

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Carrera de Arquitectura

Caracterización de la tifa (*typha latifolia*) para la construcción de paneles aislantes y su aplicación en la arquitectura

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Arquitecto

Autores:

David Israel Flores Benavides

Eugenio Valentin Orellana Caracondo

Director:

José Hernán Sánchez Castillo

ORCID:  0000-0002-7581-9374

Cuenca, Ecuador

2024-07-30



Caracterización de la tifa (*typha latifolia*) para la construcción de paneles aislantes y su aplicación en la arquitectura

Universidad de Cuenca / Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Autores: David Flores Benavides-Eugenio Orellana Caracondo

Director: José Hernán Sánchez Castillo

Resumen

Este estudio evalúa el potencial de la *Typha Latifolia* (tifa) como material termoaislante, respondiendo a la necesidad global de reducir la huella de carbono asociada a la producción de materiales industriales. Investigaciones previas han identificado que ciertas plantas fitodepuradoras, como la tifa, son fibras naturales sostenibles con propiedades termoaislantes debido a su estructura física y alta producción de biomasa. La metodología empleada se centró en la experimentación para caracterizar las propiedades térmicas de la tifa combinada con un aglutinante. La tifa se trituró en cuatro tamaños diferentes y luego se mezcló con PVA (goma blanca) para elaborar 4 tipos de probetas. Posteriormente, las probetas se sometieron a ensayos de: absorción de humedad, densidad nominal, compresión; adicionalmente se usó el equipo HT10XC para calcular el coeficiente de conductividad térmica. La tifa muestra un coeficiente de conductividad térmica promedio de 0.0874 W/m·K, indicando una capacidad de aislamiento térmico moderada. Aunque es menos eficiente que algunos materiales sintéticos convencionales como la lana de roca (0.035-0.045 W/m·K), la lana de vidrio (0.023-0.040 W/m·K) o la espuma de poliestireno expandido (0.032-0.040 W/m·K). El análisis de las diversas probetas reveló que aquellas compuestas por tallo entero exhibieron el mejor rendimiento aislante, con una conductividad térmica de 0.0646 W/m·K. Estos resultados, combinados con la naturaleza renovable, sostenible y ampliamente disponible de la tifa, subrayan su potencial como una alternativa prometedora para el desarrollo de elementos aislantes en la industria de la construcción.

Palabras clave del autor: *Typha Latifolia*, biomasa, aislante térmico, construcción sostenible



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This study evaluates the potential of *Typha Latifolia* (*Typha*) as a thermal insulating material, responding to the global need to reduce the carbon footprint associated with the production of industrial materials. Previous research has identified that certain phytodepurative plants, such as typha, are sustainable natural fibers with thermal insulating properties due to their physical structure and high biomass production. The methodology employed focused on experimentation to characterize the thermal properties of typha combined with a binder. Typha was crushed into four different sizes and then mixed with PVA (white gum) to produce four types of specimens. The specimens were then tested for: moisture absorption, nominal density, compression; additionally, HT10XC equipment was used to calculate the coefficient of thermal conductivity. The tifa shows an average thermal conductivity coefficient of 0.0874 W/m-K, indicating a moderate thermal insulation capacity. Although it is less efficient than some conventional synthetic materials such as rock wool (0.035-0.045 W/m-K), glass wool (0.023-0.040 W/m-K) or expanded polystyrene foam (0.032-0.040 W/m-K). Analysis of the various test specimens revealed that those composed of whole stems exhibited the best insulating performance, with a thermal conductivity of 0.0646 W/m-K. These results, combined with the renewable, sustainable and widely available nature of typha, underscore its potential as a promising alternative for the development of insulating elements in the construction industry.

Author Keywords: Typha Latifolia, biomass, thermal insulator, sustainable construction



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Introducción	10
I. Problemática y justificación	11
II. Objetivos	12
III. Pregunta de investigación	13
IV. Metodología	13
Capítulo I	15
Marco teórico y conceptual	15
1.1. Antecedentes	15
1.2. Tifa como material sustentable.....	17
1.3. Generación de biomasa	18
1.5. Usos de la tifa	21
1.6. Casos de estudio.....	22
Capítulo II	26
Caracterización y potencial de la especie	26
2.1. Potencial de la especie.....	26
2.1.1. Velocidad de crecimiento.....	26
2.1.2. Distribución geográfica	27
2.1.3. Facilidad de manipulación	28
2.1.4. Cosecha de la especie	29
2.2. Ensayos físicos de la especie.....	29
2.2.1. Determinación del porcentaje de absorción de humedad	30
2.2.2. Ensayo de la densidad aparente.....	31
2.3. Ensayo mecánico de la especie	33
Capítulo III	36
Ensayos experimentales	36
3.1. Tratamiento de la biomasa previo a la elaboración de las probetas.....	36
3.2. Elaboración de moldes	39
3.3. Elaboración de probetas.....	41
3.4. Ensayos físicos y mecánicos de la probetas.....	49
3.4.1. Ensayo de absorción de humedad.....	49

3.4.2. Ensayo de densidad nominal.....	51
3.4.3. Ensayo de compresión en probetas.....	54
3.5. Ensayo de conductividad térmica.....	59
3.5.1. Principios físicos.....	60
3.5.2. Metodología.....	61
Simulación de la eficiencia termoaislante de la tifa.....	67
Capítulo IV.....	72
Análisis de resultados.....	72
4.1. Análisis ensayo porcentaje de absorción de la fibra en bruto.....	72
4.2. Análisis ensayo de densidad aparente de la fibra en bruto.....	72
4.3. Análisis ensayo de compresión paralela a la fibra.....	73
4.4. Análisis ensayo de absorción de humedad en probetas.....	73
4.5. Análisis ensayo de densidad nominal en probetas.....	74
4.6. Análisis ensayo de compresión en probetas.....	74
4.7. Análisis ensayo de conductividad térmica en probetas.....	75
4.8. Conclusiones.....	79
4.9. Recomendaciones.....	80
Referencias.....	82

Índice de figuras

Figura 1. Planta de Typha Latifolia	17
Figura 2. Sección transversal del tallo de Typha	21
Figura 3. Características morfológicas de (A) raíz, (B) hojas y (C) flores de la typha	21
Figura 4. Panel Typhaboard	24
Figura 5. Ecosistema artificial de crecimiento	28
Figura 6. Método de cosecha	29
Figura 7. Ubicación de humedal artificial, comunidad San Ignacio (parroquia Zhumir, Paute)	30
Figura 8. Proceso de corte y secado	37
Figura 9. Proceso de triturado y tamizado	38
Figura 10. Fibra triturada antes y después del tamizado	39
Figura 11. Piezas componentes del molde	42
Figura 12. Materiales para elaboración de probetas	43
Figura 13. Proceso de elaboración de probetas	44
Figura 14. Probetas con tamaño de partícula 0.2-0.5mm	46
Figura 15. Probetas con tamaño de partícula 0.5-1mm	47
Figura 16. Probetas con tamaño de partícula 1-5 mm	48
Figura 17. Probetas con tallo entero (4 cm)	50
Figura 18. Proceso de pulido de las probetas en prismas regulares	53
Figura 19. Ensayo a compresión en equipo Shimadzu Autograph AGS-X	56
Figura 20. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula 0.2-0.5 mm	57
Figura 21. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula 0.5-1 mm	58
Figura 22. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula 1-5 mm	58
Figura 23. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula tallo entero (4 cm)	59
Figura 24. Equipo HT10XC Heat Transfer Service Unit de la marca Armfield	62
Figura 25. Mecanizado de probetas cúbicas	64
Figura 26. Determinación de la conductividad térmica de las probetas	65
Figura 27. Vivienda MIDUVI en software Design Builder	68
Figura 28. Sistema constructivo tradicional y sistema propuesto con tifa como aislante	69

Figura 29. Resultados de la situación energética en programa Design Builder sin aislamiento	70
Figura 30. Resultados de la situación energética en programa Design Builder con aislamiento	71
Figura 31. Relación del coeficiente de conductividad térmica entre probetas	79
Figura 32. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo A, tamaño de partícula 0.2-0.5 mm	89
Figura 33. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo B, tamaño de partícula 0.5-1 mm	89
Figura 34. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo C, tamaño de partícula 1-5 mm	90
Figura 35. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo D, tamaño de partícula 4 cm	90

Índice de tablas

Tabla 01. Taxonomía de la Typha.....	19
Tabla 02. Porcentaje de absorción de humedad de los fragmentos del tallo de tifa	31
Tabla 03. Densidad aparente de los fragmentos de fibra	33
Tabla 04. Resultados de ensayo a compresión.....	34
Tabla 05. Análisis por tamizado (distribución del tamaño de las partículas de la fibra de tifa)	41
Tabla 06. Cálculo de cantidad de fibra requerida para cada probeta	45
Tabla 07. Dosificación de probetas con tamaño de partículas de 0,2-0,5 mm.....	46
Tabla 08. Dosificación de probetas contaminada partícula de 0,5-1mm.....	46
Tabla 09. Dosificación de probetas con tamaño partículas 1-5	48
Tabla 10. Dosificación de probetas con tamaño de partículas detallo entero	49
Tabla 11. Ensayo de velocidad de absorción de humedad	51
Tabla 12. Cálculo De Densidad Nominal de las probetas.....	54
Tabla 13. Módulo de elasticidad de todas las probetas.....	60
Tabla 14. Variables Para Cálculo K de las probetas de tifa.....	63
Tabla 15. Valor de k en probetas de 0,2-0,5mm	65
Tabla 16. Valor de k en probetas de 0,5-1mm	66
Tabla 17. Valor de k en probetas de 1-5mm	66
Tabla 18. Valor de k en probetas de tallo entero (4cm)	67
Tabla 19. Resumen de resultados de ensayo de conductividad térmica	77
Tabla 20. Valores registrados de humedad absorbida por probetas un periodo de 7 días	87
Tabla 21. Valores de masa adicional absorbida por día en probetas	88

Dedicatoria

A nosotros, por el esfuerzo, la dedicación y la perseverancia que nos llevaron a alcanzar esta meta. Este logro es un testimonio de nuestro compromiso y nuestra capacidad para superar desafíos.

A nuestros familiares, quienes con su amor incondicional y apoyo constante nos dieron la fuerza y la motivación necesarias para continuar adelante. A ustedes, que han sido el pilar fundamental en cada etapa de este camino, nuestro más profundo agradecimiento.

A nuestros amigos, por su compañía, sus palabras de aliento y por estar presentes en los momentos de dificultad y celebración. Su amistad ha sido un faro de luz y un refugio en los días más oscuros.

Agradecimiento

En primer lugar, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al grupo de profesores de la facultad, cuyo conocimiento, dedicación y pasión por la enseñanza han sido una fuente constante de inspiración y motivación a lo largo de nuestra formación académica. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en nuestro desarrollo profesional y personal.

Asimismo, extendemos nuestra gratitud al grupo investigativo Virtual Tech por su invaluable colaboración al facilitarnos información crucial para la realización de este trabajo. Su apoyo y disposición para compartir conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo de nuestra investigación.

No podemos dejar de mencionar a nuestro tutor de tesis Arq. Hernán Sánchez, cuya guía y apoyo han sido esenciales en cada etapa del proceso. Sus valiosas aportaciones, paciencia y compromiso con nuestro proyecto han sido determinantes para alcanzar este logro. Gracias por creer en nuestro potencial y por brindarnos las herramientas necesarias para completar con éxito este trabajo de titulación.

Introducción

La producción de materiales termoaislantes convencionales como: polietileno expandido, lana de piedra y la lana de roca utilizados en la construcción conlleva un alto impacto en el medio ambiente (Maroto Melle, L. V. (2022). Por esta razón, se están llevando a cabo diversas investigaciones orientadas hacia el desarrollo de paneles aislantes fabricados con materiales locales, renovables y más eficientes desde el punto de vista medioambiental a partir de fibras naturales (Velasco, L., Goyos, L., Nicolás, F., Naranjo, C., & Ecuador, S. (2015).

Este trabajo se desglosa de la investigación realizada por el grupo de investigación Virtual Tech de la facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca sobre el desarrollo de materiales de construcción mediante el uso de plantas fitodepuradoras. Es así que se basa en la investigación, análisis y caracterización de un nuevo material sustentable termoaislante. Seleccionando a la *Typha latifolia*, ya que es una planta fitodepuradora adaptable a cualquier entorno de humedales, con producción de biomasa constante, capacidad de depurar el agua y con características físicas termoaislantes. En este contexto, se plantea investigar las propiedades aislantes térmicas de la planta de tifa, con el objetivo de evaluar su potencial como material de construcción sostenible y eficiente en términos energéticos. Este enfoque busca encontrar alternativas innovadoras y respetuosas con el medio ambiente para mejorar la eficiencia energética en la construcción de edificaciones, reduciendo así su impacto ambiental global.

En la fase inicial del estudio se condensa información sobre el proceso de crecimiento y el contexto en el que se desarrolla la planta de tifa, sus características físicas, aplicaciones y casos en los que esta planta ha sido utilizada como materia prima para elaborar materiales sostenibles. Luego, se detalla el potencial de la especie y el proceso de extracción de la biomasa de la tifa desde su cosecha hasta la determinación de propiedades físicas y mecánicas. De igual manera, se centra en la elaboración de probetas a partir de biomasa triturada para luego mezclarla con aglutinante y determinar su comportamiento al ensayo de conductividad térmica y compresión. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos en el laboratorio para definir la probeta con mayor potencial para desarrollar un tablero termoaislante competente en el mercado.

Diseño de la investigación

I. Problemática y justificación

La industria de la construcción es conocida por su alto consumo de recursos naturales, una necesidad que se intensifica en regiones con condiciones climáticas adversas; las mismas que exigen el diseño de edificaciones con materiales aislantes para mantener un ambiente confortable. En respuesta a esta demanda, diversas empresas se dedican a la fabricación de elementos constructivos diseñados para ofrecer aislamiento térmico en los espacios habitables, sin embargo, este proceso de producción conlleva un aumento de la huella de carbono.

En este contexto, investigaciones previas han revelado que las fibras de plantas fitodepuradoras, como la tifa, poseen propiedades físicas que la convierten en un material óptimo para aplicaciones térmicas. Además, esta planta acuática, dentro de su hábitat natural contribuye a la depuración ambiental del agua al eliminar sustancias contaminantes. Su rápido ciclo de crecimiento y capacidad de cosecha bianual hacen que se destaque como un recurso sostenible. La falta de una industria y tecnificación de materiales sostenibles en este ámbito ha generado una creciente búsqueda de materias primas basadas en recursos renovables locales. Por lo tanto, se ha seleccionado tifa como material de estudio, con el propósito de analizar su eficacia y aptitud para proporcionar aislamiento térmico en la arquitectura.

Esta investigación se enfoca en la recopilación de información técnica sobre densidad, absorción, conductividad térmica y compresión de la tifa. Los datos resultantes de los ensayos a partir de probetas con granulometría diferente serán cruciales para el desarrollo de un nuevo material de construcción basado en la tifa como materia prima. La incorporación de la tifa en el sector de la construcción puede reducir el consumo de energía en la fabricación de materiales aislantes térmicos convencionales, reduciendo su impacto ambiental.

II. Objetivos

Objetivo General

El objetivo general del trabajo es obtener las características de la biomasa en la *Typha latifolia* y definir su potencialidad como material para la construcción de paneles termoaislantes.

Objetivos Específicos

Objetivo específico 1: Estudiar a la tifa para obtener biomasa y analizar sus propiedades.

Objetivo específico 2: Elaborar paneles con diferentes tratamientos y someterlos a pruebas de conductividad térmica, compresión, absorción y densidad.

Objetivo específico 3: Definir el panel con mejor comportamiento termoaislante.

III. Pregunta de investigación

Sabiendo que algunas fibras naturales han sido empleadas para la construcción de elementos aislantes, ¿cuál es la eficiencia de la typha para la construcción de paneles termoaislantes?

IV. Metodología

La investigación se aborda mediante un enfoque descriptivo y exploratorio, respaldado por una metodología cuantitativa. Se basará en el estudio de la tifa para obtener biomasa y analizar sus propiedades. Se requerirá una investigación previa para conocer las características específicas de la tifa, considerando factores como estructura celular y propiedades físicas de su biomasa. Una vez cosechada y secada la biomasa, se procederá a la elaboración de probetas con diferentes tratamientos. Estos tratamientos implican la combinación de la biomasa con un aglutinante (goma blanca), variando tamaños y proporciones. La diversidad de estos tratamientos permitirá explorar un amplio espectro de posibilidades y evaluar cómo afectan a las propiedades de las probetas resultantes. La utilización de equipos de laboratorio especializados será primordial en este proceso para obtener datos precisos sobre conductividad térmica, compresión, absorción y densidad.

Los ensayos se centrarán en evaluar la conductividad térmica para comprender cómo la biomasa afecta la transferencia de calor en las probetas. Además, se analizará el módulo de elasticidad para evaluar su comportamiento mecánico y determinar su rigidez o capacidad para resistir deformaciones elásticas cuando se somete a cargas de compresión. Las pruebas de absorción serán esenciales para comprender cómo el material reacciona en condiciones húmedas; y la medición de la densidad proporcionará información sobre la compactación y estructura de la probeta.

Los valores obtenidos de las diferentes probetas serán evaluados y comparados para identificar la probeta con mejor comportamiento aislante, respondiendo así a los objetivos específicos establecidos. La información detallada sobre las propiedades físicas, mecánicas y de conductividad de la tifa junto con los resultados de los ensayos de las probetas ofrecerá una visión integral de su idoneidad como material aislante en la construcción. En conclusión, en esta investigación se propone explorar y describir las propiedades de la tifa, aplicándola como componente clave en la creación de paneles termoaislantes para ser usados en la arquitectura. Los objetivos determinados orientan el proceso hacia la obtención de resultados significativos que contribuirán a la aplicación de esta fibra natural en el campo de la construcción sostenible y eficiente desde el punto de vista térmico.



CAPÍTULO I

Marco teórico y conceptual

Capítulo I

En este capítulo, se ha investigado a fondo la tifa, una fibra natural de producción sencilla que ofrece una serie de beneficios en diversos campos. Se ha indagado sobre su impacto en el progreso de la sociedad y se ha recopilado información acerca de sus diferentes usos a lo largo del tiempo.

El enfoque principal de este apartado ha sido analizar cómo la *Typha latifolia* ha sido incorporada en la industria de la construcción. Se ha realizado un análisis exhaustivo de las características físicas y morfológicas de esta planta, con el fin de comprender su composición y su papel en el desarrollo sostenible. Además, se ha depurado información sobre sus aplicaciones específicas, identificando áreas donde puede ser empleada con eficacia. Se han examinado casos de estudio para comprender cómo se comporta esta fibra en distintos contextos como material compuesto.

Marco teórico y conceptual

1.1. Antecedentes

La búsqueda implacable de materiales sustentables y de fácil accesibilidad es un ámbito que podría disminuir el impacto ambiental causado por la industria inmobiliaria. En el área de los materiales termoaislantes se han encontrado que en Ecuador existen fibras naturales que son considerados como materia prima sustentable. Esta línea investigativa va dirigida a disminuir el uso de materiales termoaislantes convencionales. Finalmente, se busca frenar considerablemente la huella de carbono y dinamizar la economía en la sociedad (Velasco, L., Goyos, L., Nicolas, F., & Naranjo, C. 2015).

La diversidad agrícola y vegetal de Ecuador permite asegurar la existencia de biomásas vegetales aprovechables como componente aislante (Roldan, Pérez, Amores, Ibarra, 2015). En la construcción se presentan ya algunos materiales creados a partir de plantas fitodepuradoras para producir nuevos elementos aprovechando sus propiedades térmicas y acústicas a partir de la biomasa. La composición interna de estos tipos de plantas se caracteriza por conservar tejidos tubulares porosos con cavidades de aire, lo cual lo convierte en un material ligero con excelentes propiedades termoacústicas. En consecuencia, este recurso puede ser aprovechado para realizar construcciones de viviendas vernáculas, elementos ornamentales, artesanías, mobiliario, en el campo medicinal, alimenticio y como purificador de agua (Gonzales, 2020). El uso y valoración de fibras naturales para elementos de construcción viene dado desde hace varios años, algunas empresas como Barnacork

ubicada en España que estudia las propiedades térmicas del corcho para hacer paneles aislantes 100% naturales. Los paneles de corcho aglomerado son fabricados a partir de corcho natural que ha sido sometido a un proceso térmico de tostado. Esta técnica permite que el material se moldee en placas de manera completamente natural, sin la necesidad de emplear aditivos químicos. El proceso de tostado no solo moldea el corcho, sino que también mejora sus propiedades aislantes de manera significativa. La célula se expande, aumenta el volumen y mejora las características termoacústicas (Dobón, 2019).

En contextos locales, las fibras son empleadas como material para cubiertas debido a su eficacia en el aislamiento térmico y acústico, reduciendo los efectos de las altas temperaturas y el ruido producido por la lluvia. Se trata de cubiertas impermeables y ventiladas que favorecen también el confort térmico interior (Salas-Ruiz, y Barbero-Barrera; 2018). Las fibras naturales han aumentado su aplicación como complemento a los materiales plásticos, en diversos usos industriales y arquitectónicos, sustituyendo principalmente a la fibra de vidrio (Joshi, Drzal, Mohanty, & Arora, 2004). Además, la capacidad de las fibras vegetales de mejorar las propiedades físicas de la estructura de los objetos como: peso, flexibilidad y capacidad de absorción de impactos, han sido demostradas en diversas investigaciones (Baye & Tesfaye, 2022).

Figura 01. Planta de *Typha Latifolia*



Fuente: Elaboración propia

Al implementar a las fibras naturales como material de construcción y aprovechar sus propiedades termoaislantes se calcula que en las viviendas ubicadas en entornos fríos y calientes se puede bajar los recursos energéticos entre un 20% y 60%. Además, reduce el costo de implementación de materiales aislantes industrializados alrededor de un 30% (Roldan et al., 2015). Es así, que esta investigación está dirigida al estudio y caracterización de la fibra de tifa, al ser un material sostenible poco empleado, con potencial termoacústico y rápida producción de biomasa.

