

OPTIMIZACIÓN DE PASTAS Y MORTEROS DE CAL EMPLEANDO MUCÍLAGO DE NOPAL COMO AGENTE DE HIDRATACIÓN DE CaO

OPTIMIZATION OF LIME PUTTIES AND LIME MORTARS USING NOPAL MUCILAGE AS HYDRATING AGENT OF CaO

Angélica Pérez Ramos^a, Luis Fernando Guerrero Baca^b y José Luz González Chávez^c

^aComunidad Universitaria Golfo Centro A. C., Blvd. del Niño Poblano No. 2901, Colonia Reserva Territorial Atlixcáyotl, CP. 72820. San Andrés Cholula, Pue. angelica.perez2@iberopuebla.mx

^bUniversidad Autónoma Metropolitana, Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Delegación Coyoacán, C. P. 04960. Ciudad de México. luisfg1960@yahoo.es

^cUniversidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510 Ciudad de México, CDMX. jose luz@unam.mx

How to cite: Angélica Pérez Ramos, Luis Fernando Guerrero Baca y José Luz González Chávez. 2022. Optimización de pastas y morteros de cal empleando mucílago de nopal como agente de hidratación de CaO. En libro de actas: II Simposio de Patrimonio Cultural ICOMOS España. Cartagena, 17 - 19 de noviembre de 2022. <https://doi.org/10.4995/icomos2022.2022.14878>

Resumen

Considerada como el material base desde épocas muy remotas en la historia de la construcción, la cal aérea apagada ha sido producida de manera tradicional en México desde tiempos prehispánicos. Este tipo de producción tradicional constituye un patrimonio intangible que actualmente está en riesgo de pérdida debido a los altos costos que requiere su producción en obra, especialmente durante la fase de hidratación de Óxido de Calcio o cal viva, debido a que implica un periodo de reposo de la cal bajo su medio de hidratación por varios meses para adquirir las propiedades mecánicas y reológicas deseables, según lo señala la normativa mexicana. Se ha desarrollado una investigación multidisciplinaria de fases de experimentación fisicoquímica, mecánica y reológica con el objetivo de rescatar la producción tradicional, así como reducir el tiempo de reposo de la cal hidratada, que concluyó en el hallazgo de una sustancia clave contenida en el mucílago de nopal. La sustancia hallada mejora las características reológicas y mecánicas, pero, además, parece funcionar como catalizador en el proceso de reposo debido a una modificación en la composición cristalográfica de la cal hidratada, además, mejora la disponibilidad a la carbonatación, el comportamiento ante la absorción capilar, así como el comportamiento mecánico y reológico de los morteros que se preparan con esta nueva pasta de cal. Este comportamiento fue documentado a partir de caracterización y comparación entre morteros testigo y morteros con la pasta de cal mejorada, así como de la propia cal, a través de análisis con Difractómetro de rayos X (DRX), Microscopía electrónica de barrido (SEM), la adaptación de pruebas normadas para morteros de cemento y la propuesta de otras. La investigación ha generado nuevas teorías que abren la puerta a profundizar en la experimentación con otras variables.

Palabras clave: cal apagada, morteros de cal, mucílago de nopal, ácido galacturónico, propiedades mecánicas, propiedades reológicas.

Abstract

Considered the base material of millenary building systems in Mexico, hydrated lime has been traditionally produced since pre-Hispanic times. This implies intangible heritage that is currently at risk of being lost due to the high costs involved in its manufacture, especially during its hydration stage, which involves a resting time of several months before it develops the mechanical and rheological properties that make it useful in construction and works of restoration. Multidisciplinary research was carried out to reduce the cost of manufacturing and to revitalize an ancient technique. It involved several experimental phases of

physicochemical, architectural and constructive analysis that resulted in the discovery of a key substance contained in the nopal mucilage. This substance not only enabled a good chemical interaction with lime, but also managed to function as a catalyst in the hydration and aging process of lime putties from its crystallographic modification. Moreover, it had a significant impact on the optimization of the mechanical and rheological properties of the mortars prepared with them, as well as on their behavior during the carbonation process and their ability to absorb moisture. The results that allowed to conclude this optimization were obtained from the characterization and comparison of the behavior of the new lime putties and the mortars prepared with them through analysis in SEM, XRD, as well as the adaptation of some established methods of analysis and many others proposed in the research for this binder and its by-products. The theories produced from this research open the door to new lines of exploration that involve further research about the interference that mortar dosage has.

