

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con
adición de fibras de stipa ichu y lana de alpaca**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autores:

Yefri Waldo Ortiz Mamani
Yaneth Ross Sarmiento Copaja

Asesor:

Msc. Ecler Mamani Chambi

Juliaca, Setiembre de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Ecler Mamani Chmbi, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con adición de fibras de stipa ichu y lana de alpaca”** de los autores Yefri Waldo Ortiz Mamani y Yaneth Ross Sarmiento Copaja tiene un índice de similitud de 15 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 06 días del mes de octubre del año 2026.



Msc. Ecler Mamani Chambi

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 24 día(s) del mes de septiembre del año 2024, siendo las 9:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing Ferrer Sanaya Rojas

el (la) secretario(a): Mg Herison Duberly

Pari Luisi

y los demás miembros: Mg Maribel Sanomamani Gali

y el (la) asesor(a) Msc. Ecker Mamani Chambi

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con adición de fibras de stipa ichu y lana de alpacas

del(los) bachiller/es: a) Yefri Waldo Ortiz Mamani

b) Yaneth Ross Armiento Lopez

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Yefri Waldo Ortiz Mamani

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literar	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Yaneth Ross Armiento Lopez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literar	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literar	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

(Firma)

Presidente/a

(Firma)

Asesor/a

(Firma)

Bachiller (a)

(Firma)

Miembro

(Firma)

Bachiller (b)

(Firma)

Secretario/a

Miembro

Bachiller (c)

INDICE

1.	RESUMEN.....	5
2.	INTRODUCCIÓN.....	6
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
3.1.	Materiales y preparación de muestras	7
3.2.	Diseño experimental	8
3.3.	Ensayo de densidad aparente	8
3.4.	Ensayo de absorción superficial.....	8
3.5.	Ensayo de absorción sumergida.....	9
3.6.	Ensayo de aislamiento directo al ruido aéreo.....	10
3.7.	Ensayo de conductividad térmica	10
3.8.	Ensayo de resistencia a la flexión	11
3.9.	Ensayo de dureza superficial.....	11
3.10.	Procesamiento estadístico	12
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
4.1.	Verificación de supuestos paramétricos.....	12
4.2.	Conductividad térmica.....	13
4.3.	Aislamiento acústico	15
4.4.	Absorción superficial — cara.....	16
4.5.	Absorción superficial — dorso.....	17
4.6.	Absorción sumergida	19
4.7.	Resistencia a la flexión.....	20
4.8.	Dureza superficial	22
4.9.	Densidad aparente.....	23
4.10.	Síntesis del tamaño del efecto y diagnóstico de supuestos	24
5.	CONCLUSIONES	25
6.	ALCANCE, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS	26
7.	AGRADECIMIENTOS	27
8.	REFERENCIAS	27
9.	ANEXOS SEGÚN ESTRUCTURA DE TESIS EN FORMATO ARTÍCULO:	29
	Anexo 1: Evidencia de sumisión del artículo.....	29
	Anexo 2: Resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo	30

Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con adición de fibras de stipa ichu y lana de alpaca

Yefri Waldo Ortiz Mamani

Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú yefri.ortiz@upeu.edu.pe

Yaneth Ross Sarmiento Copaja

Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú yaneth.ross@upeu.edu.pe

1. RESUMEN

Las regiones altoandinas del Perú enfrentan condiciones climáticas extremas que limitan significativamente la habitabilidad de las viviendas, lo que demanda el desarrollo de materiales constructivos alternativos frente a estas condiciones. La presente investigación evaluó las propiedades físicas de placas de yeso reforzadas con fibras de Stipa ichu y lana de alpaca, mediante ensayos según la NTP 334.185:2015. Los datos fueron analizados con ANOVA de dos vías, pruebas post hoc de Tukey y Dunnett, análisis de efectos simples y tamaño del efecto (η^2 y d de Cohen).

Los resultados evidencian que la conductividad térmica se redujo significativamente en las nueve combinaciones frente al control de $0.315 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, con disminuciones que alcanzaron hasta el -78.16% , acompañadas de una interacción altamente significativa entre el contenido y la proporción de fibras. La absorción sumergida disminuyó entre un 15.9% y un 27.3% entre las combinaciones, y la absorción superficial - cara, se ha detectado reducciones significativas frente al control en siete de las nueve combinaciones, entre 15.9% y un 27.3% . La resistencia a la flexión aumentó sistemáticamente con el contenido de fibra, alcanzando un incremento máximo del $+19.3\%$ en la combinación $12\%-75/25$, mientras que el aislamiento acústico no mostró diferencias significativas frente al control en ninguna de las formulaciones ensayadas, en cuanto a la dureza superficial siete de las nueve combinaciones presentan huellas significativamente mayores que el control.

En conjunto, la combinación de 8% de fibra total con 25% de Stipa ichu y 75% de lana de alpaca ofrece el mejor equilibrio global entre desempeño térmico, mecánico, hidrófugo y densidad normativa dentro de las condiciones de laboratorio evaluadas, posicionándose como una alternativa técnicamente viable y ambientalmente coherente para mejorar la habitabilidad de las viviendas altoandinas a partir de recursos plenamente locales.

Palabras Clave. *placas de yeso, fibras naturales, stipa ichu, lana de alpaca.*

2. INTRODUCCIÓN

Las comunidades rurales de las regiones altoandinas del sur del Perú enfrentan condiciones climáticas que representan uno de los mayores desafíos para la habitabilidad de sus viviendas. Entre los 3500 y 5000 m s. n. m., las temperaturas nocturnas descienden habitualmente por debajo de 0 °C y pueden alcanzar valores cercanos a -15 °C durante la temporada de heladas, comprendida entre los meses de mayo y julio [1]. Estas condiciones incrementan la incidencia de enfermedades respiratorias tanto en la población como en el ganado, situación que se agrava por las deficientes condiciones térmicas de las viviendas utilizadas como refugio [2]. En el altiplano puneño, una proporción importante de la población desarrolla actividades vinculadas a la crianza extensiva de alpacas y otros camélidos sudamericanos, lo que obliga a numerosas familias a permanecer durante largos periodos en asentamientos rurales dispersos, habitando refugios artesanales conocidos como cabañas. Estas construcciones, elaboradas principalmente con materiales disponibles en el entorno inmediato, presentan escasas condiciones de aislamiento térmico, confort y durabilidad [1]. Esta problemática es especialmente evidente en comunidades como las del distrito de Crucero (provincia de Carabaya, 4190 m s. n. m.), cuyos elevados índices de pobreza limitan el acceso a materiales de construcción convencionales con adecuadas prestaciones térmicas y acústicas [2]. En consecuencia, la combinación de condiciones climáticas extremas, vulnerabilidad socioeconómica y limitada disponibilidad de soluciones constructivas adecuadas evidencia la necesidad de desarrollar materiales sostenibles que aprovechen recursos naturales locales y respondan a las condiciones particulares del contexto altoandino.

En las últimas décadas, el empleo de fibras naturales y materiales reciclados como refuerzo de matrices de yeso ha despertado un creciente interés debido a su potencial para mejorar simultáneamente las propiedades mecánicas, térmicas y ambientales de este material. Diversos estudios coinciden en que la incorporación de fibras modifica favorablemente el comportamiento del yeso, aunque la magnitud de dicha mejora depende de factores como la naturaleza de la fibra, su tratamiento superficial, la geometría y el porcentaje de incorporación.

Desde el punto de vista mecánico, Castillo-Rodríguez et al. reportaron incrementos de 5.9 % en la resistencia a flexión y de 11 % en compresión, además de una reducción de 26 % en la absorción de agua mediante la incorporación de fibras de algodón reciclado [3]. Resultados similares fueron obtenidos por Balti et al., quienes alcanzaron una resistencia a flexión de 2.45 MPa utilizando fibras de papel reciclado optimizadas mediante metodología de superficies de respuesta [5]. Asimismo, Sun et al. documentaron incrementos de hasta 56 % en la resistencia a flexión al emplear fibras de cáñamo sometidas a tratamiento superficial [9], mientras que Karua e Islam observaron una mejora significativa en el mecanismo de falla de compuestos de yeso con perlita expandida reforzados con fibras de yute [6]. En conjunto, estos estudios evidencian que las fibras naturales pueden actuar como elementos de puenteo de fisuras, incrementando la capacidad de absorción de energía y retrasando la propagación de grietas.

Sin embargo, la literatura también demuestra que los beneficios mecánicos no aumentan indefinidamente con el contenido de fibra. Nafis et al. determinaron que un contenido de 6 % de fibra de yute constituye el valor óptimo para maximizar la resistencia a tracción, observándose pérdidas de desempeño para dosificaciones superiores debido a la aglomeración de fibras y al incremento de vacíos dentro de la matriz [8]. De manera complementaria, Alyousef et al. documentaron reducciones de hasta 26 % en la densidad de las placas mediante la incorporación de fibras recicladas de polipropileno [7], mientras que Oliver-Ramírez consiguió incrementar hasta cinco veces la capacidad de almacenamiento térmico combinando fibras de polipropileno con materiales de cambio de fase [4]. Estos resultados evidencian que la optimización de los compuestos reforzados requiere alcanzar un equilibrio entre las propiedades mecánicas, físicas y funcionales del material.

Además del comportamiento estructural, numerosos investigadores han demostrado que las fibras naturales ejercen una influencia significativa sobre las propiedades térmicas y acústicas de las placas de yeso. Romero-Gómez et al. redujeron la conductividad térmica hasta en 16 % mediante la incorporación de fibras de acetato de celulosa [11], mientras que Guna et al. desarrollaron placas reforzadas con lana de oveja y fibra de coco que presentaron mejoras simultáneas en el aislamiento acústico y la resistencia mecánica, aunque con una reducción de la capacidad térmica [10]. Este compromiso entre diferentes propiedades funcionales también fue documentado por Dénes et al., quienes caracterizaron materiales aislantes elaborados a partir de lana de oveja para aplicaciones en edificación [29]. En el contexto peruano, Charca et al. identificaron a la Stipa ichu como un aislante térmico natural de elevado desempeño y bajo costo, destacando su abundancia y disponibilidad en las regiones altoandinas, lo que la convierte en un recurso con alto potencial para aplicaciones constructivas sostenibles [12]. Los mecanismos responsables de estas mejoras han sido ampliamente estudiados desde el punto de vista microestructural. Naik et al. demostraron que la interfaz entre las fibras naturales y la matriz cementicia falla predominantemente mediante

mecanismos de extracción (pull-out) y deslizamiento interfacial, en lugar de rotura frágil de las fibras, favoreciendo una disipación progresiva de energía y una mayor tenacidad del compuesto [13]. Por otra parte, Braniša et al. documentaron que la lanolina presente en la superficie de la lana de oveja proporciona un comportamiento naturalmente hidrofóbico, característica que podría extenderse a otras fibras proteicas de origen animal, como la lana de alpaca [14]. Estos mecanismos sugieren que la combinación de fibras vegetales y animales podría generar efectos complementarios sobre el desempeño físico y mecánico del yeso.

A pesar del considerable avance alcanzado en el desarrollo de placas de yeso reforzadas con fibras naturales, la revisión de la literatura evidencia dos limitaciones relevantes. En primer lugar, la mayoría de las investigaciones evalúan fibras vegetales o animales de manera independiente, existiendo escasos estudios orientados al empleo conjunto de ambas como sistemas híbridos de refuerzo. En segundo lugar, no se identificaron investigaciones que analicen específicamente la combinación de Stipa ichu y lana de alpaca en matrices de yeso bajo los procedimientos de ensayo establecidos por la NTP 334.185:2015. Esta ausencia representa un vacío científico importante, ya que ambos materiales son abundantes en el altiplano peruano, poseen características físicas potencialmente complementarias y podrían constituir una alternativa sostenible para mejorar el desempeño de materiales destinados a viviendas rurales expuestas a condiciones climáticas extremas.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de la incorporación conjunta de fibras de Stipa ichu y lana de alpaca sobre las propiedades físicas de placas de yeso fabricadas conforme a la NTP 334.185:2015. Específicamente, se determinan la conductividad térmica, el aislamiento directo al ruido, la absorción de agua superficial y sumergido, la resistencia a la flexión y la dureza superficial de placas elaboradas con diferentes proporciones de ambas fibras, comparando su desempeño con el de placas convencionales sin refuerzo. Se plantea la hipótesis de que la acción complementaria de la fibra vegetal y la fibra animal permitirá mejorar significativamente el comportamiento térmico e higroscópico del material sin comprometer las propiedades mecánicas exigidas por la normativa. De esta manera, la investigación aporta evidencia experimental sobre el desarrollo de un material compuesto basado en recursos naturales del altiplano peruano, con potencial para incrementar el confort habitacional de viviendas rurales, fortalecer el aprovechamiento de la cadena productiva alpaquera y contribuir al desarrollo de soluciones constructivas sostenibles alineadas con los principios de la economía circular y el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y preparación de muestras

Para la fabricación de las placas se utilizaron fibras de Stipa ichu (paja brava) y lana de alpaca, recolectadas en la Comunidad Campesina de Anansaya, distrito de Crucero, provincia de Carabaya, departamento de Puno. Las fibras de stipa ichu tras su recolección fue sometido a un proceso de selección manual, retirando material extraño y aquellas fibras que presentaban condiciones inadecuadas para su incorporación a la matriz de yeso. Posteriormente, las fibras seleccionadas fueron oreadas y expuestas al sol para favorecer su secado, y luego fueron cortadas manualmente hasta obtener longitudes aproximadas de 20 ± 5 mm, buscando uniformizar las dimensiones de la fibra antes de su incorporación en las diferentes dosificaciones experimentales. En el caso de la lana de alpaca, esta fue previamente humedecida mediante un baño en agua con yeso y posteriormente extendida hasta conformar un manto de dimensiones equivalentes al largo y ancho de la placa, con la finalidad de disponer la fibra de manera uniforme dentro de la matriz y mantener la configuración de capas establecida para las probetas. El yeso proviene de los depósitos evaporíticos de la Formación Muni, en las canteras del distrito de Samán, provincia de Azángaro, Puno, calcinado en hornos a temperaturas entre 120 y 160 °C hasta obtener yeso hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) con pureza superior al 95 %.