La *Typha Latifolia* es una planta que se encuentra naturalmente en la Península Ibérica y las Islas Baleares, destacándose por su notable crecimiento vegetativo y su capacidad para adaptarse en hábitats acuáticos que han sido alterados o contaminados. La tifa (figura 01) Se utiliza para la fitodepuración de aguas residuales debido a su gran capacidad para nutrirse a partir de contaminantes presentes en el agua. (Carhuancho, 2021).

El potencial de producción de la biomasa, capacidad de germinar semillas, adaptabilidad a la falta o abundancia de nutrientes y el potencial energético de la *Typha dominguensis* se ve afectada según la procedencia de la semilla, a pesar que las condiciones climáticas del medio en el que se desarrolla sea el mismo. Tal es el caso de la tifa procedente de Almeida del Campo (Cuenca, España) fue la población que mostró un tiempo térmico de germinación más corto y una velocidad de germinación más alta, una producción de biomasa superior en altos niveles de nitrógeno y una mejor adaptación a la falta de nutrientes (Carhuancho, 2021).

1.2. Tifa como material sustentable

En la actualidad, los estudios respecto al uso de tifa como material aislante se han enfocado en las hojas y tallos, ya que estos órganos poseen una gran cantidad de aerénquima en su estructura, lo que resulta en una baja conducción de calor y, por ende, un excelente aislamiento. Varias empresas, como Naporo de Austria, Typha Technik y Rainer Nowotn de Alemania y Hanffaser Uckermark, estos materiales se venden como aislantes renovables. Con una hectárea de biomasa aérea de tifa, es posible aislar los techos de cuatro viviendas. Esta planta puede ser utilizada como materia prima celulósica para la fabricación de paneles aislantes de diversas densidades, los cuales pueden ser empleados en la construcción, embalaje y compuestos ligeros (Colbers, Cornelis, Geraets, Gutiérrez, Tran, Moreno y Ramírez, 2017).

Si bien la fitodepuración es una de las aplicaciones más destacadas de las especies de *Typha* en la actualidad, el aprovechamiento de la biomasa aérea de *Typha* para la producción de bioproductos industriales es un área en crecimiento (Colbers et al., 2017). Dentro de estos bioproductos se incluyen las fibras vegetales obtenidas de las hojas, que pueden servir como una alternativa de fibra para la elaboración de materiales compuestos empleados como recubrimientos en polvo en las industrias automotriz y de muebles (Wuzella, Mahendran, Bätge, Jury y Kandelbauer, 2011). Las fibras de *Typha* poseen una absorción acústica excelente, siendo un material sostenible apto para su uso como material absorbente en sectores de textiles técnicos para transporte, construcción y diseño de interiores de vehículos (Moghaddam, Safi, Hassanzadeh y Mortazavi, 2016).

Tabla 01. Taxonomía de la tifa

Taxonomía	
Género:	<i>Typha</i>
Especie:	<i>Latifolia</i>
Familia:	Typhaceae [Tifáceas]
Subreino:	Tracheobionta
División:	Magnoliophyta
Clase:	Liliopsida
Orden:	Poales

Elaboración:

Se destaca en América Latina la generación de diversos residuos no valorizados a partir de actividades agrícolas. Estos residuos, junto con los abundantes recursos naturales en forma de biomasa vegetal, tienen el potencial de convertirse en componentes esenciales para una amplia gama de materiales de construcción (Hidalgo, 2012). Estos componentes no solo pueden reemplazar, de manera sostenible, a agregados costosos o no disponibles, sino que también pueden servir como materia prima aislante para mejorar las características térmicas de los componentes constructivos tradicionales.

La rápida regeneración de la tifa lo convierte en un material sustentable junto a sus características morfológicas aptas para la construcción de materiales aislantes.

1.3. Generación de biomasa

El crecimiento y desarrollo de la tifa presenta diferencias en su misma especie según las condiciones ambientales y disponibilidad de nutrientes del hábitat en el que se desarrolla (Molari, Milani, Toscano, Borin, Taglioli, Villani y Zema, 2014). Las plantas del género *Typha*, de la familia Typhaceae son herbáceas perennes. Su carácter perenne se debe a la presencia de un sistema radicular rizomatoso que almacena nutrientes y otros compuestos esenciales para su desarrollo continuo año tras año. Sin embargo, su ciclo de vida es anual (Bixquert, 2014).

La *Typha latifolia* es una especie herbácea que requiere alta humedad y plena insolación con una densidad de plantación de 2-4 plantas/m². Es indiferente al tipo de suelo, ya sea calizo o silíceo, y no tiene una tendencia limitante en cuanto al pH. Esta planta, de color marrón y floración en verano, tiene un porte herbáceo y una anchura de 1 metro o más. Sus hojas son caducas y tiene una resistencia al frío de hasta -17,7 °C. Se caracteriza por tener un tallo muy robusto, un poco más corto que las hojas, que son glaucescentes. Las espigas femeninas y masculinas tienen casi la misma longitud; la femenina es gruesa y de color marrón oscuro cuando es madura, y la masculina más estrecha, con el eje cubierto de pelos blancos (VIVERS CAREX, 2014).

Hacia inicios del invierno, la planta empieza a generar biomasa emergiendo de yemas situadas en los rizomas, desarrollando luego numerosas hojas nuevas, gracias principalmente a los nutrientes almacenados en ellos. Durante el verano, la planta produce un tallo aéreo, generalmente sin hojas, que porta las inflorescencias en su extremo. Hacia finales del verano, los frutos maduran y la planta acumula nutrientes en los rizomas para su crecimiento en la siguiente temporada. Luego, la parte visible de la planta se seca (Bixquert, 2014). Para llevar a cabo la cosecha de las plantas, es fundamental considerar que estas se encuentren en un estado de reposo de renovación, es decir, después de su floración o justo antes de que comience el brote de las nuevas plantas que se ubicará en el humedal. Este enfoque contribuirá a eliminar la carga contaminante del humedal durante el corte de las plantas (Hidalgo, Montalvo, Sandoval, 2005). Es importante realizar la cosecha de forma periódica, ya que esto optimiza la eficiencia en la remoción de metales por parte de las plantas (Martelo y Lara, 2012).

1.4. Características de la biomasa

La tifa es una planta acuática de pantanos, pozos, lagos y aguas poco profundas, ya sea en ambientes dulces o salobres. Tiene la capacidad de alcanzar una altura de hasta tres metros, con una densidad que puede llegar a 280 tallos aéreos por metro cuadrado, presentando un diámetro variable entre 0,5 y 2,0 cm. La densidad de 280 tallos/m² equivale alrededor de 0.015 m³ de material de tifa para la construcción. En su entorno natural, el contenido de agua en su interior ronda aproximadamente el 70%. Las hojas de la *typha* presentan un tejido de soporte fortalecido con fibras, relleno por un tejido esponjoso (figura 02) y suave compuesto principalmente por hemicelulosa, x-celulosa y lignina (Velasco et al., 2015).

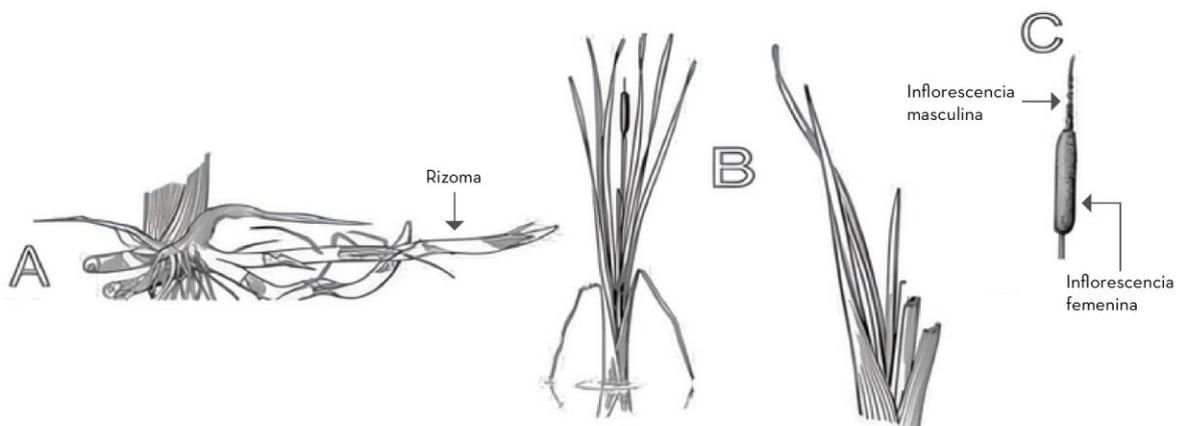
Figura 02. Sección transversal del tallo de *Typha*



Fuente: Elaboración propia

Los tallos son verticales, sencillos y cilíndricos, exhibiendo hojas alternas que son ensiformes, lineales y envainantes (figura 03). La parte interna de la vaina puede ser lisa o cubierta de glándulas mucilaginosas, disminuyendo gradualmente hacia el limbo o presentando dos aurículas terminales. La lámina se curva hacia afuera en la parte inferior. El fruto fusiforme es monospermo, con dehiscencia longitudinal y las semillas son fusiformes, truncadas en el extremo superior con el embrión cilíndrico (Cirujano y Morales, 1995).

Figura 03. Características morfológicas de (A) raíz, (B) hojas y (C) flores de la *typha*



Fuente: Fernández de la Mora, 2005

La *Typha* posee semillas que pesan 0.1 mg y su tipo de dispersión de semillas, se incluye en la misma categoría que las hierbas y arbustos que se dispersan por el viento en hábitats

abiertos. Es decir, el modo de dispersión de esta planta es la anemocoria, que se refiere a la dispersión de las semillas a través del viento (Menéndez, 2006).

1.5. Usos de la tifa

La *Typha* ha sido una fuente valiosa de materiales para la cestería, la construcción y la navegación en diversas culturas y contextos geográficos. Sus hojas, secadas al sol para adquirir un característico color marrón claro, se han utilizado en diversas aplicaciones. Desde la elaboración de asientos de sillas, donde las hojas se retorcían y se colocaban en los marcos de madera para crear el típico dibujo en diagonal, hasta la fabricación de estructuras planas y volumétricas mediante la técnica de pleita o lía, utilizando tres ramales, que permitía coser las hojas de espadaña para objetos como esterillas, espuertas, albardas, alforjas, serones y serijos (Cirujano y Morales, 1925). Por otra parte, la tifa es una especie capaz de sobrevivir en entornos húmedos contaminados, absorbiendo las toxinas, transformadas en biomasa y mejorando la calidad del agua para favorecer al hábitat del entorno (Franco et al., 2020).

A continuación, se presentan dos usos principales de tifa, el uno para la captación y acumulación de contaminantes agropecuarios en sus tejidos también conocido como fitorremediación y el otro para la fabricación de elementos de construcción.

Biorremediación

La gran capacidad de adaptación de la tifa a diversos entornos, es debido a su rápido crecimiento clonal y a la producción de biomasa en cortos periodos de tiempo. Asimismo, su amplia tolerancia a contaminantes y su fácil reproducción en laboratorio, hacen que el género tifa sea una opción adecuada para la restauración y remediación de ecosistemas acuáticos degradados. Estas plantas son utilizadas en humedales artificiales para el saneamiento de aguas residuales a través del proceso de fitorremediación, contribuyendo así a la mejora de la calidad ambiental en estos sitios (Franco, Medici, Okada, y Pérez, 2020).

Varios estudios confirman que las especies del género *Typha* son eficaces bioacumuladores de contaminantes de origen agrícola-ganadero, lo que facilita el proceso de fitorremediación (Franco et al., 2020).

Usos en la construcción

Uno de los usos históricos más significativos de la tifa dentro de la construcción fue la fabricación de techos a partir de trenzar sus tallos. Actualmente, su biomasa tiene una amplia gama de usos, ya sea en forma de bloques o paneles. Algunos de estos elementos

constructivos son diseñados para instalarse en cámaras de aire entre muros o como revestimiento interior de edificios con el fin de aislar térmicamente el espacio interior, presentando alta durabilidad frente a condiciones climáticas adversas (Velasco et al., 2015).

El desarrollo de estos aislantes térmicos a partir de biomasa de *tifa* mejora significativamente la eficiencia energética y el confort térmico de las edificaciones en el Ecuador, con soluciones sostenibles de bajo costo. Existen diversos elementos constructivos tradicionales, como muros o pisos, que a partir de la incorporación en grandes porcentajes de fibra en su composición evolucionan y mejoran su capacidad aislante. La creación de elementos constructivos contemporáneos, como paneles o mantas basadas en materiales vegetales, también contribuye a mejorar la sostenibilidad de las soluciones industriales y reducir considerablemente los costos de producción (Velasco et al., 2015).

Algunos métodos de fabricación de aislantes implican la combinación de varios compuestos entre ellos la tifa para lograr una baja conductividad térmica, dando como resultado la optimización del sistema. La eficacia de un aislante térmico depende en gran medida de su capacidad para tener una baja conductividad térmica, aunque esta no es necesariamente una característica exclusiva del material (Canto, Batista, Sanchez, Moreno y James, 2018).

1.6. Casos de estudio

La tifa se destaca como material aislante eficaz, brindando una buena protección contra el fuego y el ruido, así como un aislamiento térmico efectivo. Este material es comparativamente abierto a la difusión y activo capilarmente, lo que lo hace ideal para aplicaciones de aislamiento en interiores y tejados. Con un bajo consumo de energía durante la producción y una buena retornabilidad al ciclo natural de la materia (Krus, 2021).

Luamkanchanaphan et al. (2012) y sus colegas llevaron a cabo un estudio sobre tableros de partículas de aislamiento térmico fabricados con fibra de tifa, con el objetivo de encontrar nuevas aplicaciones prácticas para esta biomasa. Las fibras que conformaron estos tableros se unieron utilizando aglutinante de difenil diisocianato. La conductividad térmica de los paneles varió entre 0,0438 y 0,0606 W/mK, dependiendo de la densidad que osciló entre 200 y 400 kg/m³.

Además, el Instituto Fraunhofer realizó una investigación que condujo al diseño de un panel de aislamiento térmico hecho de fibra de typha, caracterizado por una conductividad térmica de 0,052 W/mK (Using Cattails For Insulation, 2013). Por último, en 1962, se publicó una patente en EE. UU. para la producción de un material aislante fabricado con fibras de typha

(Vicent, 1962). Typha Technik Naturbaustoffe y el Instituto Fraunhofer, así como Naporo Klima Dämmstoff Ltd fabrica materiales aislantes de relleno y tableros utilizando el tule (*Typha domingensis*). Estos materiales proporcionan una solución eficiente para el aislamiento térmico y acústico en la construcción, contribuyendo así a la eficiencia energética y la comodidad en los edificios.

Typhaboard

Typha Technik Naturbaustoffe y el Instituto Fraunhofer de Física de la Construcción IBP en Alemania colaboran en la producción de la *typha* como material aislante de alta calidad. Siendo los paneles typhaboard uno de los productos que ofrecen. La producción del tablero aislante (figura 04) requiere un bajo consumo energético lo que lo convierte en un producto sustentable. Con dimensiones estándar de 2500 x 1000 x 40 a 120 mm, un valor de aislamiento entre 0,048 y 0,060 W/mK, y propiedades ignífugas naturales.

El Typhaboard es un elemento compuesto por tule (en latín: typha) y un aglutinante mineral. Este innovador material se utiliza en elementos de paredes estructurales y aislantes. Sus propiedades especiales, como su estructura permeable al vapor de agua y su alta resistencia al fuego, lo hacen adecuado para la construcción de edificios ligeros, sostenibles, saludables y en gran medida prefabricados. Además, el Typhaboard es completamente biodegradable y compostable, lo cual lo hace una elección amigable con el medio ambiente.

El tablero typhaboard está compuesto por un 50% de *Typha Latifolia* y un 50% de magnesita, este material puede ser utilizado como tablero aislante, tablero de construcción, pared interior o relleno rígido. Sus propiedades incluyen aislamiento térmico y acústico, resistencia a la humedad y al fuego, así como una protección natural contra hongos e insectos debido a su alto contenido de polifenoles.

Relleno aislante de Typha

El relleno aislante de typha es un material producido por Naporo Klima Dämmstoff Ltd en Braunau am Inn, Austria, este material está compuesto por biomasa de tifa y carrizo, junto

Figura 04. Panel Typhaboard



Fuente: Building Material From Bulrush, n.d.

con sal de amonio. Ofrece una conductividad térmica de 0,040 W/mK, con una conductividad térmica especial superior a 1500 J/kgK. El material posee una densidad de compresión de 80 kg/m³ para techos y 90 kg/m³ para paredes y techos. El relleno aislante producido es totalmente reciclable y compostable, con bajas emisiones de carbono durante su cosecha y producción.

Los cultivos de *Typha* son monocultivos naturales robustos que exhiben un crecimiento acelerado, especialmente en zonas con agua rica en nutrientes. Anualmente, producen de 15 a 20 toneladas de materia seca por hectárea, lo que equivale a unos 150 a 250 m³ de material de construcción. Un ejemplo práctico de su uso se observa en la reconstrucción del monumento de las Casas del Mar Negro en Bulgaria. Para este proyecto, se instalaron aproximadamente 300 m² de TYPHABOARD en formato de 2500 x 1000 mm, con un grosor de 40 a 60 mm. Esto corresponde a unos 15 m³ de material, requiriendo 0.1 hectáreas de cultivo de tifa. En detalle, el proyecto utilizó 120 paneles. Cada panel equivale a 0.125 m³ de material, correspondiendo a 8.33 m² de cultivo de tifa. En total, se emplearon aproximadamente 0.0125 toneladas (12.5 kg) de tifa seca por panel. El precio del tablero TYPHABOARD varía según su grosor, con un costo promedio es de 310€/m³. Por ejemplo, un tablero de 2500 x 1000 x 50 mm tiene un precio de 40€ (Georgiev et al., 2019).

La composición interna de la tifa y su disponibilidad en el medio la convierte en un material ideal para ser explotado con fines aislantes. Adicionalmente, la biomasa de la tifa tiene la capacidad de combinarse con diferentes materiales para mejorar su capacidad aislante, abriendo varias posibilidades investigativas en este ámbito.

Los usos tradicionales de la tifa han sido históricamente artesanales, lo que subraya la necesidad de recabar datos técnicos para estandarizar sus características y capacidades. Además, es crucial llevar un registro detallado de la planta desde su siembra hasta su cosecha, con el fin de identificar y aplicar los componentes necesarios para su crecimiento óptimo. Por último, la investigación y experimentación con la tifa como materia prima podrían brindar datos valiosos para otros campos de estudio.



CAPÍTULO II

Caracterización y Potencial de la Especie

Capítulo II

La capacidad de una planta para su desarrollo depende en gran medida del entorno en el que crece y de si posee las características necesarias para sobrevivir. Además, el control de calidad de los elementos constructivos hechos de biomásas está intrínsecamente ligado a las características de su materia prima. Por lo tanto, este capítulo se centra en describir tanto el ciclo de desarrollo de la biomasa de la tifa como el proceso de cosecha. Además, se destaca el potencial de la biomasa como materia prima para producir materiales termoaislantes, basado en datos obtenidos en laboratorio.

Caracterización y potencial de la especie

2.1. Potencial de la especie

Su disponibilidad, facilidad de cosecha y rápido regeneramiento hacen de la tifa un material ideal para ser explotado en la creación de materiales para la construcción sostenible. Además, por su composición morfológica denota potencial para ser un material de baja conductividad térmica. Así mismo, este material ofrece facilidad en su manipulación para la creación de diversos elementos constructivos en una variedad de presentaciones; a continuación, se detallan sus potenciales más evidentes.

2.1.1. Velocidad de crecimiento

El proceso de desarrollo de la tifa es anual. La planta emerge de las yemas en los rizomas y produce muchas hojas nuevas durante los meses de septiembre y noviembre. A través de la fotosíntesis, produce carbohidratos que contribuyen al crecimiento de un tallo subterráneo rastrero, la formación de nuevos rizomas y el almacenamiento de carbohidratos de reserva mediante el engrosamiento de los rizomas (de la Mora, 2005).

Según De la Mora (2005) durante el verano (junio y julio) la planta produce un tallo aéreo, por lo general desprovisto de hojas, que lleva las inflorescencias en su extremo. Los frutos alcanzan su madurez alrededor de un mes después, hacia agosto o septiembre. Entre marzo y mayo, la parte emergente de la planta envejecida y toda la parte aérea se seca. La dispersión de los frutos tiene lugar posteriormente, usualmente durante el invierno; en esta etapa, la inflorescencia femenina toma una apariencia grisácea porque los pelos que rodean los frutos se vuelven visibles. En los meses de septiembre a noviembre comienza un nuevo ciclo con la brotación de nuevas hojas desde los rizomas.

Figura 05. Ecosistema artificial de crecimiento



Fuente: Elaboración propia

Además, afirma que a medida que suceden los ciclos anuales de desarrollo, la planta coloniza gradualmente nuevas áreas del humedal. En la parte sumergida en el fango, se forma una densa red de rizomas y raíces, mientras que, en la parte emergente, se agrupan densamente hojas y tallos, sin que se puedan distinguir plantas individuales. Por esta razón, las eneas siempre aparecen en los humedales o ecosistemas artificiales (figura 05) formando colonias densas, rodeadas por una orilla fronteriza donde también se encuentran otras plantas acuáticas e hidrófitas (de la Mora, 2005).

2.1.2. Distribución geográfica

La especie *typha* es cosmopolita y se encuentra en humedales de casi todo el territorio norteamericano, con una presencia más acentuada en Estados Unidos y México. Además, esta planta se distribuye en países como Alaska, Gran Bretaña, India, Australia, Nueva Zelanda y varios países africanos y sudamericanos (Grace y Harrison, 1986). La *Typha* crece en una diversidad de hábitats húmedos, tales como marismas, prados inundados, orillas de lagos, zanjas a lo largo de carreteras, estuarios costeros, bordes de estanques, pantanos y campos de arroz.

La *Typha latifolia* es una planta extremadamente versátil que puede adaptarse a una amplia variedad de climas y condiciones ambientales. Desde climas tropicales y subtropicales hasta zonas templadas en el norte y sur del Ecuador. Incluso esta especie también prospera tanto

en zonas costeras húmedas como en climas continentales secos; incluso podemos hallarla en elevaciones sobre el nivel del mar de hasta 2125 m.s.n.m. (Smith, 1967).