Keywords: *hydrated lime, lime mortars, nopal mucilage, galacturonic acid, mechanical properties, rheological properties.*

1. Introducción

Como es ampliamente conocido que la cal aérea hidratada es el material presente en la mayoría de los sistemas constructivos en los inmuebles históricos de México, se pondera su uso en las intervenciones encaminadas a la conservación de éstos, porque con ello se asegura la compatibilidad entre fábricas existentes y nuevas, sin embargo, el uso de la cal resulta cada vez menos atractivo debido a la dificultad que representa encontrar mano de obra calificada para trabajarla y la larga demora para obtener el producto (Prado, 2000) (Bedolla, 2010), lo que desencadena en un impacto financiero negativo para el constructor. La producción de la pasta de cal para que esté lista para ser usada, requiere de un periodo de reposo bajo su medio de hidratación de varios meses, según lo que indican las recomendaciones del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) de México. De acuerdo con una vasta variedad de investigaciones, se han podido explicar las mejoras que adquieren las propiedades de la pasta de cal gracias al paso del tiempo protegidas por el medio de hidratación con el que se produjeron. Se ha comprobado que, durante el proceso de transformación de óxido de calcio a hidróxido de calcio, cuando se agrega agua como medio de hidratación, los cristales del hidróxido de calcio sufren transformaciones morfológicas más favorables conforme avanza el tiempo, debido a que la plasticidad de la pasta depende de la cantidad de cristales con patrones laminares de tamaño nanométrico y éstos pueden absorber mayores cantidades de agua que permiten que la pasta tenga mejor trabajabilidad y plasticidad.

Para explicar lo anterior, es importante aclarar que la cal aérea en sus diferentes fases (carbonato de calcio, óxido de calcio e hidróxido de calcio) presenta estructuras cristalinas singulares, de manera que el hidróxido de calcio tiene una morfología hexagonal prismática, misma que en su proceso de hidratación y reposo o añejamiento en agua, sufre una transformación morfológica hacia patrones planos disminuidos en tamaño y con un área superficial mayor. Es por esto que, al incrementar el tiempo de hidratación se consigue un mejor comportamiento mecánico de los morteros. Se ha demostrado también, a través de estudios de difracción de rayos x, microscopio electrónico de transmisión, microscopio electrónico de barrido, velocidad de propagación ultrasónica y fenolftaleína en pastas de cal añejas con periodos de hidratación de 0-1 y 14 años de envejecimiento, que existe un incremento en la velocidad de carbonatación de los morteros, producto de pastas de cal aérea en periodos largos de añejamiento o hidratación (Rodríguez, Ruiz, et al., 2017).

Históricamente, a los productos de cal, en especial a los morteros, se les han añadido algunos otros productos, sobre todo, de origen orgánico como el mucilago de nopal para mejorar su trabajabilidad (Barba y Villaseñor, 2013). Por lo general, estas adiciones se realizan en el momento de la preparación de las mezclas, es decir, durante la fase de mezclado, cuando ya se ha producido la pasta de cal y se va a combinar con un árido y con agua para producir el mortero.

Al retomar el método de producción maya, que involucra gomas de cortezas de árboles en el apagado de cal y que ha significado una mejora notable en las propiedades de la pasta de cal (Barba y Villaseñor, 2013), se propuso la hipótesis de que el proceso de apagado de cal asistido por algún aditivo similar durante el proceso de hidratación, podría conseguir mejores resultados en las propiedades de la pasta durante su periodo de añejamiento, reduciendo incluso su duración si se

compara con la producción de pasta cuando se emplea agua únicamente como agente de hidratación (Pérez, Guerrero, et., al., 2021).

