

## Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural

### *Concrete durability properties and microstructural analysis of cement pastes with nopal cactus mucilage as a natural additive*

S. Ramírez-Arellanes<sup>(\*)</sup>, P. F. de J. Cano-Barrita<sup>(\*)</sup>, F. Julián-Caballero<sup>(\*)</sup>, C. Gómez-Yáñez<sup>(\*\*)</sup>

Recepción/Received: 11-I-11

Aceptación/Accepted: 16-I-12

Publicado online/Online publishing: 12-IV-12

#### RESUMEN

En esta investigación se evaluó el efecto de una solución de mucílago de nopal al 3% en los tiempos de fraguado, fluidez, hidratación y microestructura de pastas de cemento y absorción capilar de agua y difusión de cloruros en hormigón. La hidratación fue caracterizada por XRD y la microestructura por medio de SEM. Las relaciones solución de mucílago/cemento y agua/cemento fueron 0,30, 0,45 y 0,60. Los resultados en las pastas de cemento indican que el mucílago retarda los tiempos de fraguado, reduce la fluidez, retarda la hidratación del cemento e inhibe la formación de cristales de hidróxido de calcio, comparados con los controles. La absorción capilar en hormigón contenido mucílago se redujo significativamente y los coeficientes de difusión de cloruros disminuyeron hasta un 20% en la mezcla mucílago/cemento = 0,30. En la relación mucílago/cemento = 0,45, la reducción fue marginal, y en la relación mucílago/cemento = 0,60, el coeficiente de difusión fue mayor que el control para los especímenes sin curado en húmedo.

**Palabras clave:** aditivo orgánico, pasta de cemento, productos de hidratación, difusión, difracción de rayos X.

#### SUMMARY

The present study evaluated the addition of a 3% nopal cactus mucilage solution to cement pastes, in its effects on setting times, flow, hydration, and microstructure, as well as on capillary water absorption and chloride diffusion in concrete. Hydration was characterized through XRD and microstructure was characterized with SEM. The mucilage solution/cement and water/cement ratios tested were 0.30, 0.45, and 0.60. The results in cement pastes indicate that the addition of mucilage increases setting times, reduces flow, slows cement hydration, and inhibits the formation of calcium hydroxide crystals in comparison with the control. Capillary absorption was significantly reduced in concrete containing mucilage, and chloride diffusion coefficients dropped up to 20% in the mixture with a mucilage/cement ratio = 0.30. The mixture with a mucilage/cement ratio = 0.45 displayed marginal reduction, and the mixture with mucilage/cement ratio = 0.60 exhibited a diffusion coefficient that was greater than the control for the specimens without moist curing.

**Keywords:** organic admixture, cement paste, hydration products, diffusion, X ray diffraction.

<sup>(\*)</sup> Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca (Oaxaca, México).

<sup>(\*\*)</sup> Instituto Politécnico Nacional, ESIQIE (México D. F., México).

Persona de contacto/Corresponding author: pcano@ipn.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de durabilidad en estructuras de hormigón redundan en un impacto económico significativo. Por citar algunos ejemplos, en Estados Unidos se gastaron durante seis años 20 millones de dólares, hasta 1997, para hacer parte de reparaciones, quedando un elevado número de puentes por reparar (1). El Reino Unido, otro país industrializado, destina el 40% de su inversión en construcción a la reparación y al mantenimiento de sus estructuras (2). En México se desconoce la cantidad de estructuras de hormigón que se encuentran dañadas o en proceso de corrosión del acero de refuerzo.

Los aditivos han sido componentes importantes e integrales del hormigón, y con la introducción de nuevos aditivos y materiales suplementarios (naturales o industriales) se han obtenido hormigones altamente trabajables, con mejores propiedades mecánicas y de durabilidad. Estos hormigones han sido llamados hormigones de alto comportamiento (3). Entre sus propiedades comprende el mejoramiento en la trabajabilidad y compactación evitando la segregación, mejorando a largo plazo las propiedades mecánicas, alta resistencia a la compresión a edades tempranas, estabilidad de volumen y prolongada vida de servicio en condiciones ambientales agresivas.