Se elaboraron placas con contenidos de fibra de 4 %, 8 % y 12 % respecto al peso del yeso, en proporciones 75/25, 50/50 y 25/75 (Stipa ichu / lana de alpaca), además de un grupo control sin fibras, siguiendo los antecedentes de Nafis et al. [8] y Guna et al. [10]. Se elaboraron 100 placas de 1200 mm × 600 mm × 20 mm (10 unidades por combinación) en moldes de triplay fenólico, con relación agua/yeso de 1.25, ajustada empíricamente respecto a la relación de 0.48 planteada inicialmente en el perfil de investigación, que resultó inadecuada por un fraguado demasiado acelerado. El fraguado se realizó en ambiente ventilado, sin exposición solar directa; las probetas se extrajeron conforme a la NTP 334.185:2015 [15] y la NTP 339.051:2016 [16]. La Figura 1 resume la secuencia completa del proceso, desde la recolección de las fibras hasta la extracción de las probetas de ensayo.

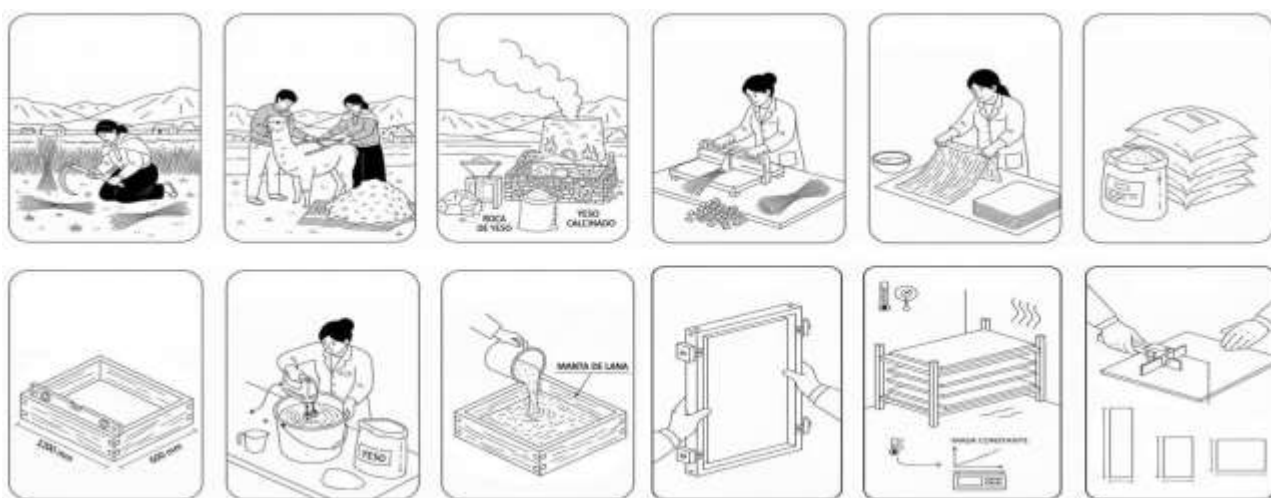


Figura 1: Proceso de preparación de placas y extracción de muestras Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diseño experimental

Se implementó un diseño factorial completamente aleatorizado de 3×3 con control independiente. El Factor A (contenido total de fibra) comprendió tres niveles (4 %, 8 % y 12 %) y el Factor B (proporción Stipa ichu / lana de alpaca) incluyó tres relaciones básicas (75/25, 50/50 y 25/75). Adicionalmente se incorporó un grupo control con 0 % de fibra. Para cada una de las nueve combinaciones reforzadas y para el control se ensayaron cinco réplicas independientes ($n = 5$), lo que arroja 50 unidades experimentales por cada propiedad evaluada. Este diseño balanceado garantiza la ortogonalidad de los efectos estimados y proporciona potencia adecuada para detectar efectos de magnitud moderada a grande con un nivel de significancia $\alpha = 0.10$.

3.3. Ensayo de densidad aparente

Comprender la homogeneidad de la distribución de las fibras es un aspecto fundamental para analizar la calidad del compuesto y la influencia del refuerzo en su estructura interna. Este ensayo se realizó conforme a la NTP 334.185:2015 [15], sobre 50 probetas de 400 mm $\times$ 300 mm (5 por combinación), calculando la densidad aparente como el cociente entre la masa y el volumen de cada probeta, expresado en kg/m³, según se ilustra en la Figura 2.



Figura 2: (a) Medición de dimensiones de probeta y (b) Medición de peso de probetas. Fuente: Elaboración propia.

En una vivienda temporal altoandina esta propiedad incide directamente en el peso que las familias deben transportar y manipular durante el montaje del refugio: una densidad menor facilita el traslado hacia zonas de difícil acceso, mientras que una densidad mayor aporta inercia térmica adicional al cerramiento.

3.4. Ensayo de absorción superficial

Este ensayo, realizado conforme a la NTP 334.185:2015 [15], cuantifica el agua absorbida por unidad de área durante una exposición corta, un escenario habitual frente a salpicaduras o humedad ambiental. Se extrajeron dos probetas de 125 mm × 125 mm por placa, una por la cara y otra por el dorso, empleando una balanza con precisión de 0.5 g, un cronómetro con exactitud de 1 minuto y un contenedor circular de 100 cm² de área y 50 mm de altura mínima. Se registró el peso seco de cada probeta hasta masa constante; luego se acopló el contenedor circular sobre la superficie expuesta para retener una columna de agua de 25 mm de altura durante dos horas, tal como muestra la Figura 3; finalmente se retiró el excedente, se secó la humedad superficial con papel absorbente y se registró la masa húmeda. La absorción superficial se determinó como la diferencia entre la masa húmeda y la seca, expresada en g/m². En las viviendas altoandinas, donde la humedad ambiental y las salpicaduras de lluvia inciden sobre los paramentos interiores, una menor absorción superficial se traduce en un deterioro más lento del material y menor riesgo de humedad persistente.



Figura 3: (a) Elaboración de probetas y (b) Medición de tasa de absorción superficial de probeta. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Ensayo de absorción sumergida

Este ensayo, realizado conforme a la NTP 334.185:2015 [15], evalúa el comportamiento higroscópico de las placas frente a una exposición prolongada al agua, un escenario crítico ante lluvias intensas o filtraciones.



Figura 4: (a) Probetas sumergidas totalmente durante 2 horas y (b) Registro de peso húmedo de probetas. Fuente: Elaboración propia.

Para el presente estudio se extrajeron probetas de 300 mm × 300 mm, garantizando una distancia mínima de 150 mm respecto a los bordes de la placa original. Se registró la masa seca inicial, se sumergieron las probetas por completo durante dos horas y, tras retirar el exceso de agua superficial, se registró la masa húmeda, según el procedimiento documentado en la Figura 4. La absorción por inmersión se calculó como el incremento porcentual de la masa respecto a la masa seca, expresado en porcentaje. Se utilizó una balanza con precisión de 0.5 g, un cronómetro con exactitud de 1 minuto y un

recipiente con las dimensiones necesarias para asegurar la inmersión total. Durante la temporada de lluvias del altiplano (diciembre a marzo) las cubiertas rurales sufren filtraciones con frecuencia; una placa con menor absorción por inmersión conserva mejor su integridad y su desempeño térmico.

3.6. Ensayo de aislamiento directo al ruido aéreo

El ensayo se llevó a cabo empleando una caja acústica hermética de doble cámara (emisora y receptora) conectadas a través de una ventana central donde se alojó la placa de yeso, tal como se aprecia en la Figura 5. Este montaje constituye una versión a escala reducida del sistema estandarizado descrito en la norma ISO 10140 [17] para la medición en laboratorio del aislamiento al ruido aéreo de elementos constructivos, y cumple con los requisitos establecidos en dicha norma, así como con los lineamientos de su equivalente americana ASTM E90 [18]. El procedimiento comenzó con una fase de calibración destinada a determinar el factor de corrección de la caja: se registró el nivel de presión sonora generado por ruido rosa, primero en la cámara emisora y luego en la receptora, sin el espécimen instalado. A continuación, se colocó la probeta de 300 mm × 300 mm en la ventana de conexión y se tomaron lecturas en el recinto receptor cada 10 segundos durante un minuto. El aislamiento acústico (dB) se determinó a partir de la diferencia entre los niveles medios de presión sonora de ambas cámaras, corregidos con el factor de la caja. Aunque el aislamiento acústico depende principalmente del sistema constructivo en su conjunto y no únicamente del material [15], esta evaluación proporciona una referencia directa sobre la influencia de las fibras en el comportamiento acústico del compuesto. En el altiplano, donde el viento fuerte y constante genera un ruido aéreo persistente sobre cubiertas y paramentos, la atenuación acústica contribuye al confort y al descanso de las familias.



Figura 5: (a) Medición de ruido en punto emisor y (b) Colocado de muestra entre cámaras. Fuente: Elaboración propia.

3.7. Ensayo de conductividad térmica

La conductividad térmica determina de forma directa la capacidad de un cerramiento para limitar las pérdidas de calor hacia el exterior durante la temporada de heladas, por lo que es la propiedad más estrechamente ligada a la habitabilidad térmica de las viviendas altoandinas. El procedimiento experimental se fundamentó en los principios de transferencia de calor y medición de propiedades térmicas establecidos en las normas ASTM C177 (método de la placa caliente resguardada) [19] y ASTM C518 (método del medidor de flujo de calor) [20]. Se empleó un sistema de adquisición de datos FluxDAQ+ con registros cada 0.676 s y termopares tipo T colocados en ambas caras de una probeta de 100 mm × 100 mm, según el montaje mostrado en la Figura 6, así mismo durante la ejecución de los ensayos no se realizó un control ni registro sistemático de la temperatura y humedad relativa del ambiente del laboratorio, dado que el estudio tuvo un enfoque comparativo y no de caracterización termo-higrométrica, por lo que estas variables no fueron consideradas como factores experimentales dentro del análisis. No obstante, antes de la realización del ensayo, las probetas se verificó alcanzar condición de masa constante, garantizando que las muestras se encontraran secas y en condiciones comparables de humedad al momento de la evaluación. La conductividad se determinó conforme a la ley de Fourier y se expresó en W/m·K.

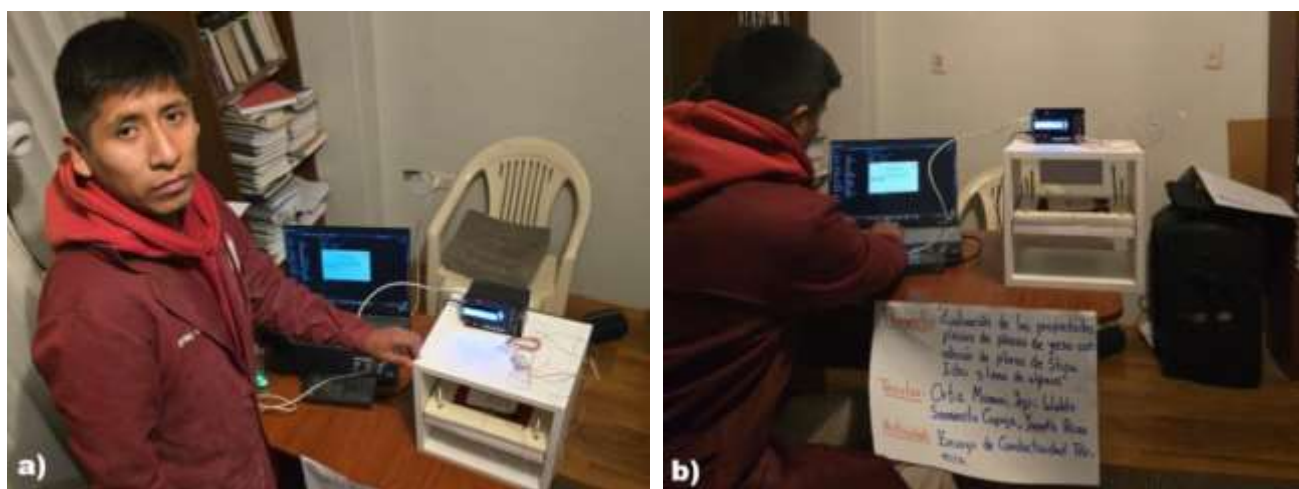


Figura 6: (a) Ubicación de muestra para medición y (b) Registro de mediciones de sensores. Fuente: Elaboración propia.

3.8. Ensayo de resistencia a la flexión

Conforme a la NTP 334.185:2015 [15], se extrajo una probeta de 400 mm $\times$ 300 mm por placa, apoyada sobre rodillos cilíndricos paralelos separados 350 mm, sobre la que se aplicó una carga central mediante arena depositada progresivamente hasta la falla, como se observa en la Figura 7; el peso de rotura se registró en gramos y se convirtió a newtons (N), unidad en la que se expresa la carga de rotura. Se empleó una balanza de precisión de 1.0 g, una bandeja y rodillos de 3 a 15 mm de radio. Esta propiedad define el límite de manipulación segura del material en obra: la placa debe resistir sin fisurarse las cargas accidentales propias del transporte, el montaje y el anclaje a la estructura de soporte de la vivienda.



Figura 7: (a) Medición de resistencia a flexión y (b) Falla por flexión de probeta ensayada. Fuente: Elaboración propia.

