

Cómo citar este artículo:

Silva Cascante, Á. V., Calvo Barriga, M. I., Vázquez Mora, C. A. & Uría, G. R. (2022). Hacia el rescate de una cultura constructiva de morteros con materiales y técnicas constructivas tradicionales para una correcta intervención patrimonial. *Project, Design and Management*, 4 (1), 128-153. doi: 10.35992/pdm.4vi1.905.

**HACIA EL RESCATE DE UNA CULTURA CONSTRUCTIVA DE
MORTEROS CON MATERIALES Y TÉCNICAS
CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES PARA UNA CORRECTA
INTERVENCIÓN PATRIMONIAL**

Ángel Vicente Silva Cascante

Universidad Católica de Leuven (Ecuador)

angelsilvac@hotmail.com · <https://orcid.org/0000-0002-7600-1320>

María Inés Calvo Barriga

Pontificia Universidad Católica del Ecuador (Ecuador)

LMC-PUCE@puce.edu.ec · <https://orcid.org/0000-0002-5255-0333>

Carlos Andrés Vásquez Mora

Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (Ecuador)

carlos.vasquez@patrimoniocultural.gob.ec · <https://orcid.org/0000-0002-1637-9540>

Guadalupe del Rosario Uría

Silva & Uría – Construcción y Restauración (Ecuador)

guadalupeuriac@gmail.com · <https://orcid.org/0000-0002-1814-1632>

Resumen. Esta investigación busca establecer el buen uso de los materiales tradicionales como: cal, barro, paja de monte y mucilago¹ de nopal; para ser aplicados en la restauración a partir de la investigación del comportamiento mecánico de las nuevas dosificaciones. Los materiales tradicionales utilizados en el ensayo de los nuevos diseños de morteros, son los que se obtuvieron como resultado de la investigación realizada a los morteros originales del convento de San Diego de la ciudad de Quito. Se diseñaron tres nuevas dosificaciones de morteros con diferentes porcentajes en cada uno de sus elementos. El propósito de la investigación es obtener diferentes parámetros para realizar una comparación entre cada uno de los ensayos mecánicos como: compresión, flexión y tracción a los que fueron sometidos los nuevos modelos. Los materiales tradicionales utilizados son de similares características que los encontrados en la investigación de los morteros antiguos. En el estudio experimental las nuevas probetas se sometieron a pruebas mecánicas con las que se obtuvieron y determinaron las características y resistencia a la compresión, tensión y flexión. Estas nuevas dosificaciones se experimentaron a distintas edades como: 14, 21 y 56 días. Todas las nuevas

¹ Sustancia orgánica de textura viscosa, semejante a la goma, que se obtiene del nopal por medio del sistema de extracción acuosa

probetas se conservaron en iguales condiciones de temperatura y humedad existentes en el laboratorio. Bajo estos parámetros se llegó a establecer la dosificación que cumplió las mejores características para ser utilizada en un proceso de restauración arquitectónica.

Palabras claves: materiales tradicionales, dosificaciones, morteros, ensayos y restauración.

TOWARDS THE RESCUE OF A CONSTRUCTIVE CULTURE OF MORTARS WITH TRADITIONAL CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNIQUES FOR A CORRECT PATRIMONIAL INTERVENTION

Abstract. This research seeks to establish the proper use of traditional materials such as: lime, mud, mountain, straw and nopal mucilage; to be applied in restoration from the investigation of the mechanical behavior of the new dosages. The traditional materials used in testing new mortar designs, are from the San Diego convent in the city of Quito. Three new mortar dosages were designed with different percentages in each of its elements. The purpose of the investigation is to obtain different parameters to make a comparison between each of the mechanical tests such as: compression, bending, and traction to which the new models were subjected. The traditional materials used are of similar characteristics to those found in the investigation of ancient mortars. In the experimental study, the new specimens were subjected to mechanical tests in which the characteristics and resistance to compression, tension, and bending were obtained and determined. These new dosages were experienced at different ages such as: 14, 21, and 56 days. All new specimens were kept in the same temperature and humidity conditions existing in the laboratory. Under these parameters, the dosage that met the best characteristics for an architectural restoration process was established.

Keywords: traditional materials, dosages, mortars, tests and restoration.

Introducción

El estudio muestra la complejidad e interés para llegar a determinar la caracterización de morteros antiguos de edificaciones monumentales pertenecientes al Patrimonio Histórico. Nuestro interés es establecer la viabilidad de la salvaguarda y la correcta restauración del Patrimonio con la utilización de nuevos morteros apropiados para la rehabilitación, estos deben ser en lo posible similares a los originales tanto en materiales como en las técnicas tradicionales de construcción para mantener los valores propios de la obra patrimonial.

Los morteros preparados con materiales y técnicas tradicionales se han utilizado a través de los tiempos como elementos de la construcción, tanto como para edificaciones particulares como para obras de carácter monumental. Dentro de la ciudad de Quito, Ecuador, existe un importante Centro Histórico donde se encuentra arquitectura colonial construida con materiales tradicionales. Una de las edificaciones importantes que mantiene gran parte de su construcción original es el convento de San Diego, en ella encontramos muros de tapial, adobe, ladrillo, piedra, suro, chaguarquero y madera en general (Universidad de Las Américas, 2016).

El Municipio del Distrito Metropolitano de Quito es la entidad encargada de aplicar una política de gestión enfocada a revitalizar las áreas históricas reconocidas como elementos esenciales de la identidad local y mantener el valor del conjunto histórico de los elementos patrimoniales, para garantizar su permanencia en el tiempo a través de la

restauración monumental. Lamentablemente en ciertos proyectos de restauración se evidencia la carencia de estudios adecuados, sumado a la falta de una especialización, y conocimiento profesional de ciertos ejecutores, a la falta de investigación en el área de la restauración arquitectónica y a la ausencia de un correcto seguimiento a las políticas de gestión aplicadas a la intervención de los edificios patrimoniales, ha provocado que algunos proyectos luego de un corto tiempo de haber sido recuperados tengan que ser nuevamente intervenidos.

La aparición del cemento Portland ha provocado que el uso de los materiales tradicionales para juntas, mampuestos y enlucidos se vaya reduciendo, provocando casi su desaparición en el uso para la construcción en general y en el campo de la restauración, causando una pérdida en la autenticidad histórica de las edificaciones patrimoniales (Usedo, 2015).

Esta investigación pretende aportar con el conocimiento en el uso de materiales tradicionales para realizar una correcta restauración y recuperación de las edificaciones patrimoniales. Con este propósito fue necesario realizar un análisis de los morteros antiguos de una edificación de la época colonial, en este caso la edificación seleccionada fue el convento de San Diego de la ciudad de Quito.