En algunos países se utilizan subproductos industriales para mejorar el desempeño del hormigón, como son la ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice (4). Sin embargo, en México algunas de estas adiciones minerales se importan y su alto costo reduce la competitividad del hormigón. Es por esto que es necesario identificar aditivos alternativos de alta disponibilidad que contribuyan a mejorar las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.

El mucílago de nopal ha sido empleado en la elaboración de morteros de cal durante siglos para restaurar y proteger edificios debido a su desempeño contra la penetración de agua y agrietamiento (5). También se ha utilizado en la elaboración de mortero y hormigón hidráulico, encontrando que el mucílago de nopal incrementa los tiempos de fraguado, disminuye la absorción de agua y aumenta la resistencia a la compresión (6). Asimismo, otras investigaciones han demostrado que el mucílago de nopal actúa como agente modificador de viscosidad de la pasta de cemento, con lo que se incrementa la resistencia a la segregación del hormigón autoconsolidable, además de incrementar la resistencia a la compresión y reducir la absorción capilar de agua (7). Peschard et al. (8) estudiaron por medio de calorimetría isotérmica, termogravimetría y espectroscopía infrarroja el proceso de hidratación de pastas de cemento conteniendo distintos polisacáridos. Sus resultados indican que el retardo de la hidratación depende

## 1. INTRODUCTION

*Durability problems in concrete structures have significant economic impact. For instance, in the six years leading up to 1997, the United States spent 20 million dollars on a fraction of the repairs needed for concrete bridges, with a significant number of bridges remaining in need of repair (1). The United Kingdom, another industrialized country, designates 40% of its construction budget to the repair and maintenance of its structures (2). In Mexico, the number of concrete structures that are damaged or suffering corrosion of their steel reinforcement is unknown.*

*Additives have been important and integral components of concrete; the introduction of new additives and supplementary materials (whether natural or industrially produced) has led to the development of highly workable concretes, with better mechanical properties and improved durability. These concretes are known as high performance concretes (3). Their properties include improved workability and consolidation without segregation, improved long-term mechanical properties, high compressive strength at early ages, volume stability, and extended service life under aggressive environmental conditions.*

*In some countries, industrial byproducts have been used to improve concrete performance; including fly ash, blast-furnace slag, and silica fume (4). However, in Mexico, some of these mineral admixtures must be imported, and their high cost reduces competitiveness in concrete. As such, it is necessary to identify widely available alternative admixtures that contribute to improving the properties of concrete in both the fresh and hardened state.*

*Nopal cactus mucilage has been employed in the production of lime mortars for centuries to restore and protect buildings, due to its ability to reduce water penetration and cracking (5). It has also been utilized in the production of mortar and hydraulic concrete, as nopal cactus mucilage has been found to extend setting times, decrease water absorption, and increase compressive strength (6). In addition, previous studies have found that nopal cactus mucilage acts as a viscosity modifying agent in cement paste, increasing self-consolidating concrete's resistance to segregation, besides increasing compressive strength and reducing capillary water absorption (7). Peschard et al. (8) studied the cement hydration process by using isothermal calorimetry, thermogravimetric analysis, and infrared spectroscopy, finding that retardation depends on*

del tipo de cemento e incrementa con altas relaciones polisacárido/cemento en peso.

