilla dando como resultado 0,618. Aunque este material es flexible y poroso generó un buen resultado dado que para conseguir un buen aislamiento acústico se necesitan materiales duros, pesados y sin poros (Segués, 2007). No obstante, cabe resaltar que materiales flexibles como el corcho y la fibra de vidrio generan un buen aislamiento acústico. A pesar de que las placas solo poseían 1 cm de espesor el resultado es relevante puesto que el yeso al ser mezclado con la cascarilla de arroz aumenta la solidez y reduce la porosidad, por lo que el índice de aislamiento acústico del material aumenta (Eternit, 2003).

Por otro lado al comparar el resultado con el obtenido de la muestra en blanco, que es de 0,061, la composición de cascarilla de arroz al 60 % de sustitución crea un material con un índice alto de aislamiento y deduce que la mezcla de los 2 compuestos (yeso y cascarilla de arroz) generan un compuesto homogéneo y uniforme para la reducción del ruido.

Una de las ventajas que refleja el material es la reducción significativa del ruido, ya que el espesor es de 1 cm. Esto como consecuencia determinaría que al aumentar el espesor aumentaría la reducción del ruido, arrojando un mayor índice de aislamiento acústico del material (Segués, 2007). El mayor o menor aislamiento depende fundamentalmente del espesor y la masa superficial del obstáculo.

Tabla 15. Resultados de aislamiento acústico bruto y aislamiento acústico específico de las 11 muestras estudiadas

		Aislamiento acústico								
Muestra		Prueba 1 (dB)	Prueba 2 (dB)	Prueba 3 (dB)	Prueba 4 (dB)	Prueba 5 (dB)	Promedio (dB)	Aislamiento acústico bruto (dB)	Aislamiento acústico específico	
1	Cascarilla de arroz al 20 %	64,6	64,1	64,8	64,5	64,4	64,48	4,56	0,297	
2	Cascarilla de arroz al 40 %	62,9	63,1	62,1	62	62,1	62,44	6,60	0,436	
3	Cascarilla de arroz al 60 %	59,9	60,2	59,8	59,7	59,8	59,88	9,16	0,618	
4	Plástico PET al 20 %	67,5	66,9	67,2	66,9	67,3	67,16	1,88	0,120	
5	Plástico PET al 40 %	65,9	65,3	65,7	65,8	65,6	65,66	3,38	0,218	
6	Plástico PET al 60 %	64,3	64,3	64,3	64,4	64,4	64,34	4,70	0,306	
7	Icopor al 20 %	65,6	66,1	65,7	65,9	65,8	65,82	3,22	0,207	
8	Icopor al 40 %	64,6	64,4	64,2	64,6	64,5	64,46	4,58	0,298	
9	Icopor al 60 %	62,9	62,7	62,7	62,8	62,9	62,8	6,24	0,411	
10	Mezcla 20 % cada uno	63,5	63,3	63,1	63,4	63,1	63,28	5,76	0,378	
11	Muestra blanco	67,8	68,1	68,3	68	68,2	68,08	0,96	0,061	
12	Intensidad del emisor (bomba de membrana)	68,8	69,1	69	69,2	69,1	69,04			

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Análisis multivariado

Al realizar el análisis estadístico de tipo multivariado se facilitó la obtención de los datos más relevantes de la investigación para realizar las pruebas físico-mecánicas. En el resumen estadístico de la [tabla 16](#) se resaltan los datos más importantes obtenidos para el análisis como son el valor mínimo y el valor máximo; para el caso del aislamiento térmico el mejor valor se encuentra en el dato mínimo que fue de 0,24437 ($W/m^2 \cdot K$) y en el caso del aislamiento acústico específico y capacidad calorífica el mejor resultado se encuentra en el dato máximo que fue de 0,618 y 2187,45 ($J/Kg \cdot K$) respectivamente. Esto se observa con mayor claridad más adelante ([figuras 1, 2, 3](#)). Igualmente el promedio, varianza, desviación estándar, rango, sesgo, suma de cuadrados entre otros que generan los 11 resultados dan una mayor comprensión de los hallazgos obtenidos.