Figura 1. Fachada principal del convento de “San Diego” Quito - Ecuador

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2021

Diseño de la investigación

Esta investigación tiene una metodología de tipo experimental para establecer el comportamiento que se presenta durante la manipulación intencionada de los materiales (cal, barro, paja, mucilago de nopal), que se utilizan en la elaboración de los nuevos morteros. Se realizó la medición mecánica de tensión, compresión y flexión, al que fueron sometidos todos los ejemplares de los nuevos morteros. Los valores obtenidos permitieron realizar una lectura cuantitativa de medición que sirve para comparar entre los modelos de morteros propuestos. Con estos resultados se procederá a valorar cuál o cuáles tienen las mejores propiedades físicas y mecánicas para ser utilizados en un proceso de restauración arquitectónica.

El método ASTM C305 se utiliza para obtener los valores que permiten determinar las cualidades mecánicas de los nuevos morteros experimentados. (Hernández, Collado y Baptista, 2014).

Análisis de los morteros originales

Para el presente estudio se tomaron ocho (8) muestras, cada una de estas son de diferentes etapas constructivas (cuatro periodos²) del *convento de San Diego*. Las muestras se tomaron de un monumento histórico, por lo que respetamos el criterio de que este bien patrimonial no puede alterarse. Las autoridades eclesiásticas decidieron el sitio y la cantidad de la muestra que se podía tomar (Kennedy Troya & Ortiz Crespo, 2010).

El análisis de los morteros antiguos se realizó en el laboratorio de química del Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC³), la investigación de los ejemplares para su investigación se basó en normas y métodos como, por ejemplo: ASTM C267 - 01(2012), PEE-LABINPC-04, Hernández, Pfeiffer Perea, & Cano Barrita, (10 de 1 de 2018). Este estudio permitió conocer las características, propiedades y variantes de las mezclas, todos los morteros fueron sometidos a varias evaluaciones como: la observación



Figura 2. Delimitación de los periodos de construcción del Convento de San Diego con los puntos de toma de muestras

Nota. Fuente: Elaboración propia, 2019

petrográfica, análisis volumétrico y granulométrico, análisis químico elemental, también se analizó la presencia o no de aditivos orgánicos en los morteros. Esta información permitió conocer la estructura del mortero original, compuesto por cal, barro, paja de monte y mucilago de nopal (Silva Cascante et al. 2020).

² Periodos de construcción del convento de San Diego

³ Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC)

A partir del análisis realizado a los morteros antiguos y empleando los resultados de la composición general de las muestras analizadas, se inició la investigación sobre los nuevos morteros preparados con materiales tradicionales. Estos estudios exponen los porcentajes de composición de cada mezcla original, siendo la base para preparar tres (3) nuevas dosificaciones. Con ello se establecerá la combinación más adecuada para ser utilizada en los procesos de restauración arquitectónica.

Los valores referenciales se obtienen con el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) en los originales. Este procedimiento consiste en obtener la composición química y microscópica de cada uno de los materiales, llegándose a determinar la estructura química de los fragmentos analizados, y establecer las características morfológicas y combinaciones. Estos datos servirán como base de las nuevas dosificaciones a aplicarse en otro mortero (INPC, 2019).

Tabla 1
Composición general de los morteros antiguos

MUESTRA	% Cal como (CaCO ₃)	% Barro	% Fibras vegetales	% Mucílago ⁴
19-07-05	8,06	76,28	1,23	9,42
19-07-6	18,19	74,79	1,03	5,99
19-07-7	3,64	92,97	1,74	1,88
19-07-8	10,90	85,73	1,74	1,63
19-07-9	3,52	87,88	1,11	1,49
19-07-10	11,35	85,72	0,99	1,93
19-07-12	3,79	95,61	-	-
19-07-13	4,58	93,48	1,62	-

Nota. Fuente: Laboratorio de química INPC, 2020

Planteamiento de dosificaciones para la elaboración de los nuevos morteros

Las muestras obtenidas de morteros originales de las diferentes etapas de construcción del convento de San Diego están conformadas de cal, barro, paja y mucilago de nopal. También se estableció las bondades, características y proporciones que tienen estos morteros tradicionales. La investigación permitió recuperar en parte los conocimientos ancestrales sobre el valor y calidad de los materiales tradicionales.

Para realizar las nuevas formulaciones se consideraron los valores más altos de los morteros originales analizados, de esta manera se utilizó la media matemática para llegar a establecer las nuevas dosificaciones con las que se procedió a realizar la experimentación en laboratorio de los nuevos morteros.

⁴ Sustancia orgánica de textura viscosa, similar a la goma, que se obtiene de la planta de nopal por medio del método acuoso

Tabla 2
Dosificaciones para la experimentación de los nuevos morteros

Morteros tipo	Cal	Barro	Baba de nopal	Paja de monte %
Mortero tipo 1	2	6	1	1%
Mortero tipo 2	1.5	6.5	1.5	1%
Mortero tipo 3	1	7	2	1%

Nota. Fuente: Elaboración propia, 2021

Cabe indicar que en el país no existe una norma para realizar un estudio sobre morteros con materiales tradicionales, el ensayo experimental se llevó a cabo en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Quito (PUCE), que realizó el estudio bajo las normas americanas ASTM C305: *Standard Test Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement of Hydraulic Cement pastes of Plastic Consistency*, de los cuales se obtuvo las valoraciones de interpretación de los morteros.

Para los nuevos modelos se formularon los volúmenes de cada material y sus proporciones están en función de volumen y peso de los distintos ingredientes utilizados. Para su interpretación: cal (ligante) /barro/mucilago de nopal (aditivo vegetal) /paja de monte (% de volumen de la mezcla). Para efectos la proporción fue: (1:5:2:2%).

Para este ensayo de las nuevas dosificaciones para ser analizadas se tomaron 27 ejemplares por cada nueva muestra, es decir se elaboraron un total de 81 modelos con las que se realizaron las pruebas mecánicas, las mismas que se ensayaron a los “14, 21 y 56” días de edad con cada prototipo.

Los ensayos mecánicos que se llevaron a cabo son:

Compresión. - $f_m = P/A$

Tensión/Tracción. - $RT = 50 * \text{Carga Max} / \text{Área transversal}$

Flexión. - $K \text{ anillo} = 3.43 \text{ kg} / 1 / 10000$

Selección de materiales

Los morteros utilizados en restauración se caracterizan por su naturaleza, por su historia, por su comportamiento estructural, bajo costo, de fácil reposición y compatibles con el medio ambiente, así también, sus partes constitutivas lo conforman los áridos, aglomerantes y aditivos; de acuerdo con el análisis obtenido de la investigación a los morteros antiguos se procedió a seleccionar los materiales tradicionales tales como cal, barro/arcilla, paja de páramo y baba de nopal.

