

FABRICACIÓN DE MORTEROS ALIGERADOS CON PERLITA Y CAL APLICADOS EN PANELES CON MATRIZ DE RESIDUOS DE PAJA DE ARROZ

Recibido 28/08/2023
Aceptado 18/11/2023

MANUFACTURE OF LIGHTENED MORTARS WITH PERLITE AND LIME APPLIED IN PANELS WITH A RICE STRAW RESIDUE MIX

FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS LEVES COM PERLITA E CAL APLICADAS EM PAINÉIS COM MATRIZ DE RESÍDUOS DE PALHA DE ARROZ

Henry Anderson Ramos-Rodríguez

Magíster en Ingeniería Civil, mención Estructuras
Investigador, Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción.
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-8981-6345>
haramos3@espe.edu.ec

Luisa Paulina Viera-Arroba

Doctora en Ingeniería Civil
Docente, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas.
Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0003-0434-7979>
lviera@uce.edu.ec



RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar y caracterizar morteros de revoco a base de perlita y cal producida en Ecuador, con una resistencia mínima a compresión de 6.89 MPa, conforme lo establece el IRC 2018. Esto, con el fin de ser aplicado sobre paneles elaborados con paja de arroz. Para ello, se diseñan 2 mezclas patrón. En la primera se usa arena como árido fino, mientras que para la segunda se usa perlita. De cada una se obtienen 8 mezclas adicionales, en las que se sustituye el cemento por cal (en volumen) en diferentes porcentajes. Se realizan 270 probetas con la finalidad de evaluar la resistencia a compresión y la densidad de los morteros a 1, 3, 7, 28 y 50 días. El mortero elaborado con perlita y compuesto por 50% cal, 50% cemento y aditivo, alcanzó una resistencia de 7.22 MPa, con una densidad de 1.45 g/cm³. Al aplicar esta mezcla sobre los paneles elaborados con paja de arroz, dio como resultado el aumento de su resistencia a compresión hasta un 68%.

Palabras clave

revoco; mortero; paja

ABSTRACT

This research aims to design and characterize plaster mortars based on perlite and lime produced in Ecuador, with a minimum compressive strength of 6.89 MPa, as established by IRC 2018, to be applied on rice straw panels. For this purpose, two standard mixes are designed. In the first, sand is used as fine aggregate, while in the second, perlite is used. Eight additional mixes are obtained from each one, where cement is replaced by lime (in volume) in different percentages. A total of 270 test specimens were made to evaluate the compressive strength and density of the mortars at 1, 3, 7, 28, and 50 days. The mortar made with perlite, comprising 50% lime, 50% cement, and an additive, reached a resistance of 7.22 MPa, with a density of 1.45 g/cm³. When this mixture was applied to the rice straw panels, it resulted in an increase of up to 68% in their compressive strength.

Keywords

plaster, mortar, straw

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é projetar e caracterizar argamassas de reboco à base de perlita e cal produzidas no Equador, com uma resistência à compressão mínima de 6,89 MPa, conforme estabelecido pelo IRC 2018. Isso, para ser aplicado em painéis feitos com palha de arroz. Para isso, foram projetadas duas misturas padrão. Na primeira, a areia é usada como agregado fino, enquanto na segunda, é usada perlita. A partir de cada uma delas, são obtidas 8 misturas adicionais, nas quais o cimento é substituído por cal (em volume) em diferentes porcentagens. Foram feitos 270 corpos de prova para avaliar a resistência à compressão e a densidade das argamassas em 1, 3, 7, 28 e 50 dias. A argamassa feita com perlita e composta por 50% de cal, 50% de cimento e aditivo, atingiu uma resistência de 7,22 MPa, com densidade de 1,45 g/cm³. Quando essa mistura foi aplicada aos painéis feitos com palha de arroz, ela resultou em um aumento de até 68% na resistência à compressão.

Palavras-chave:

reboco, argamassa, palha.

INTRODUCCIÓN

Un estudio realizado por los investigadores Stephan y Athanssiadis (2018) concluyó que, en los últimos 100 años, la población mundial ha aumentado en 4 veces su número, mientras que el consumo de materiales extraídos de la corteza terrestre lo ha hecho en 10 veces, cuyo principal impulsor es la industria de la construcción. De acuerdo con el mismo estudio, el uso de minerales de construcción tuvo un aumento de 42 veces al año 2010 (Stephan & Athanssiadis, 2018). La relación entre estos datos no es al azar, puesto que el crecimiento poblacional deriva en un mayor requerimiento de viviendas e infraestructura, lo que, a su vez, permite el desarrollo del comercio y de la economía (Mendoza & Vanga, 2021).

En este sentido, tanto el desarrollo industrial, como el incremento de industrias y crecimiento poblacional han derivado también en una mayor generación de desechos de construcción, tales como: cenizas volantes, humo de sílice, vidrio, residuos de concreto, acero, entre otros (Sudharsan & Sivalingam, 2019). Por este motivo, se ha hecho necesario estudiar materiales donde prevalezcan criterios de economía circular y se fomente la creación de nuevos productos (Zhang et al., 2018), a la vez que estén en sintonía con la necesidad de minimizar los residuos y reducir el consumo de energía (Fernández et al., 2020).

En este contexto, varias investigaciones han señalado como una alternativa para construir sustentablemente a los paneles con paja, madera y morteros. En estos, la paja es el principal material, la cual en varias ocasiones es quemada y desechada por los agricultores causando contaminación ambiental por las emisiones de CO₂ (Teslík, 2021). Este desecho agroindustrial, cuando se utiliza en la construcción, aporta soluciones que ofrecen un desarrollo económico de calidad, bienestar social y respeto por el medio ambiente (Cascone et al., 2019). Según datos estadísticos, en Ecuador en el 2010 se produjeron 1.132.267 toneladas de arroz, con una superficie de 382.230 hectáreas (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, 2022), lo cual genera una gran cantidad de residuo (paja) que podría ser aprovechada.

Por su parte, la elaboración de los paneles de paja se realiza tomando los fardos de paja directamente del productor agrícola o mediante el uso de una enfardadora manual. Luego, son acomodados a rompejuntas dentro de un marco de madera, cuyas dimensiones permiten la constitución de un panel que se acomode al diseño arquitectónico de una vivienda. En cuanto al mortero para revoco, este consiste en una mezcla de agregados (arena o perlita) y conglomerantes (cal y cemento), en proporciones tales que permitan proteger a la paja de agentes externos y mejorar las propiedades estructurales del panel.

La energía requerida para realizar los paneles y edificar con ellos es insignificante debido a su fácil montaje y desmontaje. Además, ofrece una resistencia térmica muy alta, ventilación adecuada, mayor confort y seguridad contra incendios, en comparación con el uso de materiales tradicionales (Muntani et al., 2020). Por esta razón, las edificaciones construidas con paneles de paja de arroz y morteros de recubrimiento consumen muy poca energía, al mismo tiempo que son sustentables dado que, al final de su vida útil, la madera se puede recuperar o incinerar, la paja, compostar y la cal, utilizarla en el suelo para el mejoramiento de los campos agrícolas (Martínez, 2019).

El mortero de recubrimiento o revoco en los paneles cumple varias funciones importantes. Una de estas es controlar la humedad dentro del mismo y así evitar el pudrimiento de la paja (Walker et al., 2020). Asimismo, los protege ante agentes externos como la lluvia, el sol e incluso, de insectos u organismos que puedan alterar su vida útil (Martínez, 2019). Por lo tanto, es primordial estudiar materiales innovadores como alternativas de reemplazo al cemento Portland para la elaboración de estos morteros, ya sea en diferentes proporciones o en su totalidad (Aprianti, 2017).

