


Physical-Mechanical Properties of Lime and Sand Mortars with Addition of Burned Clay Pozzolana, for Restoration of Buildings Cajamarca, Peru.

Sara Elizabeth Huamán Moreno MSc.¹; Miguel Angel, Mosqueira Moreno Dr.²
Hermes Roberto Mosqueira Ramírez Dr.³; Huamán Sangay Sergio Manuel MSc.⁴

¹ Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú. shuamanm_epg15@unc.edu.pe

² Universidad Nacional de Cajamarca (UNC). Cajamarca, Perú. mmosqueira@unc.edu.pe

³ Universidad Nacional de Cajamarca (UNC). Cajamarca, Perú. hmosqueira@unc.edu.pe

⁴ Universidad Nacional de Cajamarca (UNC). Cajamarca, Perú. shuaman@unc.edu.pe

Abstract—In this study, the impact of the incorporation of fired clay pozzolana on the physical-mechanical properties of mortars composed of lime and sand was investigated. The research was carried out in the context of Cajamarca, a place that houses a valuable cultural heritage, especially churches built with lithic structures of incalculable historical value. The central objective of this work focuses on the intrinsic connection between the addition of fired clay pozzolana and the preservation and restoration of these historical stone monuments, which are restored with lime, sand and fired clay mortars, but without having a dosage that allows greater resistance. That is why tests were carried out with four mortar dosages, including the 1:3 control dosage of lime and sand. The results indicated that the most promising combination in terms of physical-mechanical properties was that of lime, sand and pozzolana in a 1:3:2 ratio (D4) as it demonstrated notable improvements in several properties of the mortars; The mechanical resistance to compression experienced a significant increase of 83.66%, with an average of 2.81 kg/cm² compared to 1.53 kg/cm² with the lime-sand mortar in a 1:3 ratio (D1). Likewise, tensile adhesion improved by 76.92%, reaching an average of 0.23 kg/cm² for D4 compared to 0.13 kg/cm² for D1. The apparent density also increased by 1.65% with the D4 dosage, evidencing greater compactness of the mortar. Finally, absorption decreased notably in D4, reaching 61.44% less than in D1, indicating lower porosity and better water resistance. These findings suggest that the addition of fired clay pozzolana may be an effective strategy to improve the properties of lime and sand mortars, especially in the context of historical heritage conservation in Cajamarca, Peru

Keywords: Mortar, pozzolan, physical-mechanical properties.

Propiedades Físico-Mecánicas de Morteros de Cal y Arena con Adición de Puzolana de Arcilla Cocida, para Restauración de Edificaciones Cajamarca, Perú.

Resumen– En este estudio, se investigó el impacto de la incorporación de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de morteros compuestos por cal y arena. La investigación se llevó a cabo en el contexto de Cajamarca, un lugar que alberga un valioso patrimonio cultural, especialmente iglesias construidas con estructuras líticas de incalculable valor histórico. El objetivo central de este trabajo se centra en la conexión intrínseca entre la adición de puzolana de arcilla cocida y la preservación y restauración de estos monumentos históricos de piedra, los cuales son restaurados con morteros de cal, arena y arcilla cocida, pero sin tener una dosificación que permita una mayor resistencia. Es por ello que se realizaron ensayos con cuatro dosificaciones de mortero, incluyendo la dosificación de control 1:3 de cal y arena. Los resultados indicaron que la combinación más prometedora en términos de propiedades físico-mecánicas fue la de cal, arena y puzolana en proporción 1:3:2 (D4) pues demostró mejoras notables en varias propiedades de los morteros; en la resistencia mecánica a la compresión experimentó un aumento significativo del 83.66%, con un promedio de 2.81 kg/cm² en comparación con 1.53 kg/cm² con el mortero cal arena en proporción 1:3 (D1). Asimismo, la adherencia por tracción mejoró en un 76.92%, alcanzando un promedio de 0.23 kg/cm² para D4 en comparación con 0.13 kg/cm² para D1. La densidad aparente también aumentó en un 1.65% con la dosificación D4, evidenciando una mayor compacidad del mortero. Por último, la absorción disminuyó notablemente en D4, alcanzando un 61.44% menos que en D1, indicando una menor porosidad y mejor resistencia al agua. Estos hallazgos sugieren que la adición de puzolana de arcilla cocida puede ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades de los morteros de cal y arena, especialmente en el contexto de la conservación del patrimonio histórico en Cajamarca, Perú.