3.9. Ensayo de dureza superficial

De acuerdo con la NTP 334.185:2015 [15], se extrajo una probeta de 400 mm $\times$ 300 mm por placa, y se empleó una bola de acero de 50 mm de diámetro y 510 ± 10 g de masa, dejada caer libremente desde una altura de 500 mm sobre la probeta cubierta con papel carbón, expresando la dureza superficial como el diámetro promedio de tres huellas de impacto, en milímetros; una huella mayor indica una superficie menos dura. El equipo empleado y el modo de falla de la probeta de control se muestran en la Figura 8. Durante el transporte hacia zonas rurales de difícil acceso y en el uso cotidiano de la vivienda, la superficie de la placa queda expuesta a golpes accidentales, de modo que este ensayo permite estimar su resistencia a las marcas y al deterioro superficial visible.



Figura 8: (a) Equipo empleado para el ensayo de dureza superficial y (b) Falla frágil por carga de impacto en probeta de control.
Fuente: Elaboración propia.

3.10. Procesamiento estadístico

El análisis se ejecutó de manera reproducible en Python (scipy, statsmodels) directamente sobre los datos brutos de laboratorio (Anexo), con $n = 5$ réplicas independientes por combinación (10 combinaciones $\times 5$ réplicas = 50 unidades experimentales por ensayo). Para cada combinación se reportan la media, la desviación estándar (DE) y el intervalo de confianza al 90% . Todas las pruebas se evaluaron con un nivel de significancia $\alpha = 0.10$, coherente con los intervalos de confianza reportados ($IC = 1 - \alpha = 90\%$) y adoptado por el carácter exploratorio del estudio y el tamaño muestral reducido ($n = 5$ por combinación), criterio que privilegia la potencia estadística para no descartar efectos reales de magnitud moderada, a costa de una mayor tolerancia al error tipo I. El flujo de análisis fue el siguiente: (a) verificación de supuestos, con normalidad de residuos del modelo de dos vías mediante Shapiro-Wilk [21] y homogeneidad de varianzas entre las diez combinaciones mediante Levene [22]; (b) ANOVA de dos vías (Factor A: contenido total de fibra; Factor B: proporción Stipa ichu / lana de alpaca) con sumas de cuadrados de tipo II [23], apropiadas para un diseño balanceado sin jerarquía a priori entre factores, sobre las nueve combinaciones reforzadas (45 observaciones, gl residual = 36); el grupo control se excluyó de este modelo para preservar el balance factorial, y se reportan F , p y el tamaño del efecto mediante η^2 parcial ($\eta^2 p \geq 0.14$ se interpreta como efecto de magnitud alta) [24]; (c) prueba de Dunnett (cada una de las nueve combinaciones frente al control) [25], que ofrece mayor potencia que Tukey HSD o Bonferroni cuando el interés se limita a comparar tratamientos contra un único control, reportando la variación porcentual, el valor p ajustado y la d de Cohen con varianza combinada; (d) prueba de Tukey HSD [26] entre los tres niveles de contenido de fibra para las variables con efecto principal significativo, y análisis de efectos simples (ANOVA de un factor dentro de cada nivel de fibra) para las variables con interacción significativa; y (e) pruebas de robustez —ANOVA de Welch [27] y Kruskal-Wallis [28]— cuando los supuestos paramétricos no se cumplieron, para verificar que las conclusiones no dependieran de dicha violación. En las tablas, la abreviatura (s) indica efecto significativo ($p < 0.10$) y (ns) no significativo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan de acuerdo con los objetivos de la investigación y las propiedades estudiadas: la conductividad térmica, aislamiento acústico, absorción de agua superficial, absorción sumergida, resistencia a la flexión y dureza superficial y, de forma complementaria, la densidad aparente. Para cada propiedad se sigue una secuencia uniforme de cuatro elementos: la estadística descriptiva por combinación, un panel gráfico con la media $\pm$ DE y el perfil de interacción fibra $\times$ proporción, el ANOVA de dos vías y la comparación formal contra el control mediante la prueba de Dunnett.

4.1. Verificación de supuestos paramétricos

Previo al contraste de hipótesis se verificaron los supuestos del modelo: normalidad de los residuos del ANOVA de dos factores (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas entre las diez combinaciones (Levene). La Tabla 1 resume ambos diagnósticos, calculados directamente sobre los datos brutos.

Variable respuesta	W (S-W)	p	Cumple	F (Levene)	P	Cumple
Conductividad térmica ($W/m \cdot K$)	0.952	0.043	X	1.696	0.122	✓
Aislamiento acústico (dB)	0.970	0.298	✓	0.530	0.844	✓
Absorción superficial — cara (g/m^2)	0.938	0.019	X	1.416	0.214	✓
Absorción superficial — dorso (g/m^2)	0.991	0.979	✓	0.869	0.560	✓
Absorción sumergida (%)	0.966	0.205	✓	0.377	0.939	✓
Resistencia a la flexión (N)	0.822	< 0.001	X	1.362	0.238	✓
Dureza superficial (mm)	0.968	0.255	✓	0.168	0.996	✓
Densidad aparente (kg/m^3)	0.987	0.898	✓	0.523	0.849	✓

Tabla 1. Verificación de supuestos: normalidad de residuos (Shapiro-Wilk, sobre el modelo bifactorial) y homogeneidad de varianzas (Levene, 10 grupos).

Como se observa en la Tabla 1, tres variables incumplen el supuesto de normalidad de los residuos (conductividad térmica, absorción superficial en la cara y resistencia a la flexión), mientras que la absorción sumergida incumple la homogeneidad de varianzas, debido a la dispersión marcadamente mayor del grupo control. Para las tres variables con problemas de normalidad, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis; para la variable con varianzas heterogéneas, se utilizó el ANOVA de Welch. En todos los casos, estas pruebas alternativas concordaron en significación con el ANOVA clásico, por lo que las inferencias reportadas no dependen de la violación de supuestos. Los gráficos cuantil-cuantil de las variables con apartamiento de la normalidad se presentan en la Figura 18.

4.2. Conductividad térmica

La Tabla 2 reúne la estadística descriptiva de la conductividad térmica por combinación, la Figura 9 representa gráficamente las medias y el perfil de interacción entre ambos factores, y las Tablas 3 y 4 recogen, respectivamente, el ANOVA de dos vías y la comparación de cada combinación frente al control mediante la prueba de Dunnett.

Combinación	Media ($W/m \cdot K$)	DE	IC 90 %
Control	0.315	0.005	[0.310 ; 0.320]
4%-75/25	0.274	0.002	[0.272 ; 0.276]
4%-50/50	0.248	0.002	[0.246 ; 0.250]
4%-25/75	0.227	0.000	[0.227 ; 0.227]
8%-75/25	0.173	0.001	[0.172 ; 0.174]
8%-50/50	0.146	0.002	[0.145 ; 0.148]
8%-25/75	0.117	0.001	[0.116 ; 0.118]
12%-75/25	0.121	0.002	[0.119 ; 0.123]
12%-50/50	0.085	0.004	[0.081 ; 0.088]
12%-25/75	0.069	0.002	[0.067 ; 0.70]

Tabla 2: Estadística descriptiva de conductividad térmica ($W/m \cdot K$) por combinación, $n = 5$.

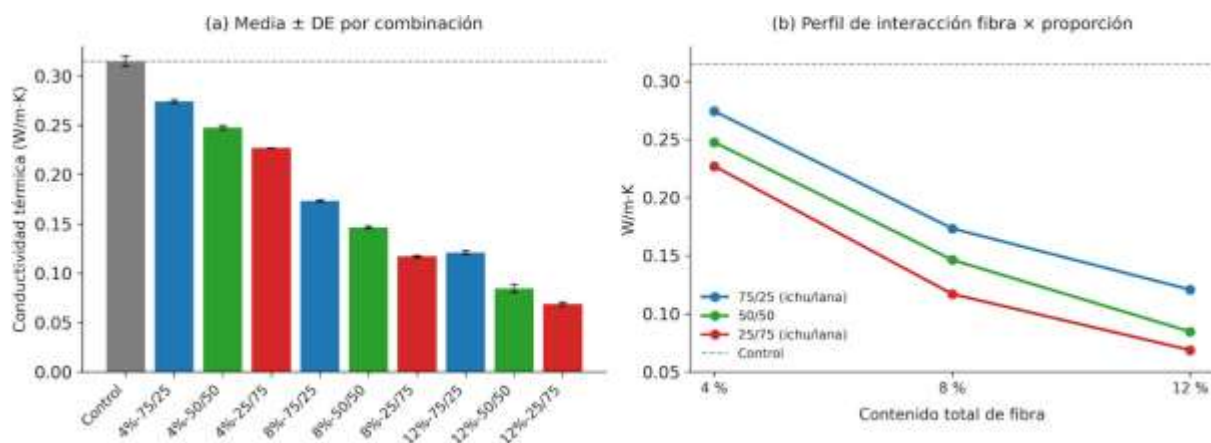


Figura 9: (a) Media $\pm$ DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra $\times$ proporción para conductividad térmica. Fuente: Elaboración propia.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η^2 parcial
Contenido total de fibra	2	24373.46	< 0.001 (s)	0.999
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	2556.12	< 0.001 (s)	0.993
Interacción (contenido $\times$ proporción)	4	20.58	< 0.001 (s)	0.696

Tabla 3: ANOVA de dos vías para conductividad térmica (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

Combinación	Media (W/m·K)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
4%-75/25	0.274	-12.90 %	-10.09	< 0.001 (s)
4%-50/50	0.248	-21.35 %	-16.54	< 0.001 (s)
4%-25/75	0.227	-27.89 %	-23.18	< 0.001 (s)
8%-75/25	0.173	-44.92%	-36.51	< 0.001 (s)
8%-50/50	0.146	-53.49%	-42.77	< 0.001 (s)
8%-25/75	0.117	-62.83%	-51.33	< 0.001 (s)
12%-75/25	0.121	-61.63 %	-48.20	< 0.001 (s)
12%-50/50	0.085	-73.13 %	-48.53	< 0.001 (s)
12%-25/75	0.069	-78.16 %	-61.16	< 0.001 (s)

Tabla 4: Prueba de Dunnett para conductividad térmica (control = 0.315 W/m·K).

Según la Tabla 3, el contenido de fibra ejerce el efecto más grande observado sobre la conductividad térmica ($F=24373.46$, $p<0.001$, $\eta^2p=0.999$), acompañado de un efecto principal de la proporción igualmente determinante ($F=2556.12$, $p<0.001$, $\eta^2p=0.993$) y de una interacción estadísticamente significativa ($F=20.58$, $p<0.001$, $\eta^2p=0.696$). El análisis de efectos simples confirma que la proporción de fibras influye de forma altamente significativa en todos los niveles de adición: 4 %, 8 % y 12 % de fibra ($p<0.001$ en los tres casos; para el nivel de 12 %, $F=459.49$, $p<0.001$). La prueba de Dunnett mostrada en la Tabla 4 confirma reducciones estadísticamente significativas frente al control (0.315 W/m·K) en las nueve combinaciones, con la mayor reducción en 12 % de fibra con 25/75, donde el aumento del contenido de lana de alpaca (proporción 25/75) potencia de manera consistente la reducción de la conductividad térmica.

La magnitud de la mejora supera con amplitud a los antecedentes con otras fibras: Romero-Gómez et al. reportaron reducciones máximas de 16 % con fibras de acetato de celulosa [11], mientras que aquí incluso la dosificación más baja (4 %-75/25) logra -12.9 % y las dosificaciones de 8 % y 12 % alcanzan entre -45 % y -73 %. La causa física de este comportamiento es doble. Por un lado, ambas fibras poseen una conductividad intrínseca muy inferior a la de la matriz de yeso: el tallo hueco y la estructura celular porosa de la Stipa ichu le confieren un desempeño aislante comparable al de aislantes comerciales, caracterizado por Charca et al. [12], y las fibras queratínicas de la lana presentan médulas y escamas corticales que atrapan aire, según lo documentado para compuestos de lana de oveja [29]. Por otro lado, la dispersión de las fibras en la matriz interrumpe la continuidad de los cristales de dihidrato e introduce microcavidades de aire en la interfaz fibra-yeso, que actúan como resistencias térmicas en serie frente al flujo de calor por conducción [12, 29]. El resultado

contrasta, además, con lo observado por Guna et al., donde la mejora acústica y mecánica de la lana de oveja se obtuvo a costa de la capacidad térmica [10]: en el sistema binario ichu-alpaca la ganancia térmica es el efecto dominante.

4.3. Aislamiento acústico

El comportamiento acústico de las diez combinaciones se describe en la Tabla 5 y se representa en la Figura 10; el ANOVA de dos vías se presenta en la Tabla 6 y la comparación frente al control en la Tabla 7.

Combinación	Media (dB)	DE	IC 90 %
Control	24.55	0.38	[24.19 ; 24.91]
4%-75/25	24.26	0.34	[23.94 ; 24.58]
4%-50/50	24.54	0.74	[23.83 ; 25.25]
4%-25/75	24.51	0.23	[24.29 ; 24.73]
8%-75/25	24.68	0.38	[24.32 ; 25.04]
8%-50/50	24.56	0.46	[24.12 ; 25.00]
8%-25/75	24.22	0.64	[23.61 ; 24.82]
12%-75/25	24.83	0.30	[24.54 ; 25.12]
12%-50/50	25.17	0.86	[24.35 ; 25.98]
12%-25/75	25.03	0.48	[24.58 ; 25.49]

Tabla 5: Estadística descriptiva de aislamiento acústico (dB) por combinación, n = 5.