2. Desarrollo

De acuerdo con el propósito trazado a partir de la hipótesis inicial, se desarrolló una investigación cuyo objetivo principal es optimizar las propiedades de pastas de cal hidratada y morteros que las contienen como conglomerante. Esta investigación propuso el empleo del mucílago de nopal como agente de hidratación de cal, independientemente de su uso como aditivo en el momento de la fase de mezclado de morteros (Pérez, Guerrero, et., al., 2021).

Para llegar al resultado hubo que realizar tres fases experimentales. La primera de ellas consistió en determinar el método de extracción del mucílago de nopal de mayor rendimiento en volumen de producción, así como en establecer el contenido químico que favoreciera la formación de complejos químicos en contacto con la cal viva para la formación del hidróxido de calcio (Pérez, Guerrero, et., al., 2021). La segunda fase experimental consistió en la producción de pasta de cal apagada empleando al mucílago de nopal como agente de hidratación. La última fase experimental consistió en la fabricación y tratamiento de las diferentes probetas para poder caracterizar y comparar el comportamiento de los morteros fabricados con las diferentes pastas de cal producidas, así como con el mucílago de nopal como aditivo empleado durante la fase de mezclado (Pérez, Guerrero, et., al., 2021).

2.1. Materiales

Posterior a la investigación fisicoquímica que permitió seleccionar al mucílago de nopal que se produjo a partir del método de extracción por maceración que incluye variables como la elevación de la temperatura a 90 °C y la agitación constante durante 30 minutos, se profundizó además, en la investigación del comportamiento químico del mucílago en contacto con el calcio (potencial Z, titulaciones ácido-base y redox) y se pudo identificar al ácido galacturónico presente en las pectinas del mucílago de nopal, como la sustancia responsable de la mejor interacción a través de la formación de complejos químicos entre la cal y el nopal. Los medios de hidratación de cal viva (CaO) experimentados, consistieron en soluciones de agua con mucílago de nopal en concentraciones del 20, 60 y 100 %, mientras que se conservó a la solución de agua al 100 % para el método de hidratación tradicional considerado como el parámetro o testigo para realizar la caracterización y contra el que se realizó la comparación de comportamiento de pastas y morteros (Fig. 1).



Fig. 1 Mucílago de nopal como agente hidratante en concentraciones del 20, 60, 100 y 0%

La cal aérea viva que sería hidratada se utilizó en terrones de granulometría de máximo $\frac{3}{4}$ " y la proporción empleada para la producción del hidróxido de calcio fue de 1:2.2 en masa (cal viva respecto al medio de hidratación). Las pastas de cal resultantes de la hidratación de óxido de calcio en las distintas soluciones de mucílago de nopal, fueron las empleadas en la formulación de los morteros caracterizados (Fig. 2).



Fig. 2 Proceso de hidratación de óxido de calcio para la producción de hidróxido de calcio o cal hidratada en pasta empleando mucílago de nopal como agente hidratante en concentraciones del 20, 60 y 100 %

El agregado que se empleó en la formulación de los morteros fue arena de banco de granulometría fina cernida por la malla de 4.75 mm para los morteros de pega y de recubrimiento grueso, así como de 2 mm para los acabados finos. Después de varias pruebas preliminares de comportamiento reológico (consistencia), se determinó emplear la dosificación 1:3 (conglomerante en relación al agregado fino) en la fabricación de los morteros.