El nopal está disponible en muchas regiones áridas y semiáridas de México. Este país produce 874.000 toneladas al año, con un rendimiento promedio de 67 ton/ha (9). Además, el uso del mucílago de nopal en materiales basados en cemento puede tener un impacto social, proporcionando un valor agregado a la producción de esta planta, y se mejoraría su rentabilidad. Debe mencionarse que no todas las especies de nopal se utilizan como alimento, de tal forma que se pueden utilizar para aplicaciones industriales aquellas que no sean aprovechadas para consumo humano o animal.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto del mucílago de nopal como aditivo natural en las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón hidráulico, así como los cambios microestructurales en pastas de cemento. En el hormigón en estado endurecido se enfatiza las propiedades de durabilidad, ya que la resistencia a la compresión ha sido abordada anteriormente tanto por otros investigadores como por uno de los coautores de este trabajo (6, 7).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Los agregados pétreos que se emplearon fueron arena de río y grava triturada con tamaño máximo de 19 mm, cuyas características se presentan en la Tabla 1. El cemento empleado en las mezclas fue cemento Portland blanco y su composición química se muestra en la Tabla 2. Se utilizó una solución de mucílago de nopal de la especie *Opuntia ficus-indica*, con una concentración al 3,0% para sustituir el agua de mezclado. La extracción del mucílago de nopal fue por medio de escaldado (10), molienda y maceración para finalmente filtrarlo y obtener la solución de mucílago de nopal. Se utilizó agua bidentalada para la preparación de la solución de mucílago de nopal y las distintas mezclas de hormigón y pastas de cemento. Para lograr una trabajabilidad adecuada de las mezclas de hormigón, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango basado en policarboxilatos, dosificado como se indica en la Tabla 3.

cement type and increases with higher polysaccharide-to-cement ratio by weight.

*Nopal cactus is available in many arid and semi-arid regions of Mexico; the country produces 874 000 tons of the plant per year, with an average yield of 67 ton/ha (9). Furthermore, the use of nopal cactus mucilage in cement-based materials could have a positive social impact, providing an added value to the production of this plant and thus improving its profitability. It is worth mentioning that not all species of nopal cactus are consumed as food; utilization of the plant in industrial applications would make it possible to take advantage of those species which are not intended for human or animal consumption.*

*Considering the above, the objective of the present study is to evaluate the effect of nopal cactus mucilage as a natural additive on the properties of hydraulic concrete in both the fresh and hardened state, as well as its effects on microstructural changes in cement pastes. An emphasis is given to its effects on durability properties for concrete in the hardened state, as the issue of compressive strength has already been addressed, both by other researchers and by one of the co-authors of this work (6, 7).*

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

*The aggregates employed were river sand and crushed gravel with a maximum size of 19 mm; their characteristics are presented in Table 1. The cement employed in the mixtures was white Portland cement; its chemical composition is shown in Table 2. A mucilage solution obtained from the nopal cactus species *Opuntia ficus-indica* at concentration of 3.0% was used to substitute for water in the mixture. The nopal cactus mucilage was extracted by scalding (10), grinding, macerating, and finally filtering to obtain the nopal cactus mucilage solution. Bi-distilled water was used in the preparation of the nopal mucilage solution and in the different concrete mixtures and cement pastes. In order to achieve adequate workability in the concrete mixtures, a high range water-reducing admixture based on polycarboxylates was utilized; doses are indicated in Table 3.*

Tabla 1 / Table 1  
Propiedades físicas de los agregados pétreos.  
Physical properties of aggregates.

Agregado / Aggregate	Absorción / Absorption (%)	Densidad relativa / Relative density (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de finura / Fineness modulus
Arena / Sand	1.29	2.57	2.88
Grava / Gravel	0.68	2.66	-

Tabla 2 / Table 2  
Composición química del cemento Portland blanco.  
Chemical composition of white Portland cement.

Compuesto / Compound	Contenido / Content (%)
SiO <sub>2</sub>	16.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.8
CaO	70.03
K <sub>2</sub> O	0.71
MgO	0.83
MnO	0.04
Na <sub>2</sub> O	1.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04
TiO <sub>2</sub>	0.21
Fe	0.12
FeO	0.16
PxC a 950 °C	5.06

Tabla 3 / Table 3  
Proporciones de las mezclas y propiedades del hormigón en estado fresco.  
Mixture proportions and fresh concrete properties.