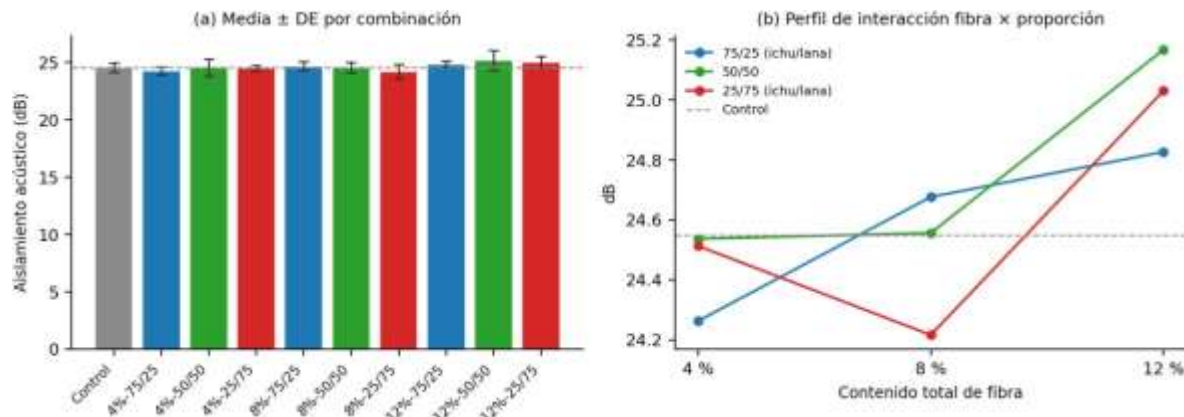


Figura 10: (a) Media $\pm$ DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra $\times$ proporción para aislamiento acústico. Fuente: Elaboración propia.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η^2 parcial
Contenido total de fibra	2	5.35	0.009 (s)	0.229
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	0.49	0.618 (ns)	0.026
Interacción (contenido $\times$ proporción)	4	0.73	0.580 (ns)	0.075

Tabla 6: ANOVA de dos vías para aislamiento acústico (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

Combinación	Media (dB)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnnett)
4%-75/25	24.26	-1.17 %	-0.80	0.951 (ns)
4%-50/50	24.54	-0.05 %	-0.02	1.000 (ns)
4%-25/75	24.51	-0.15 %	-0.12	1.000 (ns)
8%-75/25	24.68	+0.51 %	0.33	1.000 (ns)
8%-50/50	24.56	+0.03 %	0.02	1.000 (ns)
8%-25/75	24.22	-1.36 %	-0.64	0.895 (ns)
12%-75/25	24.83	+1.13 %	0.80	0.960 (ns)

Combinación	Media (dB)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
12%-50/50	25.17	+2.51 %	0.93	0.331 (ns)
12%-25/75	25.03	+1.96 %	1.11	0.604 (ns)

Tabla 7: Prueba de Dunnett para aislamiento acústico (control = 24.55 dB).

De acuerdo con la Tabla 6, el contenido de fibra presenta un efecto significativo de magnitud grande ($F = 5.35$, $p = 0.009$, $\eta^2 p = 0.229$); ni la proporción ($p = 0.618$) ni la interacción ($p = 0.580$) resultan significativas, lo que concuerda con el paralelismo de los perfiles de la Figura 10b. La prueba de Tukey HSD indica que el nivel de 12 % difiere significativamente de 4 % ($\Delta = 0.57$ dB, $p = 0.012$) y de 8 % ($\Delta = 0.52$ dB, $p = 0.022$), en ambos casos con un aislamiento acústico mayor. En la prueba de Dunnett (Tabla 7), sin embargo, ninguna combinación individual difiere significativamente del control (24.55 dB), por lo que la mejora observada en 12 % de fibra debe entenderse como una tendencia interna del diseño factorial y no como una mejora estadísticamente confirmada frente al yeso sin refuerzo.

Este resultado difiere de las mejoras acústicas notables reportadas por Guna et al. con lana de oveja y coco [10] y por Dénes et al. con compuestos de lana [29], y admite una explicación física coherente con los propios datos: la pérdida por transmisión de una placa simple en el rango de frecuencias medias está gobernada principalmente por su masa superficial —el principio conocido como ley de masas, implícito en el marco de medición de la norma ASTM E90 [18]—, y la densidad aparente de las combinaciones reforzadas apenas se redujo entre 0.6 % y 5.6 % respecto al control, como muestra la Tabla 25, de modo que, a espesor constante de 20 mm, la masa superficial de todas las placas es prácticamente la misma y no cabía esperar cambios de gran magnitud en la transmisión. Las mejoras reportadas en la literatura con fibras de lana corresponden mayoritariamente a la absorción sonora por porosidad —disipación viscosa del aire en la red de poros interconectados [10, 29]—, un mecanismo distinto del aquí medido. Adicionalmente, el método de caja reducida derivado de ASTM E90 [18] evalúa un rango espectral y una difusidad limitados, lo que restringe la sensibilidad del ensayo frente a variaciones pequeñas. La ganancia potencial de estas fibras en el plano acústico requeriría, por tanto, ensayos de coeficiente de absorción en tubo de impedancia como línea futura.

4.4. Absorción superficial — cara

La Tabla 8 presenta la estadística descriptiva de la absorción superficial medida en la cara de las placas y la Figura 11 la representa gráficamente; el ANOVA correspondiente figura en la Tabla 9 y la prueba de Dunnett en la Tabla 10.

Combinación	Media (g/m ²)	DE	IC 90 %
Control	21.06	3.59	[17.64 ; 24.48]
4%-75/25	17.80	4.37	[13.64 ; 21.96]
4%-50/50	15.94	1.36	[14.64 ; 17.24]
4%-25/75	16.72	2.64	[14.21 ; 19.23]
8%-75/25	17.14	0.97	[16.21 ; 18.07]
8%-50/50	16.86	1.83	[15.12 ; 18.60]
8%-25/75	16.16	1.00	[15.21 ; 17.11]
12%-75/25	17.10	1.11	[16.04 ; 18.16]
12%-50/50	18.28	1.35	[16.99 ; 19.57]
12%-25/75	16.78	1.19	[15.65 ; 17.91]

Tabla 8: Estadística descriptiva de absorción superficial — cara (g/m²) por combinación, $n = 5$.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η^2 parcial
Contenido total de fibra	2	0.46	0.633 (ns)	0.025
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	0.57	0.570 (ns)	0.031
Interacción (contenido $\times$ proporción)	4	0.76	0.557 (ns)	0.078

Tabla 9: ANOVA de dos vías para absorción superficial — cara (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

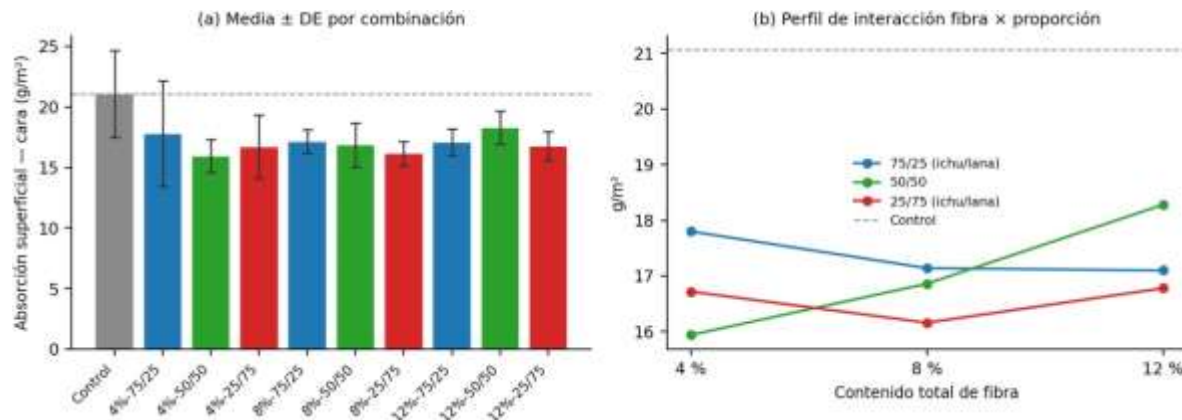


Figura 11: (a) Media $\pm$ DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra $\times$ proporción para absorción superficial — cara. Fuente: Elaboración propia.

Combinación	Media (g/m ²)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
4%-75/25	17.80	-15.48 %	-0.82	0.156 (ns)
4%-50/50	15.94	-24.31 %	-1.89	0.007 (s)
4%-25/75	16.72	-20.61 %	-1.38	0.028 (s)
8%-75/25	17.14	-18.61 %	-1.49	0.057 (s)
8%-50/50	16.86	-19.94 %	-1.47	0.035 (s)
8%-25/75	16.16	-23.27 %	-1.86	0.010 (s)
12%-75/25	17.10	-18.80 %	-1.49	0.053 (s)
12%-50/50	18.28	-13.20 %	-1.02	0.293 (ns)
12%-25/75	16.78	-20.32 %	-1.60	0.031 (s)

Tabla 10: Prueba de Dunnett para absorción superficial — cara (control = 21.06 g/m²).

Conforme a la Tabla 9, ni el contenido de fibra ($= 0.46$, $p = 0.633$), ni la proporción ($F = 0.57$, $p = 0.570$), ni su interacción ($F = 0.76$, $p = 0.557$) resultaron significativos para la absorción superficial en la cara; los valores de η^2p , todos inferiores a 0.08, confirman una influencia despreciable de las fibras sobre esta métrica dentro del diseño factorial. Dado que la variable incumple el supuesto de normalidad (Tabla 1), el resultado se contrastó con Kruskal-Wallis y ANOVA de Welch, que confirman la ausencia de efectos de los factores. La prueba de Dunnett (Tabla 10), en cambio, sí detecta reducciones significativas frente al control en siete de las nueve combinaciones (entre -18.6% y -24.3% , $p < 0.10$), lo que indica que la sola presencia de fibra reduce el agua captada por la superficie, aunque ni la dosis ni la proporción la modulen de forma detectable, tal como refleja la ausencia de tendencia en la Figura 11b.

Se concluye que el fenómeno de absorción superficial de corta duración está controlado por la matriz de yeso (su porosidad capilar superficial) y que las fibras actúan como un obstáculo pasivo esencialmente independiente de su dosificación: al atravesar la zona superficial, los filamentos interrumpen la continuidad de la red capilar del yeso y alargan la trayectoria efectiva de succión, sin modificar la porosidad total de la cara de contacto. La magnitud de la reducción (hasta -24%) es comparable a la reportada por Castillo-Rodríguez et al. con fibras de algodón reciclado (-26%) [3], lo que refuerza la idea de un mecanismo común de obstrucción capilar en compuestos de yeso con fibras.

4.5. Absorción superficial — dorso

La absorción superficial medida en el dorso se describe en la Tabla 11 y se ilustra en la Figura 12, con el ANOVA de dos vías en la Tabla 12 y la comparación frente al control en la Tabla 13.

Combinación	Media (g/m ²)	DE	IC 90 %
Control	18.02	1.60	[16.50 ; 19.54]
4%-75/25	17.98	2.01	[16.06 ; 19.90]
4%-50/50	15.86	1.33	[14.59 ; 17.13]

Combinación	Media (g/m ²)	DE	IC 90 %
4%-25/75	16.56	1.94	[14.71 ; 18.41]
8%-75/25	16.62	0.70	[15.95 ; 17.29]
8%-50/50	15.88	0.61	[15.30 ; 16.46]
8%-25/75	15.78	0.93	[14.89 ; 16.67]
12%-75/25	16.82	1.01	[15.86 ; 17.78]
12%-50/50	17.76	1.76	[16.09 ; 19.43]
12%-25/75	19.24	1.22	[18.08 ; 20.40]

Tabla 11: Estadística descriptiva de absorción superficial — dorso (g/m²) por combinación, n = 5.

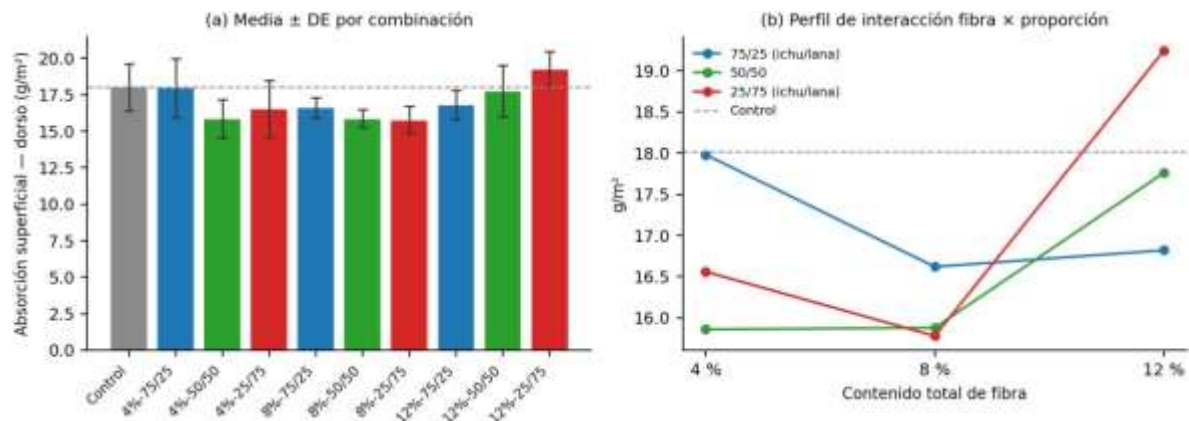


Figura 12: (a) Media ± DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra × proporción para absorción superficial — dorso. Fuente: Elaboración propia.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η ² parcial
Contenido total de fibra	2	6.94	0.003 (s)	0.278
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	1.19	0.316 (ns)	0.062
Interacción (contenido × proporción)	4	3.22	0.023 (s)	0.264

Tabla 12: ANOVA de dos vías para absorción superficial — dorso (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

Combinación	Media (g/m ²)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
4%-75/25	17.98	-0.22 %	-0.02	1.000 (ns)
4%-50/50	15.86	-11.99 %	-1.47	0.113 (ns)
4%-25/75	16.56	-8.10 %	-0.82	0.471 (ns)
8%-75/25	16.62	-7.77 %	-1.13	0.517 (ns)
8%-50/50	15.88	-11.88 %	-1.77	0.119 (ns)
8%-25/75	15.78	-12.43 %	-1.71	0.093 (s)
12%-75/25	16.82	-6.66 %	-0.90	0.680 (ns)
12%-50/50	17.76	-1.44 %	-0.15	1.000 (ns)
12%-25/75	19.24	+6.77 %	0.86	0.664 (ns)

Tabla 13: Prueba de Dunnett para absorción superficial — dorso (control = 18.02 g/m²).

