

## CONTRIBUCIÓN DEL APLANADO DE MORTEROS DE CAL PARA RESTAURACIÓN SOBRE MURETES DE MAMPOSTERÍA

**W. Martínez Molina<sup>1</sup>, M. Arreola Sánchez<sup>1</sup>, E. M. Alonso Guzmán<sup>1,2</sup>, J. A. Bedolla Arroyo<sup>2</sup>, A. A. Torres Acosta<sup>3,4</sup>, C. Lara Gómez<sup>1</sup>, H. L. Chávez García<sup>1</sup>, F. A. Velasco Ávalos<sup>1</sup> y A. L. del Valle Moreno<sup>4</sup>**

*1. Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58070; 2. Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58070; 3. Universidad Marista de Querétaro, Querétaro, Querétaro, México 76000; 4. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México, 76703.*

### RESUMEN

Los morteros con base cal, han sido materiales descritos en los tratados antiguos de arquitectura, permitidos en muchos documentos que rigen los trabajos de restauración de bienes inmuebles patrimoniales y actualmente son los materiales más empleados en la restauración y conservación del patrimonio de mampostería natural en muchos sitios del mundo.

La cal puede ser normalizada o bien puede ser apagada en sitio como describe Vitrubio en sus Libros de Arquitectura; los áridos pueden ser ígneos, metamórficos o sedimentarios; para modificar las propiedades físicas y mecánicas básicas de los morteros de cal suelen agregarse aditivos orgánicos e inorgánicos.

La restauración y conservación de los edificios de mampostería coloniales es un reto en México. Tenemos 9 ciudades coloniales cuyos centros históricos están en el listado de Patrimonio de la Humanidad de la Unesco. Todas edificadas con mamposterías de rocas naturales y aplanadas con morteros de cal y aditivos orgánicos.

Inicialmente se recubrían las rocas que carecían de labrado, cánones dictados por la arquitectura en boga. Con la modernización y masificación del transporte, los residuos vertidos a la atmósfera han deteriorado la calidad del aire ambiental resultando en pátinas, costras negras, daño antropogénico en superficies expuestas, devitrificación de la matriz de las rocas.

Del uso sugerido de emplear morteros como protección en los monumentos arquitectónicos coloniales, método relativamente simple y económico, se ha revisado también su efecto sobre la resistencia mecánica.

Este trabajo hace una comparación entre pilas de mampostería de arcilla recocida adheridas con mortero de cal adicionado con fibras desecadas y pulverizadas de nopal cactus opuntia y pilas con las mismas características, pero recubiertas en ambas caras con el mortero mencionado.

Las piezas cerámicas son hechas a mano, con arcillas montomorilloníticas del grupo Smectitas. El mortero es con cal normalizada, condiciones de laboratorio, en proporción 1:3 en peso y con adición de 1% de fibras pulverizadas de nopal, el agua se agregó hasta tener una fluidez de 90 % cuantificada en mesa. El mortero se caracterizó, así como la materia prima y las pilas, según los estándares de la American Society for Testing and Materials y los resultados se compararon contra el Reglamento de Construcciones Vigente en el Estado de Michoacán. Las pruebas mecánicas se realizaron en el Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La Conservación y restauración de obras de arte es el conjunto de procesos dedicados a la preservación de los bienes culturales para el futuro, devolviendo la eficiencia y originalidad a un producto de la actividad humana o natural. Las actividades de conservación corresponden a: Examinación, documentación, tratamiento, prevención y cuidado. Dentro de esta área, la cal tiene una importante participación, pues es el único material original que aun a la fecha puede ser obtenido fácilmente y a un costo realmente bajo [1].

Históricamente, la Cal se empleó desde la antigüedad en sorprendentes construcciones internacionalmente conocidas por su solidez y resistencia a lo largo del tiempo, como La Vía Apia, Las Pirámides de Egipto, La Muralla China y El Coliseo Romano o las Pirámides de Teotihuacán, las del área Maya o las antiguas construcciones Toltecas, por sólo mencionar algunos ejemplos [2].