Tabla 16. Resumen estadístico proporcionado por el análisis multivariado del software

	Resumen estadístico		
	Aislamiento térmico (W/m ² *K)	Aislamiento acústico específico	Capacidad calorífica (JKg*K)
Recuento	11	11	11
Promedio	0,369734	0,304545	1857,96
Varianza	0,00320354	0,0242741	82679,7
Desviación estándar	0,0565998	0,155801	287,541
Coefficiente de variación	15,3083 %	51,1587 %	15,4762 %
Mínimo	0,24437	0,061	1237,32
Máximo	0,42546	0,618	2187,45
Rango	0,18109	0,557	950,125
Sesgo estandarizado	-1,61533	0,541044	-1,45425
Curtosis estandarizada	0,744456	0,325036	0,524312
Suma de cuadrados	1,53577	1,26297	3,8799E7

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

La correlación de las 3 variables trabajadas obtenidas por medio del software se observa en la [tabla 17](#), que determina la fuerza de la relación lineal entre dos columnas en una escala de -1 a +1. Entre mayor sea el valor absoluto de la correlación (valores en negrilla) más fuerte es la relación lineal entre las 2 variables, esta correlación se presenta en forma de matriz para un mayor entendimiento.

Tabla 17. Correlación de Pearson proporcionada por el análisis multivariado del software

	Correlaciones		
	Aislamiento térmico (W/m ² *K)	Aislamiento acústico específico	Capacidad calorífica (JKg*K)
Aislamiento térmico (W/m ² *K)		-0,8027	0,9957
Tamaño muestra		(11)	(11)
Valor-P		0,0029	0,0000
Aislamiento acústico específico (dB)	-0,8027		-0,8138
Tamaño muestra	(11)		(11)
Valor-P	0,0029		0,0023
Capacidad calorífica (JKg*K)	0,9957	-0,8138	
Tamaño muestra	(11)	(11)	
Valor-P	0,0000	0,0023	

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

El tercer número (en negrilla) de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas dadas por el software; de manera que los valores-P que se encuentren por debajo de 0,05 indican correlaciones dinámicas entre las variables con un nivel de confianza del 95 %. Esto indica que estadísticamente hay una correlación fuerte entre los siguientes pares de

variables: aislamiento térmico y aislamiento acústico específico; aislamiento térmico y capacidad calorífica y aislamiento acústico específico y capacidad calorífica.

En los resultados las variables trabajadas están fuertemente asociadas, la mayor correlación obtenida fue capacidad calorífica frente aislamiento térmico (0,9957); esto se debe a que a mayor capacidad calorífica, menos será el aislamiento térmico (recordando que el valor de aislamiento térmico entre más se acerque a 0 es mejor). En cada una de las muestras trabajadas ninguna correlación estuvo por debajo de 0,8 indicando así que cada variable depende de la otra para un alto o bajo resultado; para el caso de la cascarilla de arroz con un 60 % de sustitución de composición su aislamiento térmico fue el más óptimo, pero su capacidad calorífica registró el valor más bajo entre las 11 variables estudiadas.

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

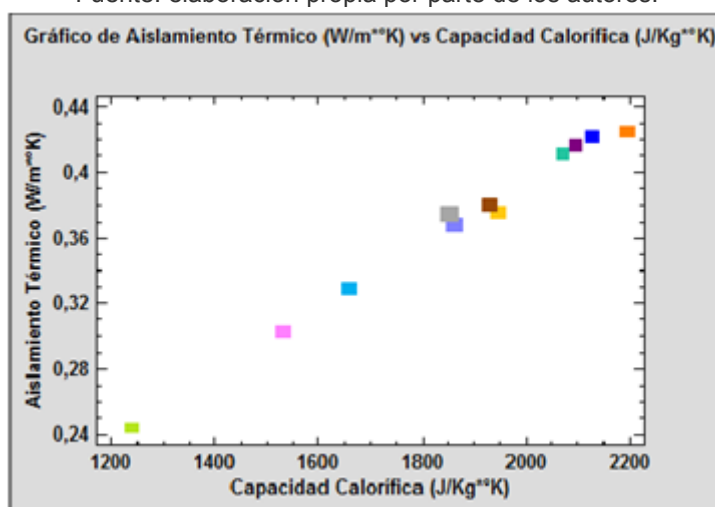


Figura 1. Resultado de la relación entre las variables aislamiento térmico y capacidad calorífica, obtenidas mediante el software.

