

Formulación de un mortero de inyección con mucílago de nopal para restauración de pintura mural

Nora Ariadna Pérez Castellanos

Asesora científica
Seminario-Taller de Pintura Mural, ECRO

Resumen

Se diseñó un experimento teniendo como variables controladas las proporciones de carga y cementante, así como la proporción de mucílago de nopal y agua. Las variables de respuesta fueron la consistencia, adhesividad, porcentaje de contracción del mortero, potencia requerida de agitación y carga soportada. Los resultados obtenidos mostraron que el mucílago mejora todas estas propiedades físicas del mortero. Se realizó la optimización de la mezcla con el software estadístico Statgraphics 5.1. La proporción de mármol:cal óptima fue de 1.5:1 y la proporción de mucílago:agua fue de 2:1.

Introducción

Como parte de los procesos de restauración que se practican sobre los bienes culturales es necesario en muchas ocasiones hacer consolidaciones que retornen la estabilidad estructural de los mismos. Dicho proceso debe realizarse utilizando

materiales que sean compatibles con el original, durables y resistentes.

Cuando las estructuras que conforman al inmueble presentan deterioros que no son únicamente superficiales, tales como oquedades, grietas y fracturas, es necesario emplear morteros de inyección que aseguren, debido a sus propiedades geológicas, el flujo adecuado del mismo con el fin de que se llenen todos los recovecos que conforman la falla que afecta al elemento estructural.

Estas oquedades o grietas pueden ocurrir por diversos motivos, siendo los más frecuentes la lixiviación de materiales, expansiones térmicas diferenciales, choques o vibraciones, técnicas de factura o diseño deficientes y asentamientos diferenciales que producen tensión en los materiales dejándolos fragmentados.¹

El proceso de consolidación de relleno se utiliza en caso de tener aplanados disgregados e inflexibles que no tienen la capacidad de recuperar su fuerza estructural y su posición original. Es en este tipo de consolidación en que el uso de un mortero de inyección es esencial.

La utilización de un mortero de inyección ocurre cuando los estratos internos del muro han perdido cohesión, generando huecos o grietas que ponen en riesgo la estabilidad del mismo, siendo posible que éstos se colapsen, derrumben o pierdan sus puntos de anclaje. Con el fin de permitir el fácil deslizamiento de las partículas y asegurar el relleno del espacio íntegramente se le agrega al mortero algún fluidificante.

Antecedentes

En México, el mucílago de nopal ha sido utilizado históricamente como aditivo para morteros de cal debido a que previene el rápido secado del mortero, ayudando a la retención necesaria de la humedad que éste requiere para fraguar adecuadamente sin cuartearse.

Debido a la experiencia colectiva transmitida entre los restauradores y el uso tradicional de varios productos vegetales en combinación con la cal en distintas regiones de la República Mexicana, a partir de 1996 la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural del INAH comenzó a emplear con buenos resultados los morteros de cal mezclados con exudados vegetales de plantas locales para la conservación de construcciones en diferentes proyectos.²

Además de su uso en la intervención de bienes culturales, el mucílago de nopal también está siendo estudiado para aplicaciones en la industria cementera obteniendo como beneficios que actúa como:³

- Inhibidor de corrosión
- Agente modificador de viscosidad: se incrementa la viscosidad por lo que el tiempo de fraguado es menor (todavía se está estudiando bajo qué condiciones)
- Reduce deformidad de la pasta pero conserva la fluidez manteniendo la viscosidad.
- Sustituye agua por el mucílago y se estabiliza la mezcla de fluidos, además es un inclusor del aire.

- La resistencia se incrementa en un 16% [curado por cierta cantidad de tiempo ya que hace que la hidratación sea más lenta]
- Retiene agua mayor tiempo [por lo tanto la hidrata por más tiempo] lo que ayuda a la transportación a distancia.