La utilización de los morteros como material de unión entre las piezas de piedra o ladrillo para garantizar la estabilidad del edificio se convirtió, con el paso del tiempo, en práctica más habitual. El aglomerante más utilizado era la cal aérea, que experimentó un importante desarrollo con la civilización romana. A esta última se debe, sino la invención del mortero de cal hidráulica o mortero puzzolánico que posiblemente se deba a los griegos o etruscos, si su desarrollo y utilización masiva en todo tipo de construcciones, tanto como para asegurar la unión o fijación de piezas en paredes y otros elementos constructivos como en revestimientos y como elemento de base para la fabricación de hormigones. Las características esenciales de este tipo de mortero, que consta de mezclas cal aérea y polvo de rocas volcánicas y de cerámica, es que su fraguado se verifica en contacto con agua y que presenta unas propiedades mecánicas más aptas que las de los morteros de cal aérea y/o yeso para funciones estructurales [3].

Las culturas prehispánicas de México habían llegado a elaborar morteros de gran calidad en los que empleaban aditivos orgánicos en sus mezclas. Estos conocimientos fueron integrados en la elaboración de los nuevos morteros. Para la carga se siguieron usando las mismas arenas empleadas por los nativos en la fabricación de adobes y las mismas fuentes minerales para la preparación de la cal [2]. Durante la época colonial, la Cal continuó usándose para levantar importantes construcciones, mismas que, hasta el día de hoy, han resistido con firmeza los embates del tiempo y la fuerza de la naturaleza [1].

Restaurar monumentos históricos no es regresar a la arquitectura de otras épocas, sino traer al tiempo actual la vivencia del gozo de un satisfactor de las necesidades espirituales y materiales de los antepasados, y saber estimar el contexto ambiental que lo originó. El arte antiguo se debe ver con los ojos de hoy y entenderlo con el pensamiento del ayer.

En México, la restauración de monumentos tiene una tradición ancestral. Durante el siglo XVIII, las construcciones prácticamente rehechas o modificadas según las necesidades de ese siglo barroco y de las grandes fundaciones en la Nueva España. Las reglamentaciones al respecto aparecen ya desde el siglo pasado; se empieza a proteger las antigüedades indígenas, también llamadas antigüedades mexicanas [4].

## **2. OBJETIVO**

Evaluar el efecto mecánico de los revestimientos en las mamposterías de mortero de cal, además de determinar las características mecánicas del nopal deshidratado en polvo como aditivo en el mortero de cal-arena sílica, comparándolo con un mortero testigo.

## **3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

Para el desarrollo de la investigación se elaboraron morteros de cal mediante la adición de nopal en polvo y se determinan las características físicas y mecánicas, así como el comportamiento de dichos morteros en conjunto con la mampostería de tabique rojo recosido, para lo cual se elaboraron pilas y muretes con y sin revestimiento.

### **3.1 materiales empleados y diseño de mezclas**

Cuando se diseña un material para determinada aplicación, deben tenerse en cuenta varios factores. El material debe adquirir las propiedades físicas y mecánicas necesarias, debe ser capaz de procesarse o fabricarse en la forma deseada y debe proporcionar una solución económica para el problema de diseño [5].

Los materiales empleados en el presente estudio son los que se describen en seguida:

**1.- Arena de río**, se extrajo del banco de material "Ojo del Cuervo", ubicado en la carretera Morelia-Ciudad Hidalgo, en Michoacán, dicha arena fue cribada entre las mallas N° 16 y N°30 y sólo se utilizó la parte de arena retenida entre dichas mallas, según la norma ASTM, que especifica dicha arena, denominada como arena cuarcita o arena de Canadá, para experimentación de laboratorio.

**2.- Conglomerante.** Los conglomerantes son los materiales encargados del proceso de fraguado y endurecimiento de las mezclas. En nuestro caso se usó la cal normalizada del tipo comercial o cal muro, de marca "cal muro", propiedad de una empresa michoacana. Tiene sus yacimientos ubicados en Piedras de Lumbre, Municipio de Jungapeo, Michoacán, México. Es una marca ampliamente reconocida dentro de la industria de la construcción.