Materiales / Materials	Relación a/c o m/c / w/c or m/c ratio					
	a/c = 0.30	m/c = 0.30	a/c = 0.45	m/c = 0.45	a/c = 0.60	m/c = 0.60
Grava / Gravel (kg)	1007	1007	997	997	994	994
Arena / Sand (kg)	661	661	713	713	786	786
Cemento / Cement (kg)	513	513	449	449	337	337
Agua o sol. de mucílago / Water or mucilage solution (kg)	167	167	172	172	203	203
Superplasticificante / Superplasticizer (L/m <sup>3</sup> )	3.8	4.7	1.6	1.9	1.4	1.4
Revenimiento / Slump (mm)	60	150	90	60	80	105
Peso volumétrico / Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	2348	2295	2329	2287	2318	2221
Contenido de aire / Air content (%)	2	2	2	6	2	6
Temperatura / Temperature (°C)	23	23	26	27	24	24

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Elaboración y caracterización de pastas de cemento

Se elaboraron 30 pastas de cemento con relaciones agua/cemento (a/c) y solución de mucílago de nopal/cemento (m/c)= 0,30, 0,45 y 0,60, de acuerdo a la norma ASTM C 305-99 (11), de las cuales 18 fueron preparadas para SEM, seis para XRD y seis más por duplicado para determinar la fluidez y tiempos de fraguado de acuerdo a la norma ASTM C230-08 (12) y ASTM C807-08 (13), respectivamente. La fluidez y tiempo de fraguado se determinó a una temperatura de 23±2 °C. A edades de 28, 56 y 120 días se analizó la microestructura por medio de SEM utilizando un equipo JSM-6300; también se caracterizó el proceso de hidratación por medio de XRD, utilizando un equipo D8 Focus.

### 2.2.2. Elaboración y caracterización de las mezclas de hormigón

Se diseñaron y elaboraron mezclas de hormigón con relaciones agua/cemento (a/c) y solución de mucílago de

## 2.2. Methods

### 2.2.1. Preparation and characterization of cement pastes

Thirty cement pastes with water/cement (w/c) and nopal cactus mucilage solution/cement (m/c) ratios of 0.30, 0.45, and 0.60 were prepared according to the ASTM C 305-99 standard (11). 18 of the pastes were prepared for SEM, 6 for XRD, and 6 more in duplicate for determination of flow and setting times in accordance with the ASTM C230-08 (12) and ASTM C807-08 (13) standards, respectively. Flow and setting time were determined at a temperature of 23 ± 2 °C. Microstructure was analyzed at 28, 56, and 120 days by SEM with a JSM-6300. The hydration process was characterized by XRD, using a D8 Focus.

### 2.2.2. Preparation and characterization of concrete mixtures

Concrete mixtures with water/cement (w/c) and mucilage solution/cement (m/c) ratios of 0.45 and 0.60

nopal/cemento ( $m/c$ ) = 0,45 y 0,60, de acuerdo al Método del ACI (14). Las mezclas de hormigón con relación a/c o  $m/c$  = 0,30 se diseñaron de acuerdo al método propuesto por Aitcin y Mehta (15). Una vez preparadas las mezclas, se elaboraron 36 cilindros de 100 mm de diámetro x 200 mm de longitud con cada una de ellas, considerando tres cilindros para absorción capilar de agua y tres para difusión de cloruros. Las pruebas se realizaron de acuerdo con las normas ASTM C39-04 (16), ASTM C642-06 (17) y NORDTEST NT BUILD 443 (18), respectivamente. La Tabla 3 muestra las proporciones de las mezclas empleadas y sus propiedades en estado fresco.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Tiempos de fraguado

La Figura 1 muestra los tiempos de fraguado de las pastas con relación a/c y  $m/c$  = 0,30, 0,45 y 0,60. Se observa que los tiempos de fraguado inicial y final de todas las mezclas que contienen solución de mucílago de nopal tienen incrementos superiores al 50% con respecto a las mezclas control. Estos resultados indican las ventajas potenciales del uso del mucílago de nopal como aditivo retardante en climas cálidos, ya que las temperaturas altas reducen los tiempos de fraguado y, por lo tanto, se cuenta con un menor tiempo para el transporte, colocación y acabado del hormigón en obra. El efecto del mucílago de nopal como aditivo retardante se explica por la presencia de azúcares como la galactosa 21-40,1%, ramnosa 7-13,1%, arabinosa 24,6-42,0%, xilosa 22-22,2% y ácido galacturónico 8-12,7% (5, 6 ,19).