En México se han empleado diferentes ingredientes orgánicos, siendo el mucílago de nopal uno de los más comunes, especialmente en el altiplano central. La baba de nopal se ha empleado en el área de conservación principalmente en el centro y norte de la República. No obstante, en cada lugar se extrae, añade y usa de manera distinta. Las proporciones de agua y penca de nopal varían en cada caso. Muchas veces depende de la experiencia del restaurador o de los trabajadores que han asesorado el procedimiento. A pesar de estas diferencias, todos coinciden en sus buenos resultados como aditivo y en el incremento de las propiedades de los morteros, ya que proporciona una mayor facilidad de manejo y minimiza las grietas en las intervenciones.⁴

Se han estudiado ya los efectos que tiene la adición de diferentes cantidades de este mucílago sobre el comportamiento mecánico de la pasta de cal, estos estudios han sido realizados solamente sobre las propiedades instantáneas de la pasta de cal, como son el estrés máximo y la deformación. Se notó que el mucílago, inclusive a las concentraciones más bajas, interrumpía la red tridimensional formada por el hidróxido de calcio [Ver figura 1] y ocasionaba una disminución en el desempeño de sus propiedades mecánicas en pruebas de esfuerzo-deformación con respecto a un testigo exento del mucílago.⁵

Este efecto, que volvía las pastas de hidróxido de calcio más quebradizas, se veía disminuido, sin embargo, a las concentraciones más altas del mucílago (1. 65% en peso). Los autores atribuyen este comportamiento a que el mucílago puede

formar, a esta concentración, una red tridimensional que se compenetra con la red de hidróxido de calcio mejorando así el comportamiento mecánico de la muestra [Ver figura 1].

Si aumenta la concentración de hidróxido de calcio las propiedades mecánicas aumentan también, debido a la formación de una red homogénea del mucílago dentro de la base de hidróxido, sin sufrir ningún tipo de deformación en su estructura el polisacárido.

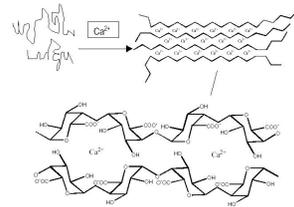


Figura 1. Representación esquemática del modelo “caja de huevos” para la gelificación de pectina de nopal en presencia de iones de calcio.⁶

Planteamiento del problema y justificación

La importancia de añadir mucílago de nopal al mortero radica en la disminución de la cantidad de agua empleada en el mortero para evitar la remanencia de esta en el muro. Puesto que el mortero se inyecta directamente en el muro es difícil la evaporación del agua de la mezcla provocando entre otras cosas, una migración de sales indeseable que puede afectar estratigráficamente al muro.

Existe interés en el desarrollo de diferentes formulaciones para los morteros de cal, especialmente en Europa, debido a las malas experiencias con el cemento. Tomando en cuenta que:

“...el mucílago de nopal ha sido utilizado para la construcción en México desde hace siglos... “⁷ se considera importante el aprovechar la abundancia de esta planta en el país pudiendo obtener de ella una formulación apreciada para la comunidad dedicada al cuidado de los bienes culturales que asimismo produzca una contribución al ámbito de la restauración.

Objetivos

- Estandarizar un método de extracción del mucílago de nopal.
- Determinar la relación cuantitativa entre las propiedades mecánicas del mortero y la cantidad de mucílago empleada.
- Obtener un mortero de inyección óptimo.

Hipótesis

La adición del mucílago de nopal a un mortero inyectable de cal aumenta su fluidez y sus propiedades mecánicas se ven favorecidas por la interacción de la mezcla de estos materiales.

Metodología

Diseño experimental estadístico

El mortero de inyección tiene como cementante cal en pasta escurrido por diez minutos para remover el exceso de agua, polvo de mármol como carga, agua y mucílago de nopal como aditivo. Las variables consideradas para el mortero fueron la relación mucílago: agua en la mezcla, la proporción de carga: cementante, manteniendo la proporción líquido a sólidos en un valor de 1:1.25 en volumen. Para la realización de las mezclas para los experimentos se utilizó un diseño estadístico. Los experimentos se realizaron en orden aleatorio y con las características de cada factor que se muestran como nivel alto (+), medio (0) y bajo (-).

•Factor P [proporción de sólidos]

Nivel alto: proporción de 1:2 de cal y polvo de mármol.

Nivel medio: proporción de 1:1.5 de cal y polvo de mármol.

Nivel bajo: proporción de 1:1 de cal y polvo de mármol.

•Factor M [proporción líquidos]

Nivel alto: proporción de 1:0.5 de mucílago y agua.

Nivel medio: proporción de 1:1 de mucílago y agua.

Nivel bajo: proporción de 0.5:1 de mucílago y agua.