**3.- Aditivos.** La cantidad de nopal en polvo empleado como aditivo se determinó mediante la elaboración de pastillas para los tiempos de fraguado de la cal con diferentes proporciones (en peso) de nopal, del 1 al 10% (ver fig. 1), con respecto a la cantidad de cal. Una vez realizadas las pastillas se analizó cuales presentaron un mejor comportamiento y se eligió las más estables en cuanto a contracciones y apariencia física, las que presentaron mejor estabilidad fueron las muestras con el 1,3,5 y 9% de adición de nopal en polvo.



Figura 1. Pastillas de cal con adición de nopal para determinar tiempos de fraguado y comportamiento durante su secado.

Una vez determinados estos cuatro porcentajes se elaboraron cubos para determinar el comportamiento mecánico, a 14 días de edad, de los 4 diferentes porcentajes, según los resultados de la tabla 1, se presenta una mayor resistencia mecánica con una adición del 1% de nopal en polvo.

Tabla 1. Resistencia a compresión de cubos con diferentes % de nopal.

Cubos de mortero de cal 1:3, con adición de nopal deshidratado en polvo							
Adición (%)	Peso (gr)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (Kg)	f <sub>c</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> promedios
1	210.98	5.22	5.07	26.47	142.5	5.38	5.35
	219.71	5.4	4.95	26.73	137.5	5.14	
	216.93	5.18	5.02	26.00	143.5	5.52	
3	200.14	5.22	4.98	26.00	103	3.96	4.13
	208.62	5.22	4.97	25.94	90.5	3.49	
	201.17	5.21	4.99	26.00	128.5	4.94	
5	189.61	5.03	4.92	24.75	95.5	3.86	3.16
	197.01	5.11	4.98	25.45	63.5	2.50	
	191.35	5.03	4.97	25.00	78	3.12	
9	171.03	5.07	4.9	24.84	56	2.25	2.27
	180.9	5.34	4.87	26.01	53	2.04	
	175.17	5.06	4.89	24.74	62	2.51	

Para este estudio no se fijó una cantidad de agua sino que se determinó una trabajabilidad adecuada, según la experiencia de albañiles, y se registró la fluidez de la mezcla y la cantidad de agua para que tuviese una trabajabilidad adecuada. Con todo lo anterior se obtuvo una proporción de 1:3 en peso de cal-arena cuarcita, con una adición en peso del 1% de nopal en polvo con respecto a la cal.

**4.- Agua.** El agua para el mezclado del mortero en este trabajo cumple con lo especificado en la norma NMX-C-122. El agua debe almacenarse en depósitos limpios y cubiertos, y ser potable.

## 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 Pruebas realizadas a la arena

Los áridos fueron muestreados en época de estiaje en el río, transportados al Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil. La muestra representativa fue cuarteada hasta tener el tamaño idóneo para las pruebas físicas de caracterización. Todas las pruebas se repitieron por triplicado y los valores indicados en las tablas, son el resultado del promedio de tres cuantificaciones. Las pruebas que se le realizaron a la arena utilizada en este estudio fueron todas las necesarias para determinar la calidad de la misma, según lo establecido en la normatividad vigente.

Tabla 2. Caracterización de la Arena.

Resumen	
Prueba	Resultado
PVSS (gr/cm <sup>3</sup> )	1.24
PVSV (gr/cm <sup>3</sup> )	1.31
Humedad Act. (%)	0.526
Humedad de Abs. (%)	3.95
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	2.41
Pasa N°200 (%)	1.491
% de Terrones	1.623
Equivalente de Arena (%)	94.871
Sedimentación en Arenas	Cantidad de Finos Aceptable

### 4.2 Pruebas realizadas a la cal

Las pruebas que se le hicieron al aglutinante fueron dos, la de consistencia normal y tiempos de fraguado, en las tablas 3 se muestran los resultados de ambas pruebas.