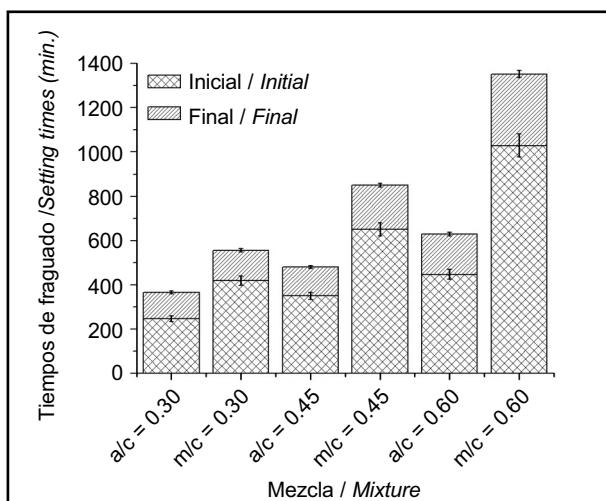


Figura 1. Tiempos de fraguado de las pastas con y sin mucílago de nopal. Las barras de error indican una desviación estándar.

Figure 1. Setting times of pastes with and without nopal cactus mucilage. Error bars indicate one standard deviation.

were designed and prepared in accordance with the ACI Method (14). The concrete mixtures with w/c or  $m/c$  = 0,30 were designed according to the method proposed by Aitcin and Mehta (15). Each mixture was used to cast 36 cylinders measuring 100 mm in diameter and 200 mm in length, with three cylinders considered for capillary water absorption and three for chloride diffusion. Testing was carried out in accordance with the ASTM C39-04 (16), ASTM C642-06 (17), and NORDTEST NT BUILD 443 (18) standards, respectively. Table 3 shows the proportions of the mixtures utilized, and their properties in fresh state.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Setting times

Figure 1 shows the setting times for pastes with w/c or  $m/c$  ratios of 0,30, 0,45, and 0,60. As can be observed, the initial and final setting times for all mixtures containing nopal cactus mucilage solution exhibited increases greater than 50% with respect to the control mixtures. These results indicate the potential advantages of the use of nopal cactus mucilage as a retarding admixture in warm climates, as high temperatures reduce setting times and, as such, reduce the amount of time available for transporting, placing, and finishing the concrete in site. The effects of nopal cactus mucilage as a retarding admixture can be explained by the presence of sugars such as galactose 21.0-49.1%, rhamnose 7.0-13.1%, arabinose 24.6-42.0%, xylose 22.0-22.2%, and galacturonic acid 8.0-12.7% (5, 6 ,19).

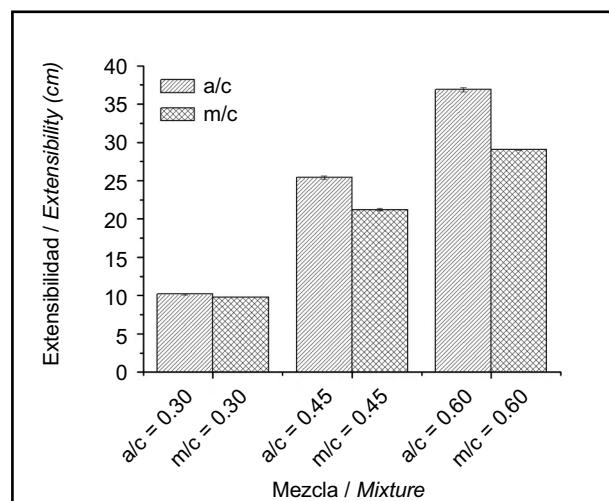


Figura 2. Fluidez de las pastas de cemento (a/c y m/c). Las barras de error indican una desviación estándar.