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

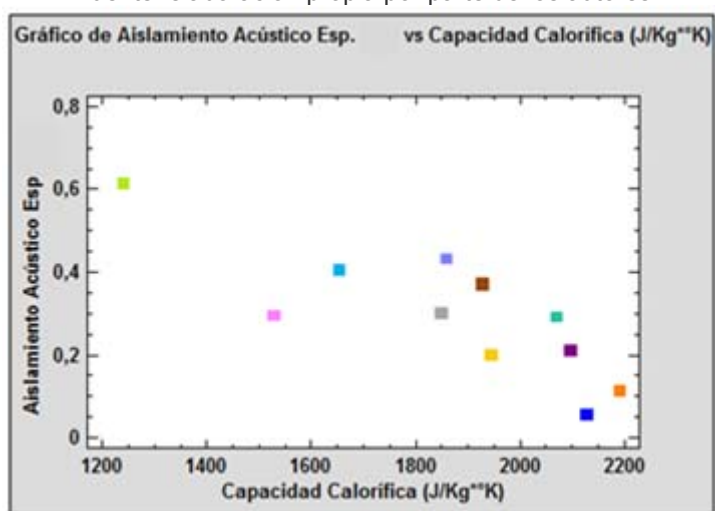


Figura 2. Resultado de la relación entre las variables aislamiento acústico específico y capacidad calorífica, obtenidas mediante el software.

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

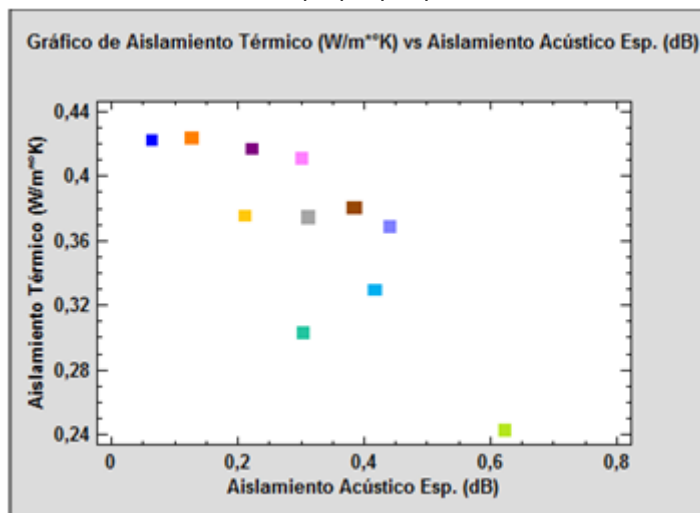


Figura 3. Resultado de la relación entre las variables aislamiento térmico y aislamiento acústico, obtenidas mediante el software.

Tabla 18. Leyenda ilustrativa de los resultados de las figuras 1, 2, 3

Mezcla	Simbolo	Aislamiento Térmico (W/m**°K)	Capacidad Calorífica (J/Kg**°K)	Aislamineto Acústico Especifico
Cascarilla de Arroz al 20%	[Color Verde]	0,41325	2066,256	0,297
Cascarilla de Arroz al 40%	[Color Azul]	0,37023	1855,790	0,436
Cascarilla de Arroz al 60%	[Color Verde Claro]	0,24437	1237,323	0,618
Plastico Pet al 20%	[Color Naranja]	0,42546	2187,448	0,120
Plastico Pet al 40%	[Color Púrpura]	0,41840	2091,988	0,218
Plastico Pet al 60%	[Color Gris]	0,37591	1842,681	0,306
Icopor al 20%	[Color Amarillo]	0,37725	1939,578	0,207
Icopor al 40%	[Color Rosa]	0,30466	1523,323	0,298
Icopor al 60%	[Color Cian]	0,33096	1650,673	0,411
Mezcla 20% cada uno	[Color Marrón]	0,38247	1921,968	0,378
Muestra Blanco	[Color Azul Oscuro]	0,42411	2120,528	0,061