2.2. Métodos

La morfología cristalina y la composición química de pastas y morteros se evaluó mediante difractor de rayos X (Bruker D8) y microscopio electrónico de barrido (SEM 7800) a los 28 y a los 400 días de añejamiento posterior al proceso de apagado, mientras que, los distintos morteros fabricados se caracterizaron con base en sus propiedades mecánicas y reológicas, agrietamiento, disponibilidad a la carbonatación y absorción capilar. Los morteros fueron fabricados durante dos periodos, en torno al tiempo de envejecimiento de la cal apagada empleada como conglomerante para ellos, a los 28 y a los 183 días de añejada. Cada probeta de mortero fue analizada a los 45, 100 y 200 días de edad. En este punto es importante señalar que algunas técnicas de análisis fueron diseñadas específicamente para esta investigación, tal es el caso de las probetas realizadas a manera de torres de tres ladrillos apilados y unidos con el mortero para caracterizar la capacidad adherente con el uso de una prensa manual digital modelo E657-2, toda vez que en México no existe un marco normativo que regule su fabricación y aplicación. Además, se consideró relevante, aplicar algunas técnicas basadas en la normativa para mezclas de cemento como punto de partida, por ejemplo, se fabricaron probetas cúbicas de 0.000125 m^3 para caracterizar su resistencia a la compresión empleando una prensa manual digital modelo E657-2, así como para caracterizar su respuesta ante la carbonatación mediante la aplicación de fenoltaleína, respecto a su comportamiento ante la absorción de humedad por capilaridad. Este proceso se realizó tomando como base inicial la norma italiana NORMAL 11/85 que implica comparar masa en seco contra masa en húmedo, así como velocidad de secado de probetas cúbicas. La consistencia en mortero fresco se valoró mediante el cono de Abrams, se fabricaron especímenes rectangulares de 2.5 cm de espesor en muros para probar el control del agrietamiento y pastillas para someter a observación las fases en las pastas de cal en el difractor de rayos X (Fig. 3) (Pérez, Guerrero, et., al., 2021).



Fig. 3 Proceso de preparación de probetas de pasta de cal hidratada en mucílago de nopal en concentraciones del 0% (en H₂O)

3. Resultados y discusión

Respecto a la morfología cristalina de las pastas que fue observada en el microscopio electrónico de barrido resultó evidente una mayor presencia de patrones laminares de tamaño nanométrico en las pastas de la cal que fue hidratada usando mucílago de nopal, sobre todo en la mayor concentración, al 100 %, en comparación con las observaciones que corresponden a las pastas que fueron hidratadas en agua y con el mismo tiempo de añejamiento (Fig. 4 y 5), situación que permite concluir que los complejos químicos formados entre el ácido galacturónico y la cal favorecen la aceleración de la fase de nucleación y el aumento en el área superficial de las pastas, mejorando su consistencia y trabajabilidad.

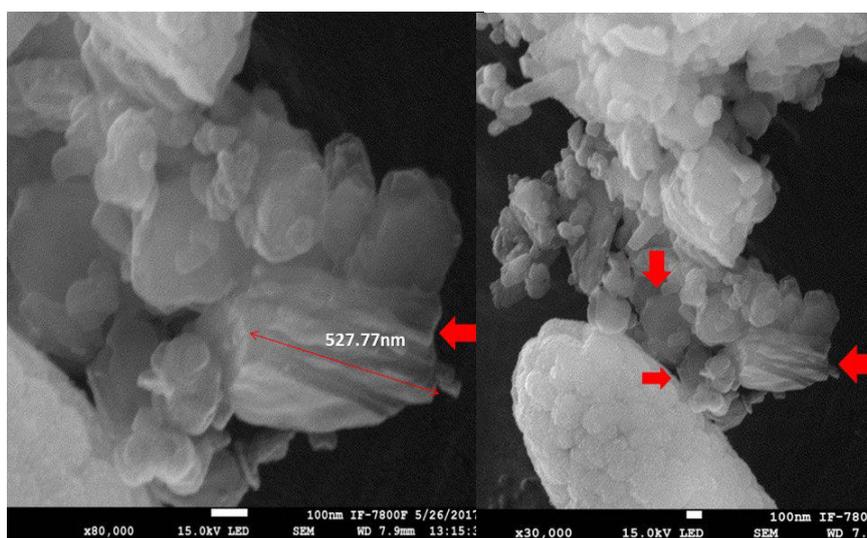


Fig. 4 Patrones cristalográficos en pastas de cal hidratada en agua a los 110 días de edad de reposo observadas en SEM 7800