El contenido de fibra afecta significativamente la absorción en el dorso ($F = 6.94$, $p = 0.003$, $\eta^2 p = 0.278$), con una interacción igualmente significativa ($F = 3.22$, $p = 0.023$, $\eta^2 p = 0.264$), según la Tabla 12. El análisis de efectos simples muestra que la proporción de fibras solo influye de forma detectable dentro del nivel de 12 % ($F = 4.00$, $p = 0.047$), donde la proporción rica en Stipa ichu (75/25) produce la menor absorción (16.82 g/m²) frente a la proporción rica en lana (25/75), que alcanza la mayor (19.24 g/m²); la divergencia de los gráficos en el extremo derecho de la Figura 12b evidencia con claridad este comportamiento. La prueba de Tukey HSD confirma que, en el efecto principal, el nivel de 12 % difiere

significativamente del de 8 % ($\Delta = 1.85 \text{ g/m}^2$, $p = 0.005$). Frente al control, únicamente la combinación 8 %-25/75 alcanza significancia en la prueba de Dunnett (Tabla 13: -12.4 %, $p = 0.093$), en el límite del criterio adoptado.

La causa del patrón observado radica en la desigualdad del proceso de vaciado: durante el fraguado, las fibras tienden a acumularse hacia el fondo (dorso), de modo que a la dosificación más alta (12 %) el exceso local de fibra incrementa la porosidad abierta accesible al agua en esa cara. El efecto aumenta cuando predomina la lana de alpaca, cuyos filamentos finos y de superficie escamosa retienen agua por capilaridad en los intersticios entre fibras, morfología descrita para las fibras por Braniša et al. [14] y Dénes et al. [29], y aumenta cuando predomina el ichu [12]. Este deterioro a dosificaciones altas es consistente con la pérdida de desempeño más allá del contenido óptimo descrita por Nafis et al. para fibra de yute [8].

4.6. Absorción sumergida

Combinación	Media (%)	DE	IC 90 %
Control	84.91	3.39	[81.68 ; 88.14]
4%-75/25	70.22	2.87	[67.48 ; 72.96]
4%-50/50	71.40	2.44	[69.08 ; 73.72]
4%-25/75	66.98	6.93	[60.38 ; 73.58]
8%-75/25	69.96	4.25	[65.90 ; 74.02]
8%-50/50	67.48	1.99	[65.59 ; 69.37]
8%-25/75	61.70	3.62	[58.25 ; 65.15]
12%-75/25	67.04	4.42	[62.82 ; 71.26]
12%-50/50	69.78	3.27	[66.66 ; 72.90]
12%-25/75	70.30	3.98	[66.50 ; 74.10]

Tabla 14: Estadística descriptiva de absorción sumergida (%) por combinación, n = 5.

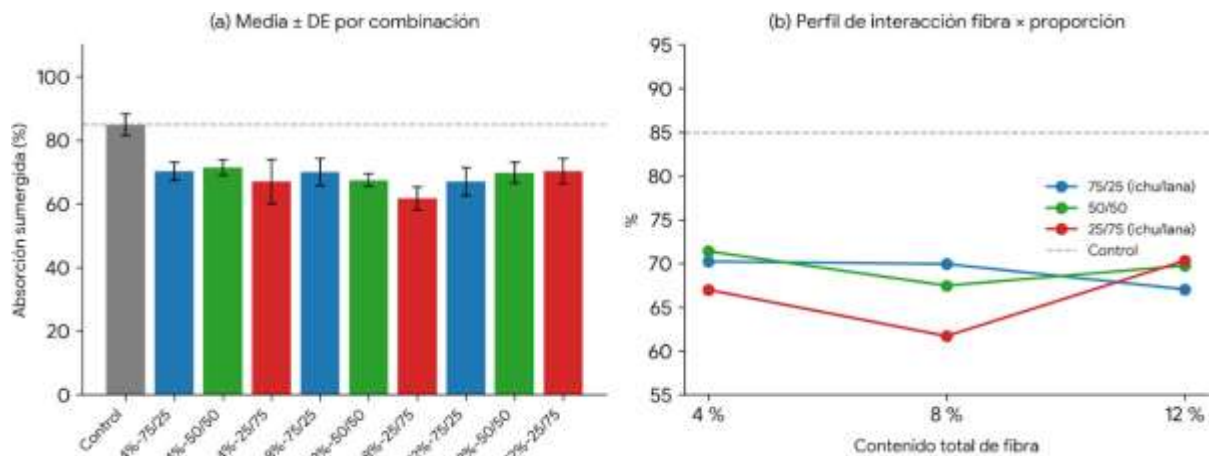


Figura 13: (a) Media $\pm$ DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra $\times$ proporción para absorción sumergida. Fuente: Elaboración propia.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η^2 parcial
Contenido total de fibra	2	2.72	0.079(s)	0.131
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	2.81	0.073 (s)	0.135
Interacción (contenido $\times$ proporción)	4	2.69	0.047 (s)	0.230

Tabla 15: ANOVA de dos vías para absorción sumergida (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

Combinación	Media (%)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
4%-75/25	70.22	-17.28 %	-4.68	< 0.001 (s)
4%-50/50	71.40	-15.92 %	-4.59	< 0.001 (s)
4%-25/75	66.98	-21.10 %	-3.28	0.001 (s)

Combinación	Media (%)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
8%-75/25	69.96	-17.62 %	-3.88	< 0.001 (s)
8%-50/50	67.48	-20.53 %	-6.28	< 0.001 (s)
8%-25/75	61.70	-27.32 %	-6.62	< 0.001 (s)
12%-75/25	67.04	-21.03 %	-4.55	< 0.001 (s)
12%-50/50	69.78	-17.84 %	-4.53	< 0.001 (s)
12%-25/75	70.30	-17.18 %	-3.94	< 0.001 (s)

Tabla 16: Prueba de Dunnett para absorción sumergida (control = 136.64 %).

De acuerdo con la Tabla 15, el contenido de fibra ($F=2.72$, $p=0.079$, $\eta^2p=0.131$) y la proporción de mezcla ($F=2.81$, $p=0.073$, $\eta^2p=0.135$) resultan estadísticamente significativos al nivel $\alpha=0.10$ adoptado, mientras que la interacción entre ambos factores alcanza una significancia mayor ($F=2.69$, $p=0.047$, $\eta^2p=0.230$). El análisis de efectos simples revela que la proporción de fibras ejerce un efecto determinante dentro del nivel de 8% de adición ($F=7.67$, $p=0.007$), donde la formulación 8%-25/75 (rica en lana de alpaca) minimiza la absorción sumergida alcanzando el valor más bajo del estudio (61.70%), en comparación con las demás proporciones de ese mismo nivel (67.48% a 69.96%), comportamiento representado en el perfil inferior de la Figura 13b.

Frente al grupo control sin refuerzo (84.91%, $DE=3.39$ en la Tabla 14), la prueba de Dunnett (Tabla 16) confirma reducciones altamente significativas de la absorción por inmersión en la totalidad de las combinaciones evaluadas ($p<0.001$ en todos los casos), con disminuciones porcentuales que se ubican entre el -15.92% y el -27.32%, acompañadas de tamaños del efecto sumamente elevados ($d<-3.20$).

Dos mecanismos físicos explican esta notable mejora. El primero está asociado a la integridad estructural del compuesto: durante la inmersión prolongada, el yeso sin refuerzo sufre una penetración masiva de agua por su red capilar abierta, mientras que la entramada red tridimensional de fibras cose las microfisuras internas mediante el mecanismo de puenteo descrito por Naik et al. [13], preservando la cohesión y estanqueidad de la matriz. El segundo mecanismo corresponde a la química superficial de la interfaz: la presencia de lanolina y compuestos lipídicos residuales en la superficie de la lana de alpaca confiere un carácter naturalmente hidrófobo a la interfaz fibra-agua, fenómeno documentado por Braniša et al. [14] para fibras queratínicas animales, lo que resulta plenamente consistente con la mínima absorción registrada en las proporciones dominadas por lana de alpaca (25/75). La magnitud de la reducción lograda (hasta -27.32%) supera la mejora alcanzada por Castillo-Rodríguez et al. (-26%) con algodón reciclado [3], una fibra celulósica e hidrófila que carece de dicho recubrimiento lipídico.

4.7. Resistencia a la flexión

La carga de rotura a flexión se describe en la Tabla 17 y se representa en la Figura 14; la Tabla 18 recoge el ANOVA de dos vías y la Tabla 19 la comparación de cada combinación frente al control.

Combinación	Media (N)	DE	IC 90 %
Control	120.37	4.19	[116.38 ; 124.36]
4%-75/25	122.03	4.33	[117.91 ; 126.16]
4%-50/50	119.37	1.73	[117.73 ; 121.02]
4%-25/75	121.39	2.72	[118.79 ; 123.99]
8%-75/25	129.82	0.26	[129.57 ; 130.07]
8%-50/50	129.74	0.20	[129.55 ; 129.93]
8%-25/75	129.82	0.21	[129.62 ; 130.02]
12%-75/25	143.63	5.44	[138.44 ; 148.82]
12%-50/50	139.70	0.13	[139.57 ; 139.82]
12%-25/75	140.30	1.06	[139.29 ; 141.32]

Tabla 17: Estadística descriptiva de resistencia a la flexión (N) por combinación, $n=5$.

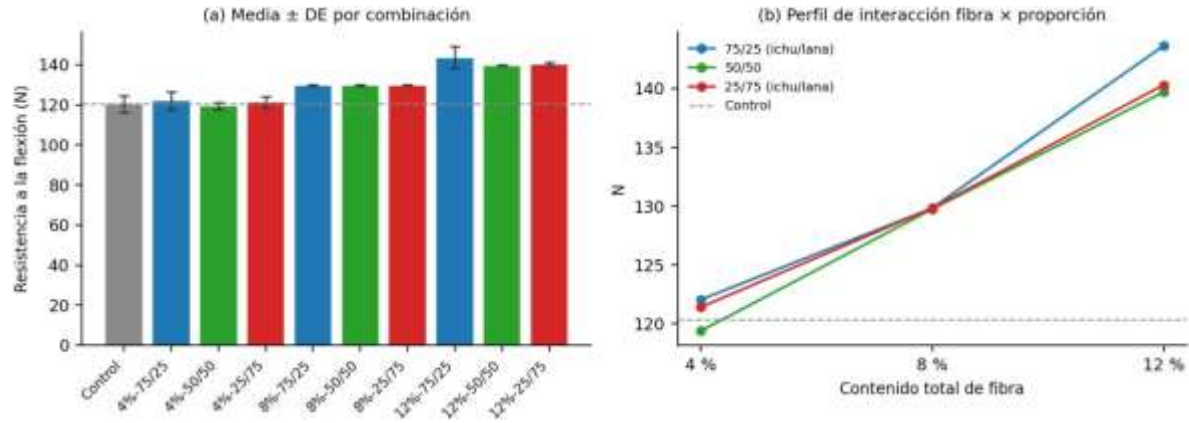


Figura 14: (a) Media $\pm$ DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra $\times$ proporción para resistencia a la flexión. Fuente: Elaboración propia.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η^2 parcial
Contenido total de fibra	2	232.07	< 0.001 (s)	0.928
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	2.81	0.074 (s)	0.135
Interacción (contenido $\times$ proporción)	4	0.99	0.423 (ns)	0.099

Tabla 18: ANOVA de dos vías para resistencia a la flexión (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

Combinación	Media (N)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
4%-75/25	122.03	+1.38 %	0.39	0.928 (ns)
4%-50/50	119.37	-0.83 %	-0.31	0.997 (ns)
4%-25/75	121.39	+0.85 %	0.29	0.997 (ns)
8%-75/25	129.82	+7.85 %	3.19	< 0.001 (s)
8%-50/50	129.74	+7.78 %	3.16	< 0.001 (s)
8%-25/75	129.82	+7.85 %	3.19	< 0.001 (s)
12%-75/25	143.63	+19.32 %	4.79	< 0.001 (s)
12%-50/50	139.70	+16.05 %	6.53	< 0.001 (s)
12%-25/75	140.30	+16.56 %	6.53	< 0.001 (s)

Tabla 19: Prueba de Dunnett para resistencia a la flexión (control = 120.37 N).

El contenido de fibra ejerce un efecto extremadamente grande y altamente significativo sobre la carga de rotura a flexión ($F = 232.07$, $p < 0.001$, $\eta^2 p = 0.928$), que por sí solo explica el 92.8 % de la varianza, como muestra la Tabla 18; la progresión ascendente y paralela de los tres perfiles de la Figura 14b ilustra este predominio del contenido sobre la proporción. Esta última alcanza una significancia marginal al nivel $\alpha = 0.10$ ($p = 0.074$, $\eta^2 p = 0.135$), no corroborada por la verificación no paramétrica (Kruskal-Wallis, $p = 0.783$) ni por los efectos simples dentro de ningún nivel de fibra, por lo que debe interpretarse con cautela; la interacción no resulta significativa ($p = 0.423$). La prueba de Tukey HSD confirma diferencias significativas entre los tres niveles de fibra (8 % vs. 4 %: $\Delta = 8.86$ N; 12 % vs. 8 %: $\Delta = 11.42$ N; 12 % vs. 4 %: $\Delta = 20.28$ N; $p < 0.001$ en las tres comparaciones), y la prueba de Dunnett (Tabla 19) muestra que las combinaciones con 8 % (+7.8 %) y 12 % (+16.1 % a +19.3 %) superan significativamente al control, mientras que las de 4 % son estadísticamente indistinguibles de él.