En este sentido, la cal hidratada o hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) es una alternativa y ha sido estudiada muy poco para estos fines, debido al surgimiento del cemento en la construcción (Apostolopoulou et al., 2021). Este material es considerado sostenible, ya que puede generar un 50% menos de contaminación en comparación con el proceso de industrialización del cemento (Hermida, 2021).

Debido a la reacción que se produce entre este material y los gases de la atmósfera durante el proceso de fraguado, en cuanto a que la cal atrapa CO₂, los tiempos de endurecimiento del mortero tienden a ser más lentos, a diferencia de los aglutinantes hidráulicos (Pahlavan et al., 2018). Sin embargo, con el tiempo este proceso químico permite que las fisuras presentadas en el mortero endurecido se autosellen, brindando una mayor durabilidad y permeabilidad al vapor de agua gracias a que la cal aumenta el contacto entre las partículas del agregado fino (Zhang et al., 2018).

La presente investigación tiene como objetivo principal el diseño y caracterización de un mortero a base de cal y perlita. Esto, con el fin de utilizarlo como revoco en paneles a base de paja obtenida como desecho de la cosecha del arroz que cumplan con parámetros estructurales ideales en la construcción de viviendas. Además, dicho revoco debe aportar al panel una resistencia adecuada y menor peso, con condiciones de sustentabilidad al permitir en su mezcla la mayor cantidad de cal como reemplazo del cemento. Se debe comprobar, por lo tanto, que el uso de cal en vez de cemento en el mortero mantenga los límites de resistencia requeridos de 6.89 MPa, conforme a lo que señala la norma americana de construcción con paja IRC 2018 (Tabla 1) y por las normas ecuatorianas NTE INEN

(Instituto Ecuatoriano de Normalización) e internacionales ASTM (*American Society of Testing and Materials*) para el diseño del mortero.

Tabla 1: Resistencia mínima a compresión de revocos para paredes elaboradas con paja. Fuente: (IRC, 2018)

Tipo de revoco	Resistencia mínima a compresión	
	(PSI)	(MPa)
Arcilla	100	0.69
Suelo - Cemento	1000	6.89
Cal	600	4.14
Cemento - Cal	1000	6.89
Cemento	1400	9.65

Ante la presencia de humedad, y al igual que la madera, la paja se degrada con el tiempo (Yin et al., 2018). Por lo tanto, la investigación de materiales como la cal para el diseño de revocos que controlen la humedad y garanticen la armonía entre la humectación y el secado, aseguran la durabilidad y buen comportamiento de edificaciones realizadas con paja (ESBA, 2021). Aquellos morteros que tienen en su composición mayor cantidad de cal presentan aceptable permeancia y permeabilidad (Pavia & Brennan, 2018), de tal manera que evitan la pudrición de la paja.

En consecuencia, es necesario que los morteros no solo cumplan la resistencia señalada, sino que también la densidad sea la menor posible debido al gran volumen que ocupa en el panel. Por este motivo, se diseñan morteros con arena y otros con perlita. La perlita es un agregado fino de baja densidad, posee una textura porosa y tiene la capacidad de retener agua en su superficie (Artigas et al., 2022).

Actualmente existe pocos estudios sobre el uso de cal y perlita en la elaboración de morteros para los fines indicados. Sin embargo, se puede destacar el realizado por Viera y Acero (2022), que evalúa la resistencia a compresión de morteros elaborados a base de cales producidas y comercializadas en Ecuador, con el fin de utilizarlos como pega en mampostería. Con la cal proveniente de la cantera La Paz, se obtiene la mayor resistencia a compresión, la que es igual a 3.5 MPa a los 28 días. Además, caracteriza 4 cales adicionales (San Juan, San José, Incoreg, Indami), que ofrecen menores resistencias.

En este sentido, para promover el uso de materiales como la perlita, la cal y la paja, es necesario desarrollar estudios que determinen cuáles son sus características tanto

físicas como mecánicas de forma individual y conjunta como es el panel. Además, aporten datos que permitan a profesionales de la construcción efectuar el respectivo modelamiento y análisis estructural de edificaciones con prefabricados de paja. Esta investigación proporciona datos relevantes acerca de la dosificación y resistencia de morteros de baja densidad con contenido de cal y perlita, que al ser aplicados sobre el panel puedan ser una alternativa en la construcciones convencionales y sustentables.

METODOLOGÍA

En el desarrollo de esta investigación se siguieron los procedimientos establecidos en las normas ecuatorianas NTE INEN y las normas internacionales ASTM, las cuales fueron utilizadas en la caracterización tanto de los materiales que componen el mortero, como de la evaluación de sus propiedades en conjunto y también para determinar la resistencia a compresión en los paneles de paja.

En la Figura 1 se resume la metodología llevada a cabo para el desarrollo de la investigación, explicada en detalle en los siguientes apartados. El estudio inicia desde la selección de los materiales y la caracterización de los mismos para proceder con el diseño de dos mezclas patrón MP1 (cemento + arena + agua) y MP2 (cemento + perlita + agua) por el método de la densidad óptima. De cada una de estas mezclas, se obtienen 8 variantes adicionales donde se sustituye el cemento por la cal en porcentajes del 30%, 50%, 70% y 90%. Además, en algunas de estas se añade aditivo.

Se realizaron un total de 270 probetas cúbicas de 50 mm de arista con cada mezcla de estudio, a fin de determinar la densidad y la resistencia a compresión de los morteros a 1, 3, 7, 28 y 50 días. La mezcla seleccionada será aquella que permita la obtención de un mortero de baja densidad, con mayor contenido de cal y una resistencia óptima igual o superior a 6.89 MPa a los 28 días de edad, conforme lo establece el código de construcción con paja IRC 2018 para que este pueda ser utilizado sobre paredes.

Finalmente, la mezcla seleccionada será aplicada en las caras externas de 3 paneles prefabricados con marcos de madera y paja de arroz previamente enfardada. Para luego ser ensayados a compresión y obtener propiedades como carga ultima, resistencia y peso de los mismos. El ensayo a compresión también se ejecuta en 3 paneles adicionales donde no se ha aplicado el recubrimiento, con el objetivo de determinar la funcionalidad y contribución del mortero dentro del panel frente a estas solicitaciones de cargas.