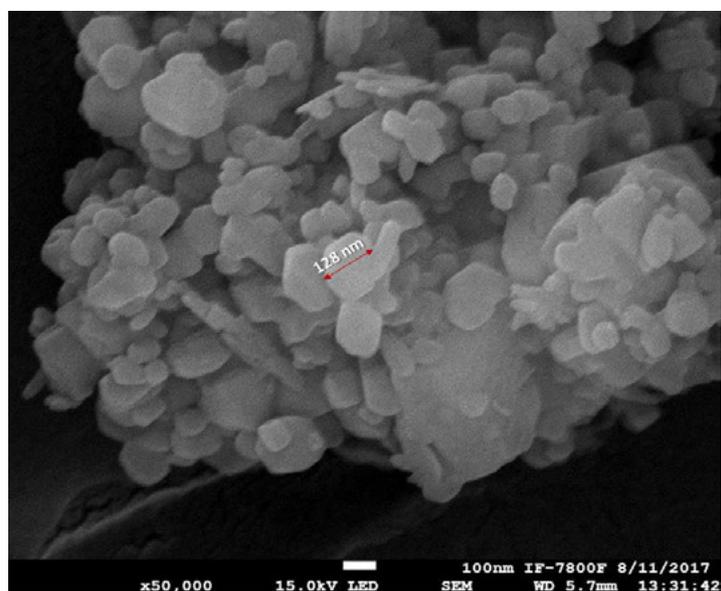


Fig. 5 Patrones laminares de tamaño nanométrico de cristales de pasta de cal hidratada en mucílago de nopal al 100 % de concentración a los 110 días de envejecimiento, observadas en SEM 7800

El comportamiento mecánico de los morteros se caracterizó con base en su resistencia a la compresión, su capacidad adherente y el agrietamiento en su función como recubrimiento. Los morteros que presentaron mayor resistencia a la compresión en la primera fase del ensayo, la cual se realizó a los 45, 100 y 200 días de edad de las probetas (empleando

pasta de cal apagada con 28 días de añejamiento), fueron aquellos que contenían cal apagada en mucílago de nopal en todas sus concentraciones (15 % promedio más resistente sobre los morteros que contienen mucílago solo como aditivo y sobre el mortero testigo). Para la segunda fase del ensayo, realizada a los 100 y 200 días de edad de las probetas (empleando pasta de cal apagada con 183 días de añejamiento), la mayor resistencia a la compresión la reflejaron primero, los morteros que contenían cal apagada en solución de mucílago de nopal en todas sus concentraciones (50 % promedio mayor resistencia sobre el mortero testigo), después, aquellos que tenían mucílago de nopal como aditivo al momento de la fase de mezclado y la menor resistencia se obtuvo de los morteros que no contienen mucílago de nopal en ninguna de sus fases. Las pruebas diseñadas para medir la capacidad adherente del mortero, en la primera fase de probetas ensayadas a los 45, 100 y 200 días de edad (empleando pasta de cal apagada con 28 días de añejamiento), reflejaron el mejor comportamiento (43 % mayor capacidad adherente en comparación con el mortero testigo) para los morteros que contienen pasta de cal apagada en solución de mucílago de nopal en las diferentes concentraciones empleadas (20 %, 60 % y 100 %), resultado coherente con la mejor capacidad adherente reflejada por los morteros que contienen mucílago de nopal en su cal y como aditivo durante su mezclado, en la segunda fase de prueba, para los morteros probados a los 100 y 200 días (empleando pasta de cal apagada con 183 días de añejamiento) (Fig. 6a y 6b), comportamiento deseable dentro de los parámetros de este tipo de morteros para lo que refiere al trabajo estructural de los sistemas constructivos en los que se emplea. La trabajabilidad de los morteros frescos fue medida en el cono de Abrams y resultó 2 veces mayor en aquellos morteros que fueron fabricados con pastas hidratadas en mucílago de nopal, seguidos de aquellos que emplearon el mucílago de nopal como aditivo de los morteros al momento de la mezcla y una menor plasticidad para los que carecen del mucílago. Dado que se evidencia un mejor comportamiento reológico y mecánico en los morteros que contienen pasta de cal hidratada con mucílago de nopal y debido a que se identificó una optimización en la trabajabilidad de las pastas fundamentada en las observaciones realizadas a los patrones cristalográficos, podría entenderse que la aceleración en la transformación de la morfología cristalina de las pastas no solo tiene impacto en su reología sino además y de manera significativa, en sus propiedades mecánicas y esto se ha reflejado en la caracterización de sus morteros.