Tabla 3. Consistencia y Tiempos de fraguado de la cal con adiciones de nopal en polvo.

Material	Cantidades (gr)	Consistencia (ml)	Fraguado i. (h)	Fraguado f. (h)	T°c	PH
Cal	200	108	4h 0min	77h 0min	20	14
Cal + 1% N	200	104	18h 55min	117h 10min	22.5	14
	2					
Cal + 3% N	200	114	24h 20min	118h 25min	21	14
	6					
Cal + 5% N	200	124	28h 10min	123h 50min	20	14
	10					
Cal + 9% N	200	144	19h 45min	122h 55min	25	13
	18					

### 4.3 Pruebas realizadas a los ladrillos

Las piezas de arcilla recocidas hechas a mano, coloquialmente se conocen como tabiques, en las Normas se encuentran descritos como ladrillos de arcilla recocida. Al igual que las pruebas hechas a los áridos, las realizadas a los tabiques están normadas y se obtuvieron los siguientes mostrados en la tabla 3, que son un valor promedio de 3 mediciones.

Tabla 4. Resultados de calidad de ladrillos.

Prueba	Resultados
Humedad de absorción en tabiques (%)	35.61
Densidad en tabiques ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	1.83
Gravedad específica	1.36
Eflorescencia de los tabiques	Se presentó eflorescencia ligera
Carga axial en tabiques ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	74.7
Prueba de Flexión en tabiques ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	10.69

### 4.4 Pruebas realizadas al mortero

Las pruebas realizadas a los morteros, tanto testigo como con aditivo, fueron la prueba de fluidez, compresión, flexión y tensión; los resultados se muestran en seguida.

#### 4.4.1 Fluidez en morteros

En esta investigación la fluidez no se consideró como un dato o parámetro fijo para el diseño de la mezcla ya que lo que se buscaba era determinar la fluidez que presenta una mezcla trabajable. En la tabla 4, se muestra cómo se comporta la fluidez en las distintas mezclas realizadas.

Tabla 5. Comportamiento de fluidez en diferentes mezclas.

Fluidez de las mezclas						
Mezcla	Proporción	Agua (l)	Cal (Kg)	Arena (Kg)	Nopal (Kg)	Fluidez (%)
A	1 a 3	10.55	10	30	/	75
B	1 a 3	31	28.5	85.5	/	74
C	1 a 3	38.65	33.33	100	/	74
D	1 a 3	59.7	46.2	138.5	/	83
E	1 a 3 + 1% N	34.55	31	95	0.31	100
F	1 a 3 + 1% N	31.93	28.5	85.5	0.285	89

En esta tabla debemos tomar como valores límite, los valores menores del 70% de fluidez no son trabajables (demasiado seca la mezcla) y los valores superiores al 100% de fluidez tampoco son trabajables, ya que mezcla se vuelve muy líquida.

#### 4.4.2 Comportamiento mecánico del mortero testigo

Las edades de prueba para el mortero testigo fueron de 7, 14, 28 días, ya a que a edades menores es muy difícil determinar la resistencia, debido a la poca resistencia de los morteros de cal en general, además de que a estas tres edades es cuando la cal muestra una tendencia de incremento de resistencia. La elaboración de los cubos para resistencia a la compresión se realizó de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM C109/C109M-02, para el caso de los prismas la norma ASTM C293 y para las briquetas según la norma ASTM C307-99. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resumen de resultados de mortero testigo.

Prueba	Compresión (Mpa)	Módulo de ruptura (Mpa)	Cortante (Mpa)	Tensión (Mpa)
<b>Mortero de cal-arena 1:3</b>				
7 días de edad	0.11	0.104	0.0373	0.05
14 días de edad	0.196	0.275	0.0987	0.085
28 días de edad	0.251	0.297	0.1064	0.109

#### 4.4.3 Comportamiento mecánico del mortero cal-arena con el 1% de nopal en polvo

Debido a que los tiempos de fraguado son más largos en el mortero después de adicionarle el nopal, no se pudo registrar la carga de los cubos a los 7 días (la resistencia fue muy pequeña), por lo que se tuvo que probar a la edad de 14,28 y 35 días para así poder realizar las gráficas comparativas entre ambos morteros.