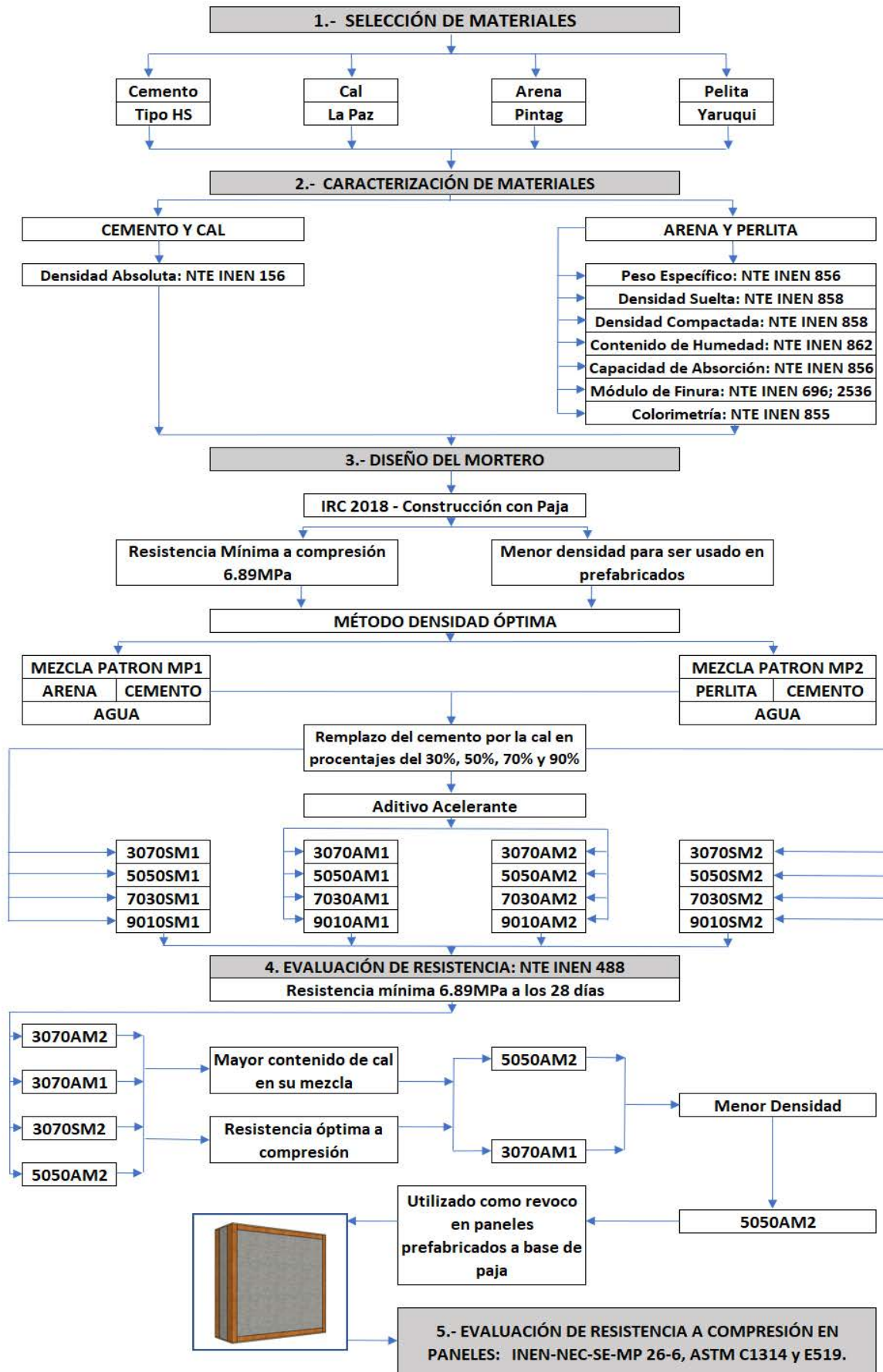


Figura 1: Metodología a seguir para el desarrollo de la investigación. Fuente: Elaboración de los autores.

MATERIALES

Para la realización de las mezclas se utilizó cemento hidráulico de alta resistencia a los sulfatos (HS), cuya densidad absoluta es de 2.80 g/cm³. A continuación, en la Tabla 2, se indican las propiedades físicas del cemento tipo HS, en concordancia a lo que señala la norma NTE INEN 2380 y ASTM C1157.

Tabla 2: Propiedades físicas del cemento. Fuente: (NTE INEN 2380, 2011)

Propiedades Físicas	NTE INEN	ASTM	Cemento Tipo HS
Cambio de longitud por autoclave (%)	200	C-490	0.80
Tiempo de fraguado inicial (min)	158	C-191	≥45≤120
Resistencia a compresión (MPa)	488	C-109	3día = 11 7día = 18 28día = 25
Expansión barra de mortero 14 días (%)	2529	C-1038	0.020
Expansión por sulfatos / Resistencia a sulfatos (%)	2503	C-1012	6 mes = 0.05 1 año = 0.10

Como reemplazo del cemento en diferentes porcentajes (30%, 50%, 70% y 90% en volumen) se utilizó cal hidratada de producción nacional, extraída de la calera La Paz (Carchi – Ecuador), la que, de acuerdo a su uso y según la norma NTE INEN 247, se clasifica como tipo N (Cal normal sin aire incorporado utilizada en morteros y revoques de cemento). Las propiedades físicas-químicas de la cal se indican a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades físicas-químicas de la cal. Fuente: Elaboración de los autores.

Propiedades Físicas - Químicas	NTE INEN	ASTM	Cal Tipo N
Densidad absoluta (g/cm ³)	156	C-144	2.20
Densidad aparente suelta (g/cm ³)	858	C-29	0.82
Densidad aparente compactada (g/cm ³)	858	C-29	0.90
Residuo tamiz N°30 (%)	244	C-110	23.20
Óxidos de calcio (%)	250	C-25-19	36.00
Óxidos de magnesio (%)	250	C-25-19	1.90

En el primer diseño de mezclas para la elaboración del mortero se utilizó arena como agregado fino, procedente de la cantera ubicada en la parroquia de Pintag (Quito – Ecuador), mientras que, para el segundo diseño, se utilizó perlita como agregado fino, procedente de la parroquia Yaruquí (Quito – Ecuador). Ambos materiales cumplen con la granulometría para ser utilizados en morteros según la norma NTE INEN 2536. A continuación, en la Figura 2 y Figura 3 se indican las curvas granulométricas de los agregados.

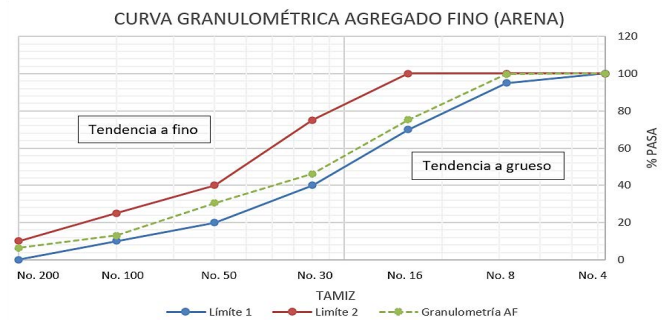


Figura 2: Curva granulométrica de la arena. Fuente: Elaboración de los autores.

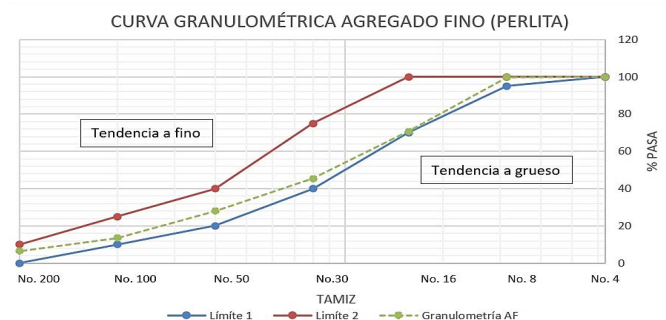


Figura 3: Curva granulométrica de la perlita. Fuente: Elaboración de los autores.

La apariencia de la perlita es similar a las bolitas de poliestireno (como se muestra en la Figura 4) y se utiliza en la construcción cuando se requiere mejorar propiedades térmicas, acústicas y obtener mayor ligereza (El Mir et al., 2020). La incorporación de la perlita en las mezclas permite realizar una comparación de las densidades de los morteros, con el fin de encontrar uno, lo más ligero posible en equilibrio con su resistencia a compresión.