Fig. 6 a) Probeta cúbica sometida a compresión para medir su resistencia al aplastamiento y comparar el comportamiento entre los morteros preparados a partir de las distintas pastas de cal producidas y los diferentes roles del mucílago de nopal. b) Probeta propuesta en un tercio de ladrillos en posición vertical sometida a fuerza de compresión para determinar la resistencia que ofrece el mortero de unión en su papel adhesivo entre unidades mampostería. Ambas pruebas se llevan a cabo en una máquina universal de pruebas tipo prensa manual digital modelo E657-2 con alcance de medición de 120 toneladas

La disponibilidad a la carbonatación de los morteros fue determinada a partir de la medición de pH con fenolftaleína aplicada directamente sobre las probetas a la edad de 200 días, la cual reflejó una mejor carbonatación (70 % de carbonatación en comparación con 30 % del mortero control) para la sección media de las probetas (que tienen una exposición menor al CO₂ del aire), en los morteros fabricados con pasta de cal apagada en mucílago de nopal en sus distintas concentraciones (con pasta de cal de 28 y de 183 días de añejamiento), seguidos de aquellos morteros en los que se empleó mucílago como aditivo durante la formulación de la mezcla (Fig. 7a,7b y 7c). El proceso de carbonatación de los morteros de cal suele ser un proceso largo y muy lento en comparación con las mezclas de cemento, lo que es favorable dado que la pérdida de la humedad al ser lenta, disminuye el agrietamiento de los recubrimientos. Sin embargo, de acuerdo con los resultados de las probetas rectangulares para medir la cantidad de grietas y fisuras, existe una notable disminución de éstas en los morteros (de 45, 100 y 200 días de edad) cuya cal ha sido hidratada en mucílago de nopal (tanto de 28 como de 183 días de añejamiento) comparada contra aquellos que han usado al mucílago solo como aditivo y mucho más evidente ha sido esta mejoría en comparación con el mortero testigo, el cual presentó la mayor cantidad de grietas. Afortunadamente, esta disminución en el agrietamiento al parecer no está condicionada por la excelente respuesta que los mismos morteros tienen ante un bajo índice de absorción capilar y un menor tiempo de secado como se demuestra a continuación.

La evaluación de la absorción capilar de los morteros, se realizó tomando como base inicial la norma italiana NORMAL 11/85, arrojando resultados evidentes que demuestran que las probetas de mortero que contienen cal apagada en solución de mucílago de nopal fueron las que reflejaron una saturación de humedad menor y un menor tiempo de secado (50 % más rápido), en comparación con aquellas que contienen mucílago de nopal como aditivo y con las que no contienen mucílago de nopal en ninguna fase de su composición (Fig. 8a y 8b).



Fig. 7 a) y b) Probetas cúbicas, secciones internas coloreadas en rosa de tono intenso ante la aplicación de fenolftaleína que indica ausencia de carbonatación. c) sección interna de color en rosa de tonalidad más clara que indica carbonatación parcial (60 a 70 %).