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Se observa que la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de la composición de la masilla posee las mejores condiciones para el aislamiento térmico y para el aislamiento acústico, así como la capacidad calorífica de este material fue la menor; sin embargo este fue el único material que presentó condiciones estables entre los 3 resultados. La cascarilla de arroz presenta una temperatura máxima que se obtiene al ser quemada y que varía de acuerdo con su condición: 970 °C (seca), 650 °C (con algún grado de humedad) y hasta los 1000 °C (mezclada con combustible) (Varón Camargo, 2005). Esto ayuda a que la capacidad calorífica aumente debido a la cascarilla de arroz, por ello se utilizó para la realización de las pruebas físico-mecánicas.

La tabla 19 muestra las correlaciones de Spearman para corroborar los resultados de la tabla 17 entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la

fuerza de la asociación entre las variables, como se observa en los resultados en negrilla nuevamente la relación con mayor fuerza de asociación es la de aislamiento térmico frente capacidad calorífica con 0,9818.

Tabla 19. Correlación ordinal de Spearman proporcionada por el análisis multivariado del software

Correlación ordinal de Spearman			
	Aislamiento térmico (W/m*K)	Aislamiento acústico específico	Capacidad calorífica (J/Kg*K)
Aislamiento térmico (W/m*K)		-0,8091	0,9818
Tamaño muestra		(11)	(11)
Valor-P		0,0105	0,0019
Aislamiento acústico específico (dB)	-0,8091		-0,8273
Tamaño muestra	(11)		(11)
Valor-P	0,0105		0,0089
Capacidad calorífica (J/Kg*K)	0,9818	-0,8273	
Tamaño muestra	(11)	(11)	
Valor-P	0,0019	0,0089	

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

El tercer número (en negrilla) de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas dadas por el software

Prueba físico-mecánicas

Resistencia a la flexión

En las [tablas 20](#) a la [23](#) se observan los datos obtenidos de la prueba de flexión tanto en posición perpendicular como en paralelo para la cascarilla de arroz al 60 % y las muestras en blanco; en [lastablas 21](#) a la [25](#) se observa el procesamiento estadístico que se obtuvo para las muestras en posición perpendicular y en paralelo para la cascarilla de arroz y las muestras en blanco. Los resultados obtenidos por la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de composición fueron de 1150 N en posición perpendicular y 486 N en posición paralela, en contraste con la muestra en blanco que fue de 738 N y 263 N respectivamente, demostrando que la cascarilla de arroz en un 60 % de sustitución en la masilla mejora las condiciones de flexión (Oliver, García y Neila, 2010); esto se debe a que las fibras mejoran considerablemente el comportamiento físico-mecánico de las placas de yeso, ya que se presenta una adherencia mutua entre el yeso y la cascarilla de arroz dando como resultado un material más maleable y mejor estructurado. De igual manera se compararon con el valor mínimo recomendado por la norma ASTM C 1396/C 1396M-04 que es de 756 N para perpendicular y 267 N para paralelo, por lo que se observa un aumento casi del 200 % en la capacidad mínima recomendada para dicho material.

Tabla 20. Resistencia a la flexión de la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de la composición

Cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de las composición							
Perpendicular				Paralelo			
Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)
1	974,78	6	1304,28	1	489,11	6	566,33
2	1125,80	7	1098,34	2	532,01	7	463,36
3	1400,39	8	1263,10	3	549,17	8	429,04
4	1194,45	9	1029,70	4	540,59	9	514,85
5	961,05	10	1153,26	5	360,39	10	411,88

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 21. Procesamiento estadístico de las 10 muestras de cascarilla de arroz al 60 % en posición perpendicular

Cascarilla de arroz al 60 % perpendicular	
Recuento	10
Promedio	1150,52 N
Valor entero promedio	1150 N
Desviación estándar	143,528
Coefficiente de variación	12,4751 %
Mínimo	961,05 N
Máximo	1400,39 N
Rango	439,34