Palabras clave: mortero, puzolana, propiedades físico-mecánicas.

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo se basa en la tesis “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca”, la cual se encuentra en el repositorio de la Universidad Nacional de Cajamarca [1].

Esta investigación se centra en el empleo de morteros compuestos por cal y arena en Cajamarca, Perú. Aunque investigaciones previas realizadas en otros lugares sugieren que la inclusión de puzolana de arcilla cocida podría mejorar las características físico-mecánicas, no se ha explorado esta

influencia específica en los morteros de cal y arena en Cajamarca, morteros que son muy usados en restauración de edificaciones históricas como lo son las iglesias de esta ciudad.

El propósito de esta investigación es abordar el desafío relacionado con las propiedades de los morteros de cal y arena utilizados principalmente en edificios patrimoniales en Cajamarca. Este estudio consiste en determinar cómo la adición de puzolana de arcilla cocida afecta las características físico-mecánicas de los morteros de cal y arena, así como establecer la dosificación adecuada de puzolana de arcilla cocida para mejorar dichas propiedades [1].

En su obra "De Architectura" en el siglo I a.C, Vitruvio Polión [2], detalló las técnicas de construcción y los materiales empleados en la arquitectura romana, resaltando la relevancia de la proporción y calidad apropiadas en la combinación de cal y arena

Además, se destaca la incorporación de arcilla cocida molida como un intento para conferir propiedades hidráulicas a la cal, con resultados significativos en términos de dureza superficial y resistencia mecánica, según los hallazgos de la investigación de González Cortina y Villanueva Domínguez en el año 2000 [3].

En zonas con un valioso patrimonio histórico y cultural, como Cajamarca, el examen de las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena con la adición de puzolana se vuelve crucial en el ámbito de la conservación de estructuras antiguas y monumentos. Normativas técnicas como la Norma Técnica Guatemalteca del 2014 [4], que corresponde a la Norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales del 2000 [5].

Junto con investigaciones previas sobre morteros, incluidos aquellos de cal y arena, señalan que la inclusión de puzolana de arcilla cocida puede mejorar propiedades físico-mecánicas como la resistencia a la compresión y la adherencia.

En el marco del patrimonio cultural de Cajamarca, una ciudad inscrita en la lista indicativa de la UNESCO debido a su riqueza histórica y arquitectónica, los morteros de cal y arena han sido componentes esenciales en la construcción y preservación de las estructuras pétreas que integran este invaluable patrimonio cultural. Estas estructuras representan una parte fundamental de la identidad e historia de Cajamarca y del Perú en su totalidad. Por lo tanto, surge una necesidad evidente de investigar el uso de morteros de cal y arena, con el objetivo de avanzar en el conocimiento aplicable a la conservación de estas estructuras singulares. Esta investigación contribuye a la protección y preservación del patrimonio

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

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

DO NOT REMOVE

cultural cajamarquino y peruano, asegurando que estas estructuras puedan ser apreciadas por las generaciones actuales y futuras [1].

De este modo, el objetivo general de la presente investigación fue evaluar el impacto de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca

II. MARCO DE REFERENCIA

La normativa relacionada con los morteros de cal y arena varía según países y regiones. A continuación, se enlistan algunas normas internacionales y nacionales relacionadas con estos morteros:

Normas internacionales [1]:

- ASTM C270: Especificación estándar para mortero de albañilería.
- EN 998-1: Especificación para mortero de albañilería, incluyendo revestimiento y enlucido.
- ISO 679: Construcción de edificios: especificaciones para la cal.
- ISO 281: Construcción de edificios: métodos de prueba para la cal.