Los resultados de las pruebas mecánicas fueron analizados en el programa de Statgraphics 5. 1, realizándose un modelo de regresión de segundo orden y posteriormente buscando la optimización del mortero para un máximo esfuerzo a la compresión, máximo de adhesividad y máximo de consistencia. Para obtener esta optimización se utilizó la función de optimización simultánea de este mismo software.

Análisis de las propiedades físicas

Las propiedades físicas de los morteros medidas en este estudio han sido seleccionadas de acuerdo a su importancia en el ámbito de la restauración. Estas propiedades se describen a continuación junto con el instrumento o método empleado para medirlas.

•Potencia de agitación: Cada mortero presenta diferente cantidad de sólidos, por lo tanto en el momento de agitar la mezcla se registró la potencia utilizada a tres velocidades distintas (10, 30 y 50 rpm) durante 30 segundos, las velocidades fueron seleccionadas para que no hubiera vórtice en el recipiente. Con el valor de la potencia empleada es posible obtener por medio de correlaciones la viscosidad de la mezcla.

•Consistencia: Puesto que el mortero consta de dos fases (carga-cementante y líquido) es importante saber cuál es su capacidad para fluir, para esto se construyó un consistómetro Bostwick basado en la norma ASTM F1080-93.

•Adhesividad: Debido a las características de los morteros fue necesario desarrollar un método indirecto de medición de esta propiedad. Se utilizó una máquina de pruebas marca Chatillon modelo DPP-25 (fuerza de 0 a 46oz) para la cual se adaptaron placas de yeso de forma rectangular (1.4 X 0.6 cm y 0.8 cm de ancho).

•Densidad: Se midió con su definición de masa sobre volumen, siendo el volumen definido 100 ml en un recipiente medidor calibrado y posteriormente pesado en una balanza con cuatro cifras significativas.

•Esfuerzo: Las probetas de los morteros fueron sometidas a pruebas de compresión con una prensa de medición: Universal Testing Machine modelo UH-1000kNl marca Shimadzu Corporation Japan; perteneciente al departamento de Ingeniería Civil del ITESO.

•Avance del proceso de carbonatación: La fenolftaleína reacciona con un color rojo fuerte al entrar en contacto con los materiales alcalinos y no presenta color en un ambiente neutro o ácido. Puesto que el hidróxido de calcio es básico y el carbonato de calcio es casi neutro, la fenolftaleína puede ser empleada para revisar el progreso de la carbonatación.⁸

•Contracción: Esta propiedad se midió con un pie de rey sobre las probetas ya secas. El valor de la contracción es importante debido a que en el momento de inyectarse el mortero en el muro se adhiere a éste y con el tiempo el mortero se seca y contrae, si este valor es muy alto puede causar esfuerzos dentro del muro que lo perjudiquen y deterioren en vez de consolidarlo.

Resultados

Método de extracción

Una vez realizada la recolección del producto se molió el nopal con una piedra de molcajete de basalto, el procedimiento anterior fue realizado a temperatura ambiente. La molienda se realizó en seco. Los trozos remanentes fueron de aproximadamente 0.5 a 1 cm. La extracción del mucílago se basó en el método 9 tipo 6 (T6) de la referencia 9 con lotes de 75 g de nopal fresco. El lote de nopales con una proporción de 1:7 de peso en agua se calentó a $40 \pm 2^\circ\text{C}$ durante cuatro horas en un termoagitador. Posteriormente se dejó enfriar y se realizó una precipitación del mucílago con alcohol isopropílico al 95%, obteniendo una solución 1:1 (extracto de mucílago:alcohol), al formar el alcohol y el mucílago dos fases, se procedió a una decantación para su separación.

Se obtuvo un rendimiento de 6 ml de solución acuosa de mucílago por gramo de nopal molido. La concentración de la solución acuosa fue de 15°Brix medida con un refractómetro de mano marca ATAGO modelo ATC-1E. La concentración de esta solución fue disminuyendo hasta mantenerse estable en 8°Brix, esta es la concentración que se usó para los morteros.