Tabla 7. Resumen de resultados de mortero con 1% de adición de nopal en polvo.

Prueba	Compresión (Mpa)	Módulo de ruptura (Mpa)	Cortante (Mpa)	Tensión (Mpa)
<b>Mortero de cal-arena con 1% de nopal en polvo</b>				
14 días de edad	0.404	0.253	0.0895	0.057
20 días de edad	0.787	0.365	0.1296	0.08
35 días de edad	0.737	0.295	0.1059	0.108

#### 4.5 Carga axial en pilas de mampostería con mortero cal-arena con el 1% de nopal en polvo

La determinación de carga axial se realizó en quince pilas de mampostería.

La norma correspondiente al cabeceado y prueba de mamposterías a compresión, especifica que las pilas se deben cabecear con yeso en las caras superior e inferior, para la aplicación de la carga, pero debido a la fragilidad de las muestras hechas con el mortero de cal adicionado con nopal en polvo, se utilizó arena para el cabeceado de las muestras, ya que cuando se empleó yeso, muchas de las muestras se fracturaron en el proceso de cabeceado.

En la figura siguiente se ilustra el procedimiento de prueba de las pilas realizadas con mortero cal-arena sílica adicionado con nopal en polvo sin revestir y se muestra el tipo de falla que fue más común en este trabajo.

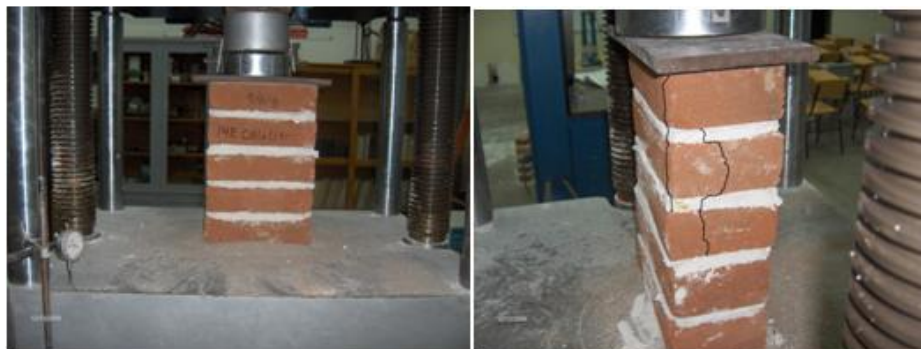


Figura 2. Modo de falla de pilas elaboradas con mortero cal-arena sílica + 1% de nopal en polvo y en peso de la cal.

En el caso de pilas revestidas por ambos lados se aplicó mortero de cal con un espesor de 1.5cm aproximadamente en condiciones de laboratorio, se eligió dicho espesor basándose en la normativa vigente y asesoramiento de albañiles con experiencia en este tipo de trabajos.

El proceso de elaboración y prueba fue el mismo que se utilizó en el caso de las pilas no revestidas, ambos tipos de pilas fueron probados a edades posteriores a los 28 días. En la figura 3 se ilustra la prueba y el tipo de falla más frecuente en este caso.



Figura 3. Prueba y modo de falla más común en las pilas revestidas.

En la Tabla 8 se muestra un concentrado de los resultados las pilas revestidas y sin revestir, en la cual se observa que el revestimiento aumenta en 1.02% la resistencia.

Tabla 8. Resultados de las Pilas de mampostería con mortero de cal-arena con y sin revestimiento.