Normas en países específicos [1]:

- Argentina: IRAM 1668: Morteros de cal para albañilería: especificaciones
- Brasil: NBR 13281: Argamasa para revestimiento de paredes y techos: requisitos. NBR 13282: Argamasa para asentamiento y revestimiento de paredes y techos: determinación de resistencia a la compresión.
- Chile: NCh1411: Hormigón: mortero de albañilería.
- Colombia: NTC 5480: Mortero de cal hidratada para albañilería: requisitos.
- México: NMX-C-147: Mortero de cal para albañilería: especificaciones y métodos de prueba.
- Guatemala: NTG 25018: Materiales de construcción: requisitos generales para morteros de construcción. NTG 25038: Materiales de construcción: especificaciones para morteros de cal.

En cuanto al mortero como material de construcción, este se compone de aglomerante, agregados finos (como arena) y agua. Su aplicación abarca la unión de elementos constructivos, revestimiento de superficies y restauraciones. La cal y el cemento son aglomerantes principales, destacándose la resistencia y transpirabilidad del mortero de cal [1].

Las características de los morteros de cal incluyen flexibilidad, transpirabilidad y una apariencia natural, siendo ideales para proyectos de restauración. Además, presentan propiedades como permeabilidad al agua y vapor, ausencia de sales solubles y álcalis, y baja resistencia a bajas temperaturas.

La composición de los morteros de cal abarca cal, agregados finos (como arena), agua y, en este caso, puzolana de arcilla cocida. La elección del tipo de cal, proporciones y proceso puede variar según la aplicación.

A. Definiciones Esenciales

Esta sección introduce y aclara diversos términos esenciales vinculados con la confección de morteros y los materiales empleados en este contexto:

- Mortero de cal: Constituye una amalgama de cal, arena y agua, sirviendo como sustancia adherente en construcciones. La cal funge como aglutinante, mientras que la arena proporciona solidez y estabilidad al mortero, según González Cortina y Villanueva Domínguez en el año 2000 [3].
- Cal: Un compuesto inorgánico derivado de la cocción de rocas de caliza. Se utiliza como aglutinante en morteros y como componente en otros materiales como el estuco. La cal hidratada, variante común, encuentra aplicación predominante en la manufactura de morteros (Riddick, J. C., & Rapson, W. S, 2009). [6].
- Cal hidratada: También conocida como cal apagada, es el producto resultante de la reacción química entre la cal viva (óxido de calcio) y el agua, desempeñando un papel crucial como componente principal en los morteros de cal (ASTM C207-07). [5].
- Agregados: Materiales granulares utilizados en la composición del mortero de cal. La arena, siendo el agregado más común, puede variar en tamaño y composición según las necesidades específicas de la aplicación (Aitcin, P. C., & Mindess, S., 2011). [7].
- Puzolana: La puzolana de arcilla cocida, un material empleado en construcción, se agrega al cemento o se incorpora en la producción de morteros y hormigones. Se obtiene mediante la calcinación de arcilla a elevadas temperaturas, otorgándole propiedades puzolánicas. Su aplicación puede mejorar las características del cemento Portland o actuar como componente en la manufactura de morteros y hormigones (Neville, A. M., 2011). [8].
- Proporción de mezcla: Hace referencia a la cantidad relativa de cal, arena y agua empleada en la preparación de un mortero de cal. Esta proporción puede variar según el tipo de mortero requerido y las características específicas del proyecto de construcción. A modo de ejemplo, una proporción común implica 1 parte de cal por 3 partes de arena, aunque pueden existir variaciones según las exigencias (Young, 2021). [9].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales, equipos, personal:

Esta investigación se ejecutó en el distrito de Cajamarca durante los años 2020 y 2021, siendo desarrollada en el Laboratorio de Ensayo GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Para la confección de los especímenes de mortero, se emplearon los siguientes materiales:

- Cal: Se utilizó cal de construcción de la marca TOPEX, presentada en envases de 20 kg, siendo comúnmente conocida como cal viva.
- Arena: La arena gruesa utilizada provino de la marca TOPEX y se suministró en bolsas de 40 kg.