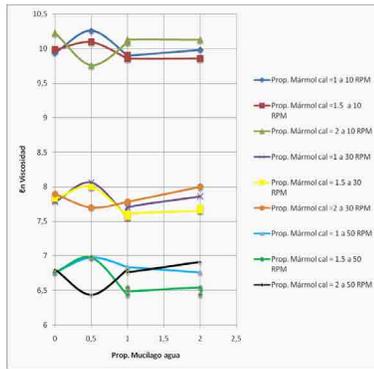
Densidad y calidad de la suspensión

Los resultados de los morteros con agua y mucílago dan un valor promedio de densidad de 1.35g/cc siendo el mismo valor aproximadamente para los morteros que sólo contienen agua. En los morteros con agua no se logró una homogeneidad de la mezcla la cual inmediatamente se separaba en dos fases, mientras que los morteros con mucílago de proporción 1:1 en sólidos tuvieron buena suspensión, los morteros 1:2 se sedimentaban rápidamente los sólidos y los morteros 1:1.5 lograban una buena suspensión de hasta 45 min.

El análisis estadístico ANOVA con $\alpha=0.05$ indicó que ninguno de los factores evaluados o sus interacciones afectan significativamente el valor de la densidad.

Potencia de agitación

Los valores obtenidos de viscosidad para los morteros con agua y con mucílago no cambian significativamente, por lo tanto relacionando los datos anteriores con la capacidad del mucílago de mantener la mezcla homogénea se puede inferir que la atribución dada por los restauradores al mucílago como fluidificante no influye en la disminución del valor de la viscosidad sino que posee la propiedad de mantener suspendidas las partículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



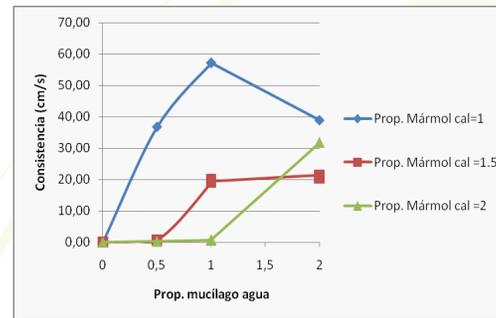
Gráfica 1. Ln Viscosidad vs proporción mucílago:agua

Consistencia

Los morteros que contienen sólo agua presentaron una tendencia muy grande a fluir, sin embargo esta propiedad es sólo del agua puesto que los sólidos no están suspendidos y lo reflejado en la prueba es la fluidez del agua. En la gráfica 2 se observa que los morteros cuya proporción de mármol:cal es de uno fluyen mejor, en especial

si su proporción de líquidos es de uno también, sin embargo, su tendencia a fluir se ve afectada por la cantidad de líquidos añadida debido a que a altas concentraciones de mucílago disminuye su fluidez. En cambio la proporción de mármol:cal de uno punto cinco a partir de una proporción de líquidos de uno es muy estable, pudiendo este comportamiento ser benéfico en la práctica en dado caso que no se tengan los instrumentos necesarios para medir las proporciones.

Al realizar la prueba de ANOVA con un valor de $\alpha=0.05$ se obtiene que el factor más significativo es la proporción de mucílago:agua.

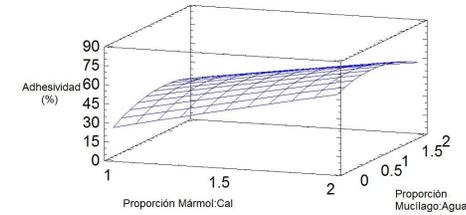


Gráfica 2. Consistencia vs proporción mucílago:agua

Adhesividad

Los morteros que presentan mayor adhesividad son los morteros que poseen una proporción alta de sólidos, mientras que las características de adhesividad de los morteros con agua coinciden con los morteros que tienen la menor cantidad de mucílago.

De acuerdo al análisis ANOVA tanto el factor de proporción de mármol:cal como el de mucílago:agua afectan a esta propiedad, teniendo un máximo de adhesividad con un nivel alto de ambos factores (Ver gráfica 3).



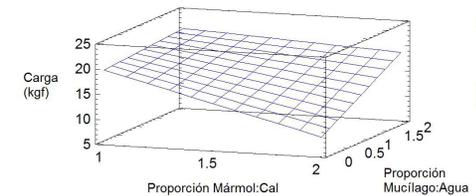
Gráfica 3. Superficie de respuesta de la adhesividad de los morteros

Proceso de carbonatación y porcentaje de contracción

Después de nueve semanas de haber fraguado los morteros el proceso de carbonatación no se había iniciado aún y todos los morteros con mucílago tuvieron poca contracción, estos valores estuvieron entre nula contracción y 0.2 cm de contracción; mientras que los morteros con agua tuvieron hasta 5 mm de contracción indicando que el aditivo mejora esta propiedad.