Tanto para la arena como para la perlita, cemento y cal se realizan ensayos con la finalidad de identificar su peso específico, densidad suelta y compactada, contenido de humedad, capacidad de absorción, granulometría, módulo de finura y colorimetría. Lo anterior se muestra en la Figura 5.



Figura 4: Perlita. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 5: Ensayos de laboratorio: a) cemento y cal, b) perlita, c) arena. Fuente: Elaboración de los autores.

Los resultados de los ensayos realizados en la arena y la perlita se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4: Propiedades físicas de la arena y perlita. Fuente: Elaboración de los autores.

Propiedades Físicas Ensayo	NTE INEN	ASTM	Arena	Perlita
Peso Específico (g/cm ³)	856	C-127	2.41	1.44
Densidad Suelta (g/cm ³)	858	C-29	1.41	0.60
Densidad Compactada (g/cm ³)	858	C-29	1.60	0.68
Contenido de Humedad (%)	862	C-127	1.04	3.39
Capacidad de Absorción (%)	856	C-127	2.26	9.55
Módulo de Finura	2536	C-136	2.44	2.43
Colorimetría	855	C-40	SPMO	SPMO

SPMO: Sin presencia de materia orgánica

El uso de la cal en las mezclas de mortero retarda los tiempos de fraguado y disminuye su resistencia a edades tempranas. Por esta razón, ha sido necesario el uso de un aditivo acelerante (Plastocrete 161 HE) con densidad 1.10 kg/dm³. Su dosificación puede variar entre 0.2% y 2.5% del peso del cemento y se lo agrega al agua de amasado de forma manual.

Por su parte, la paja de arroz utilizada para elaborar los paneles es previamente enfardada y sus propiedades físicas se indican en la Tabla 5.

Tabla 5: Propiedades físicas fardos de paja. Fuente: Elaboración de los autores.

Propiedades Físicas	Fardo
Dimensiones (cm)	35x45x120
Densidad absoluta (kg/m ³)	84.00
Contenido de humedad (%)	13.00
Peso (kg)	12.90

DISEÑO DE LAS MEZCLAS

Mediante el método de la densidad óptima, se llevaron a cabo 2 diseños de mezclas patrón, denominadas para estos efectos MP1 y MP2. Ambas contaban con una resistencia de diseño de 12.40 MPa, correspondiente a morteros de cemento y cal tipo S (que tienen mejor adherencia y uso en revestimientos) según la norma NTE INEN 2518. A partir de estas mezclas base, se generaron variantes en las que se sustituyó el cemento por la cal en diferentes proporciones, con el propósito de encontrar el porcentaje óptimo de cal que garantice una resistencia mecánica mínima de 6.89 MPa, de acuerdo con los parámetros del código IRC 2018.

En el diseño MP1 se empleó agua, cemento y arena, mientras que en el diseño MP2 se usó perlita como árido fino, dado que posee baja densidad, es fácilmente accesible en el medio local y tiene un costo similar al de la arena. De cada una de estas mezclas se obtuvieron 8 variantes, en las cuales se les agregó aditivo a 4 mezclas (aditivo acelerante de resistencia al 2.5% del peso del cemento) y a los 4 restantes no se les añadió aditivo. Además, en cada grupo de mezclas se reemplazó el cemento por la cal en proporciones del 30%, 50%, 70% y 90%. La metodología a seguir para obtención de las mezclas se resume en la Figura 6.

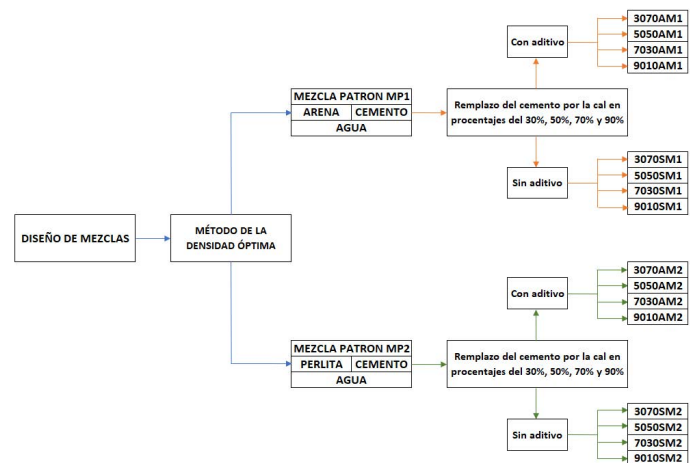


Figura 6: Metodología a seguir para la obtención de las mezclas. Fuente: Elaboración de los autores.

Para las mezclas obtenidas se utilizó la codificación que se indica en la Figura 7, que toma como ejemplo la mezcla 9010AM1.

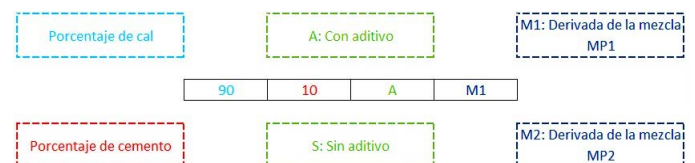


Figura 7: Codificación para las mezclas de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 6: Dosificación en kilogramos para un metro cúbico de mortero. Fuente: Elaboración de los autores.

Id.	Cal (kg)	Cemento (kg)	Agregado Fino (kg)	Agua (kg)	Aditivo (kg)
MP1	0.00	339.63	1446.50	392.29	0.00
9010AM1	240.17	33.96	1446.50	390.29	8.49
9010SM1	240.17	33.96	1446.50	390.29	0.00
7030AM1	186.80	101.89	1446.50	370.75	8.49
7030SM1	186.80	101.89	1446.50	370.75	0.00
5050AM1	133.43	169.82	1446.50	370.29	8.49
5050SM1	133.43	169.82	1446.50	370.29	0.00
3070AM1	80.06	237.74	1446.50	342.86	8.49
3070SM1	80.06	237.74	1446.50	342.86	0.00
MP2	0.00	523.63	552.40	404.88	0.00
9010AM2	370.28	52.36	552.40	408.31	13.09
9010SM2	370.28	52.36	552.40	408.31	0.00
7030AM2	288.00	157.09	552.40	383.05	13.09
7030SM2	288.00	157.09	552.40	383.05	0.00
5050AM2	205.71	261.82	552.40	371.62	13.09
5050SM2	205.71	261.82	552.40	371.62	0.00
3070AM2	123.43	366.54	552.40	360.20	13.09
3070SM2	123.43	366.54	552.40	360.20	0.00

Las cantidades en kilogramos de agua, cemento, cal, arena, perlita y aditivo para un metro cúbico de mortero elaborado con las mezclas patrón MP1, MP2 y sus derivadas se indica a continuación en la Tabla 6.

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Morteros

Todos los morteros elaborados presentan un flujo de $110\% \pm 5\%$, tal como lo indica la norma NTE INEN 488. Esta propiedad garantiza la manejabilidad de las mezclas sin generar problemas de segregación. Inspirados por la técnica usada por Echeverría et al., (2022) en un estudio similar en cuanto a la elaboración de paneles sostenibles para interiores de viviendas mediante el uso de fibra de plátano y cáscaras de maní, se fabricaron 15 probetas cúbicas (Figura 8) de 50x50x50 mm de arista para cada una de las 18 mezclas, incluyendo las muestras patrón (Echeverría et al., 2022).