- Puzolana: La puzolana de arcilla cocida molida se obtuvo mediante la trituración de ladrillos de pandereta de 6 huecos de la marca PIRÁMIDE.
- Agua: Se utilizó agua potable proveniente de la ciudad de Cajamarca.

Para el análisis de las muestras se utilizó los siguientes equipos y materia de Laboratorio:

- Máquina de Compresión Universal.
- Pórtico de Compresión.
- Aplicadores de Carga para el Espécimen de Unidades Cruzados.
- Computadora Portátil.
- Herramientas Manuales.
- Moldes Metálicos.

B. Muestras en estudio:

La elección de las muestras se realiza mediante un método de muestreo no probabilístico intencional, siguiendo las directrices establecidas en las normas técnicas. Se seleccionan cuatro dosificaciones diferentes de mortero: la dosificación de control 1:3 de cal y arena (C:A), junto con las dosificaciones de prueba 1:3:0.5, 1:3:1 y 1:3:2 de cal, arena y puzolana de arcilla cocida (C:A:P).

A continuación, nos centraremos en los ensayos en probetas a 21 días, lo que suma un total de 90 especímenes. Además, y en las pruebas de adhesión por tracción para cada dosificación, que fueron 24 en total pruebas la elección de las muestras se realiza mediante un método de muestreo no probabilístico intencional, siguiendo las directrices establecidas en las normas técnicas. Se seleccionan cuatro dosificaciones diferentes de mortero: la dosificación de control 1:3 de cal y arena, junto con las dosificaciones de prueba 1:3:0.5, 1:3:1 y 1:3:2 de cal, arena y puzolana de arcilla cocida.

A continuación, nos centraremos en los ensayos en probetas a 21 días, lo que suma un total de 90 especímenes. Además, y en las pruebas de adhesión por tracción para cada dosificación, que fueron 24 en total pruebas.

TABLA I

DETALLES DE LOS ENSAYOS Y NÚMERO DE ESPECÍMENES

Dosificación	Intervalos de Ensayo (días)	Número de Especímenes
Control 1:3	21	30
Prueba 1:3:0.5	21	30
Prueba 1:3:1	21	30
Prueba 1:3:2	21	30
Total, Pruebas (compresión, densidad, absorción)		120
Adhesión	13	24

Fuente: "Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca" [1].

C. Técnicas e instrumentos de recopilación de información:

Se usó la técnica de elaboración de fichas con el propósito de recopilar y estructurar la información de manera organizada.

Para el análisis de los agregados se utilizó la Norma Técnica Peruana 400 del 2013 [10], para de propiedades del agregado fino, como:

- Peso Unitario Suelto:
- Peso unitario compacto:
- Peso específico:
- Absorción (%):
- Contenido de Humedad (%)

Para la determinación de propiedades del mortero se realizó:

- Determinación de la resistencia a compresión del mortero endurecido, según UNE-EN 1015-11 (2020) [11]
- Ensayo de adhesión por tracción según nos indica la Norma Técnica Guatemalteca NTG 41051 h7 (Comisión Guatemalteca de Norma, 2014) [4]
- Ensayo para densidad Aparente De Mortero Endurecido, peso seco (g/cm³). Según ASTM C642 (American Society of testing Materials, 2013) [12]
- Ensayo para determinar la absorción (%) del Mortero Endurecido, según la norma ASTM C642 [12]

D. Técnicas e instrumentos de análisis de información:

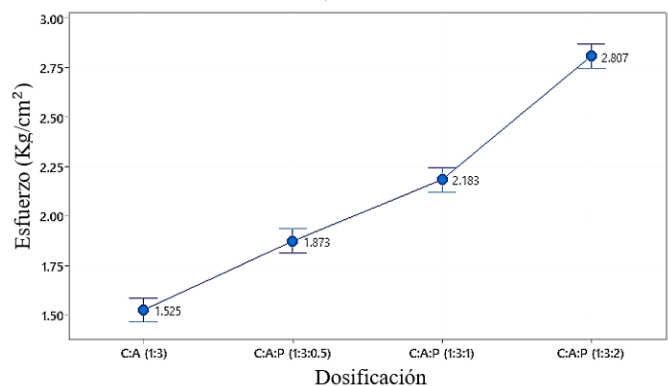
Se realizó el análisis de varianza, llamado ANOVA, de un factor por ser un método estadístico que examina las diferencias en las medias de los 5 tratamientos en estudio. Realizando el procesamiento de la información en el programa Minitab 18, obteniéndose:

TABLA II

MEDIAS

Dosificación	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
D1 cal, arena (1:3)	10	1.5250	0.0766	(1.4638; 1.5862)
D2 cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	10	1.8730	0.1325	(1.8118; 1.9342)
D3 cal, arena, puzolana (1:3:1)	10	2.1830	0.0529	(2.1218; 2.2442)
D4 cal, arena, puzolana (1:3:2)	10	2.8070	0.1011	(2.7458; 2.8682)

95% IC para la media



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos

Fig. 1 Gráfico de esfuerzo (kg /cm²) con Desviaciones Estándar vs. Dosificación

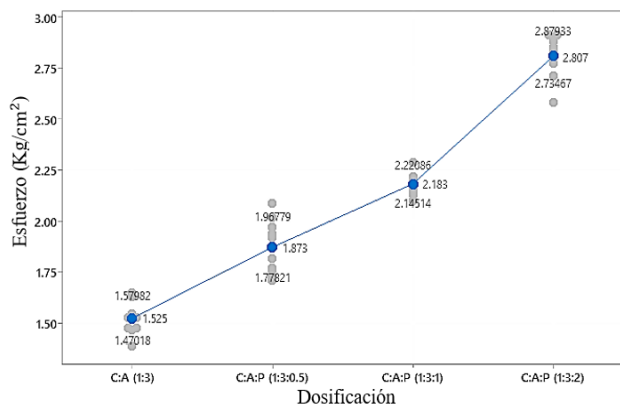


Fig. 2 Grafica de valores individuales de Esfuerzo (kg /cm²) vs. Dosificación

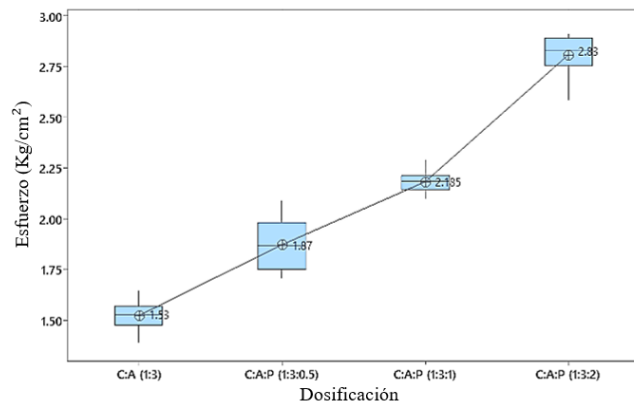


Fig. 3 Grafica de caja de Esfuerzo (kg /cm²)

Las medias y los intervalos de confianza respaldan la idea de que las dosificaciones con puzolana (D2, D3, D4) tienen medias más altas que la dosificación D1, lo cual es coherente con que la adición de puzolana mejora las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena.

Se agrupó información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.

TABLA III
COMPARACIONES EN PAREJAS DE TUKEY

Dosificación	N	Media	Agrupación
C:A:P (1:3:2)	10	2.8070	A
C:A:P (1:3:1)	10	2.1830	B
C:A:P (1:3:0.5)	10	1.8730	C
C:A (1:3)	10	1.5250	D

Las agrupaciones de Tukey respaldan la idea de que las dosificaciones con puzolana (C:A:P 1:3:2, 1:3:1, 1:3:0.5) son estadísticamente diferentes de las dosificaciones sin puzolana (C:A 1:3), indicando que la adición de puzolana tiene un impacto significativo en las propiedades medidas. Este resultado es consistente con la dirección de mejora que se

observa en las medias de las dosificaciones con puzolana en comparación con la dosificación base (D1).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resistencia Mecánica a la Compresión