Figure 2. Flow for cement pastes (w/c and  $m/c$ ). Error bars indicate one standard deviation.

### 3.2. Fluidez

La Figura 2 muestra los resultados de las pruebas de fluidez de las pastas con relación a/c o m/c = 0,30, 0,45 y 0,60. Se observa que para todas las relaciones m/c hay una pérdida de fluidez hasta de un 26% respecto a las mezclas control a/c. Esto confirma los resultados obtenidos en hormigón autoconsolidable, donde el mucílago de nopal fue utilizado exitosamente como aditivo modificador de viscosidad (7).

### 3.3. Microestructura

En la Figura 3a se muestra la microestructura de la pasta a/c = 0,30, observando claramente productos de la hidratación del cemento como el hidróxido de calcio, el silicato hidratado de calcio (CSH) y la etringita. En la Figura 3b se observa la pasta m/c = 0,30, donde solo se observan pequeñas agujas de etringita y de CSH.

La Figura 4a muestra la microestructura de la pasta de cemento a/c = 0,45, observando formaciones de etringita y silicato hidratado de calcio (CSH). En la Figura 4b, correspondiente a la pasta de cemento m/c = 0,45, observamos agujas de etringita y CSH.

En la Figura 5a se muestra la microestructura de la pasta a/c = 0,60, observando los cristales de hidróxido de calcio, el silicato hidratado de calcio y las agujas de etringita. En la Figura 5-b observamos la microestructura de la pasta m/c = 0,60, donde solo se observa etringita y silicato hidratado de calcio.

### 3.2. Flow

*Figure 2 shows the results of flow tests for pastes with w/c or m/c ratios = 0.30, 0.45, and 0.60. As can be observed, all m/c mixtures exhibited a decrease in flow, up to 26% with respect to the control w/c mixtures. This confirms the results obtained for self-consolidating concrete, where nopal cactus mucilage was successfully used as a viscosity modifying admixture (7).*

### 3.3. Microstructure

*The microstructure of the paste w/c = 0.30 is shown in Figure 3a, where the products of cement hydration such as calcium hydroxide, calcium silicate hydrate (CSH), and ettringite, can all be clearly seen. Figure 3b shows the cement paste m/c = 0.30, where only small ettringite needles and CSH can be observed.*

*Figure 4a shows the microstructure of the cement paste w/c = 0.45, where ettringite and calcium silicate hydrate (CSH) formations can be seen. In Figure 4b, cement paste m/c = 0.45, ettringite needles and CSH are observable.*

*Figure 5a shows the microstructure of the cement paste w/c = 0.60; calcium hydroxide and CSH crystals are observable, as well as ettringite needles. In Figure 5b, m/c = 0.60, only ettringite and CSH are observable.*

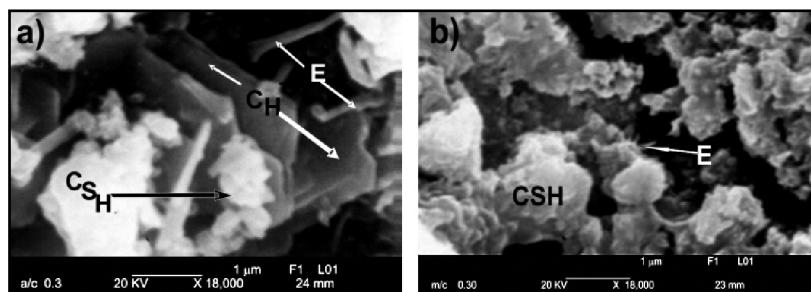


Figura 3. Microfotografías de la pasta de cemento relación a) a/c y b) m/c = 0,30 a 120 días, magnificación 18.000 X.  
Figure 3. Microphotographs of the cement pastes a) w/c (a) and b) m/c ratio = 0.30 at 120 days, magnification 18000 X.