Para efectos de este trabajo, se llevó a cabo un total de 270 ensayos de compresión en cubos de mortero para evaluar su resistencia, siguiendo las pautas establecidas por la norma NTE INEN 488. Para cada mezcla, se fabricaron 3 probetas



Figura 8: Elaboración de probetas cúbicas de mortero. Fuente: Elaboración de los autores.

a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días. Las probetas fueron almacenadas en una cámara de curado hasta alcanzar la edad especificada, siguiendo los requisitos indicados en la norma ASTM C511. Debido a la presencia de cal hidratada en las mezclas de mortero, las probetas no fueron sumergidas en agua, sino que estuvieron expuestas al aire libre para interactuar con el CO_2 y fraguar.

El ensayo de compresión de las probetas se realizó utilizando una máquina universal de 200 toneladas (Figura 9), equipada con discos metálicos para una distribución efectiva de la carga sobre el área de aplicación del cubo. La velocidad de carga fue de 0.25 MPa/s y estuvo controlada por un sistema automatizado.

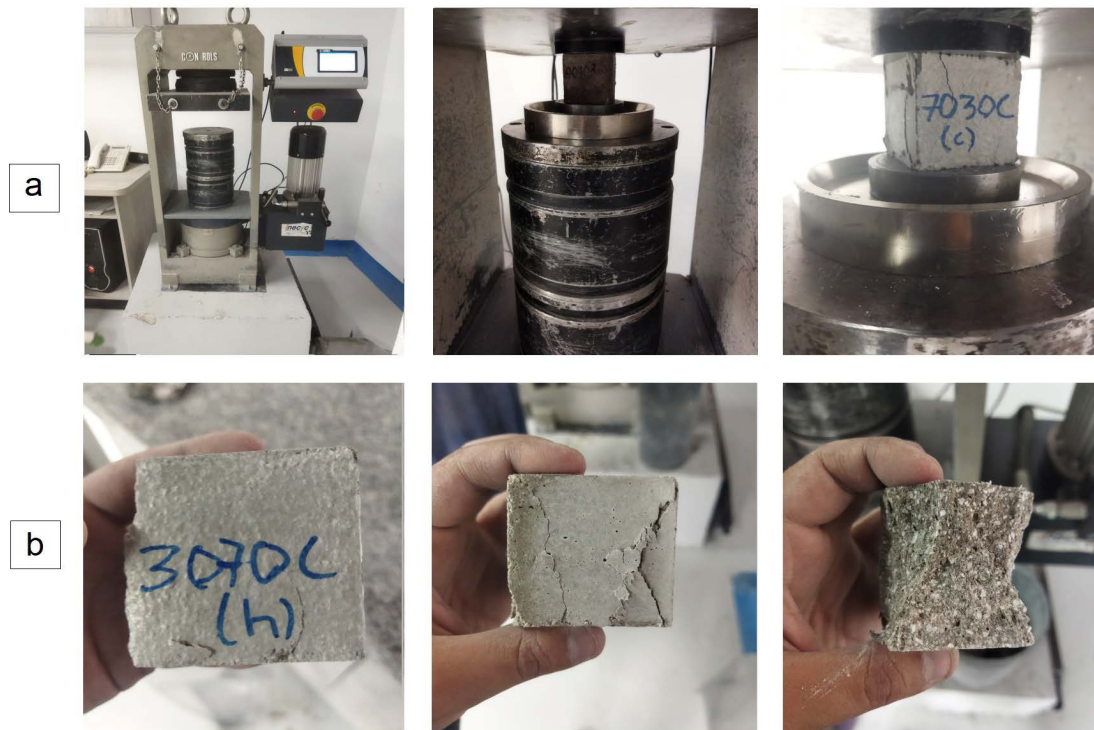


Figura 9: Ensayo a compresión: a) equipos, b) probetas cúbicas. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 10. Construcción de paneles Fuente: Elaboración de los autores.

Paneles

Con respecto a la elaboración de paneles, se construyeron 6 muestras a base de paja y marcos de madera de 1.20 m de largo, 1.20 m de altura y 0.35 m de espesor. Al igual que en el ensayo anterior, el total de muestras se dividió por la mitad, agregándole a 3 de ellos mortero y a los otros 3, no (Figura 10).

En los paneles que incluyen mortero, se aplicó una capa de 2.5 cm de espesor en ambas caras (Figura 11), elaborada con la mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita,

con aditivo). Esta mezcla cumple con el objetivo de esta investigación al ofrecer condiciones de sostenibilidad y cumplir con las propiedades requeridas, como resistencia y densidad.

Los paneles fueron sometidos a ensayos de compresión, tal como se muestra en la Figura 12, y siguiendo los procedimientos establecidos en las normas INEN-NEC-SE-MP 26-6, ASTM C1314. Para los ensayos se utilizó un sistema de carga compuesto por una celda de 20 toneladas y un cilindro hidráulico de 100 toneladas, los cuales son controlados por una bomba hidráulica de 10000Psi. Se



Figura 11. Aplicación en paneles del mortero elaborados con la mezcla 5050AM2. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 12. Ensayo a compresión de paneles: a) sin mortero, b) con mortero. Fuente: Elaboración de los autores.

colocaron 2 LVDTs (medidores de desplazamientos) sobre el panel, conectados a una caja UPM HBM de 80 canales que registran los datos de carga y desplazamientos. La velocidad del ensayo fue de 0.03 mm/s, conforme a lo que se indica en las normas.

El ensayo de compresión de los paneles se llevó a cabo a fin de determinar la capacidad estructural del conjunto de materiales que los componen (marco de madera, paja y revoco), tal como se utiliza en las edificaciones. Además, se buscó determinar si el mortero previamente diseñado aporta resistencia al panel. Las cargas axiales aplicadas durante el ensayo representaron las solicitaciones reales de cargas muertas y vivas que gobiernan en las estructuras. El valor resultante de la resistencia a compresión del panel permitirá profundizar en el modelamiento estructural de las construcciones donde se utilicen este tipo de prefabricados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 13 se presentan los resultados de la resistencia a compresión a diferentes edades (1, 3, 7, 28 y 50 días) de los morteros elaborados a partir del diseño de mezclas patrón MP1. Se observa que MP1 exhibe valores de resistencias a compresión superiores a las demás mezclas, ya que contiene un aglomerante compuesto al 100% de cemento, calculado mediante el método de la densidad óptima. La inclusión de un aditivo al 2.5% del peso del cemento en las mezclas derivadas de MP1 resulta en un aumento en su resistencia que varía entre un 20.13% y un 51.52%. Estos hallazgos sugieren la conveniencia de incluir aditivos en los morteros de cal para reducir el tiempo de fraguado y lograr mayores resistencias a edades tempranas. En particular, la mezcla 3070AM1 cumple con la resistencia a compresión mínima

requerida de 6.89 MPa a los 28 días de edad, con una resistencia media de 7.19 MPa, superando el objetivo en 0.30 MPa. Esto indica su idoneidad para ser utilizada como revoco en edificaciones elaboradas con paneles de paja.

Además, en la Figura 14 se presentan los resultados de la resistencia a compresión a diferentes edades (1, 3, 7, 28 y 50 días) de los morteros elaborados a partir del diseño de mezclas patrón MP2. Al igual que con MP1, la resistencia a compresión de este mortero es superior a las demás mezclas, debido a su composición con un aglomerante compuesto al 100% de cemento. Es importante destacar que esta mezcla contiene un 54% más de cemento que MP1, ya que se utiliza perlita como agregado fino, cuya densidad es de 0.68 g/cm³. En comparación con la arena, cuya densidad es de 1.60 g/cm³, se observa una reducción del 57.5%, lo que resulta en una mayor cantidad de pasta en la mezcla.