Se evaluó la resistencia a la compresión (kg/cm²) de diferentes proporciones de mortero a 21 días. Los resultados se muestran a continuación

TABLA IV
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (KG /CM²)

D1 cal, arena (1:3)	D2 cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	D3 cal, arena, puzolana (1:3:1)	D4 cal, arena, puzolana (1:3:2)
1.53	1.82	2.22	2.91
1.63	1.71	2.19	2.91
1.55	1.77	2.13	2.77
1.47	1.73	2.1	2.84
1.65	1.76	2.2	2.58
1.54	1.92	2.18	2.71
1.48	2.09	2.16	2.82
1.39	2.02	2.15	2.80
1.53	1.97	2.29	2.85
1.48	1.94	2.21	2.88

Fuente: "Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca" [1].

Los resultados de la resistencia a la compresión muestran una tendencia notable en el aumento de la resistencia para todas las proporciones de mortero evaluadas a la edad de 21 días.

Además, la dosificación D1 (cal, arena 1:3) tiene una resistencia promedio de 1.53 kg/cm², la dosificación D2 (cal, arena, puzolana 1:3:0.5) muestra un aumento en la resistencia promedio a 1.82 kg/cm², la dosificación D3 (cal, arena, puzolana 1:3:1) presentó un aumento adicional a 2.22 kg/cm², la dosificación D4 (cal, arena, puzolana 1:3:2) exhibió la resistencia más alta con un promedio de 2.91 kg/cm².

TABLA V
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO (KG /CM²)

D1	D2	D3	D4
cal, arena (1:3)	cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	cal, arena, puzolana (1:3:1)	cal, arena, puzolana (1:3:2)
1.53	1.87	2.18	2.81

Fuente: "Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca" [1].

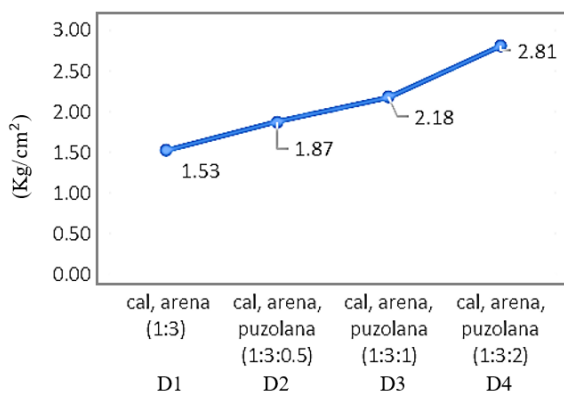


Fig. 4 Resistencia a la compresión promedio (kg /cm²)

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

B. Adherencia por Tracción

La adherencia por tracción se determinó a los 13 días. Los resultados promedio se presentan a continuación:

TABLA VI
RESISTENCIA ADHERENCIA POR TRACCIÓN (KG /CM²)

D1 cal, arena (1:3)	D2 cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	D3 cal, arena, puzolana (1:3:1)	D4 cal, arena, puzolana (1:3:2)
0.136	0.148	0.184	0.244
0.129	0.155	0.182	0.231
0.122	0.150	0.177	0.238
0.138	0.154	0.175	0.216
0.128	0.166	0.184	0.226
0.124	0.182	0.183	0.234

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

Existe un patrón consistente con la resistencia a la compresión, donde la dosificación con la mayor proporción de puzolana (1:3:2) muestra la mayor adherencia por tracción. Este hallazgo sugiere que la adición de puzolana contribuye positivamente tanto a la resistencia mecánica como a la adherencia del mortero.

TABLA VII

RESISTENCIA PROMEDIO DE ADHERENCIA POR TRACCIÓN (KG /CM²)

D1 cal, arena (1:3)	D2 cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	D3 cal, arena, puzolana (1:3:1)	D4 cal, arena, puzolana (1:3:2)
0.13	0.16	0.18	0.23

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

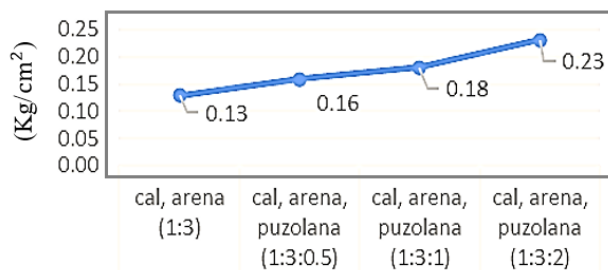


Fig. 5 Resistencia promedio de Adherencia por Tracción (kg /cm²)

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1]

C. Densidad Aparente

La densidad aparente se determinó para cada serie de mortero y muestra en la tabla de resultados.