Sin embargo, cabe mencionar que en el país (Ecuador) no se realiza un control de calidad sobre los materiales pétreos que son utilizados en la construcción, pese a existir la Normativa Ecuatoriana de Construcción (NEC) (NEC-SE-MP) misma que está en vigencia desde el 10 de enero del 2015 y su cumplimiento es obligatorio, de esta manera, el control sobre materiales tradicionales es nulo y en este caso se procede a buscar materiales locales que mantengan semejanzas con los materiales originales que son parte de la edificación a intervenir.

Cal

133

Históricamente la cal es el producto más empleado y actualmente de uso necesario e interés en materia de la conservación, considerando que este material no es muy industrializado y comercializado en nuestro medio, además, no hay una marca certificada de producción que cumpla con las normas nacionales, a pesar de ello, es posible obtenerlo en ciertos puntos de venta, se lo puede adquirir como cal viva (en piedra) para someterlo al proceso de apagado, para esta investigación se utilizó cal apagada (Pinganrrón y Villaseñor, 2013).

Sin embargo, es indispensable determinar la buena calidad de la caliza, la misma que debe tener un alto contenido de carbonato de calcio y que sea adecuadamente hidratada para obtener la pasta de cal, para esto se debe cumplir con diferentes requerimientos:

Realizar una detenida selección de la piedra caliza, la misma que debe poseer bastante pureza.

1. Uno de los requisitos indispensables es que la piedra caliza debe tener un alto grado de quemado (900 °C).
2. Otro factor que se debe tener en cuenta es el proceso de apagado de las piedras calizas, esto depende de la cantidad de agua y el tiempo que se conserve sumergido, es decir si el tiempo de apagado es más prolongado la pasta será de más pureza y mejor calidad (Villalobos Ruiz, 2014).



Figura 3. Vista de cal apagada

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

En la experimentación se utilizó la cal apagada ya que la investigación de morteros antiguos determino su presencia en las mezclas analizadas, para su aplicación se realizó el estudio de la cal viva y su similar en agua (cal apagada), para llegar a los resultados estas fueron sometidos al análisis FTIR-ATR.

Barro / tierra

El barro o la arcilla es el material disgregable más fino de la tierra que forma parte del suelo natural. Según su formación, el mineral que predomine en una arcilla determinara su volumen, lo que está establecido por su ubicación y sitio de recolección, además se debe considerar si estas son de carácter inorgánico, es decir son producto de la descomposición de las rocas u orgánicos se originan a partir de la descomposición de

organismos vivos, estos son los factores que determinan las características de las arcillas existentes y establecen sus diferentes usos (La Spina, 2014).

Para esta experimentación se empleó conocimientos ancestrales sobre el uso y manejo de los materiales tradicionales. En primer lugar se efectuó una verificación visual del sector donde se procedió a excavar para recolectar la tierra, se evidenció que esté libre de impurezas de carácter orgánico, factor que ayudo a determinar que la arcilla de este sitio es apta o no para ser utilizada en la elaboración de las mezclas, el suelo más adecuado (barro/tierra) se lo extrajo previo a la excavación a una profundidad adecuada, la tierra con mejores características para el uso de la construcción generalmente se recolecta a 50 centímetros de profundidad del nivel del suelo, esto por ser la más apropiada y tener una variada composición granulométrica, lo que permite mantener más estable los suelos al modificar sus condiciones de humedad (Gatti, 2012).



Figura 5. Vista de barro seleccionado

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Mucílago de nopal

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es una cactácea de la cual se obtiene una sustancia orgánica conocida como mucílago, en el campo de la construcción en general y específicamente en la restauración desempeña la función de adhesivo, este material es un biopolímero que impermeabiliza y aglutina materiales en este caso a los tradicionales tales como: tierra y cal, esta goma de nopal mejora las características mecánicas en los morteros. El nopal seleccionado debe tener de 2 a tres años de edad, las pencas una longitud aproximada de 25 a 30 cm y ser cortadas en la parte inferior de los tallos.

Para la utilización de las pencas de nopal se limpian sus espinas y luego se las lava en agua potable, con la finalidad de evitar que se incrusten en la piel, facilitando su manejo, a continuación, se cortan en pequeños pedazos de forma cuadrada demás o menos 2 cm, paso que facilita la extracción del mucílago.

Existen varios métodos para realizar la extracción del mucílago de nopal y su aplicación en la construcción tradicional, especialmente en la restauración (Martínez et al., 2008).

Algunas formas para realizar la extracción son:

1. Proceso de extracción de forma acuosa al frío (temperatura ambiente).

2. Procedimiento de extracción de cocido (a una temperatura promedio de 90° C).
3. Procesamiento de secado (deshidratación de la paleta de nopal), luego la paleta se somete a un proceso de molido y finalmente se obtiene el polvo de nopal para ser usado en las mezclas.

Para esta experimentación el mucilago se procedió a extraer utilizando el método de cocción para obtener la mayor cantidad del producto. Se prefirió este método ya que en el estudio que se realizó de los morteros tradicionales, se determinó que se usó el método de cocción. Los patrones de comparación utilizados para determinar la presencia de un aditivo orgánico vegetal, fueron de mucilago obtenido al frío (temperatura ambiente) y de cocción (90° C) (Silva Cascante et al., 2020).

El mucilago obtenido por cocción tiene una estructura más espesa, adhesiva y de color verde claro, según el espectro que se encontró en el análisis de los morteros antiguos.



Figura 7. Vista del nopal obtenido por cocción (mucilago)

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Paja de páramo

Para el estudio de los nuevos morteros se utilizó la paja de paramo de origen nativo (*Calamagrostis effusa*), planta de la que se obtiene una fibra natural, es un vegetal característico de las zonas semiáridas y se lo encuentra sobre una altitud de más de 3.000 m. y crece de manera natural. Tiene una composición de lignocelulosa (combinación de lignina y celulosa), la cantidad de paja que proporciona la planta se da por su variedad y edad. Esta fibra es biodegradable y de bajo costo.

Además, existen varios tipos de paja como un subproducto agrícola, tallos secos de cereales como trigo, cebada, centeno y otras especies que son utilizadas en el campo de la construcción tradicional.

En los análisis de los morteros antiguos se encontró este elemento de origen orgánico, que mejora las características mecánicas del producto final. Para su uso es recomendable que la paja se encuentre en estado seco, que la planta debe ser cortada en luna llena y secada al aire libre por medio de los rayos solares para evitar su pudrición; esta fibra natural en los morteros en el proceso de secado evita que los enlucidos se craquelen sin alterar las características de los materiales tradicionales impidiendo la erosión de los aplanados.

En la experimentación de las nuevas mezclas la paja se usó en estado seco y con una longitud promedio de 2 a 4 cm de largo (Sánchez, 2012).