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 22. Procesamiento estadístico de las 10 muestras de cascarilla de arroz al 60 % en posición paralelo

Cascarilla de arroz al 60 % paralelo	
Recuento	10
Promedio	485,67 N
Valor entero promedio	486 N
Desviación estándar	67,8314
Coefficiente de variación	13,9665 %
Mínimo	360,39 N
Máximo	566,33 N
Rango	205,94

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 23. Resistencia a la flexión de la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de la composición

Muestra en blanco							
Perpendicular				Paralelo			
Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)
1	707,55	6	725,69	1	248,60	6	267,72
2	761,98	7	653,12	2	286,84	7	286,84
3	562,41	8	852,69	3	239,04	8	286,84
4	616,84	9	888,97	4	286,84	9	248,60
5	653,12	10	961,54	5	239,04	10	239,04

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 24. Procesamiento estadístico de las 10 muestras de la muestra en blanco en posición perpendicular

Muestra en blanco perpendicular	
Recuento	10
Promedio	738,39 N
Valor entero promedio	738 N
Desviación estándar	128,014
Coefficiente de variación	17,3369 %
Mínimo	562,41 N
Máximo	961,54 N
Rango	399,13

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 25. Procesamiento estadístico de las 10 muestras de la muestra en blanco en posición paralela

Muestra en blanco paralelo	
Recuento	10
Promedio	262,94 N
Valor entero promedio	263 N
Desviación estándar	22,1926
Coefficiente de variación	8,44,016 %
Mínimo	239,04 N
Máximo	286,84 N
Rango	47,8

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Resistencia a la tracción del clavo

En las [tablas 26 y 27](#) se evidencian los datos obtenidos de la prueba de tracción del clavo para la cascarilla de arroz al 60 % y la muestra en blanco; en las [tablas 28 y 29](#) se observa el procesamiento estadístico de cada uno de los materiales. El resultado conseguido por la cascarilla

de arroz fue de 999 N en comparación con la muestra en blanco que fue de 418 N, demostrando que posee mejores condiciones de dureza (Oliver, García y Neila, 2010); esto debido a la participación de la cascarilla de arroz en la mezcla que optimizó las propiedades de la masilla y generó las diferentes relaciones intrínsecas que se producen entre ellos. De manera que el aumento en la cantidad de fuerza que se necesita para penetrar el clavo se debe a la adición de cascarilla de arroz, que genera un material más compacto y resistente que la masilla tradicional. Además es comparado con el valor mínimo recomendado por la norma ASTM C 1396/C 1396M-04 que es de 445 N con un aumento aproximado de 200 % en la capacidad mínima recomendada para dicho material.

Tabla 26. Resistencia a la tracción de clavo de la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de la composición

Cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de la composición							
Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)
1	715,89	6	902,21	11	955,17	16	810,03
2	1074,80	7	1210,14	12	1080,69	17	1516,10
3	1623,98	8	1204,25	13	870,83	18	931,63
4	668,81	9	982,63	14	853,18	19	929,67
5	710,00	10	1125,80	15	739,42	20	1070,88

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 27. Procesamiento estadístico de las 20 muestras de la cascarilla de arroz al 60 %

Recuento	20	Coefficiente de variación	25,2946 %
Promedio	998,80 N	Mínimo	668,81 N
Valor entero promedio	999 N	Máximo	1623,98 N
Desviación estándar	252,644	Rango	955,17

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 28. Resistencia a la tracción de clavo de la muestra en blanco

Muestra en blanco							
Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)	Muestra	Carga (N)
1	333,15	6	363,07	11	441,96	16	488,62
2	439,24	7	338,86	12	384,83	17	291,74
3	610,60	8	401,16	13	599,72	18	343,31
4	641,37	9	363,07	14	333,15	19	570,65
5	341,31	10	349,47	15	341,31	20	378,46

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

Tabla 29. Procesamiento estadístico de las 20 muestras en blanco

Recuento	20	Coefficiente de variación	25,5789%
Promedio	417,75 N	Mínimo	291,74 N
Valor entero promedio	418 N	Máximo	641,37 N
Desviación estándar	106,856	Rango	349,63

Fuente: elaboración propia por parte de los autores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El material que mejor comportamiento tuvo en las pruebas de aislamiento térmico fue la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución de composición que correspondió a 0,24437 W/m²*K; esto muestra que la cascarilla de arroz optimiza la función térmica de la masilla aumentando su rendimiento en más de un 200 %.