La sustitución de cemento por cal en MP2, en porcentajes del 30%, 50%, 70% y 90%, conlleva a una disminución en la resistencia a compresión. A medida que aumenta el porcentaje de cal en la mezcla y disminuye el porcentaje de cemento, también disminuye la resistencia a compresión, lo cual es un comportamiento similar a lo observado en las mezclas generadas a partir de MP1. La incorporación de un aditivo al 2.5% del peso del cemento da como resultado un aumento en su resistencia que varía entre un 33.33% y un 72.28%. En este caso, la mezcla que cumple con la resistencia a compresión mínima requerida de 6.89 MPa a los 28 días de edad es la 5050AM2, con una resistencia de 7.22 MPa, superando la resistencia objetivo en 0.33 MPa. Esto indica que también puede ser utilizada como revoco en edificaciones elaboradas con paneles de paja.

En la Figura 15 se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a compresión a los 28 días de los morteros estudiados en esta investigación. Se observa que hay 6 mezclas (MP1, MP2, 3070AM1, 3070AM2, 3070SM2, 5050AM2) que muestran una resistencia a compresión por encima del valor requerido de 6.89 MPa. Las demás mezclas obtuvieron valores por debajo de este umbral, por lo que se descartarían para su uso. Sin embargo, de las 6 mezclas seleccionadas, dos corresponden a las mezclas patrón MP1 y MP2, las cuales no contienen cal en su composición y no cumplen con el objetivo de la investigación.

De las 4 mezclas restantes, se observa que las mezclas 3070AM2 (30% cal, 70% cemento, perlita, con aditivo) y 3070SM2 (30% cal, 70% cemento, perlita, sin aditivo) generan morteros con resistencia a compresión de 13.09 MPa y 8.90 MPa respectivamente, superando el valor mínimo requerido en un 89.99% y 29.17%. Por su parte, las mezclas 3070AM1 (30% cal, 70% cemento, arena, con aditivo) y 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita, con aditivo) generan morteros con resistencia a compresión

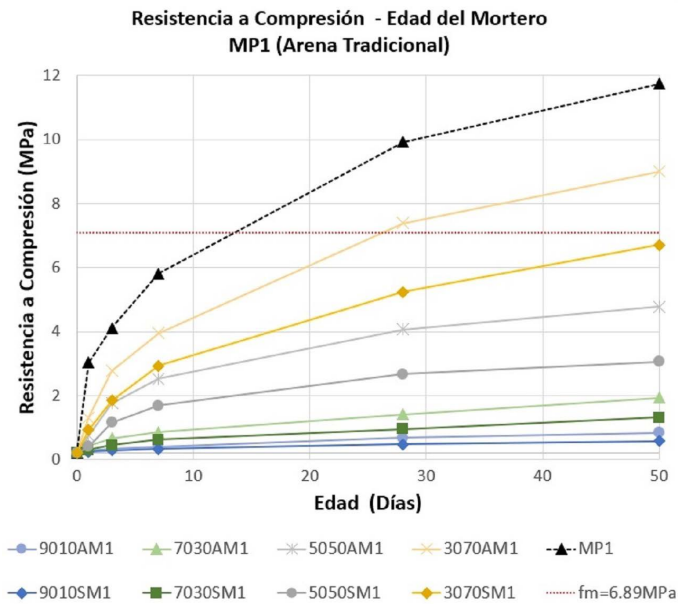


Figura 13. Resistencia a compresión de morteros elaborados con arena (M1). Fuente: Elaboración de los autores.

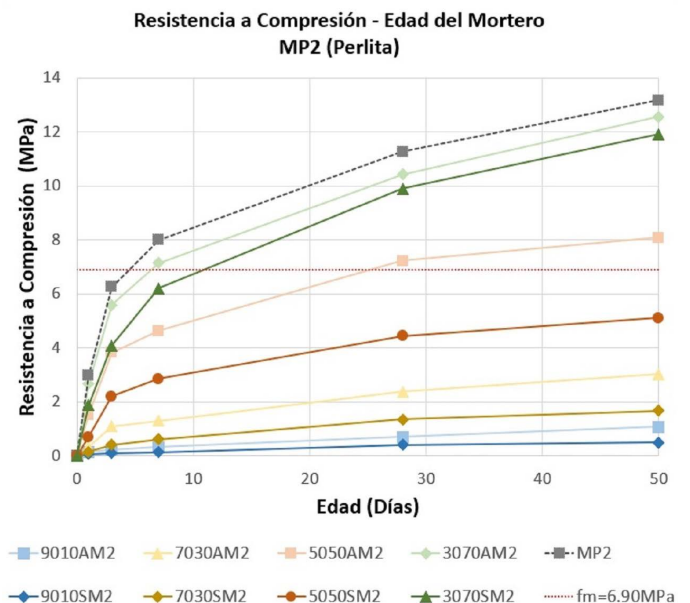


Figura 14. Resistencia a compresión de morteros elaborados con perlita (M2). Fuente: Elaboración de los autores.

de 7.19 MPa y 7.22 MPa respectivamente, superando el valor mínimo requerido en un 4.35% y 4.78%. Por lo tanto, se descartan las mezclas 3070AM2 y 3070SM2, puesto que su resistencia está muy por encima de la requerida y se aceptan a las mezclas 3070AM1 y 5050AM2 como mezclas óptimas preseleccionadas debido a su contenido de cal y resistencia presentada.

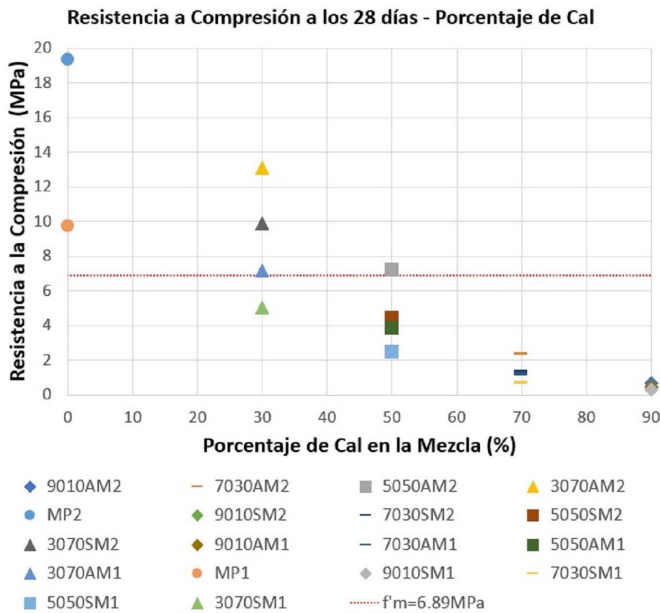


Figura 15. Resistencia a compresión a los 28 días de morteros elaborados con arena (M1) y perlita (M2). Fuente: Elaboración de los autores.

En la Figura 16, se puede observar la tendencia de las curvas obtenidas a partir de los resultados de las mezclas AM1 (cemento + cal + arena + aditivo) y AM2 (cemento + cal + perlita + aditivo), las cuales contienen aditivo y se derivan de las mezclas óptimas preseleccionadas (5050AM2, 3070AM1).