Esfuerzo a la compresión

El mortero con mayor capacidad de carga es el que tiene una proporción de mucílago alta y una proporción intermedia de sólidos mientras que los morteros con agua no tienen una capacidad



Gráfica 4. Superficie de respuesta de carga soportada.

de carga significativa. Con el análisis estadístico se comprobó que los dos factores evaluados y su interacción son relevantes para esta propiedad siendo el factor que influye más la proporción de sólidos; sin embargo de acuerdo a la gráfica 4 es necesario tener el nivel alto de mucílago para tener un resultado favorable.

Optimización de la mezcla

El mortero óptimo es el que tiene una proporción de mármol:cal de 1.5 y de mucílago:agua de 2.0, por su buena suspensión de sólidos, fluidez aceptable para la inyección, adhesividad alta y un esfuerzo a la compresión alto; esta mezcla representa un mortero de cal y mármol óptimo para la consolidación de la pintura mural por el método de inyección.

Conclusiones

El realizar un análisis para identificar las proporciones en las que debe de ser preparado el mortero constituye un avance en el desarrollo de las técnicas de conservación, puesto que se obtuvo una formulación estándar del mortero de inyección de cal para el uso de los restauradores. De acuerdo a las pruebas realizadas podemos confirmar que el mucílago de nopal mejora las propiedades físicas del mortero de cal con carga de marmolina, sin embargo cada propiedad se ve afectada de manera diferente por este aditivo siendo también un factor importante la proporción de sólidos en la mezcla.

Se recomienda el uso del mucílago para morteros de inyección debido a que facilita su aplicación y restablece de manera efectiva la estabilidad del muro. Sin embargo se deben realizar más estudios para poder determinar la influencia del mortero dentro del muro en probetas que simulen el muro, y realizar un registro de diversas etapas durante varios años para comprobar la

estabilidad del muro; estos estudios se han realizado previamente por Elisa Serrano¹⁰ sin embargo el método de extracción del mucílago, así como la carga difieren de los seleccionados para esta investigación, asimismo se debe de tomar en cuenta los diversos climas de la República Mexicana para realizar estos estudios de monitoreo, debido a que los niveles de humedad son variados y constituyen una posible causa de deterioro del muro, especialmente si existen grietas.

Bibliografía

Conferencia: Uso del extracto del nopal en materiales basados en cemento, Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y Carlos Gómez Yánez, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, IPN- Unidad Oaxaca.

Cárdenas, A., Arguelles, W. M. and Goycoolea, F. M. (1998). On the possible role of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings. *J. PACD*, 3: 64-71.

Goycoolea, M., Cárdenas, A., Propiedades Gelificantes de la Pectina de Nopal, XXV Premio Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos 2001, auspiciado por la Industria Mexicana de Coca Cola y el CONACYT.

Jáidar Benavides, Yareli, "Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación. Tesis de Licenciatura", p. 105, Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", México, 2006.

Sepúlveda, E. Sáenz, C. Aliaga E. et al (2007) Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid environments*, 68:534-545.

Serrano, E. Un mortero de inyección de productos naturales para la conservación de pinturas murales, Centro Nacional de Conservación, Restauración y Museología, Cuba.

Teutonico, J. Ma., "A Laboratory Manual for Architectural Conservators", ICCROM Roma, 1988.

Notas

1 Comunicación Oral. Lic. Rest. Mauricio Benjamín Jiménez Ramírez. Feb. 2007.

2 Jáidar Benavides, Yareli, "Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación", p. 105.

3 Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Conferencia: Uso del extracto del nopal en materiales basados en cemento.

4 Jáidar Benavides, Yareli. op. cit. pp. 106-108.

5 Cárdenas, A., Arguelles, W. M. and Goycoolea, F. M., "On the possible role of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings". p. 65.

6 Goycoolea, M., Cárdenas, A., "Propiedades Gelificantes de la Pectina de Nopal".

7 Cárdenas, A., Arguelles, W. M. op. cit., pp. 64-71.

8 Teutonico, J. Ma., "A Laboratory Manual for Architectural Conservators", p.30.

9 Sepúlveda, E. Sáenz, C. Aliaga E. et al, "Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp.", p.538.

10 Serrano, E. "Un mortero de inyección de productos naturales para la conservación de pinturas murales", p.152.