Figura 8. Vista del pesado de la paja de paramo

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Experimentación

Para esta investigación, se utilizaron datos obtenidos del estudio realizado a los morteros originales de la edificación del convento de San Diego, resultados que permitieron determinar sus componentes y porcentajes de composición de las mezclas analizadas. Con estos fundamentos se pretende demostrar que los revestimientos elaborados con materiales tradicionales tales como cal, barro, paja de monte y mucílago de nopal, pueden ser una solución para realizar una apropiada restauración. Estas dosificaciones deben tener características similares a las mezclas tradicionales, con propiedades tales como durabilidad, permeabilidad y compatibilidad con los materiales que conforman la edificación.

El objetivo de realizar este ensayo a través de un laboratorio, es medir por intermedio de las pruebas la capacidad de soportar los distintos esfuerzos mecánicos a las que son sometidas las probetas. Para alcanzar este objetivo se diseñaron tres nuevas formulaciones diferentes entre sí, pero con el mismo tipo de material: cal, barro y mucílago de nopal, se interpretan en volumen y la paja es un porcentaje (1%) en relación a la suma del volumen total de las tres anteriores, las dosificaciones tipo se muestran en las tablas 3, 4 y 5.

Interpretación de la dosificación:

(barro: cal: mucilago: paja en % del volumen de la mezcla).

Tabla 3

Dosificación de la nueva formulación mortero N.º 1

DOSIFICACIÓN N° 1		
Medida / Peso = 167.92 gr.		
Material	Proporciones	Peso (gr)
Barro (B)	7	1175.44
Cal (C)	1	244.00
Mucílago de Nopal	2	309.88
Paja (P)	1% del peso total de B+C+N	17.29

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Tabla 4

Dosificación de la nueva formulación mortero N.º 2

DOSIFICACIÓN N° 2		
Medida / Peso = 167.92 gr.		
Material	Proporciones	Peso (gr)
Barro (B)	6.5	1091.48
Cal (C)	1.5	366.00
Mucílago de Nopal	2	229.80
Paja (P)	1% del peso total de B+C+N	17.29

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Tabla 5

Dosificación de la nueva formulación mortero N.º 3

DOSIFICACIÓN N° 3		
Medida / Peso = 167.92 gr.		
Material	Proporciones	Peso (gr)
Barro (B)	6	1007.52
Cal (C)	2	488.00
Baba de Nopal	1	154.94
Paja (P)	1% del peso total de B+C+N	17.29

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

La experimentación de los modelos del presente estudio se fundamenta en la rotura de las muestras en diferentes ensayos donde se miden la resistencia mecánica a la compresión, tensión y flexión. Para cada una de las pruebas se tomaron 27 muestras por cada formulación, la experimentación de cada muestra fue ensayada a los “14, 21 y 56 días” de edad de cada modelo.



Figura 9. Vista probetas de ensayo

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Para realizar el pesado de los materiales se utilizó un recipiente como unidad de volumen, este tiene una capacidad de 170 gr. (1 unidad), con la que se realizó el pesado de las nuevas formulaciones.

En la elaboración de los modelos para las diferentes pruebas mecánicas se utilizaron diferentes moldes, sus formas varían dependiendo el tipo de ensayo mecánico que se va a realizar, así podemos indicar:

- Molde para la prueba de *compresión*, tiene forma de cubo de 5.0 x 5.0 x 5.0 cm.



Figura 10. Molde para la prueba de compresión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

- Modelo para el ensayo de *flexión*, posee una forma de barra rectangular de 16.0 x 4.0 x 4.0 cm.



Figura 11. Molde para la prueba de flexión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

- Matriz para el experimento de *tracción*, tiene forma de corbata de lazo y sus medidas son 7.5 x 2.5 x 4.0 cm.



Figura 12. Molde para prueba de tracción

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Las mezclas se realizaron de forma mecánica. Se utilizó una batidora industrial (*mortar mixer*) de tres velocidades, con una paleta para la realizar la mezcla. En esta investigación, el mezclado de los distintos materiales se hizo a una velocidad baja y se utilizó tiempos fijos de batido por cada material agregado, los tiempos empleados por muestra fueron:

- Barro + paja por 30 segundos.

- Adición de cal por 30 segundos.
- Agregación de mucílago de nopal por 60 segundos.

Con el propósito de lograr que la mezcla sea más homogénea, la argamasa fue sometida a 30 segundos más de batido en alta velocidad.



Figura 13. Batidora industrial

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Con la mezcla final se procede al llenado de cada uno de los prototipos. Se efectúa de forma manual, el vertido de la mixtura en cada uno de los moldes se realiza en dos tiempos, entre cada uno de los periodos cada capa recibirá 15 golpes con la finalidad que la mezcla ocupe todos los vacíos y el aire salga del molde. Una vez concluido el llenado de los prototipos estos son sometidos a un proceso de secado dentro del molde, a temperatura ambiente por un lapso de 7 días, luego de este periodo se desarmaron las matrices y se retiraron los ejemplares, que a continuación fueron sometidos a un proceso de curado. Cuando los modelos cumplen los ciclos de edad programada para los ensayos (14, 21, 56 días) se someten a las distintas pruebas mecánicas.

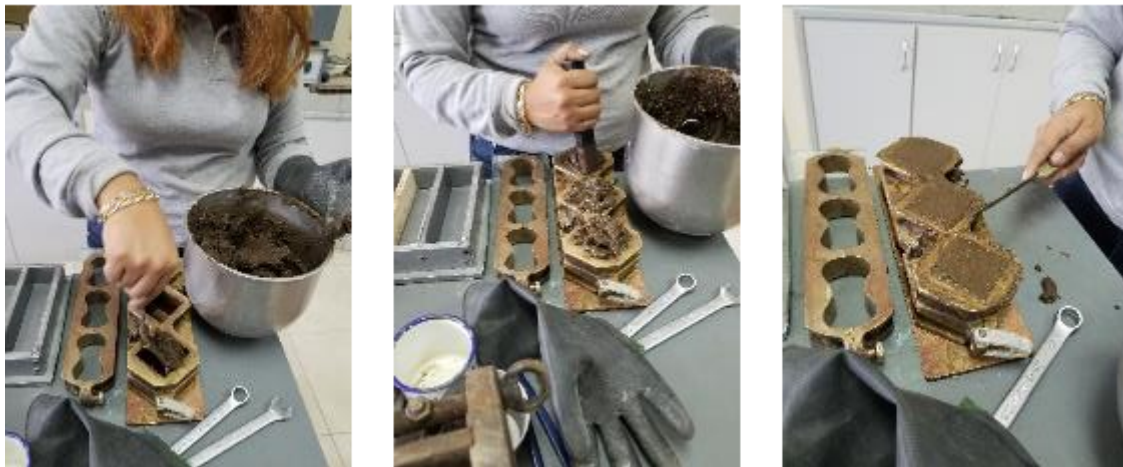


Figura 14. Proceso de llenado de los moldes

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Los resultados de las pruebas mecánicas realizadas a cada una de las dosificaciones se recolectaron a través de observación directa y fueron registrados en tablas Excel. De igual forma se analizó, interpreto y se obtuvo la información necesaria para llegar al resultado final de cada uno de los ensayos.