Al realizar el ajuste polinómico de las curvas (resistencia a compresión v/s porcentaje de cal), se obtiene la Ecuación 1. Esta ecuación permite determinar la resistencia a compresión a los 28 días de morteros elaborados a partir de la mezcla AM1 en función del porcentaje de cal que es reemplazado por el cemento.

$$f_m = 0,0016(\%Cal)^2 - 0,3084(\%Cal) + 15,047 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Para la mezcla AM2 se obtiene la (Ecuación 2).

$$f_m = 0,0026(\%Cal)^2 - 0,5237(\%Cal) + 26,553 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

f_m : Resistencia a la compresión en MPa.

$\%Cal$: Porcentaje de cal en las mezclas reemplazado por el cemento.

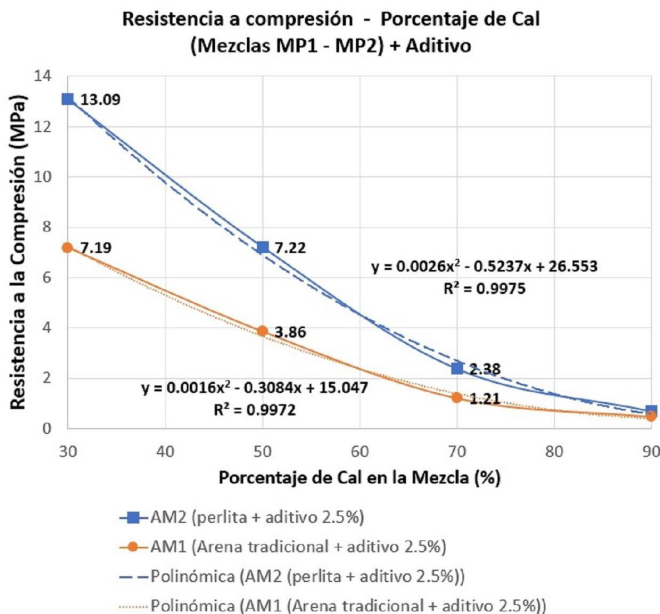


Figura 16. Ajuste polinomial resistencia a compresión vs porcentaje de cal, mezclas MP1 y MP2 con aditivo. Fuente: Elaboración de los autores.

Para evaluar la validez de las ecuaciones, se determina el coeficiente de correlación (R^2), cuyo valor para ambos modelos es de 0.997, similar a 1. Por lo tanto, ambas ecuaciones se ajustan correctamente a los resultados alcanzados, ofrecen estimaciones de resistencia a compresión a los 28 días de edad muy precisas a las obtenidas por medio de la experimentación.

En la Figura 17 se presentan los diagramas de caja y bigote elaborados a partir de los resultados de las densidades de los morteros fabricados con las mezclas óptimas preseleccionadas 5050AM2 y 3070AM1. Los valores de las densidades se tomaron en probetas cúbicas de 50 mm de arista a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días. Se elaboraron 6 probetas por edad, obteniendo valores de densidades para 60 cubos de mortero, es decir, 30 valores por cada mezcla.

Los morteros fabricados con la mezcla 5050AM2 presentan valores de densidades que oscilan entre 1.34 g/cm^3 como valor mínimo y 1.55 g/cm^3 como valor máximo, con una densidad promedio obtenida de 1.45 g/cm^3 . Por otro lado, los morteros fabricados con la mezcla 3070AM1 presentan densidades que oscilan entre 1.85 g/cm^3 como valor mínimo y 2.02 g/cm^3 como valor máximo, siendo estos superiores a los obtenidos con la mezcla 5050AM2,

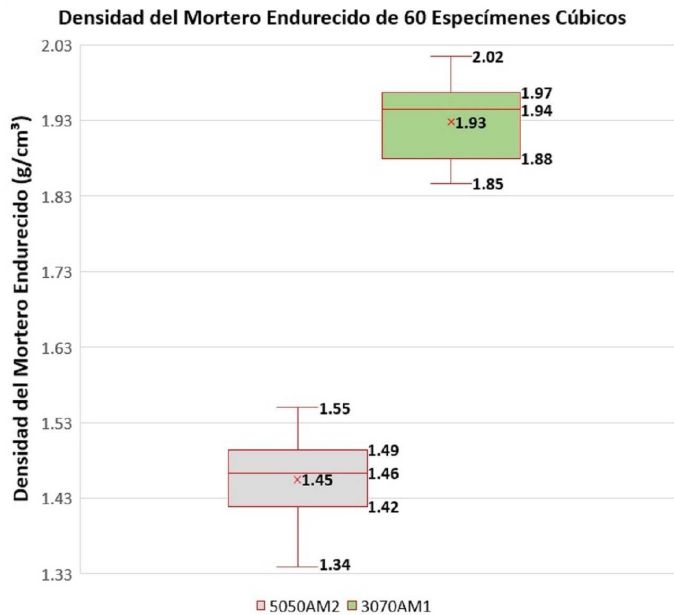


Figura 17. Densidades de morteros elaborados con las 5050AM2 y 3070AM. Fuente: Elaboración de los autores.

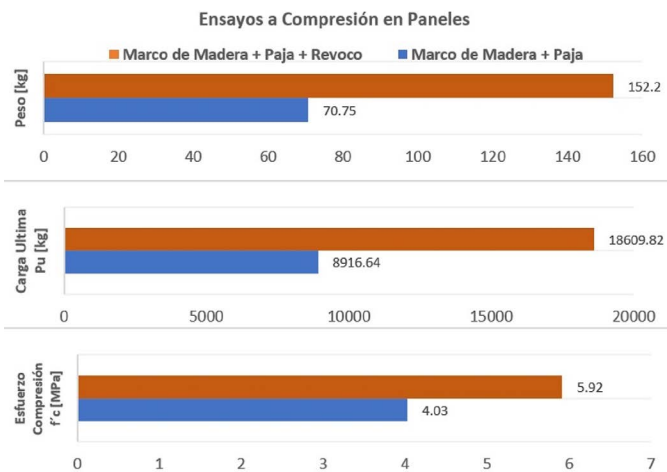


Figura 18. Resultados obtenidos del ensayo a compresión en paneles con y sin revoco. Fuente: Elaboración de los autores.

pues la densidad promedio obtenida es de 1.93 g/cm³. En este sentido, la mezcla final seleccionada a utilizarse como revoco en los paneles con paja es la 5050AM2, debido a que presenta una menor densidad.

En la Figura 18 se dan a conocer los resultados del peso, carga última y resistencia a compresión de los paneles elaborados con paja y marcos de madera. El peso del panel con revoco es de 152.20 kg, mientras que sin revoco tiene un peso de 70.75 kg, lo que indica que el revoco

aporta mayor peso al panel. En cuanto a la carga última, el panel con revoco presenta un valor de 18609.82 kg, mientras que, sin revoco, este valor disminuye a 8916.64 kg. Finalmente, se obtiene un esfuerzo a compresión máximo de 5.93 MPa cuando el panel está revocado y un valor de 4.03 MPa si no lo está. Por lo tanto, el revoco o mortero de recubrimiento no sólo aumenta la carga última, sino que también aporta mayor resistencia al panel.

CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados, se puede concluir que, por una parte, el uso de aditivo acelerante en las mezclas que contienen cal resulta beneficioso, puesto que se demuestra una mayor eficiencia al emplear perlita como árido fino. La baja densidad de la perlita permite una mayor cantidad de conglomerante en las mezclas y, por ende, mayor cantidad de aditivo. Además, permite reducir la densidad de los morteros hasta un 24.87%, en comparación con aquellos morteros en los que se utiliza arena como árido fino.