2.1.3. Facilidad de manipulación

La tifa prospera en pleno sol y puede tolerar semisombra. Sus rizomas se sumergen en el agua, y prefiere suelos ricos a una profundidad no mayor de 30 cm. A pesar de su resistencia, no requiere un suelo fértil y se adapta bien a un pH entre 5.5 y 8. La temperatura media anual ideal debe estar entre 15°C y 25°C. Para su cuidado, basta con quitar las hojas y la floración a medida que se secan. La multiplicación se logra mediante la división de los rizomas y por semilla después de la floración (Plantas y Flores, 2019).

Estas plantas se propagan de manera natural mediante la dispersión de semillas y la reproducción de rizomas. Cada sección de rizoma contiene nodos que pueden desarrollar nuevos brotes gracias al almidón almacenado. Las semillas de tifa se dispersan eficazmente por el viento o el agua, y las semillas emplumadas pueden viajar hasta 3600 metros. Para la germinación de las semillas se necesitan temperaturas elevadas, una baja concentración de oxígeno y exposición prolongada a la luz. En condiciones de luz roja, la máxima tasa de germinación se alcanza con una concentración de oxígeno de 2.3 a 4.3 mg/litro a una temperatura de 30 °C. Si crecen en un estanque, es recomendable vaciarlo cada 3 años para reponer los nutrientes del sustrato. En cuanto a la manipulación física, se pueden utilizar métodos como el corte para controlar la planta. Acompañar el corte con la manipulación del nivel del agua también puede ser efectivo (Plantas y Flores, 2019).

Figura 06. Método de cosecha

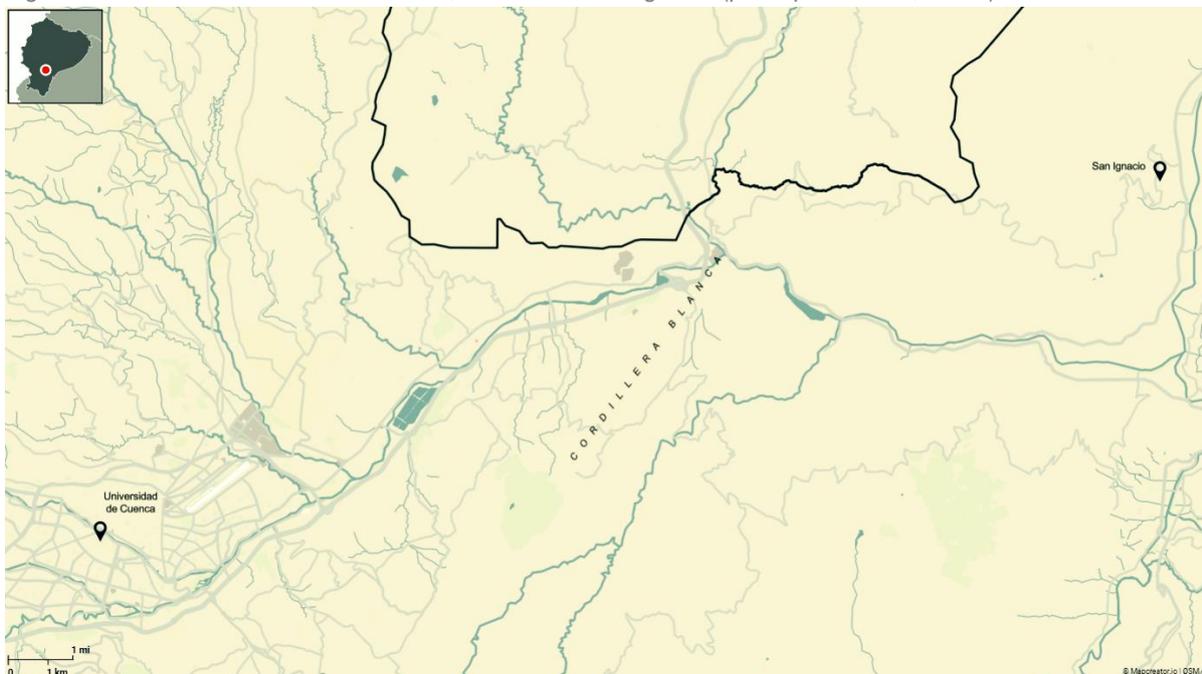


Fuente: Elaboración propia

2.1.4. Cosecha de la especie

Para asegurar la eficacia en el proceso de renovación y remoción de carga contaminante en una colonia de eneas, es conveniente cosechar periódicamente y retirar la parte emergente del humedal (figura 06). Sin embargo, es crucial considerar el momento adecuado para realizar el corte. Si se lleva a cabo durante la época vegetativa (por ejemplo, en julio), existe el riesgo de que los rizomas no hayan almacenado suficientes carbohidratos de reserva, lo que podría afectar la plantación en la siguiente temporada. Por lo tanto, se recomienda realizar el corte cuando las plantas estén en reposo y antes de que comience la nueva brotación (de la Mora, 2005). La tifa utilizada para el presente estudio proviene de la comunidad de San Ignacio (figura 07) perteneciente a la parroquia Zhumir (Paute). La fibra fue cosechada antes del brote de la nueva planta, seleccionando sus hojas y tallos.

Figura 07. Ubicación de humedal artificial, comunidad San Ignacio (parroquia Zhumir, Paute)



Fuente: Mapcreator, 2024

2.2. Ensayos físicos de la especie

A continuación, se llevarán a cabo dos ensayos físicos fundamentales relacionados con la tifa. El primero consiste en la determinación del porcentaje de absorción de humedad, que nos permitirá comprender cuánta humedad retienen los tallos secos de esta planta. Realizaremos este ensayo utilizando el método gravimétrico que se basa en la medición directa de la masa de agua eliminada en el transcurso del proceso de secado, analizando tres muestras por separado para obtener la masa de agua en cada una. El segundo ensayo se

enfoca en la determinación de la densidad aparente, basándose en el principio de Arquímedes o método de desplazamiento de volumen.

2.2.1. Determinación del porcentaje de absorción de humedad

Para determinar el porcentaje de absorción de humedad mediante el método gravimétrico, se tomó una muestra de 10 fragmentos de tallo de tifa, cada uno de 5 cm de longitud. Cada fragmento fue pesado individualmente en una balanza Adventurer TM Pro Ohaus, con una precisión de 0.01 gramos. Posteriormente, los fragmentos fueron sumergidos en agua destilada con un pH de 6.0 durante un período de 24 horas. Después de este tiempo, se volvieron a pesar para registrar su peso en el punto de saturación, eliminando previamente el agua superficial con una tela absorbente. La fórmula empleada para calcular el porcentaje de absorción fue la siguiente:

$$\% \text{ absorción} = \frac{P_s - P_h}{P_h} * 100$$

Donde: Ph representa el peso en gramos de la fibra en condiciones de humedad ambiente (60% de humedad relativa), y Ps corresponde al peso en gramos de la fibra en su punto de saturación.

De los 10 tallos de fibra tomados Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 02:

Tabla 02. Porcentaje de absorción de humedad de los fragmentos del tallo de tifa

# de muestra	Peso haz inicial (Ph) [g]	Peso haz final (Ps) [g]	% Contenido de humedad
M1	1,2	3,1	158,3
M2	1,1	3,2	190,9
M3	1,2	3,5	191,7
M4	1,2	3,2	166,7
M5	1,1	3,8	245,5
M6	1,1	3,5	218,2
M7	1,1	4,5	309,1
M8	1,0	3,4	240,0
M9	1,1	2,6	136,4
M10	1,1	2,5	127,3
Promedio	1,12	3,33	198,4

Fuente: Elaboración propia

La tifa posee una estructura porosa y fibrosa que le permite absorber y retener una considerable cantidad de humedad. Esta capacidad de absorción se debe a las paredes celulares y al interior de las numerosas cámaras de aire presentes en su estructura. El porcentaje promedio de los tallos de tifa es 198.4%, es decir tiene la capacidad de absorber casi el doble del peso de la fibra en estado seco, lo que se traduce en una reducción de la eficacia del aislamiento térmico del material. Esto se debe a que el agua tiene una mayor conductividad térmica que el aire.

En condiciones secas, las cámaras de aire y la estructura porosa de la tifa actúan como un excelente aislante térmico, impidiendo la transferencia de calor por conducción y convección. No obstante, a medida que aumenta el porcentaje de absorción de humedad, la eficacia del aislamiento térmico se ve comprometida (Colbers et al., 2017).

Mediante el análisis de la relación entre la absorción de humedad y la estructura de cámaras de aire, se pueden optimizar las condiciones de uso de la tifa como material aislante. Esto implica considerar factores como el tratamiento previo de la fibra, el control de la humedad y la protección contra la exposición a ambientes húmedos de la materia prima para la elaboración de un panel aislante o bien los aspectos constructivos que se deberían de considerar para evitar que la humedad llegue a afectar al panel como producto final.

2.2.2. Ensayo de la densidad aparente

Se calculó la densidad aparente de los fragmentos de fibra utilizando el método de desplazamiento de volumen (Principio de Arquímedes). Este método considera tanto el peso de los fragmentos como el volumen desplazado que equivale a la diferencia entre el volumen final y el volumen inicial del fluido en el que se sumerge. Para llevar a cabo las mediciones, se seleccionaron 9 paquetes de 3 fragmentos de 4 cm, asegurándose de que tuvieran masas similares. El propósito es observar y medir cualquier cambio en el volumen de agua en una probeta de 100 ml justo después de la inmersión.

Se llevaron a cabo tres tipos de mediciones de densidad aparente, variando el contenido de humedad de los fragmentos de fibra:

- Fragmentos de fibra con humedad cero.
- Fragmentos de fibra con humedad ambiente.
- Fragmentos de fibra en el punto de saturación de humedad.

El método implicó calcular la masa total del conjunto que se sumergiría y luego dividirla por el número de muestras, obteniendo así la masa de un solo haz de fibra. Después de la

inmersión, se cuantificó el volumen desplazado y se dividió nuevamente por el número de muestras para determinar teóricamente el volumen desplazado por un solo haz de fibra. La ecuación aplicada fue la siguiente:

$$\delta = \frac{m}{v_d}$$

Donde δ representa la densidad aparente, m es la masa media de los fragmentos de fibra, y v_d es el volumen desplazado.

De los 9 paquetes de 3 fragmentos de fibra tomados se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 03:

Tabla 03. Densidad aparente de los fragmentos de fibra

Tipo de haces de fibra	# de muestra	Contenido de humedad	Masa Promedio (m) [g]	Volumen Desplazado (vd) [ml]	Densidad Aparente (δ) [g/ml]	Densidad por tipo (δ) [g/ml]
Haces con humedad cero	HC1	0%	4,1	30	0,1367	0,1297
	HC2		4,1	32,5	0,1262	
	HC3		4,1	32,5	0,1262	
Haces con humedad ambiente	HA1	Ambiente	2,7	15	0,1800	0,1708
	HA2		2,7	16,5	0,1636	
	HA3		2,7	16	0,1688	
Haces en saturación de humedad	SH1	Punto de saturación	9,3	30	0,31	0,3513
	SH2		10,5	27,5	0,3818	
	SH3		10,5	29	0,3621	

Fuente: Elaboración propia

La determinación de la densidad aparente de la tifa en tres estados diferentes de humedad (fibra seca, a humedad ambiente y en punto de saturación) permite valorar la influencia de la humedad en la estructura de cámaras de aire. La densidad de la fibra seca (con humedad cero) es relativamente baja debido a la presencia de estos espacios de aire sin presencia de humedad. La fibra en humedad ambiente se evidencia que aumentó ligeramente su densidad en 0.0411 g/ml debido a la adición de masa de agua; sin embargo, si la humedad es moderada, las cámaras de aire seguirán desempeñando su función aislante. Las cámaras de aire de la fibra en un punto de saturación de humedad estarán completamente llenas de agua,

esto incrementa significativamente la densidad aparente en 0.2216 g/ml en comparación con la fibra sin humedad. Esto se debe a la alta conductividad térmica del agua en contraste con el aire., la capacidad valor de conductividad térmica aumentará y su eficiencia se reducirá.

2.3. Ensayo mecánico de la especie

El ensayo de compresión paralela a la fibra es una prueba realizada para evaluar la resistencia de la tifa cuando se le aplica una fuerza en la dirección paralela a sus fibras. Siendo este un ensayo relevante para evaluar su uso en aplicaciones de construcción o fabricación.

Para realizar el ensayo, las probetas se prepararon con una geometría cilíndrica. Los cilindros de Ø 10 cm se conformaron por fragmentos de tifa de 10 cm de alto, sujetos por correas plásticas de amarre 200 x 3,6 mm color blanco en sus extremos y mitad de los cilindros para evitar deformaciones. El ensayo se basó en la norma D3410M.

Se realizaron los ensayos mediante la máquina de compresión simple, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 04:

Tabla 04. Resultados de ensayo a compresión

# de muestra	Longitud [cm]	Diámetro [cm]	Área [cm ²]	Carga de rotura [kgf]	Resistencia a la compresión [kgf/cm ²]
C1	10	9,5	70,882	1336,3	17
C2	10	9,5	70,882	1431,3	18,2
C3	10	9,5	70,882	1393,8	17,5

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de compresión de la tifa está estrechamente ligada a su capacidad como aislante térmico. Cuando se aplica una fuerza de compresión sobre la tifa, se reduce el volumen de las cámaras de aire que contiene. Por lo tanto, una alta capacidad de compresión significa que la tifa puede comprimirse fácilmente, lo que reduce significativamente el espacio de las cámaras de aire y, en consecuencia, disminuye su capacidad para aislar térmicamente. Esto es así porque son precisamente esas cámaras de aire las que proporcionan la resistencia al flujo de calor.

Por otro lado, una baja capacidad de compresión indica que la estructura de cámaras de aire de la tifa se mantiene incluso bajo presión, conservando así su capacidad para aislar el calor. Los tallos de tifa tienen una resistencia a la compresión en promedio de 17.57 kgf/cm².

El ciclo anual de crecimiento de la tifa permite aprovechar el potencial de las hojas y tallos de la planta. La estructura porosa con presencia de cámaras de aire de la tifa permite tener una mayor eficiencia como aislante térmico cuando estas características en su estructura no se ven afectadas en el tratamiento de la biomasa. La fibra en estado seco, sin presencia de humedad mantiene su capacidad de resistencia al calor a diferencia si la fibra se viera afectada por la presencia de agua en su estructura ya que esta tiene una alta capacidad para transmitir calor.

De igual manera la fibra en estado seco mantiene una densidad aparente baja en comparación si esta se encontrara con presencia de humedad en su estructura, afectando así las cámaras de aire. Además, la capacidad de compresión de la tifa afecta su aislamiento térmico; una alta capacidad reduce el espacio de las cámaras de aire, disminuyendo la eficacia del aislamiento, mientras que una baja capacidad conserva su capacidad aislante.

En el próximo segmento se analizará el comportamiento de la fibra de tifa en diversas presentaciones, con el fin de comprender cómo las propiedades físicas y mecánicas de los tallos y hojas en su estado original se ven alteradas tras el proceso de elaboración de probetas con biomasa triturada de tifa. El desarrollo de estas probetas facilitará la identificación del tamaño de partícula con mejor comportamiento termoaislante, la cual será sometida a un programa de simulación energética.



CAPÍTULO III

Ensayos experimentales

Capítulo III

El estudio y experimentación de materiales sostenibles es crucial para reducir el impacto ambiental generado por la industria de la construcción; pero para que el uso de estos materiales sea factible se debe comprobar si su eficiencia es similar o superior a los materiales convencionales. A continuación, se desglosa el proceso y resultados de los ensayos planificados.

Ensayos experimentales

3.1. Tratamiento de la biomasa previo a la elaboración de las probetas

La biomasa previamente cosechada fue picada con machete en tamaños de hasta 5 cm (figura 08) para su posterior secado. También se extrajo tallos que fueron cortados en haces de 20cm y 10 cm. La materia prima obtenida se sometió a un proceso de secado en horno a una temperatura de 103°C durante dos horas, con intervalos de 20 minutos, con el fin de garantizar un secado uniforme. La norma ISO-3344 sugiere secar fibras naturales a temperaturas alrededor de 100-105 °C, especialmente para evitar la degradación de las fibras y asegurar un secado efectivo. Durante estos intervalos, se movieron las hojas picadas de tifa colocadas en las bandejas de aluminio para asegurar un secado óptimo.

Figura 08. Proceso de corte y secado



Fuente: Elaboración propia

El estudio trabajó con cuatro tamaños de partículas específicas de tifa, los cuales abarcan los siguientes rangos: 0.2-0.5 mm, 0.5-1 mm, 1-5 mm y 4 cm de tallo de la tifa. Las probetas utilizadas para el estudio tienen un tamaño estándar de 4x4x4 centímetros. Para la aglomeración de las partículas, se emplea goma blanca PVA como aglutinante. Este enfoque permite una investigación detallada y comparativa de las propiedades y comportamientos de los diferentes tamaños de partículas de tifa, así como su interacción con el aglutinante seleccionado. El tipo de pegamento, la presión de prensado y los tamaños de partículas se seleccionó por el grupo de investigación Virtual Tech.

Para el proceso de triturado, las hojas secas cortadas previamente en pequeños trozos se trituraron utilizando una máquina trituradora. El tamaño de partícula triturada de tifa se evaluó mediante un proceso de tamizado utilizando tamices de malla cuadrada estándar con diámetros que varían entre 2mm y 0,01 mm.

Para llevar a cabo el proceso de trituración, se empleó el Molino de Corte SM 100 (figura 09). La alimentación de la tifa en este proceso se realizó con un tamaño máximo de 50 mm. La finura final del material triturado fue determinada por los tamices inferiores del molino, los cuales tienen tamaños de abertura que oscilan entre 0,25 y 20 mm. Durante el proceso, la muestra entra en contacto con el rotor y se tritura entre las cuchillas y las barras de corte estándar estacionarias. Este método de trituración garantiza una reducción eficaz del tamaño de las partículas de tifa, obteniendo así el producto deseado.

Figura 09. Proceso de triturado y tamizado



Fuente: Elaboración propia

Para el proceso de tamizado (figura 10), se utilizó la Tamizadora Vibratoria AS 200 Control. Esta tamizadora, perteneciente a la serie AS 200, opera mediante un accionamiento electromagnético. Este tipo de accionamiento genera un movimiento de lanzamiento tridimensional que asegura una distribución homogénea del material a tamizar en la superficie completa del tamiz. El movimiento de tamizado empleado es el movimiento de lanzamiento con momento angular, característico de este tipo de tamizadoras. Los parámetros de tamizado configurados, incluyeron la amplitud de 2.50 mm y el tiempo de 10 minutos, estos fueron ajustados y controlados digitalmente para garantizar resultados precisos. Para cada ciclo de tamizado se agregaba 2 palas pequeñas para grano de fibra triturada.

Figura 10. Fibra triturada antes y después del tamizado.



Fuente: Elaboración propia

Análisis de fibra por tamizado

Para evaluar la distribución del tamaño de las partículas en la fibra de tifa, se empleó el método de análisis por tamizado. Este método permite separar fracciones o rangos de tamaño de partícula y se lleva a cabo mediante pesaje diferencial. El efecto del tamaño de las partículas en las propiedades del material, como la compresibilidad, es relevante.

Para realizar el análisis por tamizado, se verificó que los tamices utilizados cumplieran con los requisitos técnicos establecidos en normas específicas, como la ISO 3310 o la ASTM E11 / E 323. Los parámetros de tamizado configurados incluyeron una amplitud de 2.5 mm y un

tiempo de duración de tamizado de 10 minutos. Estos parámetros se ajustaron y controlaron digitalmente para garantizar resultados precisos. La cantidad de material utilizado para el análisis fue de 100 g de tifa triturada.

Los pasos para preparar la fibra triturada fueron los siguientes:

1. Preparación de la pila de tamices.
2. Muestreo (100 g).
3. Preparación de la muestra.

Los pasos para el pesaje del tamiz fueron los siguientes:

4. Pesaje de los tamices vacíos en orden ascendente.
5. Adición de la muestra.
6. Tamizado utilizando la Tamizadora Vibratoria AS 200 Control.
7. Pesaje posterior de las fracciones en cada tamiz en orden descendente.

Posteriormente, se registró la cantidad de fibra en cada tamiz para determinar la cantidad neta de totora retenida en cada uno de los envases. Luego, se sumaron los pesos de las fibras para calcular el 100% del peso total en gramos. Finalmente, se registró el porcentaje contenido en cada tamiz.