El mecanismo resistente que existe es el puenteo de fisuras: al iniciarse la fisura de tracción en la cara inferior de la placa, las fibras que la atraviesan transfieren carga por adherencia y fricción, y disipan energía mediante el arranque y deslizamiento progresivos caracterizados por Naik et al. en el ensayo de pull-out [13]; ello retrasa la propagación inestable de la fisura y eleva la carga máxima. La tendencia creciente es coherente con el refuerzo reportado en la literatura: +5.9 % con algodón reciclado [3], hasta +56 % con cáñamo tratado superficialmente [9] y mezclas optimizadas con papel reciclado [5]. No obstante, el hecho de que la mejora continúe hasta el 12 % se contrapone con el óptimo de 6 % identificado por Nafis et al. para yute, más allá del cual la aglomeración de fibras introduce defectos y el desempeño decae [8], y la variabilidad casi

nula registrada en el nivel de 8 % (DE = 0.20–0.26 N en la Tabla 17, frente a 1.7–5.4 N en los demás niveles) resulta atípicamente baja para un ensayo de carga con arena.

4.8. Dureza superficial

El diámetro promedio de la huella de impacto, indicador inverso de la dureza superficial, se presenta en la Tabla 20 y se representa en la Figura 15; el ANOVA de dos vías figura en la Tabla 21 y la prueba de Dunnett en la Tabla 22.

Combinación	Media (mm)	DE	IC 90 %
Control	21.24	0.56	[20.71 ; 21.78]
4%-75/25	22.63	0.78	[21.89 ; 23.37]
4%-50/50	22.35	0.55	[21.82 ; 22.88]
4%-25/75	21.70	0.69	[21.04 ; 22.36]
8%-75/25	24.43	0.58	[23.88 ; 24.99]
8%-50/50	22.61	0.85	[21.79 ; 23.42]
8%-25/75	21.43	0.66	[20.80 ; 22.05]
12%-75/25	23.66	0.62	[23.08 ; 24.25]
12%-50/50	23.52	0.80	[22.76 ; 24.28]
12%-25/75	23.17	0.46	[22.73 ; 23.60]

Tabla 20: Estadística descriptiva de dureza superficial (huella) (mm) por combinación, n = 5.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η² parcial
Contenido total de fibra	2	12.23	< 0.001 (s)	0.404
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	17.88	< 0.001 (s)	0.498
Interacción (contenido × proporción)	4	5.19	0.002 (s)	0.366

Tabla 21: ANOVA de dos vías para dureza superficial (huella) (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

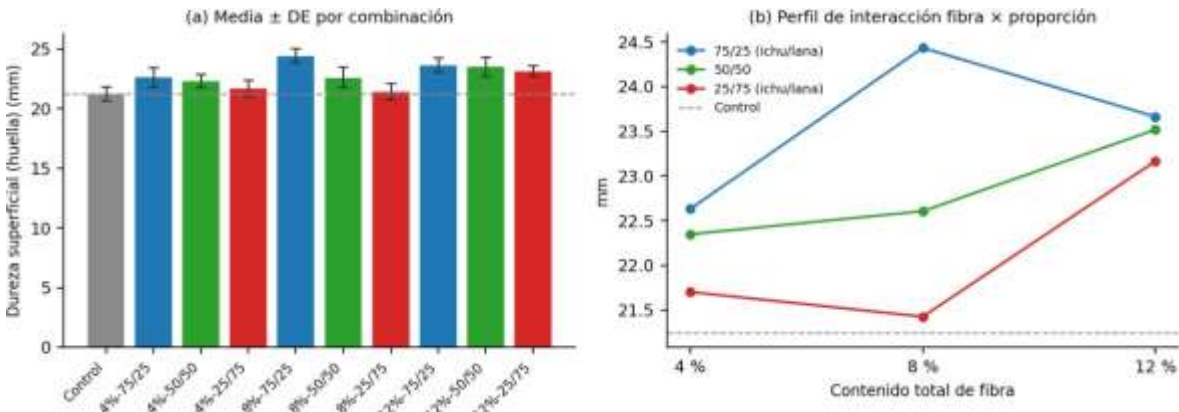


Figura 15: (a) Media ± DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra × proporción para dureza superficial (huella). Fuente: Elaboración propia.

Combinación	Media (mm)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
4%-75/25	22.63	+6.53 %	2.05	0.015 (s)
4%-50/50	22.35	+5.20 %	1.99	0.077 (s)
4%-25/75	21.70	+2.16 %	0.73	0.858 (ns)
8%-75/25	24.43	+15.02 %	5.58	< 0.001 (s)
8%-50/50	22.61	+6.42 %	1.89	0.017 (s)
8%-25/75	21.43	+0.86 %	0.30	1.000 (ns)
12%-75/25	23.66	+11.39 %	4.11	< 0.001 (s)
12%-50/50	23.52	+10.71 %	3.30	< 0.001 (s)

Combinación	Media (mm)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
12%-25/75	23.17	+9.05 %	3.76	< 0.001 (s)

Tabla 22: Prueba de Dunnett para dureza superficial (huella) (control = 21.24 mm).

Tanto el contenido de fibra ($F = 12.23$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.404$) como la proporción ($F = 17.88$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.498$) ejercen efectos grandes y significativos, con una interacción igualmente significativa ($F = 5.19$, $p = 0.002$, $\eta^2p = 0.366$), según la Tabla 21. El análisis de efectos simples muestra que el efecto de la proporción se concentra en el nivel de 8 % de fibra ($F = 22.92$, $p < 0.001$), donde la proporción rica en lana de alpaca (25/75) produce la huella más pequeña (es decir, la mayor dureza superficial) con 21.43 mm, estadísticamente indistinguible del control (21.24 mm, $p = 1.000$), frente a 24.43 mm en la proporción rica en Stipa ichu; la máxima separación entre perfiles en el nivel intermedio de la Figura 15b refleja precisamente este efecto. En términos de Dunnett (Tabla 22), siete de las nueve combinaciones presentan huellas significativamente mayores que el control, lo que indica una superficie más blanda del compuesto reforzado.

La causa física de esta pérdida nominal de dureza es la sustitución local de matriz rígida por fibra deformable en la zona de contacto: el impacto de la bola comprime un volumen superficial en el que las fibras, de módulo elástico muy inferior al del yeso, permiten mayor indentación plástica. Sin embargo, el resultado debe leerse junto con el modo de falla observado: las probetas de control se fracturaron de manera frágil e inmediata ante el primer impacto, como documenta la Figura 8b, mientras que las placas reforzadas toleraron el mismo impacto sin fractura catastrófica, absorbiéndolo como indentación local. Este cambio se explica por el mismo mecanismo de arranque y deslizamiento de fibra que redistribuye la energía de impacto en un volumen mayor de material [13], y coincide con las mejoras en el mecanismo de falla reportadas por Karua e Islam con fibra de yute [6]: el compuesto cambia integridad superficial por tenacidad, un intercambio favorable para el transporte y montaje en zonas rurales de difícil acceso.

4.9. Densidad aparente

Finalmente, la Tabla 23 recoge la densidad aparente de las diez combinaciones y la Figura 16 la representa gráficamente, con el ANOVA de dos vías en la Tabla 24 y la comparación frente al control en la Tabla 25.

Combinación	Media (kg/m ³)	DE	IC 90 %
Control	764.61	30.14	[735.87 ; 793.34]
4%-75/25	735.74	17.20	[719.34 ; 752.14]
4%-50/50	731.48	10.46	[721.50 ; 741.45]
4%-25/75	758.55	27.16	[732.66 ; 784.45]
8%-75/25	724.42	16.01	[709.15 ; 739.69]
8%-50/50	752.84	15.25	[738.30 ; 767.37]
8%-25/75	759.75	24.69	[736.21 ; 783.29]
12%-75/25	721.75	24.00	[698.86 ; 744.63]
12%-50/50	729.98	12.54	[718.03 ; 741.93]
12%-25/75	724.35	15.75	[709.33 ; 739.36]

Tabla 23: Estadística descriptiva de densidad aparente (kg/m³) por combinación, n = 5.

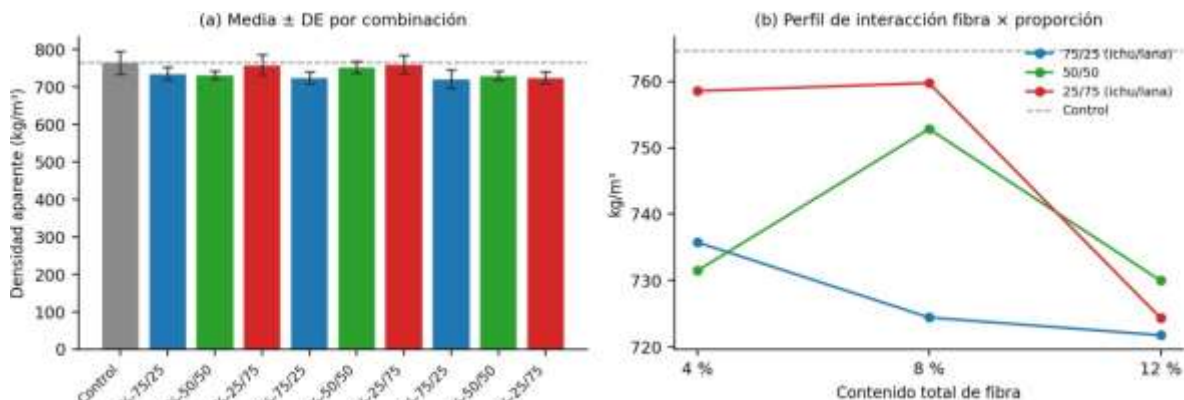


Figura 16: (a) Media $\pm$ DE por combinación y (b) perfil de interacción fibra $\times$ proporción para densidad aparente. Fuente: Elaboración propia.

Fuente	gl	F	p (sig.)	η^2 parcial
Contenido total de fibra	2	4.89	0.013 (s)	0.214
Proporción Stipa ichu / lana de alpaca	2	4.30	0.021 (s)	0.193
Interacción (contenido $\times$ proporción)	4	1.90	0.131 (ns)	0.174

Tabla 24: ANOVA de dos vías para densidad aparente (9 combinaciones reforzadas, gl residual = 36).

Combinación	Media (kg/m ³)	% vs. control	d de Cohen	p (Dunnett)
4%-75/25	735.74	-3.78 %	-1.18	0.172 (ns)
4%-50/50	731.48	-4.33 %	-1.47	0.086 (s)
4%-25/75	758.55	-0.79 %	-0.21	0.999 (ns)
8%-75/25	724.42	-5.26 %	-1.67	0.023 (s)
8%-50/50	752.84	-1.54 %	-0.49	0.938 (ns)
8%-25/75	759.75	-0.64 %	-0.18	1.000 (ns)
12%-75/25	721.75	-5.61 %	-1.57	0.013 (s)
12%-50/50	729.98	-4.53 %	-1.50	0.066 (s)
12%-25/75	724.35	-5.27 %	-1.67	0.023 (s)

Tabla 25: Prueba de Dunnett para densidad aparente (control = 764.61 kg/m³).

El contenido de fibra ejerce un efecto significativo de magnitud moderada-alta sobre la densidad aparente ($F = 4.89$, $p = 0.013$, $\eta^2 p = 0.214$), al igual que la proporción ($F = 4.30$, $p = 0.021$, $\eta^2 p = 0.193$), sin interacción significativa ($p = 0.131$), tal como recoge la Tabla 24. La prueba de Tukey HSD ubica diferencias significativas entre 12 % y 8 % ($\Delta = 20.31$ kg/m³, $p = 0.031$) y entre 12 % y 4 % ($\Delta = 16.57$ kg/m³, $p = 0.092$); solo la comparación 8 % frente a 4 % ($p = 0.878$) no alcanza significancia. En la prueba de Dunnett (Tabla 25) cinco combinaciones difieren del control (764.6 kg/m³): 4 %-50/50 (-4.3 %), 8 %-75/25 (-5.3 %), 12 %-75/25 (-5.6 %), 12 %-50/50 (-4.5 %) y 12 %-25/75 (-5.3 %).

La reducción de densidad tiene una explicación directa de mezcla: las fibras sustituyen en volumen a un material más denso (yeso fraguado, ≈ 2300 kg/m³ en fase sólida) por fibras vegetales y queratínicas de densidad muy inferior, e incorporan además aire ocluido en la interfaz. Que la reducción resulte moderada, muy inferior al -26 % logrado por Alyousef et al. con polipropileno de desecho [7], indica que las fibras naturales se integran a la matriz sin introducir macroporosidad severa, en línea con la incorporación homogénea descrita por Karua e Islam [6]. Todas las combinaciones permanecen dentro del rango de 600–900 kg/m³ exigido por la NTP 334.185:2015 para placas de 20 mm [15], conservando así la manipulabilidad de las placas sin sacrificar inercia térmica.

4.10. Síntesis del tamaño del efecto y diagnóstico de supuestos

La Figura 17 resume, en un solo panel, el tamaño del efecto (d de Cohen) de las nueve combinaciones reforzadas frente al control para las ocho propiedades evaluadas, permitiendo apreciar de forma comparativa dónde el refuerzo fibroso produce un impacto estadísticamente sustentado (barras verdes, $p < 0.10$ en Dunnett) y dónde su efecto no supera el umbral de significancia (barras grises). El patrón que revela la Figura 17 es nítido: la conductividad térmica y la absorción sumergida concentran los efectos significativos en la totalidad de las combinaciones; la flexión y la dureza los concentran en las dosificaciones de 8 % y 12 %; y el aislamiento acústico no registra ningún efecto individual significativo.