(Pérez, Guerrero, et., al., 2021)



Fig. 8 a) Probetas cúbicas de morteros de cal sometidas a prueba de absorción capilar en donde se distinguen diferentes saturaciones. b) Control de masas en seco y húmedo de las probetas en la misma prueba de absorción capital

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que las técnicas prehispánicas de producción de cal apagada, principalmente las mayas, tienen ahora un fundamento científico que permite comprobar que se producen pastas de mejor calidad cuando se emplea un aditivo orgánico con capacidad de formación de complejos químicos durante la fase de producción de hidróxido de calcio. Los complejos químicos que se identificaron en la investigación fueron favorecidos por el ácido galacturónico mayoritariamente presente en las pectinas del mucílago de nopal, lo que lo posiciona como la sustancia de mayor injerencia en la optimización de las propiedades del hidróxido de calcio durante la etapa de hidratación y reposo o añejamiento. La optimización conlleva una aceleración en el proceso de nucleación y migración hacia fases químicas más estables que se reflejan en la presencia de patrones cristalográficos laminares en un menor periodo de tiempo respecto a las pastas que han sido hidratadas en agua únicamente. Adicionalmente, pudo demostrarse que el mucílago de nopal realmente produce una optimización en los morteros de cal que lo incorporan como aditivo, en comparación con los morteros que no lo contienen, sin embargo, la mejoría se limita al comportamiento reológico y es notablemente inferior a la injerencia del mucílago de nopal en su rol como hidratante del conglomerante. La producción acelerada de cal hidratada con propiedades optimizadas que, a su vez, confieren un mejor comportamiento mecánico y reológico a los morteros que se fabrican con ella, abre la posibilidad de un reposicionamiento entre los materiales conglomerantes tradicionales disponibles para la intervención de estructuras edilicias históricas debido a que la aceleración en la obtención de las propiedades mejoradas, disminuye el impacto financiero negativo provocado por la larga espera durante el proceso de reposo o añejamiento de la pasta de cal bajo su medio de hidratación, al reducir a cero el número de meses del periodo de tiempo de espera para la obtención de las propiedades de la pasta, que originalmente se consiguen tras un periodo prolongado que supera al mes de añejamiento.

Referencias

- Barba Pingarrón, Luis e Isabel Villaseñor Alonso (eds.) (2013). *La cal. Historia, propiedades y usos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Bedolla, Juan Alberto (2010). *Caracterización física mecánica de los morteros de cal apagada, propuesta de morteros según su uso y función ante los agentes comunes de deterioro*. Tesis de doctorado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Prado Núñez, Ricardo (2000). *Procedimientos de restauración de materiales; protección y conservación de edificios artísticos e históricos*. México: Trillas, 2000.
- Pérez Ramos, Angélica, Guerrero Baca Luis F., González Chávez José L., Sánchez Espinosa Miguel A., Chiken Soriano Anahí (2021). *Optimization of Hydrated Lime Putties and Lime Mortars using Nopal Pectin for Conservation of Cultural Heritage, Structural Studies and Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XVII*, Vol. 203, STREMAH 2021, Wit Press, ISSN: 1746-4498, UK., 101-111.
- Rodríguez Navarro, Carlos, Encarnación Ruiz-Agudo, Alejandro Burgos-Cara, Kerstin Elert y Eric Hansen (2017). *Crystallization and Colloidal Stabilization of Ca(OH)₂ in the Presence of Nopal Juice (Opuntia ficus indica): Implications in Architectural Heritage Conservation*, *Langmuir* 33, no. 41 (20 de septiembre de 2017): 10936-10950.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2020). “El nopal, parte de la riqueza del campo mexicano”, 2020. México, Acceso el 18 de febrero de 2022, recuperado de: El nopal, parte de la riqueza del campo mexicano | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)