Posteriormente, se analizaron cada uno de los resultados para llegar a establecer posibles incoherencias, errores, y corregirlos de ser necesario. Se verifico cuidadosamente toda la información recolectada para redactar el informe final de los ensayos registrados en formularios tipo del laboratorio de suelos de la Universidad Católica (PUCE).

Ensayos mecánicos de laboratorio

Para identificar, determinar la calidad y establecer las mejores características de los morteros, en el laboratorio las probetas fueron sometidas a las siguientes pruebas mecánicas:

Compresión. - $f_m = P/A$

Los ensayos de compresión de los morteros se realizaron bajo la norma ASTM C109: *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Center Mortars (using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*.

Por cada mortero se prepararon tres ejemplares por dosificación para cada edad de rotura. Se rompieron tres unidades por modelo, obteniendo tres registros de resistencia, se realizó la media entre los tres valores obtenidos de cada edad de rotura, para realizar un análisis de las características de cada ejemplar.



Figura 15. Probetas de ensayo de compresión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019



Figura 16. Esquema de ensayo de rotura a la compresión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Tensión/Tracción. - $RT=50 \cdot \text{Carga Max} / \text{Área transversal}$

Los ensayos de tensión se realizaron a las nuevas dosificaciones bajo la norma AASHTO T132: *Standard Method of Test for Tensile of Hydraulic Cement Mortars.*

Para la determinación de resistencia del mortero a la tensión, de igual manera que en las demás pruebas, se utilizaron tres ejemplares por dosificación para cada edad de rotura planteada, con los datos de resistencia obtenidos de cada toma, se realizó la media entre los tres valores obtenidos de cada muestra analizada con las cuales se llega a valorar sus características.



Figura 18. Probetas de ensayo de tensión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019



Figura 19. Esquema de ensayo de rotura a la tensión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Flexión. - K anillo=3.43 kg/1/10000

Los ensayos de flexión se realizaron bajo la norma ASTM C348: *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars*.

La ejecución de los ensayos para establecer la resistencia a la flexión de las nuevas dosificaciones, de igual forma se realizaron con tres ejemplares por cada mezcla para las edades de rotura programadas, para cada periodo se ensayaron tres ejemplares y sus resultados fueron registrados y con sus valores se realizó la media aritmética, las que son utilizadas para evaluar sus características.



Figura 21. Probetas de ensayo de flexión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019



Figura 22. Esquema de ensayo de rotura a la flexión

Nota. Fuente: Elaboración Propia, 2019

Resultados

En el proceso de investigación en laboratorio se demostró las características mecánicas de los morteros por medio de los ensayos de resistencia a la compresión, tensión y flexión de cada nueva dosificación analizada, según la metodología planteada en la investigación, se obtuvieron resultados de las resistencias a las tres nuevas dosificaciones en edades de 14, 21 y 56 días, según los tiempos establecidos de ensayo se puede establecer que las tres dosificaciones presentan un comportamiento ascendente en su resistencia en relación a la edad del ensayo.

Los datos del ensayo a la compresión se registran en una tabla de resultados promedio por edades de rotura, en esta se puede observar que la dosificación 1 tiene una mejor resistencia a la compresión a los 56 días, seguidas por las dosificaciones 2 y 3, sin embargo, a la edad de los 14 y 21 días su resistencia a la compresión es más baja que las otras dosificaciones, no obstante, se puede evidenciar que la dosificación 3 a los 14 y 21 días presentan mayor resistencia a la compresión.

Tabla 6
 Tabla de resultados de ensayos de Resistencia a la Compresión

Resultados de Ensayos de Compresión					
Dosificación N 1		Dosificación N 2		Dosificación N 3	
B:C:N:P		B:C:N:P		B:C:N:P	
(7:1:2:1%)		(6.5:1.5:2:1%)		(6:2:1:1%)	
Edad	Resistencia	Edad	Resistencia	Edad	Resistencia
(días)	Promedio	(días)	Promedio	(días)	Promedio
	(Mpa)		(Mpa)		(Mpa)
14	0.30	14	0.35	14	0.46
21	0.44	21	0.53	21	0.55
56	0.68	56	0.62	56	0.59

*Factor de conversión: 1 Mpa = 10.2 Kg/cm²

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales PUCE, 2020

Con los datos obtenidos del análisis se realiza una media de estos valores con los cuales se grafica cada una de las dosificaciones para determinar la curva de resistencia de cada modelo. En la figura 17 se puede evidenciar como se desarrolla el incremento de resistencia a la compresión según la edad de rotura de cada muestra, considerando las 3 dosificaciones se puede demostrar que a los 14 días de edad hay un incremento ascendente en el cual la dosificación 3 mantiene la mayor resistencia con 0.46 (Mpa). De igual manera en la rotura de las muestras a la edad de los 21 días, también se puede evidenciar un incremento en la resistencia donde la dosificación 3 posee la mayor resistencia con una lectura de 0.55 (Mpa); en el ensayo final de las tres dosificaciones a los 56 días de edad, según los datos obtenido en las lecturas se presenta que la mayor resistencia tiene la dosificación 1 con 0.68 (Mpa) y la menor resistencia lo presenta la dosificación 3 con un valor de 0.59 (Mpa).