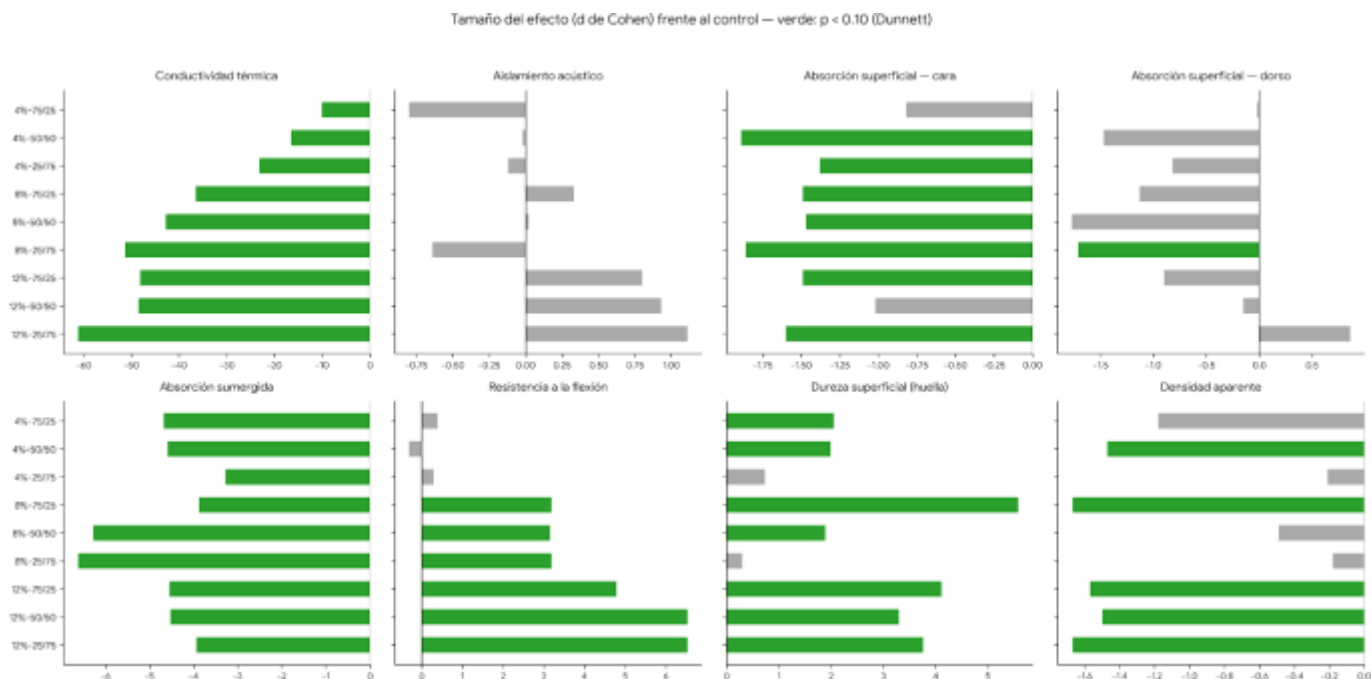


Figura 17: Tamaño del efecto (d de Cohen) de cada combinación frente al control, por propiedad, según la prueba de Dunnett. Verde: $p < 0.10$; gris: no significativo. Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

El objetivo general de esta investigación consistió en evaluar la influencia de la adición de fibras de *Stipa ichu* y lana de alpaca en las propiedades físicas de placas de yeso, con miras a una alternativa constructiva sostenible para viviendas altoandinas. A partir de un diseño factorial 3×3 con grupo control, analizado mediante ANOVA de dos vías, pruebas post hoc de Tukey y Dunnett, análisis de efectos simples y un nivel de significancia $\alpha=0.10$, se formulan las siguientes conclusiones.

En primer lugar, la adición de fibras mejora sustancialmente el comportamiento térmico de las placas. Las nueve combinaciones redujeron significativamente la conductividad térmica frente al control de $0.315 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ($p < 0.001$ en todos los casos), con reducciones que oscilaron entre el -12.9% y el -78.16% . El mejor desempeño correspondió a la combinación 12% de fibra total con proporción $25/75$ ($0.069 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, -73.1%), seguida de 12% $-50/50$ ($0.085 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, -73.13%). Estas mejoras superan ampliamente el -16% máximo reportado con otras fibras naturales [11], lo que evidencia la alta eficiencia del sistema binario ichu-lana alpaca. El efecto del contenido de fibra fue el más pronunciado de todo el estudio ($F=227.01$, $p < 0.001$, $\eta^2 p=0.927$), mientras que la interacción entre contenido y proporción también resultó altamente significativa ($F=9.77$, $p < 0.001$, $\eta^2 p=0.521$), lo que indica que el efecto de la proporción depende del nivel de contenido fibroso.

En cuanto a la absorción de agua, todas las combinaciones redujeron significativamente la absorción sumergida entre un 15.9% y un 27.3% en comparación con el control de 84.9% ($p \leq 0.001$), registrando el mejor desempeño en la combinación de 8% de fibra con proporción $25/75$ (61.7% , -27.3%). En la absorción superficial de la cara expuesta, siete de nueve combinaciones lograron reducciones significativas, destacando 4% - $50/50$ con una captación de 15.94 g/m^2 (-24.3% , $p=0.007$); en el dorso, únicamente 8% - $25/75$ mostró una mejora frente al control (15.78 g/m^2 , -12.4% , $p=0.093$).

En relación con el aislamiento acústico, ninguna combinación superó individualmente al control de 24.55 dB . Únicamente se detectó una diferencia interna que favorece al nivel de 12% de fibra sobre los niveles de 4% y 8% ($p=0.012$ y $p=0.022$, respectivamente), fenómeno atribuible a la ley de masas, dada la escasa variación de densidad a espesor constante. Por tanto, el refuerzo fibroso no confiere una mejora acústica en las condiciones ensayadas.

En la resistencia a la flexión, la carga de rotura aumentó progresivamente con el contenido de fibra. El mejor desempeño correspondió a la combinación 12 %-75/25 (143.6 N, +19.3 % sobre el control de 120.4 N, $p < 0.001$). Las tres proporciones del nivel de 8 % presentaron mejoras del +7.8 %, mientras que las combinaciones de 4 % resultaron estadísticamente indistinguibles del control. Cabe señalar que la variabilidad inusualmente baja registrada en el nivel de 8 % aconseja verificar la trazabilidad instrumental de esos registros antes de dar por concluyente el óptimo mecánico.

En cuanto a la dureza superficial, la combinación 8%-25/75 presentó una huella de 21.43 mm, estadísticamente equivalente al control (21.24 mm, $p = 1.000$). El resto de combinaciones mostraron huellas mayores, es decir, superficies más blandas. No obstante, este comportamiento se acompaña de un modo de falla no catastrófico frente a la fractura frágil e inmediata del yeso sin refuerzo [6, 13], lo que supone una ventaja desde el punto de vista de la seguridad estructural.

Respecto a la densidad aparente, la mayor aligeración se obtuvo con la combinación 12%-75/25 (721.7 kg/m³, -5.6 %, $p = 0.013$). Todas las combinaciones ensayadas se mantuvieron dentro del rango normativo de 600 — 900 kg/m³ establecido por la NTP 334.185:2015 [15], lo que garantiza su viabilidad regulatoria.

En conjunto, la hipótesis general queda respaldada con solidez para la conductividad térmica y la absorción de agua, donde se observaron mejoras estadística y técnicamente significativas en todas las combinaciones ensayadas. No se confirma, en cambio, para el aislamiento acústico frente al control, ya que ninguna formulación superó el desempeño del yeso sin refuerzo. Asimismo, se confirma la existencia de interacciones significativas entre el contenido de fibra y la proporción de mezcla para la conductividad térmica y la absorción de agua, lo que exige dosificar ambos factores de manera conjunta para optimizar estas propiedades.

A partir de los resultados obtenidos, se identifican dos formulaciones de interés según el criterio de diseño. Cuando se busca un equilibrio global de propiedades, la combinación 8 % de fibra total con 25 % de Stipa ichu y 75 % de lana de alpaca ofrece la mejor solución de desempeño: densidad dentro de norma (767.4 kg/m³), mínima absorción sumergida (61.7 %), dureza equivalente al control (21.43 mm), resistencia a la flexión superior al control (+7.8 %, 129.8 N) y reducción térmica del -62.43% (0.117 W/m·K). Por el contrario, cuando el criterio dominante es exclusivamente el máximo desempeño térmico, la combinación 12% 25/75 resulta preferible, con una reducción del -78.16 % en conductividad térmica (0.069 W/m·K).

Finalmente, es preciso señalar que estas conclusiones son válidas dentro de las condiciones de laboratorio en que fueron obtenidas, probetas de 20 mm de espesor y $n = 5$ réplicas por combinación. La variabilidad atípica registrada en el nivel de 8 % para la resistencia a la flexión aconseja verificar la trazabilidad instrumental de esos registros antes de dar por concluyente el óptimo mecánico. Asimismo, el traslado a un escenario constructivo real o a mayor escala requerirá validación complementaria mediante prototipos y ensayos en condiciones de servicio. Con esa salvedad, el material desarrollado constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente coherente para mejorar la habitabilidad de las viviendas altoandinas a partir de recursos plenamente locales, contribuyendo además a la valorización de dos fibras naturales de amplia disponibilidad en la región.

6. ALCANCE, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El tamaño muestral de cinco réplicas por combinación ofrece una potencia estadística limitada para detectar diferencias de magnitud pequeña, lo que explica por qué el aislamiento acústico, con una tendencia descriptiva clara en el nivel de 12 %, no alcanza significancia individual frente al control. En conductividad térmica, absorción superficial de la cara y resistencia a la flexión los residuos se apartaron de la normalidad, aunque las conclusiones se sostienen en la concordancia con las pruebas de robustez de Welch y Kruskal-Wallis. El ensayo acústico empleó una caja reducida derivada de ASTM E90, con rango espectral y difusidad limitados. Tampoco se evaluó la durabilidad a largo plazo del material (ciclos de humedad-secado y hielo-deshielo, degradación biológica de las fibras) ni su comportamiento integrado en un sistema constructivo completo.

Estas limitaciones definen las líneas de continuidad de la investigación: verificar la trazabilidad de los registros de resistencia a la flexión y repetir el ensayo con instrumentación de mayor resolución; ampliar el número de réplicas en las propiedades de menor potencia estadística; caracterizar la absorción sonora del material en tubo de impedancia; evaluar la durabilidad de las formulaciones frente a ciclos higrotérmicos propios del altiplano; y construir un prototipo de vivienda a escala real que permita validar en campo el desempeño conjunto de la formulación óptima, acompañado de un análisis de costos comparativo frente a soluciones convencionales.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Peruana Unión — Campus Juliaca por facilitar las instalaciones de laboratorio empleadas en la fase experimental, y al Mgtr. Ecler Mamani Chambi por su asesoría a lo largo del desarrollo de la investigación, por sus acertadas orientaciones técnicas y metodológicas. Los autores declaran no tener conflictos de interés; el libro de resultados de laboratorio que sustenta el análisis estadístico de este artículo se encuentra disponible bajo solicitud directa a los autores.

8. REFERENCIAS

- [1] Larraín, S. R. (2019). Evolución de las técnicas constructivas en la vivienda del altiplano de la comunidad alpaquera de Orduña, Puno, Perú. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [2] Ocola, A. (2008). Conozca los peligros y vulnerabilidades de los distritos de Crucero, Ajoyani, Corani, Macusani, provincia de Carabaya, región Puno. Lima, PREDES.
- [3] Castillo-Rodríguez, A. P., Santander-Peralta, L. A. and García-Navarro, J. (2022). Compuestos de yeso con adición de fibras textiles de algodón recicladas, *Anales de Edificación*, 8(3), pp. 19-26. DOI: <https://doi.org/10.20868/ade.2022.5092>.
- [4] Oliver-Ramírez, A. (2009). PCM integration in gypsum boards reinforced with polypropylene fibers, PhD Thesis.
- [5] Balti, S., Boudenne, A. and Hamdi, N. (2023). Characterization and optimization of eco-friendly gypsum materials using response surface methodology, *J. Build. Eng.*, 69, 106219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106219>.
- [6] Karua, P. and Islam, M. S. (2023). Effect of jute fiber reinforcement on the mechanical properties of expanded perlite particles-filled gypsum composites, *Constr. Build. Mater.*, 387, 131625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131625>.
- [7] Alyousef, R., Abbass, W., Aslam, F. and Imran, M. (2023). Potential of waste woven polypropylene fiber and textile mesh for production of gypsum-based composite, *Case Stud. Constr. Mater.*, 18, e02099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02099>.
- [8] Nafis Abir, M.T., Siddique, A.B., Begum, H.A., Gafur, M.A., Khan, A.N. and Mahmud, M.A. (2023). Effect of fibre loading on mechanical properties of jute fibre bundle reinforced gypsum composites, *Heliyon*, 9(7), e18147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18147>.
- [9] Sun, Y., Chen, Q., Zhang, X., Ma, Y., Wu, Y., Guo, Z., Tan, H., Bai, L., Huan, S. and Gu, J. (2024). Gypsum reinforced using hemp fibers: enhanced interfacial compatibility by dual-modification strategy, *Constr. Build. Mater.*, 419, 135521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135521>.
- [10] Guna, V., Yadav, C., Maithri, B.R., Ilangovan, M., Touchaleaume, F., Saulnier, B., Grohens, Y. and Reddy, N. (2021). Wool and coir fiber reinforced gypsum ceiling tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance, *J. Build. Eng.*, 41, 102433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102433>.
- [11] Romero-Gómez, M.I., Silva, R.V., Costa-Pereira, M.F. and Flores-Colen, I. (2022). Thermal and mechanical performance of gypsum composites with waste cellulose acetate fibres, *Constr. Build. Mater.*, 356, 129308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129308>.
- [12] Charca, S., Noel, J., Andia, D., Flores, J., Guzman, A., Renteros, C. and Tumialan, J. (2015). Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions, *Energy Build.*, 108, pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.053>.
- [13] Naik, D.L., Sharma, A., Chada, R.R., Kiran, R. and Sirotiak, T. (2019). Modified pullout test for indirect characterization of natural fiber and cementitious matrix interface properties, *Constr. Build. Mater.*, 208, pp. 381-393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.021>.
- [14] Braniša, J., Koóšová, K. and Porubská, M. (2024). Selective modifications of sheep wool usable in non-textile applications, *Polymers*, 16(10), 1380. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16101380>.
- [15] INDECOPI (2015). NTP 334.185:2015. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Lima, INDECOPI.
- [16] INACAL (2016). NTP 339.051:2016. Terminología asociada al yeso, a sus materiales y sistemas de construcción. Lima, INACAL.
- [17] ISO. (2021). Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 1: Application rules for specific products (ISO 10140-1:2021).