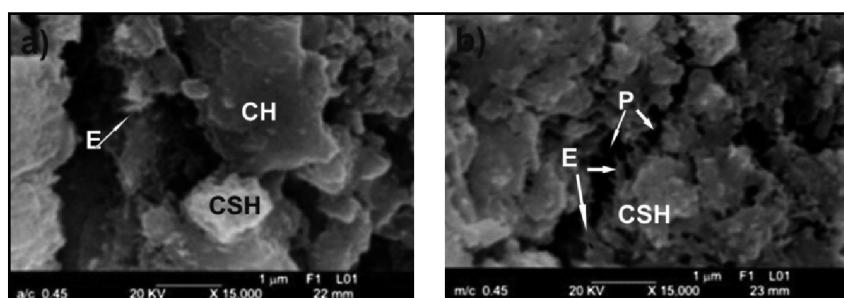


Figura 4. Microfotografías de la pasta de cemento relación a) a/c y b) m/c = 0,45 a 120 días, magnificación 15.000 X.  
Figure 4. Microphotographs of cement pastes a) w/c and b) m/c ratio = 0.45 at 120 days, magnification 15000 X.

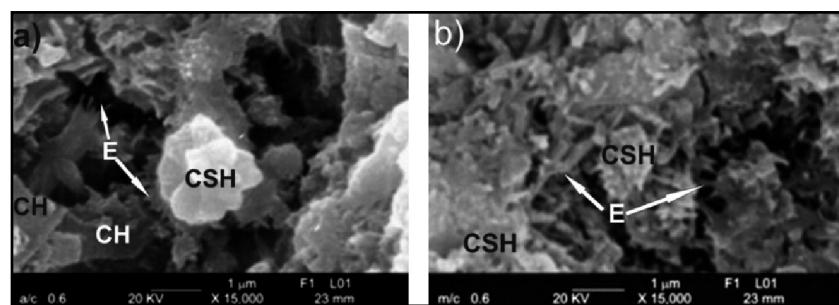


Figura 5. Microfotografía de la pasta relación a) a/c y b) m/c = 0,60 a 120 días, magnificación 15.000 X.  
 Figure 5. Microphotographs of the pastes a) w/c and b) m/c ratio = 0.60 at 120 days, magnification 15000 X.

En los resultados de microestructura de pastas de cemento que contienen solución de mucílago de nopal, se observan cristales de etringita, aunque no se observan los cristales de hidróxido de calcio. Chandra *et al.* (6) reportan que la utilización de mucílago de nopal disminuye el tamaño de los cristales de hidróxido de calcio. Knapen *et al.* (19) y Peschard *et al.* (8) también reportan que al utilizar polímeros solubles en agua, estos tienen influencia en la microestructura y formación de los cristales originados por la hidratación.

### 3.4. Difracción de rayos X

Los resultados de las pastas de cemento con relación a/c y m/c = 0,30 a edades de 3 y 28 días se muestran en la Figura 6. En estos difractogramas se observa etringita, hidróxido de calcio, carbonato de calcio, así como el consumo de  $C_2S$  y  $C_3S$ . Debe notarse que en el caso de la pasta conteniendo mucílago de nopal (Figuras 6c y 6d), la disminución de  $C_2S$  y  $C_3S$  es menor que la observada en la pasta que contiene solo agua (Figuras 6a y 6b), indicando una hidratación lenta del cemento en presencia

Ettringite crystals can be observed in the microstructures of the cement pastes containing the nopal cactus mucilage solution, although calcium hydroxide crystals are not observable. Chandra *et al.* (6) reported that the addition of nopal cactus mucilage decreased the size of calcium hydroxide crystals. Knapen *et al.* (19) and Peschard *et al.* (8) also reported that water-soluble polymers have an effect on microstructure and the formation of hydration-induced crystals.