Tabla 05. Análisis por tamizado (distribución del tamaño de las partículas de la fibra de tifa)

N° de tamiz	Tamaño de tamiz [mm]	Peso recipiente [g]	Peso recipiente y fibra [g]	Peso de la fibra [g]	Porcentaje de la fibra [%]
>10	>2mm	216	217,5	1,5	1,5
10	2mm	227,24	230,24	3	3,0
20-30	850-600 mic	199,73	218,93	19,2	19,3
40-60	425-250 mic	584,77	615,87	31,1	31,2
<100	<150mic	213,4	258,3	44,9	45,0
Total				99,7	100,0

Fuente: Elaboración propia

3.2. Elaboración de moldes

El diseño del molde fue proporcionado por el grupo de investigación virtual Tech de la Universidad de Cuenca, quienes lo construyeron e identificaron el modelo más adecuado mediante varios ensayos de prueba y error. Factores que influyeron en la elección del molde

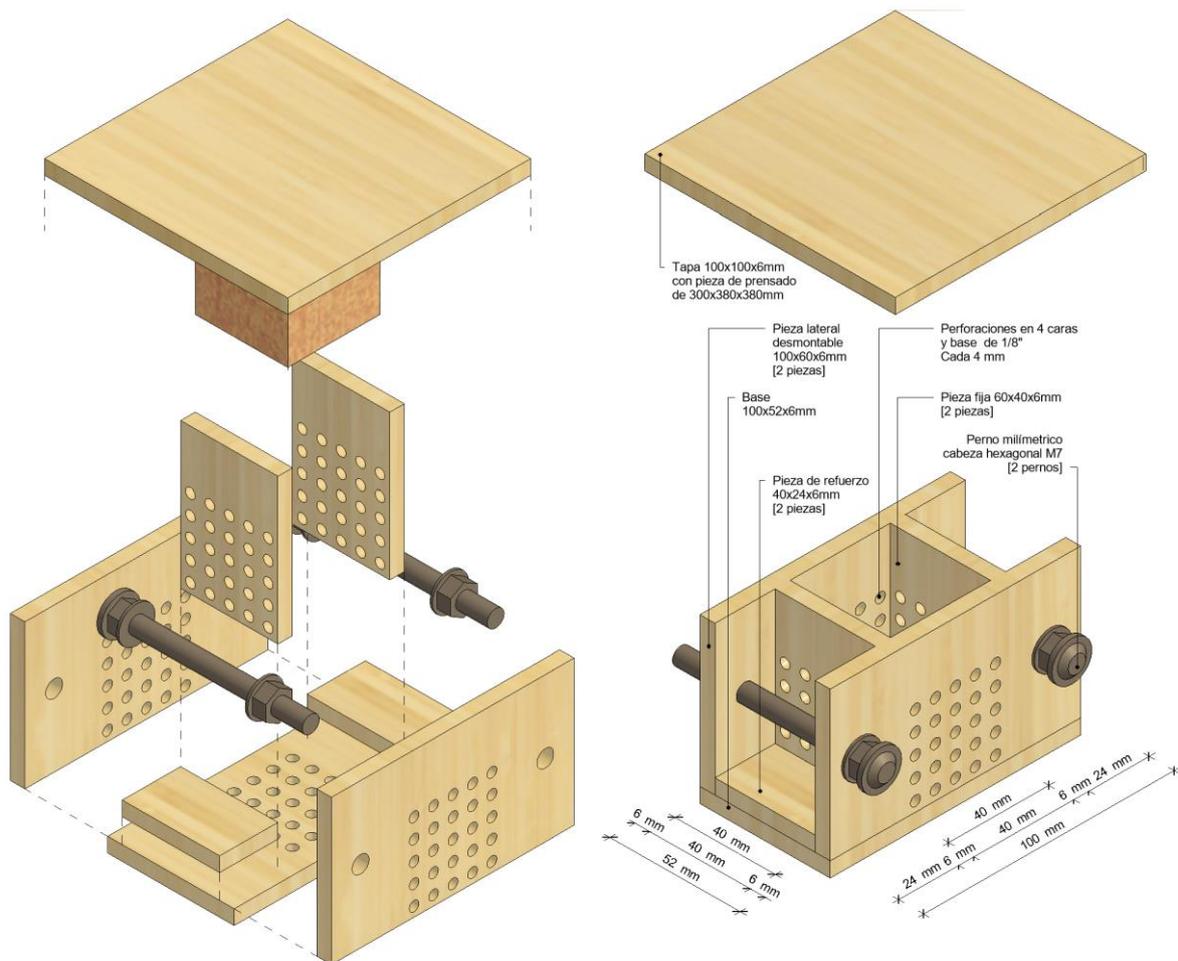
adecuado incluyen: la facilidad de desmoldeo de las probetas, la presencia de perforaciones planificadas en las paredes del molde para asegurar un secado uniforme del aglutinante mediante ventilación, la garantía de que el material del molde no cause quemaduras en las probetas, la prevención de la filtración del material de las probetas por las juntas de las piezas, la evitación de la adherencia de la probeta al molde, y la adecuada superficie de la tapa del molde para facilitar la colocación del material de prensado.

Con estos criterios, el modelo final del molde consistió en material de madera (preferiblemente MDF), con dos piezas laterales desmontables para facilitar el desmoldeo de la probeta. Se incluyeron perforaciones en las superficies de contacto con la probeta para permitir su ventilación durante el proceso de secado, y la tapa con dimensiones de 10x10 cm para asegurar una mayor área de contacto con el material de prensado. Además, se recubrió la superficie interior con papel contact transparente perforado de acuerdo a las perforaciones en las caras del molde para evitar que la probeta se adhiera al molde, y como medida preventiva se roció la superficie con aceite WD-40 antes de colocar el material para la probeta.

El molde (figura 11) se construyó utilizando MDF de 6 mm de espesor, cortando las piezas con una sierra circular. El diseño del molde incluyó una altura inicial de 6 cm, anticipando que durante el proceso de prensado en el horno, la altura se reduciría produciendo así un cubo de 4x4x4 cm. Para ensamblarlo, se utilizó pegamento Super Bonder. Además, dos de las piezas laterales son desmontables, lo que facilita el desmoldeo del cubo, estas piezas están sujetas con tornillos de 5/8" x 8". La tapa del molde está compuesta por una pieza de MDF de 10x10x0.6 cm y otra de 3.8 x 3.8 x 3 cm ajustada con pegamento en centro de la pieza con mayor tamaño. Esta última se desliza fácilmente para ajustar la altura deseada del cubo final, que es de 4 cm.

Para evitar deformaciones en la base al aplicar la carga de prensado sobre la tapa, las piezas de 4x6 están reforzadas con pequeñas piezas de 4x2.4x0.6 cm. Además, en las caras internas del molde, se cubrieron con papel contact para evitar que las partículas de la tifa y el aglutinante se adhieran a la superficie del MDF. También se realizaron perforaciones intercaladas con una broca de 1/4" en la base y las caras del molde para facilitar la ventilación durante el proceso de secado. Antes de colocar el material en el molde, se lubrica la superficie interna con aceite WD-40 para evitar que la probeta se pegue.

Figura 11. Piezas componentes del molde



Fuente: Elaboración propia

3.3. Elaboración de probetas

Los materiales empleados en la fabricación de las probetas fue el acetato de polivinilo (PVA) como componente principal del aglutinante, este material también es conocido como goma blanca, que consiste en un polímero que se produce a través de la polimerización del acetato de vinilo. Este material tiene un impacto ambiental relativamente bajo en comparación con otros adhesivos sintéticos como el adhesivo acrílico, silicona epóxido o cemento de contacto. Además, se utilizaron dos pozuelos de vidrio para mezclar la tifa y el aglutinante. También se emplearon espátulas de silicona, tres tarrinas transparentes de 1/5 litro y dos vasos plásticos de 16 oz (figura 12) para medir las porciones de cada material al elaborar la probeta.

Figura 12. Materiales para elaboración de probetas



Fuente: Elaboración propia

La determinación de la dosificación para la elaboración de las probetas fue realizada por el grupo de investigación Virtual Tech, quienes llevaron a cabo pruebas con cuatro diferentes proporciones: 1:2, 1:2.2, 1:2.3 y 1:2.4, correspondientes a las proporciones de fibra y aglutinante, respectivamente. La mezcla de los dos componentes se efectuó de manera manual. Tras analizar los resultados en cuanto a la cohesión de las fibras trituradas y los tallos enteros, tanto en la parte interna como en la superficie de las probetas, se concluyó que la dosificación óptima para las probetas fue de 1:2.3. Del mismo modo, se determinó que para las probetas de tallo entero, la proporción adecuada de fibra y aglutinante era de 1:2, respectivamente.

La proporción utilizada para preparar el aglutinante fue de 2:1, es decir, dos partes de PVA por cada parte de agua. La balanza utilizada para pesar cada porción fue la Adventurer TM Pro Ohaus. Las probetas ya terminadas se colocaron en un horno a una temperatura constante de 75°C y se mantuvieron allí durante 24 horas. Durante este periodo, las probetas estuvieron sujetas a una presión de prensado de 0.1 kg/cm², lo que se traduce en una fuerza de 1.6 kg aplicada sobre la cara superior de cada probeta.

El procedimiento utilizado para fabricar cada probeta (figura 13), excluyendo las probetas de tallos enteros (de 4 cm), fue el siguiente:

1. Pesado de las fibras.
2. Pesado del aglutinante en una proporción de 2:1
3. Mezclado minucioso de las fibras con el aglutinante utilizando las espátulas.
4. Pesado del molde previamente lubricado con aceite WD 40.
5. Vertido de la mezcla en capas de 1 cm en el molde y compactado de las esquinas correctamente realizando 8 golpes por capa con un pedazo de madera de sección cuadrada.

6. Calibrado de la presión de prensado a 1.6 kg utilizando ladrillos y trozos de cerámica de 0.2g.
7. Nivelado de la posición de la tapa y colocado de la probeta en el horno (modelo GC Series Lab Ovens) a 75 °C durante 24 horas.
8. Retirado de las probetas del molde y pesadas.
9. Señalizado de cada probeta con un código para identificarlo.

Figura 13. Proceso de elaboración de probetas



Fuente: Elaboración propia

Para cada grupo de probetas correspondientes a un rango de tamaños de partículas, se creó una tabla con el propósito de mostrar la dosificación aplicada a cada una. A continuación, se describen los términos presentes en las tablas:

- Código: Cada probeta está identificada con un código específico para facilitar la organización de los datos.
- Peso molde: Registra el peso del molde en gramos luego de aplicar el aceite WD-40, esto antes de colocar y compactar las fibras con el aglutinante.
- Peso fibra: Indica el peso en gramos de la fibra utilizada en cada probeta.
- Peso aglutinante: Corresponde al peso en gramos del aglutinante. En el caso de los 3 primeros tamaños de partícula, el peso del aglutinante corresponde al peso de la fibra multiplicado por 2.3 según la dosificación antes indicada. Sin embargo, para las

probetas de tallo entero (4 cm), el peso del aglutinante corresponde al doble del peso de la fibra.

- P1: Es el peso en gramos del molde después de colocar y compactar la fibra con el aglutinante.
- Peso probeta entrada: Representa la diferencia entre el peso total del molde después de la colocación de la fibra con el aglutinante y el peso inicial del molde.
- P2: Este valor representa el peso combinado del molde y la probeta en gramos después de haber estado en el horno durante 24 horas a una temperatura de 75 °C.
- Peso probeta salida: Se obtiene pesando la probeta sin el molde.
- Peso aglutinante salida: Es la relación entre el peso del aglutinante por el peso de la probeta de salida y el peso de la probeta de entrada.

La cantidad de fibra necesaria para obtener una probeta final de dimensiones 4x4x4 cm se determinó mediante una prueba inicial con los cuatro tamaños de partículas. Para las partículas de 0.2-0.5 mm, 0.5-1 mm y 1-5 mm, se utilizó una dosificación de 1:2.3 de fibra y aglutinante, respectivamente, mientras que para las probetas de tallo entero de 4 cm se utilizó una dosificación de 1:2. Para la probeta con partículas de 0.2-0.5 mm, se emplearon 15.2 g de fibra, mientras que para las probetas con partículas de 0.5-1 mm, 1-5 mm y 4 cm, se utilizaron 12.5 g de fibra. Después de permanecer 24 horas en el horno, se calculó el volumen de cada probeta y la cantidad de fibra utilizada. Con esta información, se realizó una regla de tres para calcular la cantidad de fibra necesaria para obtener una probeta de 64 cm³.

Tabla 06. Cálculo de cantidad de fibra requerida para cada probeta

Código	Peso fibra [g]	Peso aglutinante [g]	Peso probeta: entrada [g]	Peso probeta: salida [g]	Tamaño probeta: salida [cm]	Volumen probeta: salida [cm ³]	Peso fibra requerido [g]
1	15,21	34,99	50,20	19,90	4x4x3,8	60,84	16,00
2	12,45	28,65	41,10	16,20	4x4x3,83	61,29	13,00
3	12,45	28,65	41,10	16,40	4x4x3,56	56,91	14,00
4	12,45	28,65	41,10	24,40	4x4x3,98	63,74	12,50

Fuente: Elaboración propia

Partículas de 0,2-0,5mm

La probeta con el código 1 en la prueba inicial corresponde a la probeta con el código A6. Del proceso de tamizado se ocupó la fibra de los tamices 250 mic (No.60) y 425 (No.40) para elaborar las probetas (figura 14).

Tabla 07. Dosificación de probetas con tamaño de partículas de 0,2-0,5mm

Código	Peso molde [g]	Peso fibra [g]	Peso aglutinante [g]	P1 [g]	Peso probeta: entrada [g]	P2 [g]	Peso probeta: salida [g]	Peso aglutinante: salida [g]
A1	170,80	16,00	36,80	223,60	52,80	187,10	20,92	14,58
A2	117,30	16,00	36,80	170,10	52,80	132,60	20,30	14,15
A3	115,80	16,00	36,80	168,60	52,80	131,50	21,60	15,06
A4	116,60	16,89	38,86	172,35	55,75	131,30	20,60	14,36
A5	163,40	16,00	36,80	216,20	52,80	175,90	20,90	14,57
A6	127,50	15,21	34,99	177,70	50,20	141,15	19,90	13,87

Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Probetas con tamaño de partícula 0.2-0.5mm



Fuente: Elaboración propia

Partículas de 0,5-1mm

La probeta con el código 2 en la prueba inicial corresponde a la probeta con el código B4. Del proceso de tamizado se ocupó la fibra de los tamices 600 mic (No.30) y 850 (No.20) para elaborar las probetas (figura 15).

Tabla 08. Dosificación de probetas con tamaño de partículas de 0,5-1mm

Código	Peso molde [g]	Peso fibra [g]	Peso aglutinante [g]	P1 [g]	Peso probeta: entrada [g]	P2 [g]	Peso probeta: salida [g]	Peso aglutinante: salida [g]
B1	121,70	13,00	29,90	164,60	42,90	130,70	16,80	11,71
B2	118,50	13,00	29,90	161,40	42,90	122,50	15,70	10,95
B3	133,30	13,00	29,90	176,20	42,90	140,80	16,50	11,50

B4	134,60	12,42	28,58	175,60	41,00	137,34	16,20	11,29
B5	119,00	13,00	29,90	161,90	42,90	126,40	17,40	12,13
B6	115,00	13,00	29,90	157,90	42,90	123,50	15,90	11,08

Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Probetas con tamaño de partícula 0.5-1mm



Fuente: Elaboración propia

Partículas de 1-5mm

La probeta con el código 3 en la prueba inicial corresponde a la probeta con el código C4. Del proceso de tamizado se ocupó la fibra del tamiz 2 mm (No.10) para elaborar las probetas (figura 16).

Tabla 09. Dosificación de probetas con tamaño de partículas de 1-5mm

Código	Peso molde [g]	Peso fibra [g]	Peso aglutinante [g]	P1 [g]	Peso probeta: entrada [g]	P2 [g]	Peso probeta: salida [g]	Peso aglutinante: salida [g]
C1	124,70	14,00	32,20	170,90	46,20	173,00	17,40	12,13
C2	123,10	14,00	32,20	169,30	46,20	133,50	18,10	12,62
C3	125,70	14,00	32,20	171,90	46,20	136,00	18,30	12,76
C4	124,50	12,45	28,65	165,60	41,10	139,91	16,40	11,43
C5	119,00	13,00	29,90	161,90	42,90	150,00	16,00	11,15
C6	115,00	13,00	29,90	157,90	42,90	152,71	17,90	12,48

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Probetas con tamaño de partícula 1-5 mm



Fuente: Elaboración propia

Partículas de tallo entero 4 cm

La muestra utilizada para calcular la cantidad de fibra necesaria se preparó utilizando tallos enteros de 4 cm, los cuales fueron mezclados con el aglutinante en una proporción de 1:2, respectivamente. Durante la elaboración de la probeta, cada capa se alterna entre horizontal y vertical, siguiendo esta secuencia hasta completarla. Después de este proceso, el molde se colocó en un horno a una temperatura de 75°C. Tras 24 horas de secado, la muestra fue retirada para su análisis. La primera observación reveló que la muestra se había fracturado y se observó que las capas del tallo no estaban completamente impregnadas con aglutinante, lo que dificulta la adherencia entre ellas.

Para abordar los problemas encontrados en la probeta de prueba, se optó por dividir el tallo por la mitad, permitiendo así que el aglutinante impregne en las capas internas. Luego de mezclar los tallos y el aglutinante se dejó la mezcla en reposo por una hora. Después del período de secado y análisis, se llegó a la conclusión de que esta medida resolvía el problema, logrando una probeta uniforme. A continuación, se detallan los pasos seguidos para la elaboración de las probetas con tallo entero.

1. Seleccionar los tallos de tifa en mejores condiciones con una sección uniforme.
2. Cortar los tallos de tifa en fragmentos de 4 cm.
3. Dividir los tallos cortados por la mitad.
4. Pesado de la fibra.
5. Pesado del aglutinante en una proporción de 1:2, el doble de aglutinante en relación a la fibra.

6. Mezclado minucioso de los tallos con el aglutinante utilizando las espátulas. Este proceso se lo debe de realizar hasta evidenciar que todas las capas del tallo se encuentran recubiertas con una capa de aglutinante.
7. Reposo de la mezcla por una hora para permitir que el aglutinante impregne todos los tallos.
8. Pesado del molde previamente lubricado con aceite WD 40.
9. Para ensamblar las capas del tallo, estas deben intercalarse, es decir, se completa una capa en una dirección y la siguiente se coloca perpendicular a la anterior, siguiendo esta secuencia hasta terminar la probeta. Cada capa debe compactarse adecuadamente mediante 8 golpes por capa con un trozo de madera de sección cuadrada.
10. Calibrado de la presión de prensado a 1.6 kg utilizando ladrillos y trozos de cerámica de 0.2g.
11. Nivelado de la posición de la tapa y colocado de la probeta en el horno (modelo GC Series Lab Ovens) a 75 °C durante 24 horas.
12. Retirado de las probetas del molde y pesadas.
13. Señalizado de cada probeta con un código para identificarlo.

La probeta con el código 4 en la prueba inicial corresponde a la probeta con el código D4. Durante el desarrollo de las probetas de tallos enteros (figura 17), la muestra D1 no se secó correctamente y, al manipularla, se fracturó. Por lo tanto, se llevó a cabo una nueva probeta con el código D7 para reemplazarla.

Tabla 10. Dosificación de probetas con tamaño de partículas de tallo entero (4cm)

Código	Peso molde [g]	Peso fibra [g]	Peso aglutinante [g]	P1 [g]	Peso probeta: entrada [g]	P2 [g]	Peso probeta: salida [g]	Peso aglutinante: salida [g]
D7	156,80	14,00	32,20	203,00	46,20	173,50	15,40	10,73
D2	170,30	13,91	31,99	216,20	45,90	181,69	14,50	10,11
D3	121,80	13,85	31,85	167,50	45,70	134,10	16,70	11,64
D4	111,00	14,00	32,20	157,20	46,20	132,60	16,10	11,22
D5	121,70	14,00	32,20	167,90	46,20	129,60	16,00	11,15
D6	156,10	14,00	32,20	202,30	46,20	173,20	16,10	11,22

Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Probetas con tallo entero (4 cm)



Fuente: Elaboración propia

3.4. Ensayos físicos y mecánicos de la probetas

3.4.1. Ensayo de absorción de humedad

La relación entre el ensayo de velocidad de absorción de humedad de un material y su capacidad de aislamiento térmico no es directa. El ensayo evalúa cuánta agua absorben las muestras de probetas de tifa cuando se exponen al aire húmedo. La velocidad de absorción de humedad depende del coeficiente de absorción de humedad del material, representado por el valor "m". Este coeficiente indica la capacidad del material para absorber humedad en relación con su masa o volumen. Se presume que cuanto menor es el valor de "m", mayor será la absorción de agua. Indirectamente, un material con una alta velocidad de absorción de humedad podría afectar su capacidad de aislamiento térmico si la humedad altera sus propiedades.

Con el fin de determinar la velocidad de absorción de humedad de las muestras de tifa en condiciones ambientales, se llevaron a cabo las siguientes etapas: inicialmente, se colocaron las muestras en un horno a una temperatura constante de 75°C durante 24 horas, hasta que alcanzaron su peso anhidro. Posteriormente, se registró el peso de las muestras cada 24 horas durante un período de 7 días, mientras se tomaban también mediciones de la humedad ambiente y la temperatura. Es importante destacar que las muestras se mantuvieron en una ubicación fija durante todo el proceso para asegurar la consistencia de los datos recopilados. Este método proporciona un indicador preciso de la cantidad de humedad ambiental absorbida por las muestras, lo que permite una evaluación detallada de su capacidad de absorción.

Aparatos

- Balanza Adventurer TM Pro Ohaus, con capacidad de pesar 0,01 g.
- Horno modelo GC Series Lab Ovens, regulable.
- Anemómetro Kestrel 5500.

Procedimiento

Se registró la humedad relativa, la temperatura ambiental y el peso de cada probeta con el objetivo de calcular la masa adicional después de 7 días. La cantidad promedio de masa adicional por día se obtiene calculando el promedio de las diferencias de peso de la probeta entre cada día consecutivo. Por otro lado, el porcentaje promedio de absorción se calcula como la diferencia entre el peso de la probeta en el primer y último día de registro, dividida por el peso del primer día, y luego multiplicada por cien.

Tabla 11. Ensayo de velocidad de absorción de humedad

# de muestra	Tamaño de partícula	Peso 1er día [g] HR = 96,9 % temp = 21,3 °C	Peso 7mo día [g] HR = 63,7 % temp = 20°C	Cantidad media de masa adicional [g] HR prom = 70,8% temp prom = 20,1°C	Porcentaje prom. de absorción HR prom = 70,8% temp prom = 20,1°C
A1	0,2-0,5 mm	20,60	22,50	0,12	9,22
A2	0,2-0,5 mm	20,30	22,10	0,12	8,87
A3	0,2-0,5 mm	21,60	23,50	0,14	8,80
A4	0,2-0,5 mm	20,60	22,40	0,13	8,74
A5	0,2-0,5 mm	20,90	22,70	0,13	8,61
A6	0,2-0,5 mm	20,00	21,70	0,12	8,50
B1	0,5-1mm	17,20	18,80	0,13	9,30
B2	0,5-1mm	16,00	17,50	0,11	9,38
B3	0,5-1mm	16,90	18,40	0,11	8,88
B4	0,5-1mm	17,20	18,60	0,10	8,14
B5	0,5-1mm	17,80	19,30	0,12	8,43
B6	0,5-1mm	16,10	17,60	0,12	9,32
C1	1-5 mm	17,80	19,30	0,12	8,43
C2	1-5 mm	18,40	20,00	0,11	8,70

C3	1-5 mm	19,00	20,80	0,10	9,47
C4	1-5 mm	18,10	19,60	0,11	8,29
C5	1-5 mm	17,60	19,10	0,11	8,52
C6	1-5 mm	16,40	17,80	0,09	8,54
D1	4cm	15,80	16,20	0,04	2,53
D2	4cm	14,90	18,40	0,22	23,49
D3	4cm	17,00	18,00	0,10	5,88
D4	4cm	16,40	16,40	0,03	0,00
D5	4cm	15,10	17,40	0,15	15,23
D6	4cm	16,10	17,30	0,09	7,45
E1	polvo + 0,5-1mm	18,00	19,80	0,14	10,00
E2	polvo + 1-5 mm	15,50	16,90	0,10	9,03

Fuente: Elaboración propia

Las probetas experimentaron un incremento de peso en un rango que variaba entre 0,03 y 0,22 gramos por día. En algunos casos, se observó que ciertas probetas aumentaron considerablemente su absorción de humedad en días con humedades relativas bajas, pero liberaron esta humedad adicional cuando las condiciones ambientales presentaban una humedad relativa alta. La presencia de humedad puede tener un impacto adverso en las propiedades aislantes de la tifa cuando se utiliza como material aislante. En este estudio, las probetas absorbieron una cantidad reducida de humedad, lo que mantuvo su estructura y propiedades físicas intactas. Si las probetas de tifa hubieran absorbido cantidades elevadas de humedad, esto habría resultado en un material más denso, perdiendo así su estructura de cámaras de aire. Además, podrían haber desarrollado problemas de deterioro como la pudrición o el moho, lo que habría disminuido su efectividad y durabilidad como aislantes.