- [18] ASTM International (2018). ASTM E90-09(2018). Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements. DOI: <https://doi.org/10.1520/E0090-18>.
- [19] ASTM International (2019). ASTM C177-19. Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0177-19>.
- [20] ASTM International (2021). ASTM C518-21. Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0518-21>.
- [21] Shapiro, S.S. and Wilk, M.B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, 52(3-4), pp. 591-611. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.
- [22] Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances, In: *Contributions to Probability and Statistics*, Stanford University Press, pp. 278-292.
- [23] Langsrud, Ø. (2003). ANOVA for unbalanced data: Use Type II instead of Type III sums of squares, *Statistics and Computing*, 13(2), pp. 163-167. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1023260610025>.
- [24] Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed., Hillsdale NJ, Lawrence Erlbaum Associates. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203771587>.
- [25] Dunnett, C.W. (1955). A multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control, *J. Am. Stat. Assoc.*, 50(272), pp. 1096-1121. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1955.10501294>.
- [26] Tukey, J.W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance, *Biometrics*, 5(2), pp. 99-114. DOI: <https://doi.org/10.2307/3001913>.
- [27] Welch, B.L. (1951). On the comparison of several mean values: an alternative approach, *Biometrika*, 38(3-4), pp. 330-336. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/38.3-4.330>.
- [28] Kruskal, W.H. and Wallis, W.A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis, *J. Am. Stat. Assoc.*, 47(260), pp. 583-621. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>.
- [29] Dénes, T.-O., Iştoan, R., Tămaş-Gavrea, D.R., Manea, D.L., Hegyi, A., Popa, F. and Vasile, O. (2022). Analysis of sheep wool-based composites for building insulation, *Polymers*, 14(10), 2109. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14102109>.

9. ANEXOS SEGÚN ESTRUCTURA DE TESIS EN FORMATO ARTÍCULO:

Anexo 1: Evidencia de sumisión del artículo

21/8/26, 0:57

Gmail - Submission Acknowledgement



Yefri Waldo Ortiz Mamani <yefri.ortizm@gmail.com>

Submission Acknowledgement

1 mensaje

Francesco Iacoviello via Italian Group Fracture <fracturae@gruppofrattura.eu>

21 de agosto de 2026 a las 0:56

Responder a: Francesco Iacoviello <francesco.iacoviello@gruppofrattura.eu>

Para: Yefri Waldo Ortiz Mamani <yefri.ortizm@gmail.com>

Yefri Waldo Ortiz Mamani:

Thank you for submitting the manuscript, "Evaluation of the Physical Properties of Gypsum Boards with Added Stipa ichu Fibers and Alpaca Wool" to Fracture and Structural Integrity. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/dashboard/mySubmissions?workflowSubmissionId=6072>
Username: yefriortiz

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

I wish to remember you that *Fracture and Structural Integrity* is financially supported by the Italian Group of Fracture and by crowdfunding and is completely free of charge both for readers and for authors. Neither processing charges nor submission charges are required. We are grateful for your contribution to our journal and for being part of our great community.

Prof. Francesco Iacoviello
Fracture and Structural Integrity, Editor in Chief
Gruppo Italiano Frattura (IGF), President
Università di Cassino e del Lazio Meridionale - DICeM
via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino (FR), Italy
tel. +39.07762993681



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

RESOLUCIÓN N° 0663-2024/UP-U-PIA-CF-T

Lima, Nueva 27 de agosto de 2024

VISTO:

El expediente de Yefri Waldo Ortiz Mamani, identificado(a) con Código Universitario N° 201710544 y Yameth Ross Sarmiento Copaja identificado(a) con Código Universitario N° 201712317, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que Yefri Waldo Ortiz Mamani y Yameth Ross Sarmiento Copaja, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con adición de fibras de stipa ichu y lana de alpaca." y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 27 de agosto de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con adición de fibras de stipa ichu y lana de alpaca." y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a MSc. Eder Mamani Chambi como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: Ing. Herson Duberty Pari Cusi y Mg. Maribel Samomamani Cusi, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA



Ph.D. Silvia Pilco Quisada
SECRETARIA ACADÉMICA

CC:
-Intermedio
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

	UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
	LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TÍTULO DE TESIS	: "Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con adición de fibras de stipa ichu y lana de alpaca"
UBICACIÓN	: Campus Upeu Fital Juliaca - Juliaca - San Roman - Puno
TESISTAS	: Bach. Ortiz Mamani Yefri Waldo y Bach. Sarmiento Copaja Yaneth Ross
DESCRIPCIÓN DEL ESPECIMEN	: Placa con adición del 12% de fibras (75% ichu + 25% lana de alpaca)
FECHA ELABORACIÓN	: 24 de setiembre del 2024
FECHA EJEC. DE ENSAYO	: 12 de febrero del 2025

ENSAYO:

CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL - CARA DE PROBETA

NORMA NTP 334.185 - 2015

Hora de inicio del ensayo		: 00:45:00		Hora final del ensayo			: 02:45:09	
DESCRIPCIÓN		UND.	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
DIMENSIONES:								
Largo ₍₁₎	L	mm	126.00	125.00	126.00	127.00	124.00	
Ancho ₍₁₎	A	mm	129.00	125.00	124.00	125.00	122.00	
Espesor ₍₁₎	E	mm	23.90	22.00	22.50	21.00	22.30	
Volumen de probeta	$V=L*A*E/1000$	cm ³	388.47	343.75	351.54	333.38	337.35	
PESO:								
Peso de probeta seco	P _S	gr.	291.00	250.00	241.00	247.00	243.00	
Peso de probeta húmedo	P _H	gr.	479.00	411.00	417.00	414.00	406.00	
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL:								
Variación de Peso	$V_P = P_H - P_S$	gr.	188.00	161.00	176.00	167.00	163.00	
Absorción Superficial	$ABS_{SUP} = V_P / 100cm^2$	gr/m ²	18800.0	16100.0	17600.0	16700.0	16300.0	

ENSAYO:

CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL - DORSO DE PROBETA

NORMA NTP 334.185 - 2015

DESCRIPCIÓN			UND.	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
DIMENSIONES:								
Largo ₍₁₎	L	mm	128.00	127.00	127.00	128.00	128.00	
Ancho ₍₁₎	A	mm	125.00	123.00	126.00	125.00	124.00	
Espesor ₍₁₎	E	mm	22.15	22.50	23.50	21.00	21.50	
Volumen de probeta	$V = L \cdot A \cdot E / 1000$	cm ³	354.40	351.47	376.05	336.00	341.25	
PESO:								
Peso de probeta seco	P _s	gr.	250.00	263.00	253.00	279.00	269.00	
Peso de probeta húmedo	P _h	gr.	427.00	432.00	424.00	430.00	442.00	
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL:								
Variación de Peso	$V_p = P_h - P_s$	gr.	177.00	169.00	171.00	151.00	173.00	
Absorción Superficial	$ABS_{SUP} = V_p / 100cm^2$	gr/m ²	17700.0	16900.0	17100.0	15100.0	17300.0	

*Los resultados consignados en el presente certificado se basan en los datos obtenidos durante la ejecución de ensayos realizados en el laboratorio en el marco del trabajo de investigación de los testistas. Las muestras y la ejecución de los ensayos fueron responsabilidad de los testistas, conforme a los procedimientos establecidos, mientras que el laboratorio efectuó el procesamiento y la emisión de los resultados para su certificación.





UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TÍTULO DE TESIS	: "Evaluación de las propiedades físicas de placas de yeso con adición de fibras de stipa ichu y lana de alpaca"
UBICACIÓN	: Campus Upeu Filial Juliaca - Juliaca - San Roman - Puno
TESISTAS	: Bach. Ortiz Mamari Yefri Waldo y Bach. Sarmiento Copaja Yaneth Ross
DESCRIPCIÓN DEL ESPECIMEN	: Placa con adición del 4% de fibras (75% ichu + 25% lana de alpaca)
FECHA ELABORACIÓN	: 24 de setiembre del 2024
FECHA EJEC. DE ENSAYO	: 25 de febrero del 2025

ENSAYO:

ABSORCIÓN TOTAL DE AGUA (SUMERGIDO)

NORMA NTP 334.185 - 2015

HORA DE INICIO DE ENSAYO	: 00:30:00	ORA DE FINAL DE ENSAYO		: 02:30:00			
DESCRIPCIÓN		UND.	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
DIMENSIONES:							
Largo ₍₁₎	L	mm	306.67	299.00	298.67	301.67	298.57
Ancho ₍₁₎	A	mm	303.33	296.67	300.67	296.00	301.00
Espesor ₍₁₎	E	mm	21.20	20.62	20.30	19.75	21.28
Volumen de probeta	V=L*A*E/1000	cm ³	1972.30	1828.62	1822.92	1775.68	1913.04
PESO:							
Peso de probeta seco	P _s	gr.	1570.00	1330.00	1280.00	1340.00	1430.00
Peso de probeta húmedo	P _h	gr.	2610.00	2270.00	2230.0	2270.00	2440.00
DENSIDAD:							
Densidad aparente	D=P _s /V	gr/cm ³	0.796	0.727	0.702	0.755	0.747
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL:							
Absorción Superficial	V _a = (P _h - P _s) / P _s	%	66.24%	70.68%	74.22%	69.40%	70.63%

*Los resultados consignados en el presente certificado se basan en los datos obtenidos durante la ejecución de ensayos realizados en el laboratorio en el desarrollo de trabajo de investigación de los tesisas. Las muestras y la ejecución de los ensayos fueron responsabilidad de los tesisas, conforme a los procedimientos establecidos, mientras que el laboratorio efectuó el procesamiento y la emisión de los resultados para su certificación.





8ft

PHFS Certificate of Calibration

www.FluxTeq.com info@fluxteq.com +1-540-257-3735

Sensor Model: PHFS - 01e

Serial Number: PH - 11687

Date of Calibration: 4/26/24

Sensor Calibration Method

PHFS-01 and PHFS-01e heat flux sensors are calibrated using a conduction based calibration system. The sensors are placed between a precisely controlled hot plate surface, heated by a resistance heater, and a cold water cooled surface. This calibration system was developed in-house by FluxTeq LLC and provides results of up to 5% accuracy.

Calibration Test Results

Heat Flux Sensor Sensitivity, S_{Calib}	1.02 $\pm 0.03 \mu V/(W/m^2)$
Sensor Temperature at Time of Calibration, T_{Calib}	25.0 $^{\circ}C$
Heat Flux at Time of Calibration	3420 W/m^2

- Sensors should be recalibrated after 1 year to ensure accuracy.
- Each individual sensor is calibrated in conduction system to within 5%.
- Alternate calibration procedures under radiation and convection conditions are available upon request for additional cost per sensor.

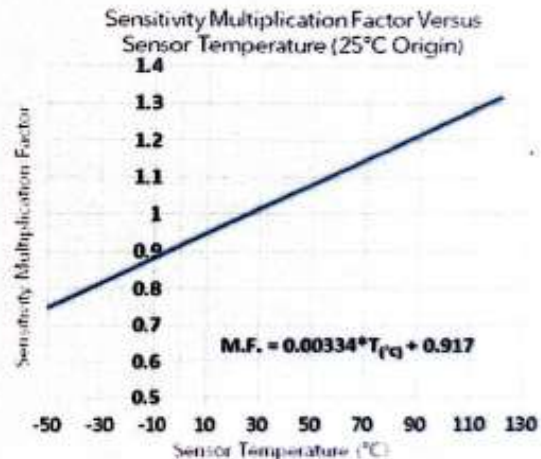
Apply the Sensitivity Multiplication Factor (M.F.) to adjust sensor sensitivity when the sensor temperature is significantly different than 25 $^{\circ}C$.

The resulting sensitivity at that sensor temperature, $S_{@T_c}$, can be found using the following equation.

$$S_{@T_c} = [0.00334 \cdot T_c + 0.917] \cdot S_{Calib}$$

Where T_c is the sensor's temperature in degrees Celsius & S_{Calib} is the calibrated sensor sensitivity provided in the table above.

Calibrated by: JA



For additional information about PHFS heat flux sensor specifications, applications, or general inquiries, use the following contact information or visit the FluxTeq website at www.FluxTeq.com

Direct General Inquiries To: info@FluxTeq.com Phone: +1-(540) 257-3735

Email: info@FluxTeq.com Homepage: www.FluxTeq.com Phone: +1-(540)257-3735
1800 Kraft Drive, Suite 109, Blacksburg, VA 24060-6370