TABLA VIII
DENSIDAD PESO SECO (GR/CM³)

D1 cal, arena (1:3)	D2 cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	D3 cal, arena, puzolana (1:3:1)	D4 cal, arena, puzolana (1:3:2)
1.82	1.76	1.85	1.86
1.84	1.76	1.83	1.84
1.83	1.78	1.84	1.85
1.83	1.79	1.83	1.82
1.81	1.82	1.86	1.86
1.83	1.76	1.85	1.88
1.83	1.77	1.83	1.86
1.83	1.78	1.82	1.82
1.81	1.81	1.84	1.82
1.81	1.79	1.83	1.84

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

Los resultados indican que la densidad aparente tiende a aumentar con una mayor proporción de puzolana en la mezcla

TABLA IX
DENSIDAD PROMEDIO PESO SECO (KG /CM³)

D1 cal, arena (1:3)	D2 cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	D3 cal, arena, puzolana (1:3:1)	D4 cal, arena, puzolana (1:3:2)
1.82	1.78	1.84	1.85

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

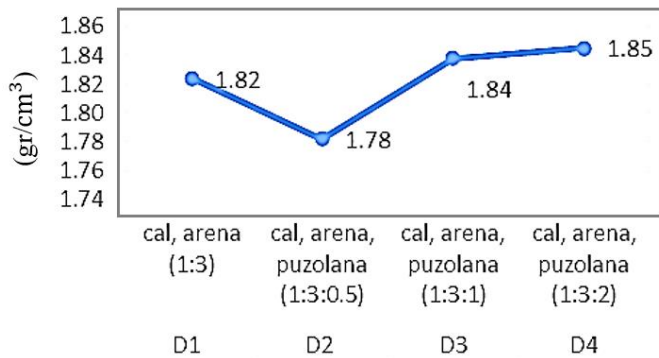


Fig. 6 Densidad Promedio Peso Seco (kg/cm³)

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

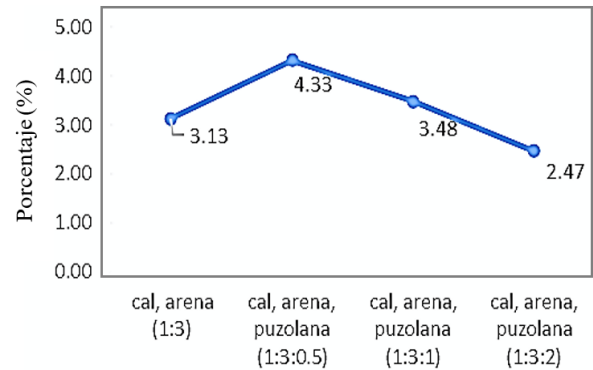


Fig. 7 Absorción Promedio (%)

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

D. Absorción

Los resultados del ensayo de absorción se detallan a continuación

TABLA X
ABSORCIÓN (%)

D1 cal, arena (1:3)	D2 cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	D3 cal, arena, puzolana (1:3:1)	D4 cal, arena, puzolana (1:3:2)
1.81	3.96	1.95	2.41
3.20	5.25	3.31	3.31
2.17	4.43	3.50	2.11
4.36	4.67	5.20	3.37
4.56	3.16	0.71	0.04
4.41	4.51	2.09	0.24
2.02	4.77	4.35	1.95
2.85	5.15	5.61	3.90
3.71	3.61	3.39	4.21
2.20	3.76	4.69	3.17

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

Por otro lado, las dosificaciones D3 y D4 muestran valores de absorción relativamente más bajos en general, indicando una menor capacidad para retener agua. Esto puede interpretarse como una menor porosidad en estas dosificaciones, lo cual puede ser beneficioso en términos de resistencia

TABLA XI
ABSORCIÓN PROMEDIO (%)

D1	D2	D3	D4
cal, arena (1:3)	cal, arena, puzolana (1:3:0.5)	cal, arena, puzolana (1:3:1)	cal, arena, puzolana (1:3:2)
3.13	4.33	3.48	2.47

Fuente: “Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca” [1].