3.4.2. Ensayo de densidad nominal

La densidad nominal ejerce influencia en las propiedades térmicas de un material, ya que incide en su estructura molecular y conductividad térmica. Por lo general, una densidad nominal más elevada se relaciona con una mayor capacidad de aislamiento térmico en ciertos materiales. Esto se explica porque una mayor densidad implica una mayor cantidad de material por unidad de volumen, lo que tiende a generar una estructura más compacta y menos espacios vacíos dentro del material. Esta estructura más densa suele disminuir la transferencia de calor a través del material, mejorando así su capacidad aislante. No obstante,

en algunos casos, materiales con densidades nominales más bajas pueden presentar propiedades aislantes muy eficaces debido a la presencia de cámaras de aire en su estructura. Este ensayo se realiza de acuerdo con la normativa chilena NCh 176/2.

La densidad se define como la relación entre la masa y el volumen de un objeto. En el caso de las probetas de tifa, su densidad nominal se refiere a la relación entre la masa de la probeta en su estado anhidro (tras pasar 24 horas en un horno a 75°C) y el volumen de la probeta sin humedad. Para calcular la densidad nominal, se determina la masa de la probeta mediante pesaje y su volumen mediante la medición de sus dimensiones. Esto permite calcular la masa por unidad de volumen de la probeta de tifa.

Aparatos

- Calibrador, con capacidad de determinar las dimensiones de las probetas al 0,1 mm.
- Balanza Adventurer TM Pro Ohaus, con capacidad de pesar 0,01 g.
- Horno modelo GC Series Lab Ovens, regulable.

Figura 18. Proceso de pulido de las probetas en prismas regulares



Proceso de pulido

Fuente: Elaboración propia

Comprobación de ángulos rectos en las esquinas

Preparación de las probetas

Las probetas se pulieron en forma de prismas rectos con secciones regulares (figura 18), lo que resultó en esquinas con ángulos rectos y superficies lisas. Este procedimiento se realizó en grupos de tres probetas, correspondientes a cada tamaño de partícula, totalizando así un conjunto de 12 probetas en total.

Procedimiento

Se determinó la masa de la probeta con una precisión de 0,01 g. El volumen de cada probeta fue determinado por el método de medición directa, para este método se midió la longitud (l), el ancho (a) y el espesor (e), con una precisión de $\pm 0,3\%$. Se efectuaron tres mediciones en cada dirección de la probeta.

La densidad nominal, representada como p_n , de cada probeta se expresa en gramos por centímetro cúbico mediante la siguiente fórmula:

$$p_n = \frac{m_o}{V_H}$$

Donde; m_o es la masa, en gramos de la probeta en el estado anhidro; V_H es el volumen, en centímetros cúbicos de la probeta con 0% de humedad.

Tabla 12. Cálculo de la densidad nominal de las probetas

Código	Masa probeta [g]	Longitud [cm]	Ancho [cm]	Espesor [cm]	Volumen probeta [cm ³]	Densidad probeta [g/cm ³]
A4	18,6	3,8	3,8	3,6	51,98	0,358
A5	15,3	3,8	3,3	3,4	42,64	0,359
A6	18,1	4,3	4,0	4,2	72,24	0,251
B4	14,5	3,7	3,7	3,7	50,65	0,286
B5	14,8	3,8	3,9	3,6	53,35	0,277
B6	14,8	3,6	3,8	3,7	50,62	0,292
C4	11,6	3,5	3,5	3,4	41,65	0,279
C5	15,1	4,0	3,9	3,2	49,42	0,306
C6	13,8	3,7	4,0	3,3	48,84	0,283
D5	13,9	3,9	4,1	3,7	59,16	0,235
D6	12,8	3,8	3,5	4,0	53,20	0,241
D7	14,5	3,9	3,8	3,8	56,32	0,257

Fuente: Elaboración propia

Las probetas exhibieron una densidad que variaba entre 0.235 g/cm^3 y 0.359 g/cm^3 , lo que indica una estructura porosa con cámaras de aire en su interior. La ventaja de un material elaborado a partir de fibra de tifa con baja densidad radica en su capacidad para ofrecer un aislamiento térmico eficaz sin añadir un exceso de peso o volumen al entorno donde se aplique. La baja densidad implica que el material es liviano, lo que facilita su manipulación, transporte e instalación. Además, una baja densidad puede potenciar su capacidad para retener aire en su estructura, mejorando aún más su eficiencia como aislante térmico.

3.4.3. Ensayo de compresión en probetas

La prueba de compresión de compuestos poliméricos fibrosos es comúnmente empleada en la industria de la construcción para analizar cómo se comportan los materiales bajo carga. En este caso, la simplicidad del proceso de carga, medición de carga y deformación, junto con la facilidad del equipo analítico, permite llevar a cabo un análisis del comportamiento de la fibra de tifa en sus diferentes presentaciones de tamaño de partícula. Este ensayo se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM D 695, que establece el procedimiento para determinar las propiedades de compresión de polímeros y materiales compuestos.

Un material que exhibe una alta resistencia a la compresión puede conservar su integridad estructural frente a cargas externas, lo que preserva su capacidad de aislamiento. Por ejemplo, en el caso de aplicaciones de aislamiento térmico en construcción, un material con alta resistencia a la compresión puede conservar su forma y estructura a lo largo del tiempo, asegurando así la eficiencia continua de sus propiedades aislantes.

Es así que, en este caso nos enfocaremos en el estudio del límite de fluencia del material, dado que el objetivo no es obtener un material termo-aislante que logre recibir un cierto nivel de carga sin deformarse. En este contexto, cualquier deformación permanente comprometería significativamente su efectividad. Por lo tanto, es crucial evaluar el límite de fluencia para garantizar que el material mantenga sus propiedades aislantes bajo condiciones de carga, evitando deformaciones que puedan reducir su capacidad de aislamiento y su desempeño general en aplicaciones constructivas.

Para la realización del ensayo, es fundamental asegurar que las esquinas de las probetas sean ortogonales y que sus superficies estén perfectamente lisas. Esto garantiza que la presión aplicada por el pistón y platina superior de la prensa a compresión se distribuya de manera perpendicular a la probeta, lo cual es esencial para obtener resultados precisos. De este modo, se asegura la validez y repetibilidad de los ensayos, permitiendo una evaluación fiable de las propiedades mecánicas del material. Además, todas las probetas deben ser

posicionadas en la máquina de tal manera que el pistón de presión ejerza la fuerza en la misma dirección en que fueron compactadas durante su fabricación (figura 19), asegurando así datos homogéneos y comparables.

Aparatos

- Prensa de compresión (Shimadzu Autograph AGS-X)
- Calibrador digital
- Escuadra

Figura 19. Ensayo a compresión en equipo Shimadzu Autograph AGS-X



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento

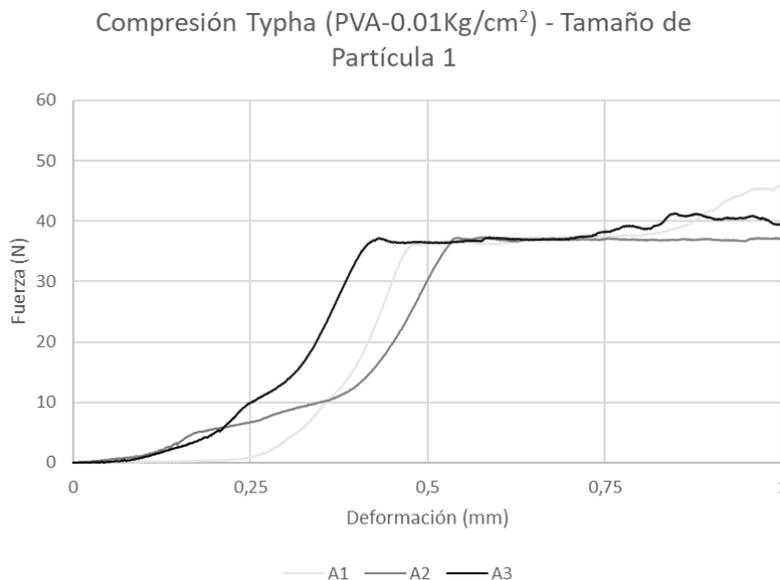
- Se procedió a medir con precisión el ancho y el espesor de la probeta en varios puntos a lo largo de su longitud, con una exactitud de 0.01 mm. Posteriormente, se calculó y registró el valor mínimo del área de la sección transversal, incluyendo también el espesor de la muestra.
- Luego, la probeta fue colocada entre las superficies del equipo de compresión, con especial atención en alinear la línea central de su eje largo con la del émbolo y asegurar que los extremos de la probeta estuvieran paralelos a la superficie de la herramienta de compresión.

- Se ajustó la cruceta de la máquina de prueba hasta que entrara en contacto con la parte superior del émbolo de la herramienta de compresión.
- Finalmente se registró los datos de la compresión hasta los 3 mm de deformación debido a que se centró en encontrar el límite de fluencia y el módulo de elasticidad.

Se utilizaron un total de 3 probetas para cada tamaño de partícula, creando una única gráfica para agrupar los datos según el tamaño de las partículas. Esto permitió estudiar y promediar el módulo de elasticidad, el límite de fluencia y la variación entre las probetas. A continuación, se muestran los datos obtenidos.

Probetas con tamaño de partícula de 0.2 a 0.5mm (figura 20):

Figura 20. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula 0.2-0.5 mm

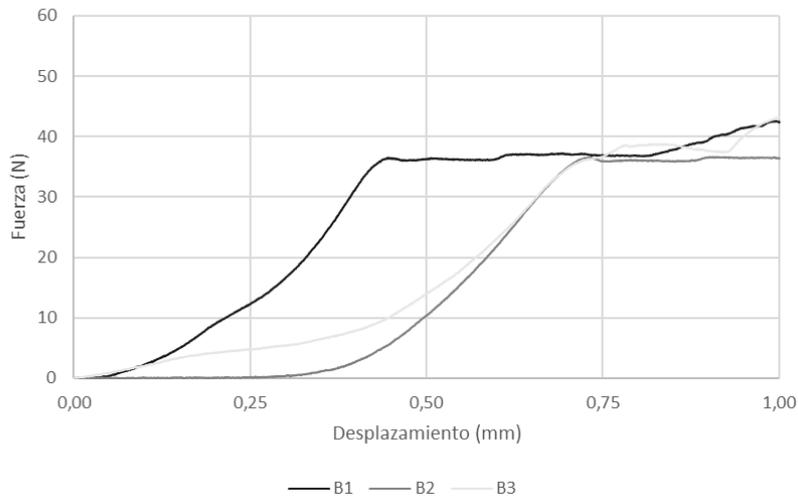


Fuente: Elaboración propia

En las probetas de partículas con tamaños entre 0.2 y 0.5 mm, se observa una cierta homogeneidad en los resultados. En particular, la capacidad del material para regresar a su estado inicial (límite de fluencia) se manifiesta al recibir una carga promedio de 36 N y una deformación de 0.44 mm, lo que equivale a 3.67 kg/cm².

Probetas con tamaño de partícula de 0.5 a 1 mm (figura 21):

Figura 21. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula 0.5-1 mm
 Compresión Typha (PVA-0.01Kg/cm²) - Tamaño de Partícula 2

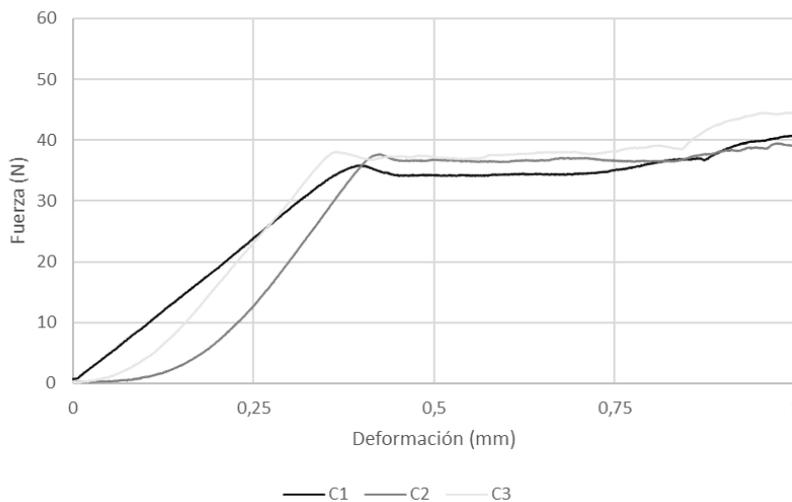


Fuente: Elaboración propia

En las probetas de partículas con tamaños entre 0.5 y 1 mm, se observa cierta variabilidad en los resultados, ya que una de las probetas se encuentra algo alejada del promedio. Esta variabilidad puede deberse al material o a la compactación de las probetas durante su elaboración. La capacidad del material para regresar a su estado inicial (límite de fluencia) se manifiesta al recibir una carga promedio de 37 N y una deformación de 0.74 mm, lo que equivale a 3.77 kg/cm².

Probetas con tamaño de partícula de 1 a 5 mm (figura 22):

Figura 22. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula 1-5 mm
 Compresión Typha (PVA-0.01Kg/cm²) - Tamaño de Partícula 3

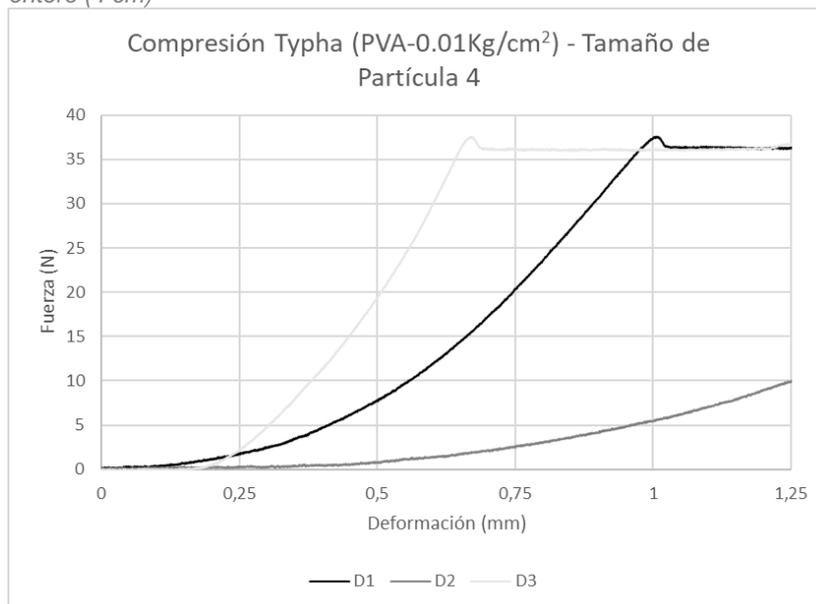


Fuente: Elaboración propia

En las probetas de partículas con tamaños entre 1 y 5 mm, se observa una cierta homogeneidad en los resultados. La capacidad del material para regresar a su estado inicial (límite de fluencia) se manifiesta al recibir una carga promedio de 37 N y una deformación de 0.40 mm, lo que equivale a 3.77 kg/cm².

Probetas con tamaño de partícula de tallo entero (4 cm):

Figura 23. Gráfico fuerza-deformación tamaño de probetas con tamaño de partícula tallo entero (4 cm)



Fuente: Elaboración propia

En las probetas de partículas con tamaños de 4 cm (figura 23), se observa una cierta variabilidad en los resultados. En particular, en la probeta D2 (tallo entero) se observa una reacción distintiva en el gráfico de fuerza-deformación. Esto evidencia la dificultad de estandarizar los datos de biomasa de la tifa sin un procesamiento previo adecuado. Este fenómeno puede atribuirse a las variaciones intrínsecas en las características estructurales de las plantas, incluso cuando comparten un entorno de crecimiento idéntico. Estas diferencias en la morfología y la composición del material vegetal subrayan la necesidad de un tratamiento y preparación meticulosa de la biomasa para obtener resultados consistentes y reproducibles.

Finalmente, en los resultados de la capacidad del material para regresar a su estado inicial (límite de fluencia) se manifiesta al recibir una carga promedio de 37 N y una deformación de 0.83 mm, lo que equivale a 3.77 kg/cm².

Módulo elástico

En la creación de nuevos materiales, es fundamental conocer los datos del módulo de elasticidad, ya que están directamente relacionados con la rigidez, durabilidad y capacidad de compactación. En el caso de la biomasa de la tifa, este conocimiento es esencial, dado que cualquier deformación del material, ya sea durante su manipulación o en el sistema constructivo utilizado, puede provocar cambios que afecten su efectividad como aislante térmico. La comprensión precisa del módulo de elasticidad permite prever y mitigar estas deformaciones, asegurando así la integridad estructural y la eficiencia del material.

Tabla 13. Módulo de elasticidad de todas las probetas.

Probeta tipo A	M. Elástico (N/mm ²) Fuerza (800-900) N	Probeta tipo B	M. Elástico (N/mm ²) Fuerza (800-900) N	Probeta tipo C	M. Elástico (N/mm ²) Fuerza (800-900) N	Probeta tipo D	M. Elástico (N/mm ²) Fuerza (800-900) N
A4	10,142	B4	7,048	C4	6,565	D5	2,059
A5	17,363	B5	4,136	C5	5,508	D6	1,710
A6	8,766	B6	8,792	C6	8,176	D7	3,634
Promedio	12,090		6,658		6,750		2,468

Fuente: Elaboración propia

Los materiales se consideran flexibles cuando tienen un módulo de elasticidad entre 0.1 y 10 N/mm², y semiflexibles en el rango de 10 a 500 N/mm². En los ensayos realizados, las probetas tipo A, compuestas por partículas de 0.2 a 0.5 mm, mostraron un módulo de elasticidad promedio superior a 10 N/mm², clasificándolas como materiales semiflexibles.

Por otro lado, las probetas B, C y D exhibieron valores menores a 10 N/mm², situándolas en la categoría de materiales flexibles. Es destacable que la probeta D (tallo entero) resultó ser la más flexible, con un módulo de elasticidad de 2.46 N/mm².

3.5. Ensayo de conductividad térmica

El ensayo de conductividad térmica en la tifa tiene como objetivo determinar su capacidad para transmitir calor a través de su estructura física. Esta propiedad es esencial para evaluar el potencial de la tifa como material aislante térmico. La conductividad térmica es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie a través de un material. Cuanto menor sea la conductividad térmica, mayor será la capacidad aislante del material. En el caso de la tifa, su estructura fibrosa y porosa contiene numerosas cámaras de aire atrapadas que actúan como barreras al flujo de calor, reduciendo así la transmitancia térmica. Un valor bajo de

conductividad térmica en la tifa indicaría su idoneidad como material aislante, capaz de mantener una diferencia significativa de temperatura entre ambos lados de un espacio en donde se aplique. A continuación, se detallan los principios físicos y el comportamiento de los 4 tipos de probetas al ser sometidos al ensayo.

3.5.1. Principios físicos

Un material al estar expuesto a diferentes temperaturas en dos de sus paredes de forma espontánea conduce calor desde la pared más caliente hacia la pared más fría, es decir, cuando hay una diferencia de temperaturas dentro de un material, el calor fluye naturalmente desde la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. La ley de Fourier describe cuantitativamente este fenómeno de conducción térmica. Establece que la tasa de flujo de calor por conducción, $\Delta Q = \frac{Q}{\Delta t}$, es proporcional al gradiente de temperaturas $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ y al área transversal (A perpendicular a la dirección del flujo de calor. Dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\Delta Q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

En donde, $\Delta Q = \frac{Q}{t}$ (Q/t es la cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo, en unidades de Kcal/seg o en Joule/seg), k es la conductividad térmica del material, A es el área en contacto con la superficie caliente en unidades de m^2 , ΔT es la diferencia entre la temperatura T_1 y T_2 de los extremos de la probeta en unidades de $^{\circ}C$ y Δx es el espesor de la probeta en metros.

En el caso de la tifa, su estructura fibrosa y porosa se caracteriza por numerosas cámaras de aire en el interior de sus estructuras que actúan como barreras al flujo de calor. Esto significa que la tifa tiene una baja conductividad térmica (k), lo que reduce la transferencia de calor a través de la tifa. Para determinar experimentalmente la conductividad térmica de la tifa, se establece un gradiente de temperatura conocido a través de una muestra del material y se mide el flujo de calor resultante los mismos que son registrados por un equipo diseñado para registrar estas temperaturas.