Elemento	Esfuerzo (MPa)	f*m (MPa)
Pilas de mortero de cal-arena adicionado con 1% de nopal en polvo sin revestir.	1.232	0.896
Pilas de mortero de cal-arena adicionados con 1% de nopal en polvo revestidas.	1.254	0.912



#### 4.6 Carga a tensión diagonal en muretes de mampostería con mortero cal-arena

El procedimiento de elaboración y prueba de los muretes fue el reglamentado por la NTC del distrito federal, en la figura 4, se muestra la prueba de los muretes sin revestimiento; mientras en la figura 5, se muestran el proceso de prueba de los muretes revestidos.



Figura 4. Prueba y modo de falla de muretes sin revestimiento.



Figura 5. Prueba y modo de falla de muretes revestidos.

Al igual que en el caso de las pilas, el revestimiento empleado en los muretes fue de 1.5cm aproximadamente, ya que es el espesor más común y adecuado en la construcción y por consecuencia es el que podemos encontrar o esperar en construcciones tanto nuevas como antiguas. En la tabla 9 se comparan los resultados de resistencia al cortante para ambos tipos de muretes, revestidos y no revestidos.

Tabla 9. Resistencia promedio de muretes con y sin revestimiento.

Elemento	Esfuerzo (MPa)	V*m (MPa)
Muretes de mortero de cal-arena sin revestir	0.082	0.055
Muretes de mortero de cal-arena revestidos	0.093	0.062

Como podemos observar en la tabla anterior se comprueba un incremento en la resistencia al esfuerzo cortante de los muretes en un 1.13% con la presencia del aplanado de 1.5cm de espesor.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación más amplio, en el cual se pretende determinar las características mecánicas de morteros de cal-arena con diferentes adiciones orgánicas, para contemplarlos en la restauración de edificios históricos.

La elaboración de los morteros testigo y con adición de nopal en polvo fue hecha tratando de simular el proceso antiguo o artesanal con que fueron elaborados los morteros empleados en los edificios históricos. Con esto se pretende determinar las características mecánicas tanto del mortero de cal-arena, como del mortero de cal-arena con adiciones orgánicas.

Con base en los resultados obtenidos se determinó que la adición, en peso del cementante (cal), de nopal en polvo incrementa la resistencia solo en un uso menor al 10% del peso del cementante, siendo la cantidad óptima del 1% de nopal en polvo en peso de la cal para morteros con proporción 1:3. Conforme se incrementa la cantidad de nopal en polvo en un mortero se reduce su resistencia mecánica, se incrementa su contracción lineal (siendo estas solo en sentido vertical), se disminuye su peso propio, se incrementa la plasticidad de la mezcla y se incrementan los tiempos de fraguado. En el caso de la fluidez registrada, podemos determinar que ésta se mantiene en un rango de entre 70 y 100%, para presentar la trabajabilidad adecuada en el uso de los morteros, según la forma tradicional de elaboración.

En el caso de las mamposterías, se concluye que el revestimiento mejora el comportamiento mecánico, ayudando a que los elementos (mortero y tabique) trabajen en conjunto. Además de que incrementa la resistencia mecánica a carga axial en un 1.02% y a cortante en un 1.13%.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero del Proyecto CB Conacyt 59999 y de los proyectos CIC-UMSNH 12.4 y 12.5, así como la colaboración de los técnicos de la Sección de Resistencia de Materiales del Laboratorio "Ing. Luis Silva Ruelas" de la FIC-UMSNH.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] [www.ANFACAL.com.mx](http://www.ANFACAL.com.mx) (2009).

[2] ÁLVAREZ PÉREZ, AURELIO., ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN, J. A. BEDOLLA ARROYO (septiembre, 2009). *El tapial y los morteros de cal en las construcciones históricas de Tiripetio (Morelia, México)*. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía Macla nº 11.

[3] [WWW.URG.es](http://WWW.URG.es), 2009.

[4] Mangino Tazzer, Alejandro (1991). La restauración arquitectónica, retrospectiva histórica en México. Editorial Trillas. México.

[5] Askeland, Donald., (2004). La Ciencia E Ingeniería De Los Materiales. Editorial Thomson-México. ISBN: 9706863613 ISBN 13: 9789706863614.