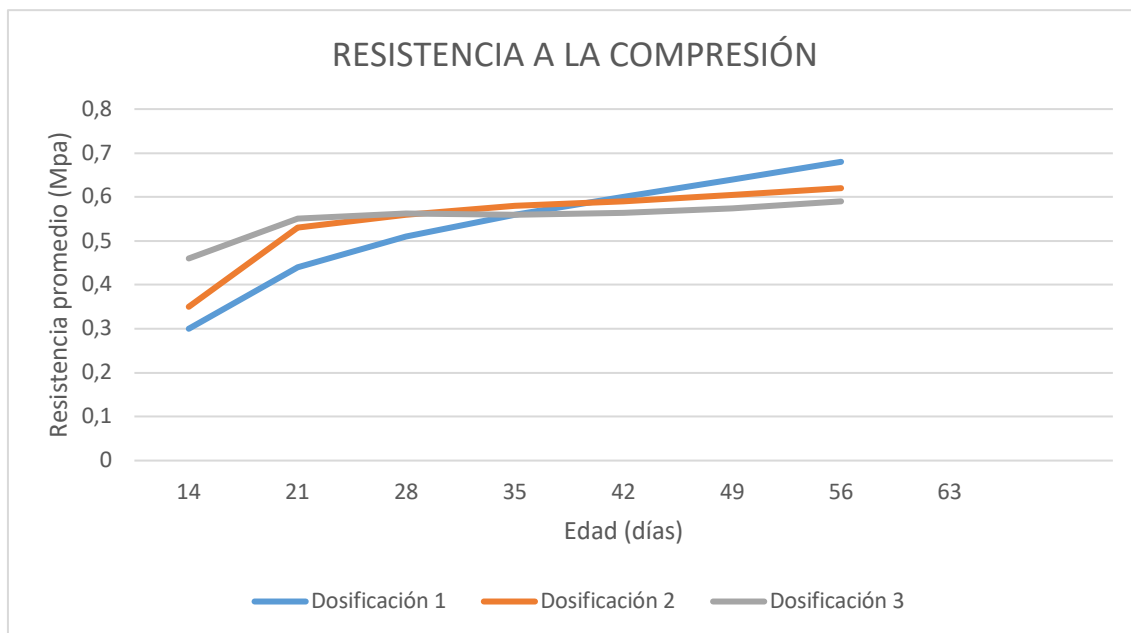


Figura 17. Tabla de resultados de ensayo Resistencia a la Compresión

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales PUCE, 2020

Con los valores obtenidos del ensayo a la tensión se preparó el cuadro de resultados de resistencia, en consecuencia se analizan los valores obtenidos comparando las dosificaciones, así tenemos que la muestra 2 mantiene mayor resistencia a la tensión a edad de los 56 días en la dosificación 3, seguidas de la dosificación 2, sin embargo, a la edad de los 14 días la resistencia a la tensión es la más baja que las otras muestras, no obstante, se puede estimar que las dosificaciones 2 y 3 a los 14 y 21 días de edad presentan igual valor de resistencia, superando al valor de la tensión que mantiene la dosificación 1.

Tabla 7

Tabla de resultados de ensayo de Resistencia a la Tensión

Resultados de Ensayos de Tensión					
Dosificación N 1 B:C:N:P (7:1:2:1%)		Dosificación N 2 B:C:N:P (6,5:1,5:2:1%)		Dosificación N 3 B:C:N:P (6:2:1:1%)	
Edad (días)	Resistencia Promedio (Mpa)	Edad (días)	Resistencia Promedio (Mpa)	Edad (días)	Resistencia Promedio (Mpa)
14	0.0100	14	0.0198	14	0.0198
21	0.0157	21	0.0220	21	0.0220
56	0.0197	56	0.0243	56	0.0258

*Factor de conversión: 1 Mpa = 10.2 Kg/cm²

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales PUCE, 2020

Para una mejor apreciación de los resultados obtenidos en los ensayos de la prueba mecánica de tensión, se analiza de forma gráfica. En la figura 20 se puede confirmar el comportamiento de las muestras al ensayo de resistencia, basándose en el estudio realizado a los ejemplares en la edad de rotura correspondiente, el primer análisis realizado a las 3 dosificaciones fue a la edad de los 14 días, aquí se puede evidenciar que hay un incremento ascendente de sus valores, la dosificación 1 tiene una resistencia de 0.0100 (Mpa), siendo así la más baja y que la mezcla con mayor resistencia es la 3 presentando una resistencia de 0.0198 (Mpa); en el análisis efectuado a las muestras a los 21 días de edad se puede demostrar que la dosificación 1 es la resistencia más baja con 0.0157 (Mpa), pero se puede señalar un incremento en la resistencia en las mezclas 2 y 3 donde se mantiene una constante de los valores entre estos dos morteros con una resistencia de 0.0220 (Mpa); en la experimentación a los 56 días de edad las 3 dosificaciones presentan datos ascendentes según se puede observar en su resultado, la menor resistencia lo presenta la dosificación 1 con 0.0197 (Mpa), contrario a esta la que mayor resistencia presenta es la dosificación 3 con 0.0258 (Mpa).

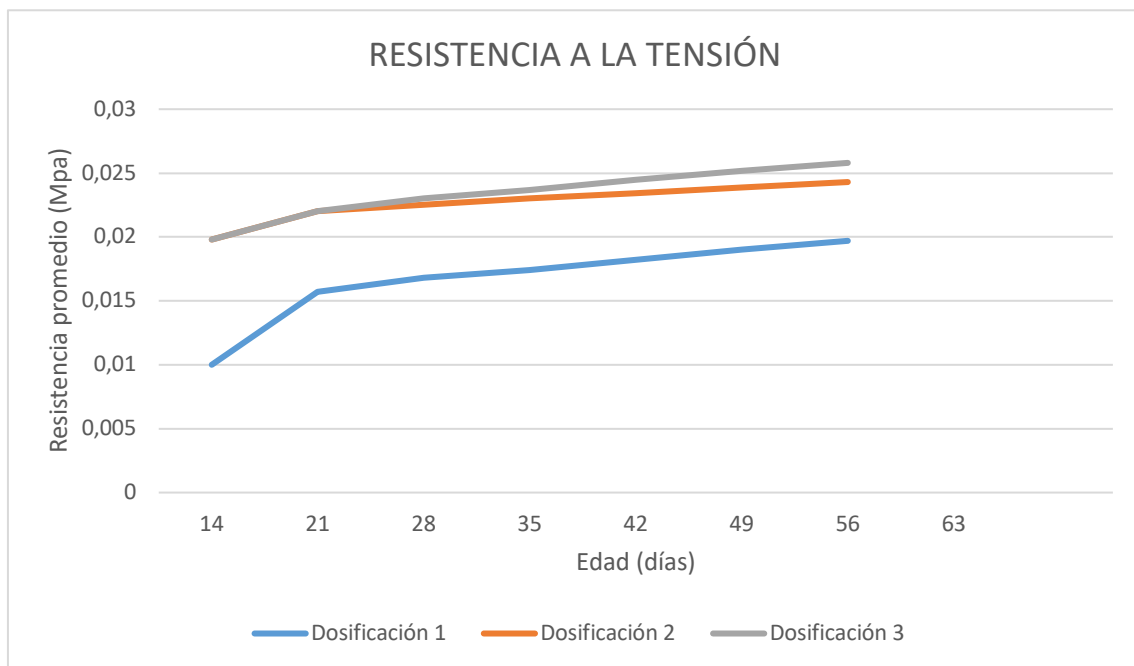


Figura 20. Tabla de resultados de ensayos de Resistencia a la Tensión

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales PUCE, 2020

Con los resultados alcanzados en la prueba con los morteros en los ensayos a flexión, se puede establecer que la dosificación 2 muestra una mayor resistencia a la edad de los 56 días, seguidos por las dosificaciones 3 y 1, no obstante, a la edad de 14 y 56 días su resistencia a la flexión es la más baja en relación a las otras dosificaciones, sin embargo, se puede observar que la dosificación 1 a los 14 y 21 días de edad muestra una mayor resistencia.