Figura 24. Equipo HT10XC Heat Transfer Service Unit de la marca Armfield



Fuente: Elaboración propia

Para determinar la conductividad térmica por la Ley de Fourier ΔQ se calcula mediante la multiplicación del voltaje por el amperaje, estos valores son calibrados y registrados por el equipo HT10XC Heat transfer service unit de la marca Armfield (figura 24); el espesor (e) de la probeta equivale a Δx de la ecuación original. Despejando k de la ecuación anterior se obtiene:

$$k = \frac{\Delta Q * e}{\Delta T * A}$$

3.5.2. Metodología

El equipo HT10XC Heat Transfer Service Unit de la marca Armfield fue utilizado para registrar las temperaturas y determinar la transferencia de calor, permitiendo así calcular el valor de la conductividad térmica (k). El grupo de investigación virtual Tech determinó los valores de voltaje y amperaje necesarios para el cálculo del flujo de calor (Q). Los valores de temperatura (T) utilizados en los cálculos corresponden al promedio de las temperaturas en la superficie caliente (t_2 y t_3) y al promedio de las temperaturas en la superficie fría (t_6 y t_7), registradas

por el equipo HT10XC. En la tabla 14, se muestran los valores registrados y las fórmulas de cálculo utilizadas para cada variable involucrada.

Tabla 14. Variables para el cálculo de k de las probetas de tifa

	Valor/ fórmula	Unidad	Descripción
V	1,4	V	Voltaje
I	0,14	A	Intensidad
dx	0,015	m	Distancia entre sensores del equipo
e	0,0015	m	Espesor de la probeta
t2	---	°C	Temp. caliente
t3	---	°C	Temp. caliente
t6	---	°C	Temp. fría
t7	---	°C	Temp. fría
th	$t3 - ((t2 - t3)/2)$	°C	Temp. prom. caliente
tc	$t7 - ((t6 - t7)/2)$	°C	Temp. prom. fría
dT	th - tc	°C	delta de temp.
Q	V*I	W	Tasa de transferencia de calor
A	$(\pi * D^2)/4$	m ²	Área probeta
K	---	W/mK	Coficiente conductividad

Fuente: Elaboración propia

Aparatos

- Estilete
- Lija A275 para madera
- Calibrador
- HT10XC Heat Transfer Service Unit

Procedimiento

De las 6 probetas fabricadas para cada tamaño de partículas, 3 fueron mecanizadas para obtener cilindros de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura. Este proceso se realizó puliendo las probetas después de trazar un círculo con radio de 1,5 cm en su centro. Posteriormente, se continuó puliendo hasta lograr la forma cilíndrica con las dimensiones requeridas.

De las probetas cilíndricas mecanizadas (figura 25), se seleccionó una de cada grupo de tamaño de partículas para cortar dos láminas de 1.5 a 1.8 mm de espesor destinadas al ensayo de conductividad térmica. Mediante un estilete, se realizó el corte de las láminas, las cuales fueron posteriormente pulidas con el fin de obtener una superficie lisa. El uso de un calibrador permitió medir y ajustar el espesor deseado en cada lámina.

Figura 25. Mecanizado de probetas cúbicas



Cilindros a partir de las probetas cúbicas de tifa

Proceso para laminar los cilindros

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionó un voltaje de 1.4 voltios para operar el equipo, el cual suministra una corriente eléctrica a los cilindros superior e inferior que contienen termocuplas, herramientas de medición de temperatura ubicadas en la parte superior e inferior. Posteriormente, se aplica el voltaje de 1.4V y se observa en el lector de la fuente de poder hasta que la temperatura de la primera termocupla (t_2) se mantenga constante, con un valor cercano al registrado por el equipo para t_3 . Este proceso de estabilización de la temperatura suele tomar alrededor de 30 a 40 minutos desde el encendido del equipo. Una vez estabilizada, se seleccionan las termocuplas consecutivas t_2 - t_3 y t_6 - t_7 , y se registran sus temperaturas marcadas en el lector (figura 26).

Es necesario que la válvula de agua esté abierta al encender el equipo, ya que controla las temperaturas t_6 y t_7 . Para cada probeta, se realizan dos registros de temperatura para el cálculo de la conductividad térmica (k). El primer registro de la primera probeta se efectúa a los 30 minutos, y el segundo, 15 minutos después. En el resto de probetas, los registros se realizan a los 15 y 30 minutos posteriores a la colocación de la probeta entre los cilindros con termocuplas del equipo. Este proceso se repite para 2 probetas por cada tamaño de partícula, dando un total de 8 muestras.

Figura 26. Determinación de la conductividad térmica de las probetas



Configuración del voltaje y estabilización de temp.

Colocado de probeta entre cilindros del equipo

Fuente: Elaboración propia

La tabla 15 presenta los valores obtenidos para las probetas conformadas con partículas de tamaño entre 0.2 y 0.5 mm. Dado que el ensayo se realizó en dos probetas, se registraron dos datos de cada probeta. Por consiguiente, el valor de la conductividad térmica (k) constituye el cálculo con cada grupo de valores calculados individualmente para cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 15. Valor de k en probetas de 0,2-0,5 mm

Código probeta:	A01		A02		Unidad
	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	
V	1,4	1,4	1,4	1,4	V
I	0,14	0,14	0,14	0,14	A
dx	0,015	0,015	0,015	0,015	m
e	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	m
t2	24,7	24,9	25,1	25,5	°C
t3	24,7	24,9	25,1	25,5	°C
t6	19,8	19,7	19,9	19,8	°C
t7	19,8	19,7	19,9	19,9	°C
th	24,7	24,9	25,1	25,5	°C
tc	19,8	19,7	19,9	19,95	°C
dT	4,9	5,2	5,2	5,55	°C
Q	0,196	0,196	0,196	0,196	W
A	0,00071	0,00071	0,00071	0,00071	m2

K	0,0849	0,0800	0,0800	0,0749	W/mK
----------	--------	--------	--------	--------	------

Fuente: Elaboración propia

La tabla 16 presenta los valores obtenidos para las probetas conformadas con partículas de tamaño entre 0.5 y 1 mm.

Tabla 16. Valor de k en probetas de 0,5-1 mm

Código probeta:	B01		B02		Unidad
	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	
V	1,4	1,4	1,4	1,4	V
I	0,14	0,14	0,14	0,14	A
dx	0,015	0,015	0,015	0,015	m
e	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	m
t2	23,4	23,7	24	24,4	°C
t3	23,4	23,7	24	24,4	°C
t6	19,5	19,8	20,2	19,8	°C
t7	19,5	19,8	20,2	19,8	°C
th	23,4	23,7	24	24,4	°C
tc	19,5	19,8	20,2	19,8	°C
dT	3,9	3,9	3,8	4,6	°C
Q	0,196	0,196	0,196	0,196	W
A	0,00071	0,00071	0,00071	0,00071	m ²
K	0,1066	0,1066	0,1095	0,0904	W/mK

Fuente: Elaboración propia

La tabla 17 presenta los valores obtenidos para las probetas conformadas con partículas de tamaño entre 1 y 5 mm.

Tabla 17. Valor de k en probetas de 1-5 mm

Código probeta:	C01		C02		Unidad
	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	

V	1,4	1,4	1,4	1,4	V
I	0,14	0,14	0,14	0,14	A
dx	0,015	0,015	0,015	0,015	m
e	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	m
t2	24,1	24,1	24	24,4	°C
t3	23,9	24	24	24,4	°C
t6	19,9	19,9	20	20,1	°C
t7	19,9	19,9	20	20,1	°C
th	23,8	23,95	24	24,4	°C
tc	19,9	19,9	20	20,1	°C
dT	3,9	4,05	4	4,3	°C
Q	0,196	0,196	0,196	0,196	W
A	0,00071	0,00071	0,00071	0,00071	m2
K	0,1066	0,1027	0,1040	0,0967	W/mK

Fuente: Elaboración propia

La tabla 18 presenta los valores obtenidos para las probetas conformadas con partículas de tamaño tallo entero (4cm).

Tabla 18. Valor de k en probetas de tallo entero (4cm)

Código probeta:	D01		D02		Unidad
	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	Valores registrados a los 15 min	Valores registrados a los 30 min	
V	1,4	1,4	1,4	1,4	V
I	0,14	0,14	0,14	0,14	A
dx	0,015	0,015	0,015	0,015	m
e	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	m
t2	26,7	26,9	27,2	27	°C
t3	26,6	26,8	27,1	26,9	°C
t6	20,2	20,4	20,6	20,4	°C
t7	20,1	20,5	20,7	20,6	°C
th	26,55	26,75	27,05	26,85	°C
tc	20,05	20,55	20,75	20,7	°C

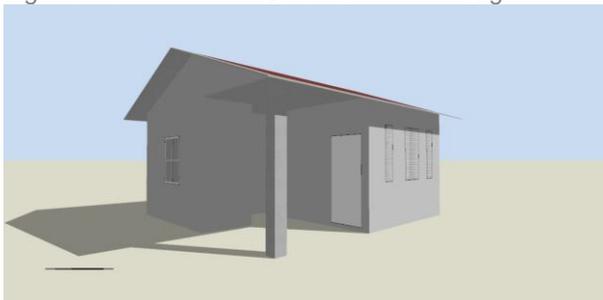
dT	6,5	6,2	6,3	6,15	°C
Q	0,196	0,196	0,196	0,196	W
A	0,00071	0,00071	0,00071	0,00071	m2
K	0,0640	0,0671	0,0660	0,0676	W/mK

Fuente: Elaboración propia

Simulación de la eficiencia termoaislante de la tifa

La implementación de este material en un programa de simulación energética permite evaluar su eficiencia de manera económica y en un tiempo reducido. En este caso, se utilizó el software Design Builder, una herramienta que incorpora datos climáticos reales del sitio, proporcionando estimaciones precisas de la cantidad de material necesario para garantizar un adecuado confort térmico. Estas simulaciones se llevarán a cabo en un prototipo de vivienda social MIDUVI (figura 27), ubicada en la ciudad de Cuenca, con la finalidad de obtener datos concretos sobre el desempeño del material en el entorno específico.

Figura 27. Vivienda MIDUVI en software Design Builder

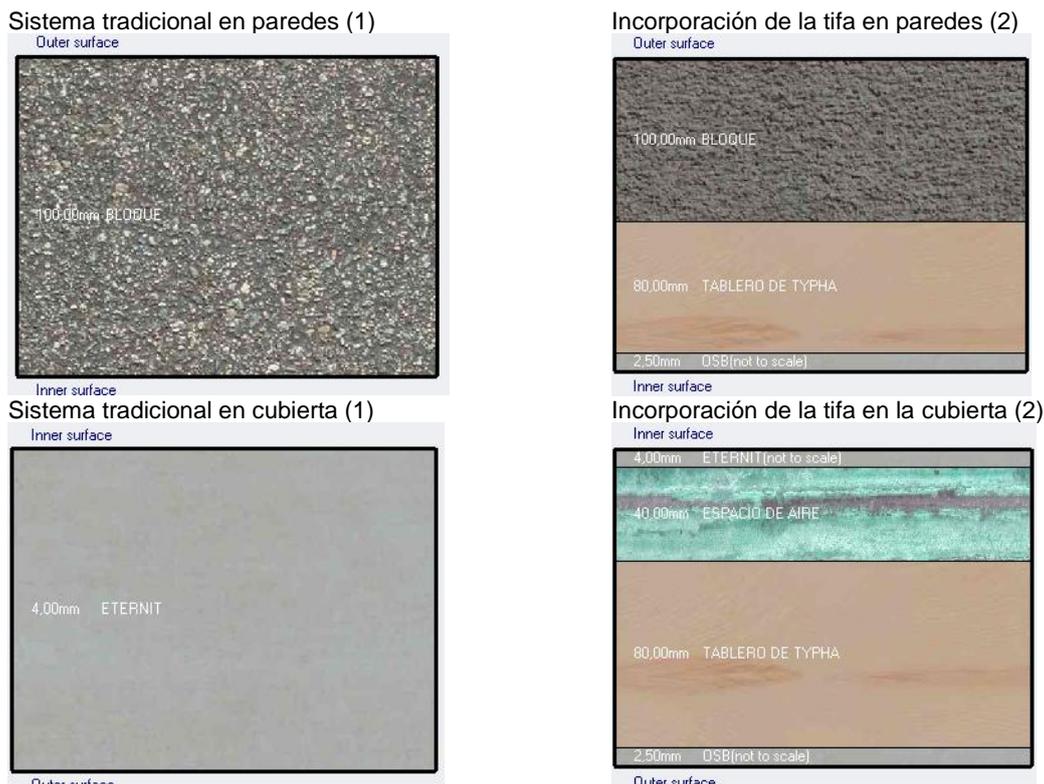


Fuente: Elaboración propia

Se llevaron a cabo dos simulaciones de eficiencia energética en una vivienda tipo MIDUVI. La primera simulación utilizó los materiales convencionales empleados en las construcciones existentes, mientras que la segunda simulación aplicó paneles termoaislantes de tifa.

Sistemas constructivos usados en la simulación

Figura 28. Sistema constructivo tradicional y sistema propuesto con tifa como aislante

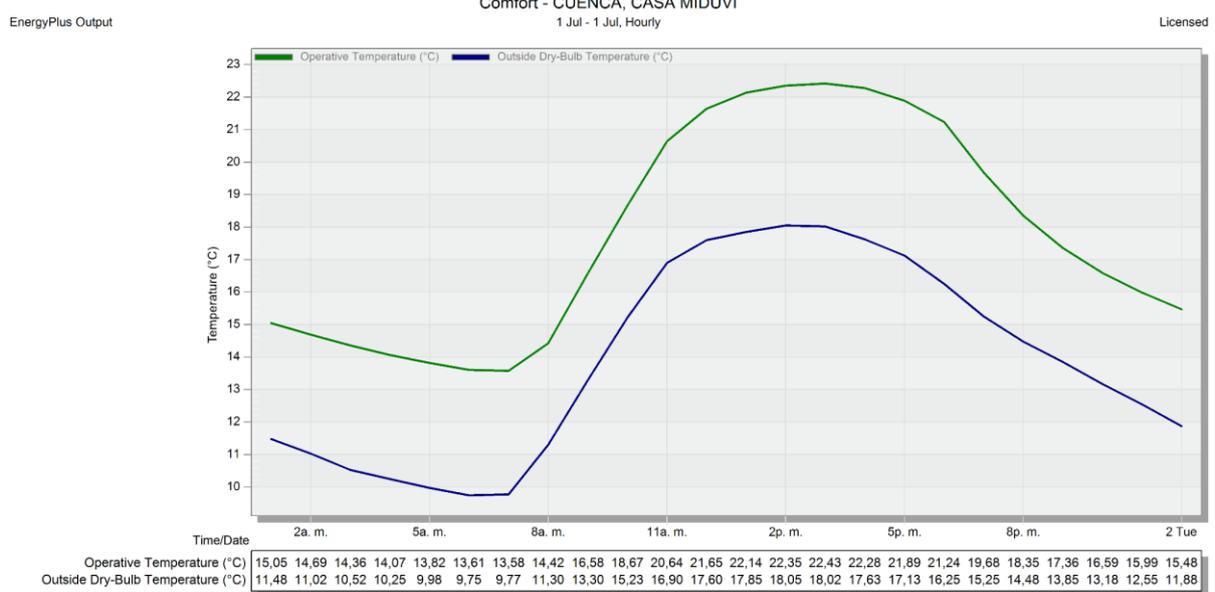


Fuente: Elaboración propia

Simulación en el sistema constructivo tradicional

En esta simulación, se utilizó el mismo sistema constructivo datos obtenidos de probetas con partículas tipo D (tallo entero), que tienen un espesor de 8 cm de tifa en las paredes y la cubierta. Este tamaño de biomasa fue seleccionada debido a su alta eficiencia térmica, demostrada por un coeficiente de conductividad térmica de 0.0646 W/m-K y una densidad de 0.25 g/cm³. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de dichas simulaciones.

Figura 29. Resultados de la situación energética en programa Design Builder sin aislamiento



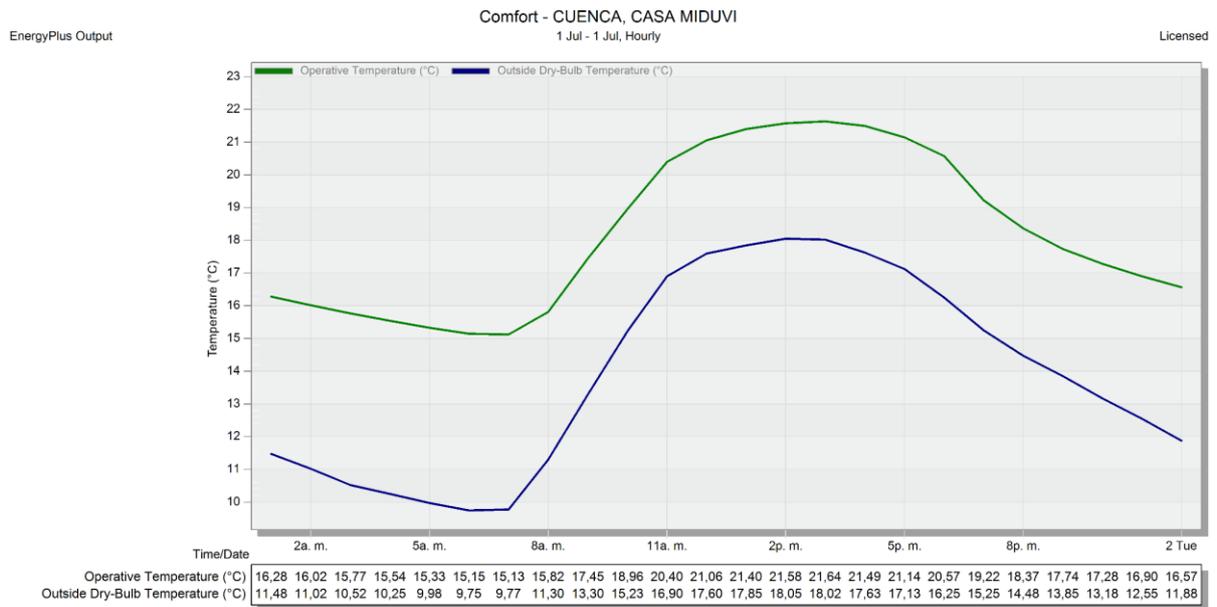
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica, la curva azul representa los cambios de temperatura a lo largo del día en la ciudad de Cuenca durante su temporada más fría, mientras que la curva verde muestra la temperatura operativa interna de la vivienda. Se puede observar que, desde las 8 pm hasta las 8 am, las temperaturas externas descienden hasta los 7°C. En contraste, el sistema tradicional de las casas del MIDUVI mantiene temperaturas internas mínimas de 13.58 °C.

Simulación en el sistema constructivo tradicional con la incorporación de tifa como aislante térmico.

En esta simulación, se utilizaron datos obtenidos de probetas con partículas tipo D (tallo entero), con un espesor de 8 cm de tifa en las paredes y cubierta. Esta probeta fue seleccionada debido a su alta eficiencia térmica, demostrada por un coeficiente de conductividad térmica de 0.0646 W/m-K y una densidad de 0.25 g/cm³. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de dichas simulaciones.

Figura 30. Resultados de la situación energética en programa Design Builder con aislamiento



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que desde las 8 pm hasta las 8 am tiene temperaturas bajas de hasta 7 °C, y que en el sistema tradicional con incorporación de tifa como aislante térmico de las casas del MIDUVI logra establecer temperaturas mínimas de 15.13°C, por lo que la mejora de la temperatura interior con respecto al sistema tradicional.

The background of the entire page is a dense, textured layer of light brown wood chips or mulch. The chips are irregular in shape and size, creating a natural, organic pattern. A semi-transparent dark brown horizontal band is positioned in the lower half of the image, serving as a backdrop for the text.

CAPÍTULO IV

Análisis de resultados

Capítulo IV

Análisis de resultados

La influencia de las diferentes propiedades físicas, mecánicas y de conductividad térmica de las probetas tienen un impacto en la eficacia como material aislante térmico. La capacidad de las probetas para absorber humedad del ambiente se relaciona con la integridad física del material al igual que si el material absorbe una cantidad reducida de agua no afecta las propiedades aislantes, mientras que una baja densidad de las probetas significa que la cantidad de aire encapsulado en el interacción es mayor lo que favorece a una baja transmisión del calor a través del material, en cambio la comprender las características mecánicas de las probetas permiten plantear un material con características técnicas que solvente la trabajabilidad y manipulación del material.

4.1. Análisis ensayo porcentaje de absorción de la fibra en bruto

La fibra de tifa en bruto tiene la capacidad de absorber cerca del doble de su peso en humedad, lo que incrementa su conductividad térmica y disminuye su capacidad de aislamiento térmico en caso de la fibra encontrarse en condiciones que sature la fibra de humedad. Por ende, durante la cosecha y el proceso de triturado, es crucial evitar la exposición de la fibra a la humedad ambiental para mantener su rendimiento aislante óptimo. Después de absorber humedad, es fundamental exponer la fibra al calor para facilitar su secado y así restaurar sus propiedades aislantes. Además, la absorción de humedad provoca un aumento en el volumen de la fibra, seguido de una contracción al secarse, lo cual podría comprometer su integridad estructural y física.

4.2. Análisis ensayo de densidad aparente de la fibra en bruto

La densidad aparente de la lana de roca varía entre 0.04 y 0.2 g/mm, mientras que su conductividad térmica oscila entre 0.020 y 0.040 W/mK, lo cual la convierte en un material eficiente como aislante térmico. Por otro lado, la densidad aparente de la tifa varía entre 0.1297 y 0.1708 g/mm en humedad ambiente, lo que le confiere un potencial aislante. La relación entre la densidad aparente de la fibra de tifa es un factor determinante en su conductividad térmica ya que, a mayor densidad, aumenta la conductividad térmica y disminuye la capacidad de aislamiento. Esto se debe a que los materiales más densos poseen una menor porosidad, lo que reduce la cantidad de cámaras de aire, principales responsables del aislamiento térmico.

Al comparar las densidades aparentes en tres estados de la fibra de tifa en bruto (estado anhidro, con humedad ambiente y en el punto de saturación de humedad), los resultados podrían direccionar al desarrollo de tratamientos o recubrimientos que permitan mantener las cámaras de aire libres de humedad, incluso en ambientes húmedos, maximizando así el rendimiento de la tifa como aislante térmico.