IV. CONCLUSIONES

De la evaluación de diversas propiedades del mortero se obtiene sobre la influencia de la adición de puzolana al mortero de cal y arena lo siguiente:

Resistencia Mecánica a la Compresión:

- La dosificación D4 (cal, arena, puzolana 1:3:2) proporcionó la resistencia más alta con un promedio de 2.91 kg/cm², aumentando la resistencia en un 83.66% con respecto al patrón (cal, arena 1:3) que alcanzó la resistencia de 1.53 kg/cm²
- La adición de puzolana contribuyó positivamente al aumento de la resistencia mecánica, mostrando un patrón ascendente de 1.53; 1.87; 2.18; 2.81 kg/cm² para dosificaciones de 1:3; 1:3:0.5; 1:3:1; 1:3:2; respectivamente.

Adherencia por Tracción:

- La adherencia por tracción también mostró un patrón consistente con la resistencia a la compresión, obteniéndose mayor resistencia para la dosificación D4 (cal, arena, puzolana 1:3:2) de 0.23 kg/cm² mayor al patrón en 76.9 %
- D4 presentó la mayor adherencia por tracción, respaldando la idea de que la puzolana mejora tanto la resistencia mecánica como la adherencia del mortero
- La adición de puzolana contribuyó en aumentar la adherencia por tracción, mostrando un patrón ascendente de: 0.13; 0.16; 0.18; 0.23 kg/cm² para dosificaciones de 1:3; 1:3:0.5; 1:3:1; 1:3:2; respectivamente.

Densidad Aparente:

- La densidad aparente no sufrió mucha variación pudiendo considerarse estadísticamente dentro del mismo grupo muestral, entre 1.78 a 1.85 kg/cm³

Absorción:

- La muestra de cal, arena y puzolana (1:3:0.5) obtuvo la absorción más alta 4.33%, sugiriendo una mayor porosidad y retención de agua en comparación con otras dosificaciones.

- La muestra de cal, arena y puzolana (1:3:2) obtuvo la absorción más baja 2.47%. Lo cual indica una disminución significativa del 61.44% en la absorción en comparación con el mortero patrón, esto puede contribuir a reducir la absorción, indicando una menor permeabilidad y mejor resistencia al agua.

REFERENCIAS

- [1] S.E. Huaman Moreno, "Influencia de la adición de puzolana de arcilla cocida en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cal y arena en Cajamarca" Tesis grado de Maestría, Univ. Pub. UNC, 2023.
- [2] M. Vitruvio Polión, "De Architectura," Trad. J. Ortiz y Sanz. Linkgua, 2013.
- [3] M. González Cortina y L. Villanueva Domínguez, "Morteros hidráulicos de cal y chamota", 2000
- [4] COGUANOR, "Norma Técnica Guatemalteca", 2014.
- [5] ASTM Standard "Norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales", 2000.
- [6] J. C. Riddick y W. S. Rapson, "Building with lime: A practical introduction. Routledge", 2009
- [7] P. C Aitcin y S. Mindess, "Modern concrete materials: Binders, additives and admixtures. Routledge", 2011
- [8] A. M. Neville, "Properties of Concrete", Pearson Education., 2011.
- [9] D. Young, "TECHNICAL GUIDE. Mortars: materials, mixes and method. A guide to repointing mortar joints", 2021.
- [10] Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI, "Norma Técnica Peruana 400, 2013
- [11] UNE-EN 1015-11, "Determinación de la resistencia a compresión del mortero endurecido" Normaliza con española, 2020
- [12] ASTM International "Norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales", 2013