Tabla 8
Tabla de resultados de ensayos de Resistencia a la Flexión

Resultados de Ensayos de Flexión					
Dosificación N 1		Dosificación N 2		Dosificación N 3	
B:C:N:P		B:C:N:P		B:C:N:P	
(7:1:2:1%)		(6.5:1.5:2:1%)		(6:2:1:1%)	
Edad	Resistencia	Edad	Resistencia	Edad	Resistencia
(días)	Promedio	(días)	Promedio	(días)	Promedio
	(Mpa)		(Mpa)		(Mpa)
14	0.147	14	0.124	14	0.084
21	0.151	21	0.141	21	0.114
56	0.169	56	0.249	56	0.193

*Factor de conversión: 1 Mpa = 10.2 Kg/cm²

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales PUCE, 2020

Para una mejor interpretación de los resultados estos se representa de forma gráfica. En la figura 23 se puede observar los resultados del análisis realizado a las muestras que se sometieron a las pruebas de flexión realizadas en las edades de ensayo programadas para su rotura.

Los análisis iniciales fueron realizados a los 14 días, estos resultados nos permiten evidenciar que los valores tienen un desarrollo descendente, donde se puede ver que la dosificación 1 tiene la mayor resistencia de 0.147 (Mpa), seguido por la dosificación 2 que tiene una resistencia de 0.124 (Mpa), también se puede observar datos más bajos que presentan una menor resistencia y la presenta la dosificación 3 con 0.084 (Mpa); en relación al análisis realizado a las muestras a la edad de los 21 días, también, se evidencia que la rotura a los 14 días la dosificación 1 mantiene la resistencia más alta con 0.151 (Mpa), por otro lado la dosificación 2 muestra un descenso en su resistencia a 0.141 (Mpa), y la menor resistencia lo presenta la dosificación 3 con 0.114 (Mpa), de igual manera en la experimentación realizada a los 56 días de edad, los datos mantienen una tendencia ascendentes, la menor resistencia corresponde a la dosificación 1 con 0.169 (Mpa), mientras que la de mayor resistencia está dada por la dosificación 2 con 0.249 (Mpa), entre tanto la resistencia de estimación media lo posee la dosificación 3 con 0.193 (Mpa) (PUC, 2020).

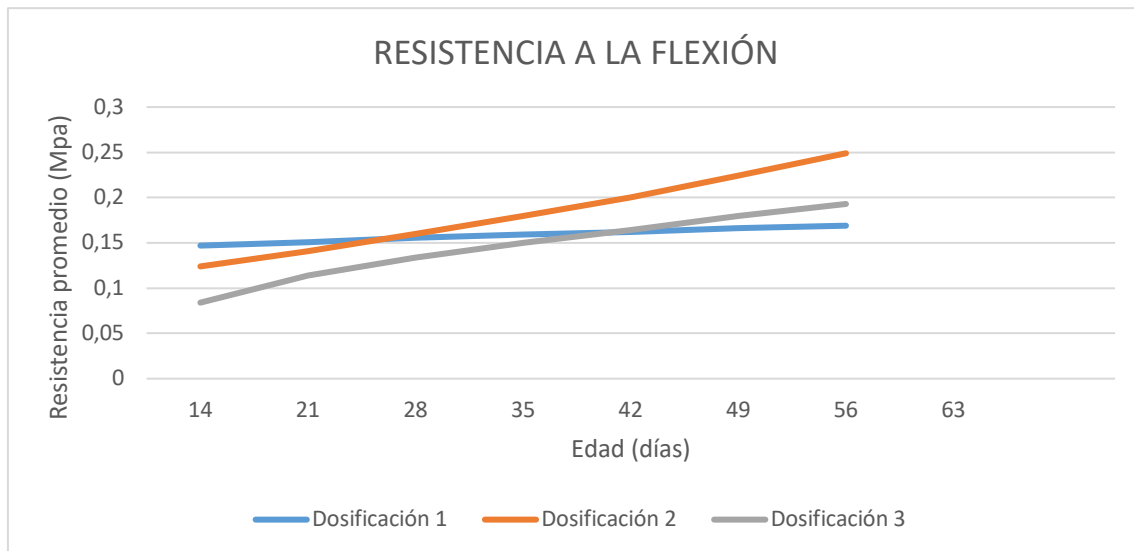


Figura 23. Tabla de resultados de ensayos de Resistencia a la Flexión

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales PUCE, 2020

En resumen, la dosificación 1 presenta a los 56 días una mayor resistencia a la compresión, seguida por la dosificación la 2, mientras tanto que la dosificación 3 a los 14 y 21 días presenta mayor resistencia a la compresión. La dosificación 2 presenta a los 56 días una mayor resistencia a la flexión, mientras que a los 14 y 21 la dosificación 1 tiene una mayor resistencia a la flexión seguida de la dosificación 2. La dosificación 3 a los 56 días tiene una mayor resistencia a la tensión, seguida por la dosificación 2, mientras tanto que a la edad de 14 y 21 días la dosificación 2 presenta una resistencia similar a la tensión.

De los resultados obtenidos se pueden determinar que la dosificación 2, según los valores alcanzados que corresponden a una media matemática de las resistencias con respecto a las otras dosificaciones analizadas, presenta mejores propiedades mecánicas, siendo la óptima para la aplicación en procesos de restauración.

Tabla 9

Tabla de resultados dosificación 2

Edad (días)	Dosificación N 2 B:C:N:P (6.5:1.5:2:1%)					
	Resistencia a la Compresión		Resistencia a la Tensión		Resistencia a la Flexión	
	(Mpa)	Kg/cm ²	(Mpa)	Kg/cm ²	(Mpa)	Kg/cm ²
14	0.35	3.57	0.0198	0.20	0.124	1.26
21	0.53	5.41	0.0220	0.22	0.141	1.44
56	0.62	6.32	0.0243	0.25	0.249	2.54

*Factor de conversión: 1 Mpa = 10.2 Kg/cm²

Nota: Fuente: Laboratorio de materiales PUCE, 2020

Conclusiones y recomendaciones

Una vez concluida la experimentación, se puede determinar que las tres nuevas dosificaciones estudiadas presentan entre ellas propiedades muy semejantes en relación a la investigación realizada a los ensayos de resistencia mecánica a la compresión, tensión y flexión aplicados a los morteros elaborados en el laboratorio, luego de haber analizado en el laboratorio los ensayos a las edades programadas de 14, 21 y 56 días, permite considerar que los resultados obtenidos como fiables.

Sobre la base este estudio se pretende instaurar nuevas pautas de uso de técnicas y materiales tradicionales, para que estas sean aplicadas en los procesos de restauración patrimonial y evitar el uso de materiales contemporáneos que alteran y dañan los monumentos patrimoniales. Además, esta investigación se establece como un punto de partida para realizar nuevas investigaciones con nuevas dosificaciones de los materiales tradicionales.

Los morteros en base a materiales tradicionales son irremplazables en un proceso de restauración arquitectónica, ya que estos incluso son la solución de problemas estructurales para la protección de los mampuestos de adobe, tapia, ladrillo o piedra. Estos morteros permiten que las edificaciones recuperen su integridad.