4.3. Análisis ensayo de compresión paralela a la fibra

En aplicaciones donde se requiere un buen aislamiento térmico, es deseable que la tifa posea una alta resistencia a la compresión con el fin de evitar que las fibras se compacten y pierdan su porosidad, eliminando así los espacios de aire. Esto garantizará que su estructura de cámaras de aire se mantenga intacta, incluso cuando se someta a cargas o presiones. Por lo tanto, el estudio de la capacidad de resistencia a la compresión de la tifa permite evaluar su idoneidad como material aislante térmico en diferentes aplicaciones y condiciones de uso, ya que una baja resistencia a la compresión resultaría en una disminución de su efectividad aislante al ser sometida a cargas.

Los tallos de tifa presentan una resistencia a la compresión promedio de 17.57 kgf/cm², lo que indica una notable resistencia a esta propiedad. En el caso de que los tallos de tifa conformen un panel aislante y éste sea sometido a cargas o presión, su estructura no cedería fácilmente, preservando así las cámaras de aire intactas y manteniendo inalterada su capacidad aislante.

4.4. Análisis ensayo de absorción de humedad en probetas

En el ensayo de absorción de humedad realizado en probetas de tifa durante un período de 7 días, se obtuvieron datos relevantes para evaluar su desempeño como material aislante. Después de la exposición a la humedad ambiental, el peso final de las probetas registró un incremento del 8.78% en comparación con su peso inicial. Las probetas con tamaños de partícula de 0.2-0.5 mm, 0.5-1 mm y 1-5 mm presentaron un aumento de masa entre 8.66% y 8.91%, mientras que las probetas de tallo entero mostraron un 9.10% de aumento. Esta ganancia de masa equivale a 0.11 gramos adicionales por cada probeta. La humedad relativa del ambiente osciló entre 56.8% y 96.9%, y la temperatura ambiental varió en un rango menor, entre 19.9°C y 21.3°C. Aunque un bajo nivel de absorción de humedad es deseable en materiales aislantes para mantener su eficacia térmica y acústica, estos resultados sugieren que si la tifa llegara a absorber un porcentaje elevado de humedad, podría conducir a una disminución de sus propiedades aislantes, afectando negativamente su desempeño y durabilidad a largo plazo.

4.5. Análisis ensayo de densidad nominal en probetas

Las probetas de tifa exhibieron densidades variables en función de su tamaño de partícula. Las probetas con partículas de 0.2-0.5 mm presentaron una densidad de 0.32 g/cm³, mientras que aquellas de 0.5-1 mm tuvieron una densidad ligeramente menor de 0.285 g/cm³. Por otro lado, las probetas de 1-5 mm alcanzaron una densidad de 0.289 g/cm³, y las de tallo entero mostraron la densidad más baja de 0.24 g/cm³. En general, se observó una tendencia de mayor densidad a medida que disminuye el tamaño de partícula. Esta variación en la densidad puede influir en la eficiencia de la tifa como aislante térmico, ya que densidades menores suelen estar relacionadas con conductividades térmicas más bajas y, por lo tanto, mejores capacidades aislantes. Como punto de comparación, la densidad de probetas de totora y cabuya, materiales similares estudiados como aislantes, oscila entre 0.39 y 0.61 g/cm³, presentando coeficientes de conductividad térmica que varían entre 0.0371 y 0.0768 W/m²K.

4.6. Análisis ensayo de compresión en probetas

El ensayo de compresión realizado sobre diferentes presentaciones de la fibra de tifa, evaluando su comportamiento ante cargas externas, proporcionó datos valiosos para entender las propiedades mecánicas y estructurales de este material en aplicaciones constructivas.

Partículas de 0.2 a 0.5 mm: Las probetas mostraron una capacidad notable para regresar a su forma original después de la carga, con un límite de fluencia promedio de 36 N y una deformación de 0.44 mm. Esto equivale a una resistencia de aproximadamente 3.67 kg/cm², indicando que estas probetas son relativamente rígidas y capaces de mantener su estructura bajo cargas moderadas.

Partículas de 0.5 a 1 mm: Se observó cierta variabilidad en los resultados, con una probeta alejada del promedio, lo que sugiere sensibilidad a las variaciones en la compactación o el material mismo. El límite de fluencia promedio fue de 37 N y una deformación de 0.74 mm, equivalente a una resistencia de 3.77 kg/cm². A pesar de la variabilidad, el material aún muestra una capacidad adecuada para mantener su integridad bajo carga.

Partículas de 1 a 5 mm: Similar a las partículas más pequeñas, estas probetas mostraron una respuesta homogénea, con un límite de fluencia promedio de 37 N y una deformación de 0.40 mm, equivalente a una resistencia de 3.77 kg/cm². Esto sugiere que el tamaño de partícula

en este rango no afecta significativamente la capacidad del material para recuperarse después de la carga.

Tallo entero (4 cm): Las probetas con tallo entero mostraron una variabilidad significativa, especialmente evidenciada en la probeta D2, que exhibió una respuesta distinta en el gráfico de fuerza-deformación. Esto puede atribuirse a las variaciones inherentes en las características estructurales de las plantas, incluso bajo condiciones de crecimiento idénticas. El límite de fluencia promedio fue de 37 N y una deformación de 0.83 mm, con una resistencia de 3.77 kg/cm². Este resultado subraya la importancia de un procesamiento meticuloso de la biomasa para obtener resultados consistentes.

La variabilidad observada en las probetas con tallo entero destaca la necesidad de un tratamiento y preparación cuidadosa de la biomasa para asegurar resultados consistentes en aplicaciones prácticas. Finalmente, la clasificación del material según su módulo de elasticidad permite identificar su rigidez y flexibilidad relativa, información crucial para seleccionar el tipo adecuado de fibra de tifa según las necesidades específicas de cada aplicación en construcción.

4.7. Análisis ensayo de conductividad térmica en probetas

El cálculo del coeficiente de conductividad térmica en los 4 tipos de probetas, agrupadas por tamaño de partícula, se realizó en base a dos muestras por tipo. Para cada muestra, se registraron los valores de temperatura obtenidos mediante el equipo, con el fin de calcular su conductividad térmica en dos períodos de tiempo distintos. Este procedimiento permitió corroborar los valores por tipo de probeta y descartar posibles valores atípicos que pudieran indicar anomalías en el proceso de desarrollo de la probeta o errores experimentales durante el ensayo.

Las probetas con partículas de 0.2-0.5 mm registraron valores de conductividad térmica entre 0.0967-0.1066 W/m-k. Las de 0.5-1 mm, entre 0.0904-0.1095 W/m-k. Las de 1-5 mm, entre 0.0723-0.0849 W/m-k. Y las de tallo entero (4 cm), entre 0.0635-0.0660 W/m-k. En comparación con otros materiales como la lana mineral (0,042 W/m[°]K), la lana de vidrio (0,041 W/m[°]K) y el poliestireno expandido (0,038 W/m[°]K); la tifa presenta un coeficiente de conductividad térmica relativamente más alto. Sin embargo, es importante considerar que el espesor de la muestra de tifa en la que se calculó el coeficiente fue de 1.5 mm, mientras que la capa de los siguientes materiales tiene un espesor de 10 cm; el coeficiente de conductividad térmica del tablero de partículas de madera es de 0.13 W/m-k y el del corcho es de 0.049 W/m-k.

Las probetas con tamaño de partícula de 0.2-0.5 mm y 0.5-1 mm presentaron coeficientes de conductividad térmica similares, variando entre 0.0904 y 0.1066 W/m-k. Estas probetas, al tener las partículas más pequeñas, se compactaron en mayor medida durante su elaboración, eliminando una gran cantidad de espacios de aire atrapado en su interior, lo cual favorece una mayor conductividad térmica. Por otro lado, las probetas con tamaño de partícula de 1-5 mm permitieron una mayor cantidad de cámaras de aire en su estructura interna, reflejándose en valores de conductividad térmica que oscilaron entre 0.0723-0.0849 W/m-k. Las probetas de tallo entero presentaron los valores más eficientes en comparación con las otras, variando entre 0.0635-0.0660 W/m-k. Esto se debe a que la muestra tomada era prácticamente una capa de la estructura original del tallo de tifa, manteniendo su estructura interna inicial. En general, las probetas con fibra triturada de tifa exhibieron un mejor desempeño aislante a medida que el tamaño de partícula fue mayor, ya que esto impidió que las fibras se compactaran por completo, permitiendo atrapar aire en su interior.

Los resultados evidencian una clara relación inversamente proporcional entre la densidad de las probetas y su conductividad térmica. Las probetas con una densidad de 0.3224 g/cm³ presentaron una conductividad térmica de 0.1025 W/m-K, mientras que aquellas con densidades de 0.2854 g/cm³, 0.2889 g/cm³ y 0.2443 g/cm³ exhibieron conductividades térmicas de 0.1033 W/m-K, 0.0793 W/m-K y 0.0646 W/m-K, respectivamente. Esta tendencia se explica por la estructura porosa y la presencia de cámaras de aire en el interior de las probetas. Una mayor densidad implica una menor cantidad de espacios de aire atrapados en la estructura interna, lo que conduce a una mayor conductividad térmica y, consecuentemente, a un menor aislamiento térmico. Por otro lado, las probetas con densidades más bajas contienen una mayor cantidad de cámaras de aire, dificultando así la transferencia de calor y resultando en una conductividad térmica más baja y, por lo tanto, en un mejor aislamiento.

Tabla 19. Resumen de resultados de ensayo de conductividad térmica

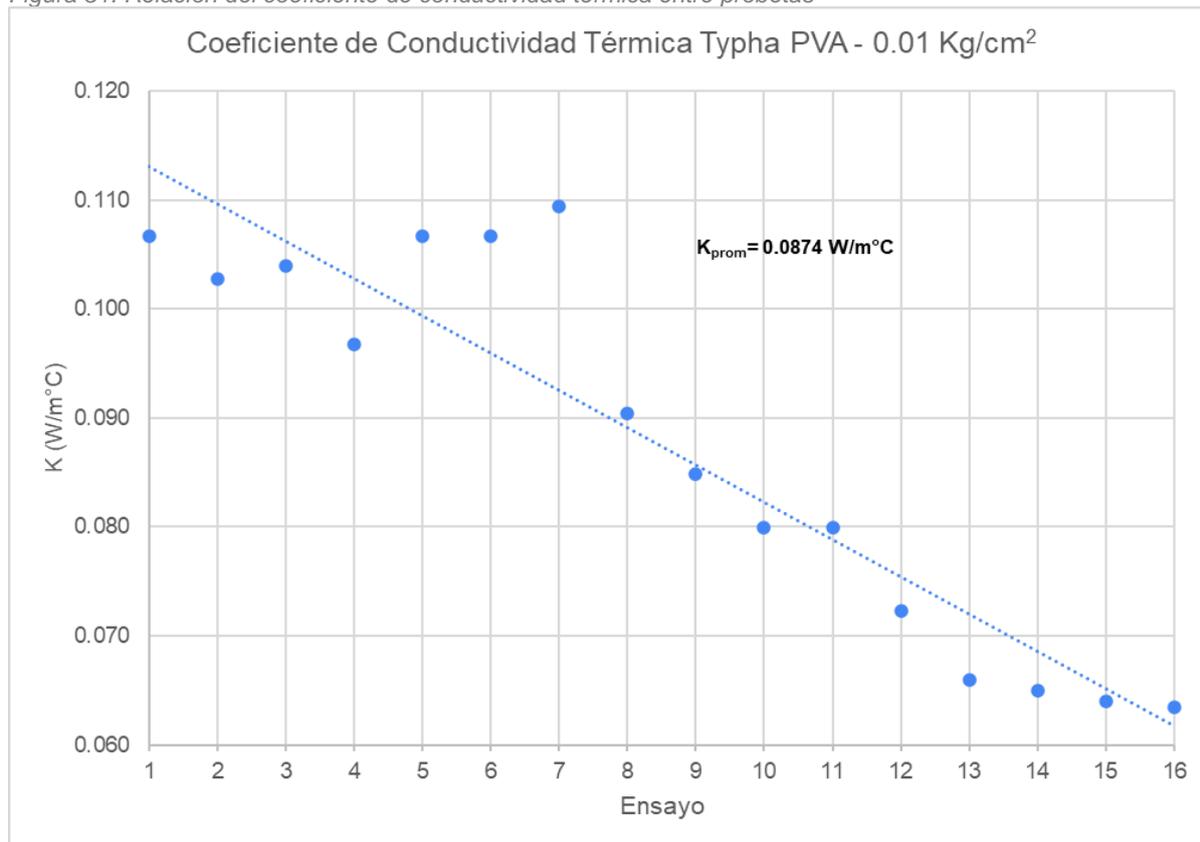
Tamaño	#	K [W/m-k]	ΔT [°C]	Desviación Estándar	K promedio probeta [W/m-k]	K promedio tamaño [W/m-k]	K promedio tifa [W/m-k]
0-0.5 mm	C01	0,1066	4,55	0,0042	0,1047	0,1025	0,0874
	C01	0,1027	4,3				
	C02	0,1040	4,5		0,1004		
	C02	0,0967	4,6				

	B01	0,1066	5,65			
0.5-1 mm	B01	0,1066	5,3	0,0087	0,1066	0,1033
	B02	0,1095	5,25			
	B02	0,0904	5,3		0,1000	
	A01	0,0849	5,2			
1-5 mm	A01	0,0800	5,25	0,0052	0,0825	0,0793
	A02	0,0800	5,6			
	A02	0,0723	5,65		0,0762	
	D01	0,0660	4,3			
Tallo entero	D01	0,0650	4,4	0,0011	0,0655	0,0646
	D02	0,0640	4,55			
	D02	0,0635	5,05		0,0638	

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 31 presenta la conductividad térmica en el eje vertical, expresada en $W/m^{\circ}C$, y los diferentes tipos de probetas de tifa en el eje horizontal. Cada punto representa el valor de conductividad térmica obtenido para una probeta específica, identificadas desde C01 (ensayo 1) hasta D02 (ensayo 16). Adicionalmente, se ha trazado una línea de tendencia que mejor se ajusta a los datos, permitiendo visualizar la relación general entre la conductividad térmica y las características de las probetas, como el tamaño de partícula o la densidad. Se puede observar que la línea de tendencia tiene una pendiente negativa, lo que indica que a medida que aumenta el tamaño de partícula, la conductividad térmica disminuye. Esta tendencia puede deberse a la diferencia en la cantidad de aire atrapado en cada tipo de probeta. Además, la línea de tendencia permite identificar probetas que se desvían significativamente de la tendencia general, como la B02 (ensayo 7), cuyo valor de conductividad térmica se encuentra por encima de la línea. Estas desviaciones podrían indicar la influencia de otros factores durante el desarrollo de las mismas.

Figura 31. Relación del coeficiente de conductividad térmica entre probetas



Fuente: Elaboración propia

El promedio del coeficiente de conductividad térmica de las probetas de tallo entero de tifa es de 0.0646, siendo este un valor relativamente alto en comparación con los materiales aislantes comúnmente utilizados. Por ejemplo, la lana de roca presenta un coeficiente entre 0.035 y 0.045 W/m·K, mientras que la lana de vidrio oscila entre 0.023 y 0.040 W/m·K. El coeficiente de conductividad de la Espuma de Poliestireno Expandido (EPS) varía de 0.032 a 0.040 W/m·K, y el poliuretano tiene un coeficiente de 0.028 W/m·K en proyección y 0.036 W/m·K en inyección. A diferencia de los materiales mencionados, la tifa se presenta en forma de panel, lo que le confiere la posibilidad de desempeñar una función estética como material de acabado en el diseño arquitectónico, siempre y cuando se le aplique un tratamiento final para evitar afecciones por humedad. En cambio, los otros materiales deben incorporarse en sistemas constructivos tipo sándwich.

4.8. Conclusiones

En conclusión, el presente estudio logró obtener las características de la biomasa de la *Typha Latifolia* y definir su potencialidad como material para la construcción de paneles termoaislantes. Mediante la caracterización de la fibra, se determinó que la tifa posee una baja conductividad térmica, con valores en el rango de 0.0646 y 0.1043 W/m·K, siendo las probetas de tifa de tallo entero (4 cm) las que exhibieron el mejor comportamiento como material aislante térmico, al presentar una conductividad térmica menor, que oscila entre 0.0640 y 0.076 W/m[°]K, en comparación con los otros tipos de probetas. Además, su baja densidad y capacidad de absorción de humedad contribuyen a mejorar sus propiedades aislantes.

Los resultados de conductividad térmica obtenidos de la tifa, en comparación con otras fibras naturales como la totora y la cabuya que oscilan entre 0,037 y 0,073 W/m[°]K y algunos materiales sintéticos convencionales como la lana de roca y la espuma de poliestireno expandido que varían de 0.032 a 0.045 W/m·K; demuestran que la tifa tiene una eficiencia ligeramente menor como aislante térmico para la construcción de paneles. No obstante, es importante destacar que, si bien su desempeño aislante es inferior al de algunos materiales sintéticos, su principal ventaja radica en su carácter renovable y reducida huella ambiental. En este sentido, la tifa emerge como una alternativa más sostenible para el sector de la construcción, ofreciendo una solución eco-amigable y viable para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones.

La conformación de un panel aislante a partir de tifa constituido por el tallo entero, siendo este el tamaño de partícula con mejor comportamiento aislante, debe contemplar una protección contra la humedad, ya que puede llegar a incrementar el peso del panel hasta un 8.78% en condiciones ambientales normales, es decir, sin la presencia saturada de humedad en el ambiente. Además, la absorción de humedad provocaría un aumento en el volumen del panel y luego, tras el proceso de secado, ocurriría una contracción, lo cual podría comprometer su integridad estructural y física. Sin embargo, el panel sería manejable y fácil de manipular, ya que presenta una baja densidad de 0.24 g/cm³.

El potencial de aplicación de la tifa en la construcción de paneles o elementos aislantes es prometedor, gracias a su abundante disponibilidad en el entorno y rápida renovabilidad, al estar presente en lagunas y reservas ubicadas en áreas rurales de la ciudad, así como su considerable facilidad de procesamiento. No obstante, se recomienda explorar tratamientos o combinaciones de la tifa con otros materiales para optimizar sus propiedades aislantes. Esta investigación contribuye significativamente al conocimiento en el área de materiales

aislantes sostenibles, abriendo camino al desarrollo de soluciones innovadoras basadas en fibras naturales.

4.9. Recomendaciones

El estudio de la biomasa de la tifa es una línea de investigación que impacta significativamente en la producción de materiales de construcción. Es fundamental establecer datos estandarizados sobre sus propiedades y potencialidades para optimizar su uso. Este enfoque convierte a la tifa en un eje de estudio central desde diversas disciplinas científicas, con el objetivo de perfeccionar los procesos de siembra y cosecha para obtener un producto de alta calidad. Al desarrollar un entendimiento profundo y detallado de la biomasa de la tifa, se pueden mejorar tanto las técnicas agrícolas como las aplicaciones industriales, contribuyendo así a la creación de materiales de construcción sostenibles y eficientes.

Dado que es un producto de fácil producción y ofrece altas prestaciones como material sustentable, su cultivo en los humedales de áreas rurales podría convertirse en una fuente económica significativa para personas de escasos recursos. Sin embargo, para aprovechar plenamente su potencial, sería necesario implementar programas de capacitación para la producción y manejo adecuado del material. Además, establecer un control de calidad riguroso garantiza que el producto final cumpla con los estándares necesarios para su comercialización. De este modo, no solo se generaría una fuente de ingresos sostenible para las comunidades locales, sino que también se promovería la conservación de los humedales y la adopción de prácticas agrícolas respetuosas con el medio ambiente. La combinación de capacitación y control de calidad es esencial para asegurar el éxito y la viabilidad a largo plazo de este emprendimiento, creando así un ciclo beneficioso tanto para las personas como para el entorno natural.

El coeficiente de transmitancia térmica de las probetas de tallo entero es muy bueno y competitivo, lo que las hace una opción atractiva para diversas aplicaciones. No obstante, se podría potenciar aún más su rendimiento mediante la experimentación con diferentes aglutinantes, proporciones y procedimientos de fabricación. Al explorar estas variables, es posible optimizar las propiedades térmicas y mecánicas de la biomasa, ampliando así sus usos potenciales y mejorando su eficiencia. Este enfoque no solo maximizará la capacidad de la biomasa, sino que también contribuiría a un desarrollo más sostenible y económico de materiales innovadores.

Al ser una biomasa susceptible de procesamiento técnico, se pueden aplicar datos estandarizados en la simulación energética. Su efectividad es competitiva en comparación

con materiales termoaislantes de alto contenido energético. Sin embargo, es esencial evaluar su potencial en términos de manipulación, producción y costos para determinar su viabilidad y adecuada inserción en el mercado.

Para la producción de probetas con propiedades térmicas, se utilizan partículas mayores a 0,2 mm para mantener espacios de aire y así preservar su capacidad de aislamiento. Sin embargo, el proceso de trituración genera un 45% de partículas menores a 0,2 mm, resultando en una cantidad excesiva de desperdicio. Por lo tanto, sería conveniente implementar otros mecanismos de trituración o investigar las potencialidades de estas partículas minúsculas para desarrollar nuevos bioproductos. De este modo, se podría reducir el desperdicio y aprovechar al máximo todos los subproductos generados, promoviendo una producción más eficiente y sostenible.

Si bien el estudio presenta ciertas limitaciones, se sugieren futuras investigaciones centradas en perfeccionar el procesamiento de elaboración del material para aprovechar al máximo el potencial de este material y su estructura porosa colmada por cámaras de aire. En conclusión, los resultados obtenidos resaltan la importancia de explorar la tifa como una alternativa sostenible para mejorar la eficiencia energética en la construcción y las condiciones de confort de la misma.