En el aislamiento acústico específico la cascarilla de arroz en un 60 % de sustitución de la composición fue el mejor resultado con un valor de 0,618; demostrando que esta composición es seis veces mejor puesto que la mezcla de los dos compuestos (yeso y cascarilla de arroz) genera un compuesto homogéneo, liviano y compacto.

En cuanto a la prueba de capacidad calorífica el mejor resultado correspondió al PET al 20 % de sustitución de composición, que al ser comparado con la muestra en blanco su variación no fue significativa.

El análisis estadístico de tipo multivariado indicó que el material más eficiente de los estudiados fue la cascarilla de arroz al 60 % de sustitución en la composición, ya que cumplía con valores más homogéneos y las variables trabajadas estaban fuertemente relacionadas.

Las propiedades físico-mecánicas son fundamentales a la hora de evaluar el material, pues estas características son las que definen como se comportará. Los resultados obtenidos indican que la interacción de la cascarilla de arroz con la masilla para Drywall genera un material liviano, resistente y flexible que cumple con parámetros y estándares de las normas ASTM C1396/C1396M-04.

Con los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación se asegura que la masilla con cascarilla de arroz al 60 % es un material adecuado para ser implementado en procesos de construcción dado que demuestra que este material reciclable es eficiente y posee propiedades específicas que de acuerdo con determinados procesos productivos puede llegar a ser utilizado nuevamente e incluso reemplazar materiales tradicionales reduciendo así costos de implementación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por permitirnos utilizar los equipos y laboratorios, en especial a los laboratorios de Tecnologías Apropriadas y de Química de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad Tecnológica y a los auxiliares de los mismos por su asesoría a la hora de realizar los ensayos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de Bogotá. (2011). **Proyecto de Acuerdo 113 de 2011**. Recuperado de [Link](#).
- Arriola, E. y Velásquez, F. (2013). **Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)**. San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador.
- Ayambem, A. and Ferretti, J. (2015). **Low dust joint compound and method of making the same**. Recuperado de [Link](#).
- Banco Mundial. (2012). **Las ciudades van a enfrentar un marcado aumento de los costos del tratamiento de basuras**. Recuperado de [Link](#).
- Callister, W. (2008). Thermal Properties. En Callister, W. and Rethwisch, D., **Fundamentals of Materials Science and Engineering** (pp. 713-729). New York, USA: Wiley.
- Cárdenas, L. (2005). **Conductividad térmica**. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2.
- Cisneros, J. (1995). **Análisis y pruebas mecánicas para la obtención de la calidad requerida en alabes turbina**. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Consejería de Economía y Hacienda de Madrid. (2012). **Guía sobre materiales aislantes y eficiencia energética**. Madrid, España: Gráficas Arias Montano.
- El Mejjatti, A. et al. (2014). Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). Application to the synthesis of multiblock copolyesters. **Express Polymer Letters**, 8 (8), 544-553.
- Eternit. (2003). **Manual técnico. Sistema de construcción en seco Eternit (Drywall)**. Recuperado de [Link](#).
- Gutiérrez, J., Cadena, C. y Bula, A. (2014). Aislamiento térmico producido a partir de cascarilla de arroz aglomerada utilizando almidón producido con *saccharomyces cerevisiae*. **DYNA**, 81 (184), 138-143.
- Hamilton Drywall Products. (2005). **All Purpose Joint Compound, Material Safety Data Sheet**. Portland, USA: Hamilton Drywall Products.
- Jaroslav, V. and Anton, T. (2012). **Determination of Thermal Conductivity**. Recuperado de [Link](#).
- Jenkins, M. (2001). **Mechanics of Materials Laboratory**. Seattle, USA: University of Washington.