Se debe continuar con la investigación de las propiedades de los morteros con materiales tradicionales, produciendo variaciones entre cada uno de ellos, de estas modificaciones se pueden obtener propiedades mecánicas cuantificadas que determinen la calidad de los morteros.

Dado que el árido varía de un sitio a otro por lo que este tiene una notable influencia en los morteros tradicionales, esto condiciona que en cada proyecto de restauración se debe realizar el estudio de calidad del barro a ser utilizado en la elaboración de las nuevas mezclas.

Referencias

- Abraján, M. (2008). *Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucilago del nopal (opuntia ficus-indica) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible* (Tesis doctoral). Universidad politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Alvarez, Martín, & García (1995). Historia de los morteros. *Boletín informativo del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 13, 52-59.
https://www.google.com/search?q=HISTORIA+DE+LOS+MORTEROS&rlz=1C1CHBD_esEC917EC917&oq=HISTORIA+DE+LOS+MORTEROS&aqs=chrome.69i57j0l3.4251j0j1&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- Aranda, Y., y Suárez, E. (2013). Efecto de la impermeabilidad del Mucilago de Nopal en bloques de tierra comprimidos. *Nova Scientia*, 6(11).
- Barbero, M. (2011). *Mejora del comportamiento térmico de los morteros de cal aditivados y su empleo en la rehabilitación de inmuebles* [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Cazalla, O. (2002). *Morteros de cal, aplicación en el Patrimonio Histórico* (Tesis doctoral). universidad de Granada, Granada, España.
- Cedeño Valdiviezo A. (2011). *Agglomerantes morteros y aplanados adecuados para proteger el medioambiente | Revista de Arquitectura (Bogotá)*. *Revista de*

- Arquitectura* (Bogotá), 13(1), 106-117.
<https://editorial.ucatolica.edu.co/index.php/RevArq/article/view/774>
- De Sutter, P., (1984). *Presentación de la cartilla manual para la construcción popular en adobe "Hagamos nuestra casa"*. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural
- Díaz, I. (2015). *La piel de la arquitectura de tierra, sustancias naturales al servicio de la restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado* (Tesis doctoral). Palmas de la Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Díaz, M. (Febrero de 2016). *Aditivos orgánicos e inorgánicos en morteros de cal: revisión histórica para su aplicación en intervenciones actuales* [Tesis de Maestría]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, Mexico.
- Gatti, F. (2012). *Arquitectura y construcción en tierra Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra*. (Tesis de maestría), Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- González de la Cadena, J. F. (2016-11-11). *Estudio del mortero de pega usado en el cantón Cuenca. Propuesta de mejora, utilizando adiciones de cal* (Tesis de maestría). <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23664>
- Guerrero, L. (2007). *Arquitectura en tierra Hacia la recuperación de una cultura constructiva | Apuntes*. Revista de estudios sobre patrimonio cultural. Obtenido de Apuntes. *Revista De Estudios Sobre Patrimonio Cultural*. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/view/8976>
- Hernández et al. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- INPC, L. d. (2019). *Informe de resultados*. Morteros antiguos San Diego.
- Instituto Nacional de Cultura del Perú. (2007). *documentos fundamentales para el patrimonio cultural*, (1ª ed.). Instituto Nacional de Cultura del Perú, Ed.
- Kennedy, A., & Ortiz, A. (2010). *Recoleta de San Diego de Quito. Historia y restauración* (1ª ed.). Ediecuatorial, Ed.
- La Spina, V. (2014). *Los revestimientos continuos históricos en las fachadas de la Valencia intramuros: estudio histórico, caracterización y propuestas de conservación* [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Valencia, España.
- Lanas, J., & Alvarez, J. (2006). Preparación y ensayos de morteros de cal de nueva factura para su empleo en restauración del patrimonio. En *V Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio"*. La Plata, Argentina.
- Lara, M., Sanz, D., & Del Pino, I. (2020). Morteros históricos en las construcciones de Quito de los siglos XVI, XVII y XVIII. *Ge-conservación N. 17*, 71-81. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7600262>
- Martinez, W., Alonso, M., Rubio, J. C., Bedolla, J. A., Velasco, F. A., & Torres, A. A. (2008). Comportamiento mecánico de morteros de cal apagada artesanalmente, de catácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos coloniales. *Revista de la Construcción*, 6. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127612584009>
- Mas i Barbera, X. (2006). *Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales* [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de València, València, España.
- Ontiveros, E. (2006). *Programa de normalización de estudios previos aplicado a bienes inmuebles*, (PH cuadernos 19 ed.). (Consejería de Cultura, Ed.) Sevilla, España: Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.

- Ontiveros, E. (2015). *La cal y sus aplicaciones en la conservación de bienes culturales*. Blog de la Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico: <http://www.juntadeandalucia.es/cultura/blog/la-cal-y-sus-aplicaciones-en-la-conservacion-de-bienes-culturales/>
- Pingarrón, L. (2013). *La cal historia, propiedades y usos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de investigaciones antropológicas. Recuperado de: https://www.academia.edu/10460845/La_Cal_Propiedades_y_Usos
- Pingarrón, L. y Villaseñor, I. (2012). *Los orígenes tecnológicos de la cal*. Cuicuilco., vol. 19, núm. 55, 11-41. www.redalyc.org/articulo.oa?id=35128270010
- PUCE, L. d. (2020). Informe de elaboración de morteros con materiales tradicionales (cal, barro, baba de nopal y paja).
- Sáenz, C., García, Abraján, Fabry, & Robert, A. (2016). El Nopal, una especie de zonas áridas productora de hidrocoloides naturales. *Revista técnico-profesional*, 60 - 68.
- Sánchez, V. (2012). *Morteros de barro estabilizados con fibras de paja, esparto y sisal para su uso como revestimientos*. [Trabajo Fin de Máster]. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Madrid, España.
- Silva Cascante, A. V., Vazquez Mora, C. A., & Uría Cevallos, G. R. (2020). *Determinación del uso del mucilago de nopal en la construcción de la época colonial (caso convento de San Diego)*. Project, Design and Management, 2(2), 95-118. <https://doi.org/10.29314/pdm.v2i1.433>.
- Universidad de Las Américas. (2016). *Quito, patrimonio de la humanidad*. <https://www.udla.edu.ec/2016/09/08/quito-patrimonio-de-la-humanidad/>
- Usedo, R. (2015). *Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico*. [Tesis Máster]. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Valera, J., & Olvera, M. (2016). *Materiales y técnicas constructivas*. SIACOT.
- Villalobos Ruiz, R. (2014). *Morteros de cal con mucilago de nopal (Opuntia ficus-indica)*. [Tesis de pregrado]. Universidad autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, Mexico.

Fecha de recepción: 26/10/2021

Fecha de revisión: 04/11/2021

Fecha de aceptación: 02/02/2022