De este modo, se comprueba que las mezclas elaboradas con perlita presentan mejores resistencias a compresión que aquellas que contienen arena, debido a la alta capacidad de absorción de la perlita, lo que contribuye a reducir los tiempos de fraguado de la cal al absorber el agua de amasado rápidamente, a diferencia de la arena que no cuenta con esta propiedad.

La mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita, con aditivo) resultó ser la óptima para la fabricación de un mortero, ya que cumple con la resistencia mínima requerida de 6.89 MPa (según el IRC 2018) para ser utilizado como revestimiento en paredes de paja. Esta mezcla contiene mayor cantidad de cal y permite obtener morteros con una resistencia a compresión de 7.22 MPa a los 28 días, con una densidad de 1.45 g/cm³, menor a la densidad característica de los morteros convencionales.

En términos de dosificación de la mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, aditivo y perlita), para un metro cúbico de mortero de baja densidad a utilizarse como revestimiento en paredes de paja, se requiere 205.71 kg de cal, 261.82 kg de cemento, 552.50 kg de perlita, 371.72 kg o litros de agua y, finalmente, 13.09 kg de aditivo.

En conclusión, los hallazgos de esta investigación respaldan la idoneidad del mortero de recubrimiento elaborado con la mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita, con aditivo). Al aplicarse en ambas caras del panel, no sólo protege y controla la humedad dentro del mismo, sino que también aumenta la carga última y su resistencia a compresión hasta un 47.91% y 68.07% respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Universidad Central del Ecuador y al Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón (INECYC), especialmente a los ingenieros Alexander Cadena y Jhoanna Mamarandi por el apoyo técnico brindado en el marco de la investigación.

Contribución de Autores: Conceptualización, H.R y L.V.; Curación de datos, H.R.; Análisis formal, H.R.; Adquisición de financiación, H.R y L.V.; Investigación. H.R y L.V.; Metodología, H.R.; Administración de proyecto, H.R.; Recursos, H.R y L.V.; Software, H.R.; Supervisión, H.R y L.V.; Validación, H.R y L.V.; Visualización, H.R.; Escritura - borrador original, H.R y L.V.; Escritura - revisión y edición, H.R y L.V.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APOSTOLOPOULOU, M., BAKOLAS, A. & KOTSAINAS, M. (2021). Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials*, 290(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123272>

APRIANTI, A. (2017). A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production e a review part II. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4178-4194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>

ARTIGAS, V., QUINTANA, M., POSITIERI, M. & OSHIRO, A. (2022). Efectos de la utilización de desecho polvo de perlita natural en hormigones autocompactantes coloreados. *Concreto & Construções*, XLIX(105), 42-47. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2022.105.0003>

CASCONE, S., RAPISARDA, R. & CASCONI, D. (2019). Physical Properties of Straw bales as a construction material. *Sustainability*, 11(12), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su11123388>

ECHVERRÍA, M., FLORES, V. & DEL RÍO, J. (2022). Reuse of banana fiber and peanut shells for the design of new prefabricated products for buildings. *Revista de la Construcción*, 21(2), 462-472. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.2.461>

EL MIR, A., NEHME, S. & ASSAAD, J. (2020). Durability of self-consolidating concrete containing natural waste, *Heliyon*, 6 (1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020. e03165>

ESBA. (2021, December 22). *UP STRAW: Interreg Project | ESBA*. <https://strawbuilding.eu/up-straw-interreg-project/>

FERNANDEZ, F., GERMINARIO, S., BASILE, R. & MONTAGNO R. (2020). Development in construction Industry Development of Eco-Friendly and Self-Cleaning Lime-Pozzolan Plasters for Bio-Construction and Cultural Heritage. *Buildings*, 10(10), 172, 1-12. <https://doi.org/10.3390/buildings10100172>

HERMIDA, Á. (2021, February 15). Cemento y crisis climática: cómo el material supremo calienta el planeta. *elconfidencial.com*. https://www.elconfidencial.com/medioambiente/ciudad/2021-02-15/cemento-gases-efecto-invernadero-calentamiento_2944723/

INTERNATIONAL CODE COUNCIL (ICC). (2018). *2018 INTERNATIONAL RESIDENTIAL CODE (IRC)|ICC DIGITAL CODES*. <https://codes.iccsafe.org/content/IRC2018/appendix-s-strawbale-construction>

MARTÍNEZ S., C. (2021). *Estudio y aplicaciones de las construcciones con fardos de paja* [Trabajo final de Grado]. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38967/TFG-A-170.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MENDOZA, J. & VANGA, M. (2021). Realidad y expectativa sobre la construcción sostenible en Ecuador. *Revista San Gregorio*, 1(43), 197-209. <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/1116/14-JHON22>

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA DE ECUADOR. (2022). *Sistema de información pública agropecuaria [SIPA]*. sipa.agricultura.gob.ec. <http://sipa.agricultura.gob.ec/>

MUNTANI, G., AZZOLUNO, C., MACRÍ, M. & MANCUSO, S. (2020). Straw Buildings: A Good Compromise between Environmental Sustainability and Energy-Economic Savings. *Applied Sciences*, 10(8), 1-19. <https://doi.org/10.3390/app10082858>

PAHLAVAN, P., MANZI, S., SANSONETTI, A. & CHIARA, M. (2018). Valorization of organic additions in restorative lime mortars: Spent cooking oil and albumen. *Construction and Building Materials*, 181, 650-658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.089>

PAVÍA, S., & BRENNAN, O. (2018). Portland Cement-Lime Mortars for Conservation. In J. Hughes, J. Válek, & C. J. W. P. Groot (Eds.), *Historic Mortars: Advances in Research and Practical Conservation* (pp. 129-142). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91606-4_10

RAMOS, A. P., CHÁVEZ, J. L. G., GUERRERO, L., ESPINOSA, M. Á. S., & SORIANO, A. C. (2021). Optimization of hydrated lime putties and lime mortars using nopal pectin for conservation of cultural heritage. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture*, XVII, 101-111. <https://doi.org/10.2495/str210091>

STEPHAN, A. & ATHANASSIADIS, A. (2018). Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 248-262. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.022>

SUDHARSAN, N. & SIVALINGAM, K. (2019). Potential Utilization of Waste Material for Sustainable Development in construction Industry. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3), 3435-2438. <https://doi.org/10.35940/ijrte.c5062.098319>

TESLÍK, J. (2021). Analysis of the fire properties of blown insulation from crushed straw in the buildings. *Materials*, 14(15), 1-12. <https://doi.org/10.3390/ma14154336>.

VIERA, P. & ACERO, M. (2022). Diseño de un mortero a partir de la caracterización de cal producida y comercializada por 5 proveedores en Ecuador, *Novasinerzia*, 5 (2), 158-173, <https://doi.org/10.37135/ns.01.10.09>

WALKER, P., THOMSON, A., & MASKELL, D. (2020). Straw bale construction. In K. A. Harries & B. Sharma (Eds.), *Nonconventional and vernacular construction materials: Characterisation, Properties and Applications*. (2nd Edition, pp. 189–216). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102704-2.00009-3>

YIN, X., LAWRENCE, M. & MASKELL, D. (2018). Straw bale construction in northern China – Analysis of existing practices and recommendations for future development. *Journal of Building Engineering*, 18, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.009>.

ZHANG, D., ZHAO, J., WANG, D., XU, C., ZHAI, M. & MA, X. (2018). Comparative study on the properties of three hydraulic lime mortar systems: Natural hydraulic lime mortar, cement-aerial lime-based mortar and slag-aerial lime-based mortar. *Construction and Building Materials*, 186, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.053>