Referencias

- A. García Santos, "Aplicaciones constructivas de un material compuesto de escayola y fibras naturales de Typha Latifolia", *Materiales de Construcción*, vol. 54, nº 273, 2003.
- Aza Medina, L. C. (2016). *La totora como material de aislamiento térmico: Propiedades y potencialidades* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Bautista Gordillo, J. D., y Loaiza Elizalde, N. F. (2018). IMPACTOS DE LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE Y TRADICIONAL A NIVEL AMBIENTAL. *Boletín Semillas Ambientales*, 12(1), 16–25. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/view/13613>
- Baye, B., & Tesfaye, T. (2022). Characterization of a New Fiber from Cyperus Dichrostachus A. Rich Plant. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- Bixquert Ariño, F. J. (2014). Estudio de la vegetación en el humedal artificial Tancat de la Pipa y en el filtro verde V-30: determinación de la biomasa vegetal y su contenido nutritivo, evaluación de la velocidad de crecimiento y asimilación de nutrientes.
- *Building material from bulrush*. (n.d.). Land Der Ideen. <https://land-der-ideen.de/en/project/building-material-from-bulrush-541>
- Canto, A., Batista, M., Sanchez, J., Moreno, M., & James, A. (2018). Aislante térmico a base de materiales orgánicos. *Revista de iniciación Científica*, 4, 48-51.
- VIVERS CAREX. (2014). <http://www.carex.cat/es/vivers-carex/catalogo/typha-latifolia-.aspx>
- Carhuancho León, Fanny Mabel (2021). *Estudio del potencial de biomasa de distintas poblaciones de la especie Typha domingensis Pers. cultivadas en flotación*. Tesis (Doctoral), E.T.S. de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.69053>.
- Cirujano, S., y Morales Valverde, R. (1995). Plantas y cultura popular: La etnobotánica en España. Las espadañas y sus utilidades.
- Colbers, B., Cornelis, S., Geraets, E., Gutiérrez-Valdés, N., Tran, LM, Moreno-Giménez, E., & Ramírez-Gaona, M. (2017). *Un estudio de viabilidad sobre el uso de*

espadaña (*Typha spp.*) para la producción de materiales aislantes y bioadhesivos (Vol. 71). Wageningen: Universidad y centro de investigación de Wageningen.

- de la Mora, C. F. (2005). Macrófitas de interés en fitodepuración.
- Dobón Oliver, B. (2019). *Materiales de construcción reciclados y reutilizados para la arquitectura sostenible* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Franco, M. F., Medici, S. K., Okada, E., y Pérez, D. J. (2020). *Biorremediación de aguas contaminadas por actividades agropecuarias: uso de la planta acuática Typha spp.(tatora) como organismo fitorremediador*. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA.
- Georgiev, G., Krus, M., Loretz, C., & Theuerkorn, W. (2019). TYPHABOARD in the restoration of historic Black Sea houses in Bulgaria. *Sustainability*, 11(4), 1000.
- González Ramón, E. M. (2020). *Revalorización de la tatora como material de construcción* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Grace, J., & Harrison, J. (1986). The biology of canadian weeds: *Typha latifolia*, *Typha angustifolia* and *Typha xglauca*. *Canadian Journal of Plant Science*, 66(2), 361-379. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4141/cjps86-051>
- Hidalgo López, A. (2012). Valoración de residuos de biomasa en la industria de la construcción.
- Hidalgo, C., Montano, J., Sandoval, M.(2005).Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoría*, 14 (1). 17-25.
- Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(3), 371-376.
- Krus, M. (9 de diciembre de 2021). *Nuevo material de construcción resistente y aislante a base de espadaña (typha)*. Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. <https://www.ibp.fraunhofer.de/en/projects-references/building-material-cattail.html>
- Latina. *Ingeniería y Sociedad UC*, 10(1), 08-21.
- Luamkanchanaphan, T., Chotikaprakhan, S., & Jarusombati, S. (2012). A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-

leaved Cattail Fibers. *APCBEEES Procedia*, 1, 46–52.
<https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.009>

- Nufiez, D. R., y Castro, C. O. (1991). La Guia de Incafo de las Plantas Utiles y Venenosas de la Peninsula Iberica y Baleares.
- Maroto Melle, L. V. (2022). Habitar en climas extremos: adaptación de la arquitectura contra los efectos que supondrá el cambio climático.
- Martelo, J., y Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte, 8, 221–243
- MENÉNDEZ VALDERREY, Juan Luis. Typha latifolia. En asturnatura.com [en línea] Num. 87, 07/08/2006 [consultado el 5/4/2024]. Disponible en asturnatura.com. ISSN 1887-5068
- Moghaddam, MK, Safi, S., Hassanzadeh, S. y Mortazavi, SM (2016). Características de absorción acústica del no tejido sostenible de Typha/polipropileno punzonado. *La Revista del Instituto Textil*, 107 (2), 145-153.
- Molari, G., Milani, M., Toscano, A., Borin, M., Taglioli, G., Villani, G., & Zema, D. A. (2014). Energy characterisation of herbaceous biomasses irrigated with marginal waters. *biomass and bioenergy*, 70, 392-399.
- PALCANARIAS . (S.F.). Palcanarias Pinturas. [en línea] pp. 5-7 [Consulta: 8 Octubre 2016]. <http://www.palcanarias.com/producto/cola-blanca-adhesivo-para-madera-papel-carton/en>
- Padilla Caluña, A. P. (2017). *Diseño de un reactor para la fabricación de resinas vinílicas utilizadas en la elaboración de colas blancas en la Empresa Pintuglobal del cantón Mocha* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). pg 22.
- Plantas y Flores. (2019, August 13). *Typha latifolia. Origen, descripción, variedades, cultivo, cuidados y usos*. Plantas Y Flores. <https://plantasyflores.pro/typha-latifolia/>
- Roldan, L. V., Pérez, L. G., Amores, L. F., & Ibarra, A. (2015). Potencial de aprovechamiento de la biomasa vegetal como aislamiento en climas extremos del Ecuador. *Enfoque UTE*, 6(4), 23-41.

- S. Cirujano, CLXXV. Typhaceae, in Flora Iberica. Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares, Vol 18., Real Jardín Botánico, CSIC., (2007), pp. 259–266.
- Salas-Ruiz, A., & Barbero-Barrera, (2018) M. M. IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS CON FIBRAS VEGETALES QUE SEAN SOSTENIBLES EN CONTEXTOS DE PRECARIEDAD.
- Salcedo Recalde, E. L. (2019). *Evaluación de concentración de plomo y cromo en poblaciones de typha latifolia en la laguna de Yahuarcocha* (Bachelor's thesis).
- Smith, G. (1967). Experimental and Natural Hybrids in North American Typha (Typhaceae). *The American Midland Naturalist*, 78(2), 257-287. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2485231>
- Tejada González, J. C. (2010). Diseño de un humedal para la remoción de cd, as y cr con plantas de typha latifolia (Espadaña). *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*.
- *Using cattails for insulation*. (2013, 2 mayo). Fraunhofer-Gesellschaft. <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2013/may/using-cattails-for-insulation.html>
- Velasco, L., Goyos, L., Nicolas, F., & Naranjo, C. (2015). Investigación y desarrollo de aislantes térmicos naturales basados en residuos de biomasa para su aplicación en la mejora de la eficiencia energética de las edificaciones en América Latina. *Ingeniería y Sociedad UC*, 10(1), 08-21.
- Vincent, D. (1962). *US3063125A - Método de fabricación de material aislante térmico a partir de fibras de espadaña* - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US3063125A/en>
- Wuzella, G., Mahendran, AR, Bätge, T., Jury, S. y Kandelbauer, A. (2011). Nuevos compuestos reforzados con fibra, sin aglutinantes, basados en un recurso renovable de la planta parecida a la caña Typha sp. *Cultivos y Productos Industriales*, 33 (3), 683-689.

Anexos

Tabla 20. Valores registrados de humedad absorbida por probetas en un periodo de 7 días

# de muestra	Tamaño de partícula	Peso 1er día [g]	Peso 2do día [g]	Peso 3er día [g]	Peso 4to día [g]	Peso 5to día [g]	Peso 6to día [g]	Peso 7mo día [g]	Cantidad media de masa adicional [g]
		HR = 96,9 %	HR = 85,7 %	HR = 58,4 %	HR = 70,9 %	HR = 56,8 %	HR = 63 %	HR = 63,7 %	HR prom = 70,8%
		temp = 21,3 °C	temp = 19,9 °C	temp = 19,6 °C	temp = 20,1 °C	temp = 20 °C	temp = 19,9°C	temp = 20°C	temp prom = 20,1°C
A1	0,2-0,5 mm	20,6	22,4	22,4	22,4	22,4	22,5	22,5	0,12
A2	0,2-0,5 mm	20,3	21,9	22	22	22	22,1	22,1	0,12
A3	0,2-0,5 mm	21,6	23,2	23,3	23,3	23,3	23,5	23,5	0,14
A4	0,2-0,5 mm	20,6	22,1	22,3	22,3	22,3	22,5	22,4	0,13
A5	0,2-0,5 mm	20,9	22,4	22,5	22,5	22,5	22,7	22,7	0,13
A6	0,2-0,5 mm	20	21,5	21,6	21,6	21,6	21,7	21,7	0,12
B1	0,5-1mm	17,2	18,4	18,6	18,6	18,7	18,8	18,8	0,13
B2	0,5-1mm	16	17,3	17,3	17,4	17,4	17,5	17,5	0,11
B3	0,5-1mm	16,9	18,2	18,3	18,3	18,3	18,4	18,4	0,11
B4	0,5-1mm	17,2	18,4	18,5	18,5	18,5	18,6	18,6	0,10
B5	0,5-1mm	17,8	19	19,1	19,2	19,2	19,3	19,3	0,12
B6	0,5-1mm	16,1	17,3	17,5	17,5	17,5	17,5	17,6	0,12
C1	1-5mm	17,8	19	19,1	19,2	19,2	19,3	19,3	0,12
C2	1-5 mm	18,4	19,8	19,9	19,9	19,9	20	20	0,11
C3	1-5 mm	19	20,8	20,7	20,7	20,7	20,9	20,8	0,10
C4	1-5 mm	18,1	19,4	19,5	19,5	19,5	19,6	19,6	0,11
C5	1-5 mm	17,6	18,9	19	18,9	19	19,1	19,1	0,11
C6	1-5 mm	16,4	17,7	17,7	17,7	17,8	17,8	17,8	0,09
D1	4cm	15,8	16	17,2	16,1	17,2	16,2	16,2	0,04
D2	4cm	14,9	18,2	16,1	18,3	16	18,4	18,4	0,22
D3	4cm	17	17,6	18,3	17,7	18,4	17,9	18	0,10
D4	4cm	16,4	16,1	17,7	16,3	17,8	16,4	16,4	0,03
D5	4cm	15,1	17,2	16,3	17,2	16,3	17,4	17,4	0,15
D6	4cm	16,1	17,1	17,2	17,2	17,3	17,3	17,3	0,09
E1	polvo + 0,5-1mm	18	19,4	19,6	19,7	19,7	19,8	19,8	0,14

E2	polvo + 1-5 mm	15,5	16,7	18,7	16,7	16,8	16,8	16,9	0,10
----	-------------------	------	------	------	------	------	------	------	------

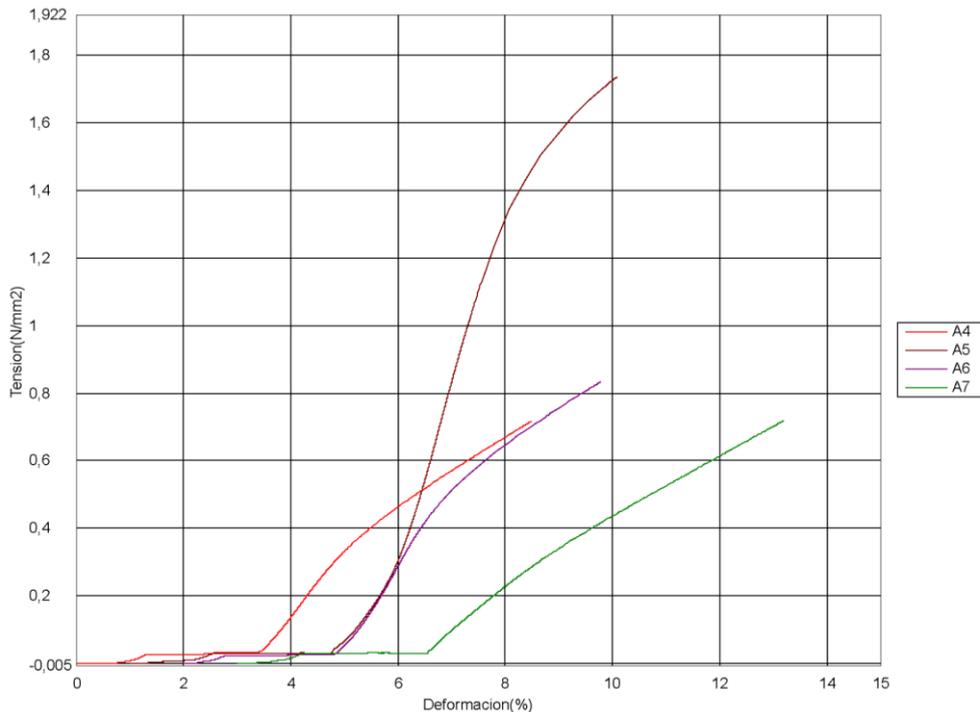
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Valores de masa adicional absorbida por día en probetas

# de muestra	Tamaño de partícula	dif. 2do día [g]	dif. 3er día [g]	dif. 4to día [g]	dif. 5to día [g]	dif. 6to día [g]	dif. 7mo día [g]	Prom. masa adicional día [g]
A1	0,2-0,5 mm	0,60	0	0	0	0,1	0	0,12
A2	0,2-0,5 mm	0,53	0,1	0	0	0,1	0	0,12
A3	0,2-0,5 mm	0,53	0,1	0	0	0,2	0	0,14
A4	0,2-0,5 mm	0,50	0,2	0	0	0,2	-0,1	0,13
A5	0,2-0,5 mm	0,50	0,1	0	0	0,2	0	0,13
A6	0,2-0,5 mm	0,50	0,1	0	0	0,1	0	0,12
B1	0,5-1mm	0,40	0,2	0	0,1	0,1	0	0,13
B2	0,5-1mm	0,43	0	0,1	0	0,1	0	0,11
B3	0,5-1mm	0,43	0,1	0	0	0,1	0	0,11
B4	0,5-1mm	0,40	0,1	0	0	0,1	0	0,10
B5	0,5-1mm	0,40	0,1	0,1	0	0,1	0	0,12
B6	0,5-1mm	0,40	0,2	0	0	0	0,1	0,12
C1	1-5 mm	0,40	0,1	0,1	0	0,1	0	0,12
C2	1-5 mm	0,47	0,1	0	0	0,1	0	0,11
C3	1-5 mm	0,60	-0,1	0	0	0,2	-0,1	0,10
C4	1-5 mm	0,43	0,1	0	0	0,1	0	0,11
C5	1-5 mm	0,43	0,1	-0,1	0,1	0,1	0	0,11
C6	1-5 mm	0,43	0	0	0,1	0	0	0,09
D1	4cm	0,07	1,2	-1,1	1,1	-1	0	0,04
D2	4cm	1,10	-2,1	2,2	-2,3	2,4	0	0,22
D3	4cm	0,20	0,7	-0,6	0,7	-0,5	0,1	0,10
D4	4cm	-0,10	1,60	-1,40	1,50	-1,40	0,00	0,03
D5	4cm	0,70	-0,9	0,9	-0,9	1,1	0	0,15
D6	4cm	0,33	0,10	0,00	0,10	0,00	0,00	0,09
E1	polvo + 0,5-1mm	0,47	0,2	0,1	0	0,1	0	0,14
E2	polvo + 1-5 mm	0,40	2,00	-2,00	0,10	0,00	0,10	0,10

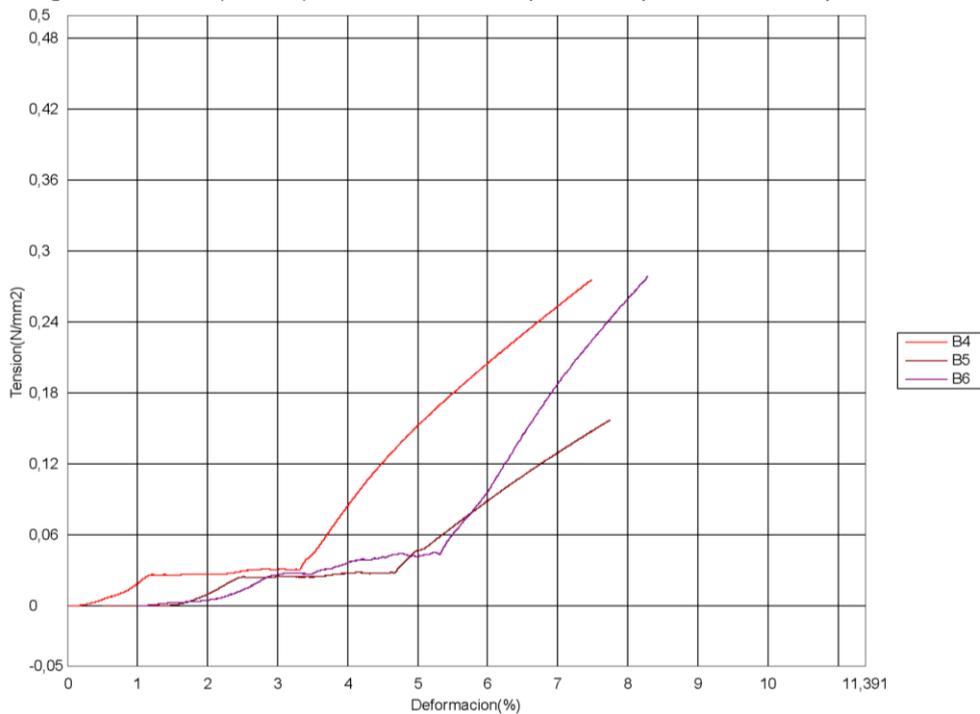
Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo A, tamaño de partícula 0.2-0.5 mm



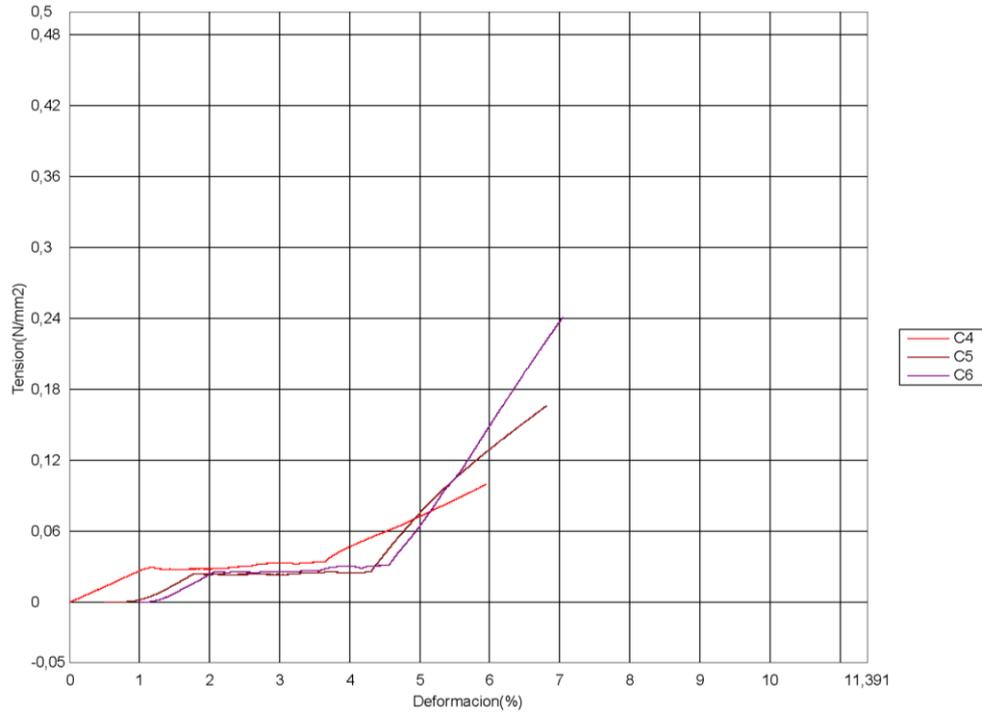
Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo B, tamaño de partícula 0.5-1 mm



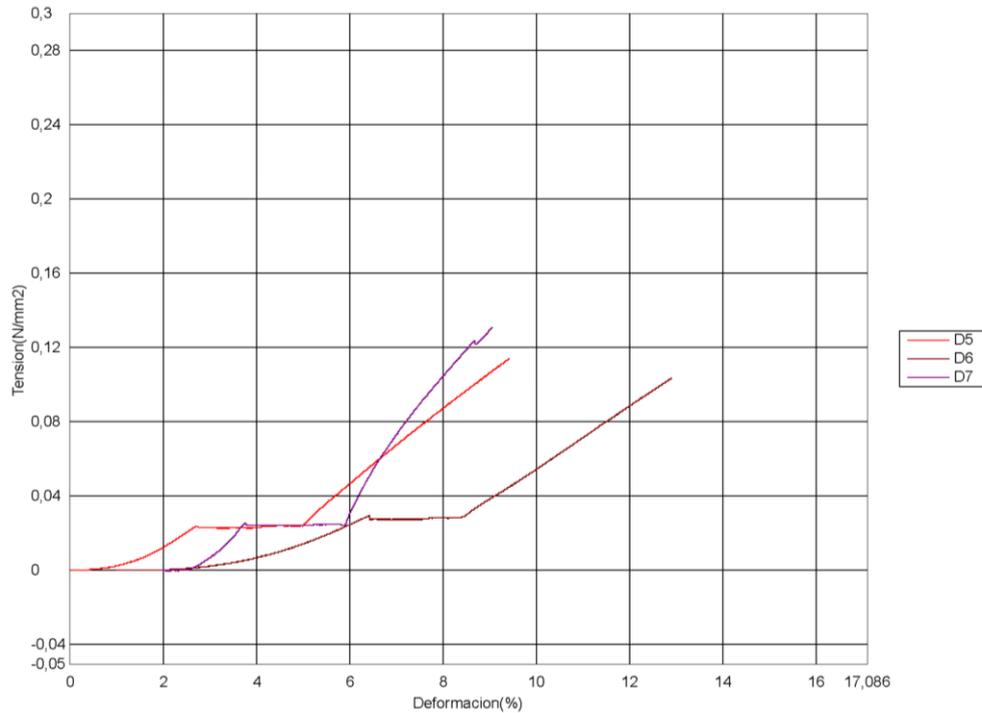
Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo C, tamaño de partícula 1-5 mm



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Diagrama esfuerzo(tensión)-deformación de las probetas tipo D, tamaño de partícula 4 cm



Fuente: Elaboración propia