- Johnson, R. and Wichern, D. (1988). **Applied Multivariate Statistics Analysis**. New Jersey, USA: Prentice-Hall.
- LAFARGE. (2013). **Material Safety Data Sheet**. Recuperado de [Link](#).
- León, L. (2008). **Materiales de construcción**. Huánuco, Perú: Universidad de Huánuco.
- Levenspiel, O. (1993). **Engineering Flow and Heat Exchange**. New York, USA: Plenum Press.
- Martín, A. (2012). **Apuntes de transmisión del calor**. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Medina, A. (2009). **Termodinámica**. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Mejía, J. (2009). **Drywall**. Chiclayo, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Menéndez, V. (2008). **Medidas de aislamiento acústico**. Madrid, España: EOI.
- Oliver, A., García, A. y Neila, F. (2011). Caracterización física y mecánica de placas de yeso con materiales de cambio de fase incorporados para almacenamiento de energía térmica mediante calor latente. **Materiales de Construcción**, 61 (303), 465-484.
- Peña, D. (2002). **Análisis de datos multivariantes**. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Petrus, F. and Lusvardi, K. (2006). **Water-soluble, low substitution hydroxyethylcellulose, derivatives thereof, process of making, and uses thereof**. Recuperado de [Link](#).
- Podlas, T. (2007). **Joint compounds using thickeners prepared from raw cotton linters**. Recuperado de [Link](#).
- Reyes, J. (2009). **Estudio de factibilidad para la instalación de una planta recicladora de PET**. Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Segués, F. (2007). **Conceptos básicos de ruido ambiental**. Madrid, España: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Serth, R. and Lestina, T. (2007). **Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules Of Thumb**. Oxford, United Kingdom: Academic Press.
- Sierra, J. (2009). **Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia**. Sincelejo, Colombia: Universidad de Sucre.
- Sigaut, L. y Knoblauch, P. (2001). **Capacidad calorífica y temperatura de Debye**. Recuperado de [Link](#).
- Sub Gerencia de Evaluación Tecnológica, Gerencia de Planeamiento y Evaluación de Inversiones y Oficina Central de Planificación y Desarrollo. (2009). **El drywall - conveniencia de su uso en infraestructura física de los centros asistenciales de salud**. EsSalud. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de Portal del Seguro Social de Salud: [Link](#)
- Sutcu, M. and Akkurt, S. (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. **Ceramics International**, 35 (7), 2625-2631.

- Texsa. (2009). **Sistema de aislamiento acústico para obra nueva y rehabilitación**. Barcelona, España: Texsa Systems S.A.
 - United States Gypsum. (2003). **Material Safety Data Sheet**. Chicago, USA: United States Gypsum.
 - United States Gypsum. (2008). **Material Safety Data Sheet**. Chicago, USA: United States Gypsum.
 - Varon Camargo , J. (2005). **Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz**. El hombre y la Máquina(25), 128-135. Obtenido de [Link](#)
-

1. Magíster en Sistemas de Calidad y Productividad. Docente de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.flalfonsom@gmail.com. ORCID: 0000-0002-2471-8063. Google Scholar [Link](#).
 2. Ingeniera Ambiental. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.vasruizl@correo.udistrital.edu.co. ORCID: 0000-0001-8026-0096. Google Scholar [Link](#).
 3. Ingeniero Ambiental. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.dafamadorm@correo.udistrital.edu.co. ORCID: 0000-0002-4200-9084. Google Scholar [Link](#).
-

Para citar este artículo: Alfonso, F.L., Ruiz, V.S. y Amador, D.F. (2018). Efecto de la adición de materiales reciclables en la masilla para construcción liviana respecto a la capacidad calorífica, aislamiento térmico y acústico. **Revista Luna Azul**, 47, 36-66. DOI: 10.17151/luaz.2019.47.3. <http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php/component/content/article?id=295>

Esta obra está bajo una [Licencia de Creative Commons Reconocimiento CC BY](#)