### 3.4. X-ray diffraction

The results for the cement pastes with w/c and m/c ratio = 0.30 at 3 and 28 days of age are shown in Figure 6. As can be observed in these diffractograms, there is ettringite, calcium hydroxide, calcium carbonate, as well as consumption of  $C_2S$  and  $C_3S$ . Notice that in case of the paste containing nopal cactus mucilage (Figures 6c and 6d), the reduction of  $C_3S$  and  $C_2S$  is less than in the paste containing only water (Figures 6a and 6b), indicating a slow cement hydration in the presence of

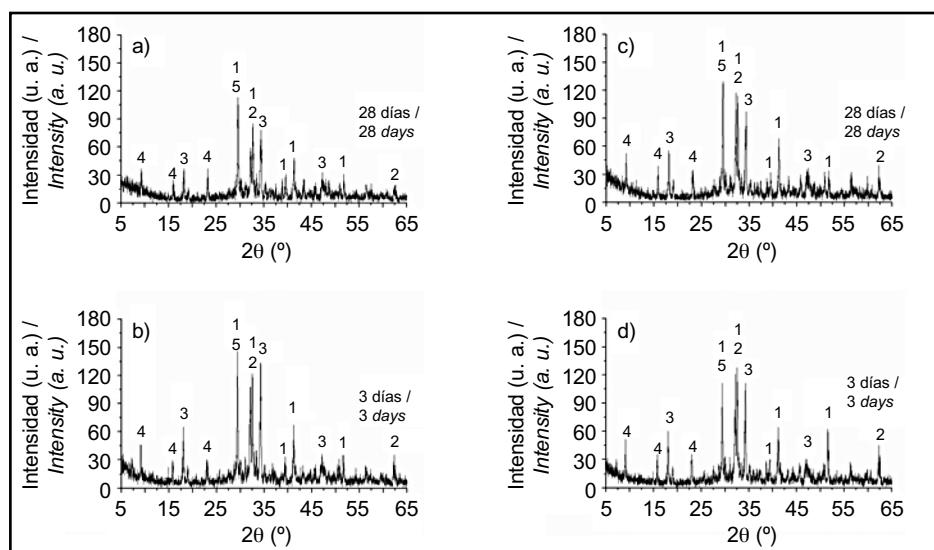


Figura 6. XRD de las pastas a/c (a, b) y m/c (c, d) = 0,30 a 3 y 28 días de edad. 1)  $C_3S$ , 2)  $C_2S$ , 3)  $Ca(OH)_2$ , 4) Etringite, 5)  $CaCO_3$ .  
 Figure 6. XRD of pastes a/c (a, b) and m/c (c, d) = 0.30 at 3 and 28 days of age. 1)  $C_3S$ , 2)  $C_2S$ , 3)  $Ca(OH)_2$ , 4) Ettringite, 5)  $CaCO_3$ .

del mucílago de nopal. Los productos cristalinos observados en ambos casos son congruentes con los reportados en la literatura sobre hidratación de cemento (20, 21).

En la Figura 7 se presentan los difractogramas de las pastas de cemento con relación a/c y m/c = 0,45 a edades de 3 y 28 días, identificando los productos cristalinos originados por la hidratación del cemento, así como también el carbonato de calcio producido por la carbonatación de la pasta de cemento. El incremento en la intensidad del pico correspondiente al hidróxido de calcio de 3 a 28 días de edad es mayor en la pasta que contiene solo agua, comparado con la que contiene mucílago de nopal. También se observa en la pasta que contiene mucílago de nopal menores cambios en la intensidad de los picos correspondientes al  $C_3S$  y  $C_2S$ , de 3 a 28 días de edad.

En la Figura 8 se presentan los difractogramas de las pastas de cemento con relación a/c y m/c = 0,60 a edades de 3 y 28 días, identificando también los productos cristalinos originados por la hidratación del cemento, así como también el carbonato de calcio. A diferencia de los casos anteriores, la alta permeabilidad de la pasta de cemento ocasionó una mayor carbonatación de las pastas. También se observa un mayor consumo de  $C_3S$  y  $C_2S$  en las pastas conteniendo solo agua.

Con base en los difractogramas presentados y los resultados de SEM, se deduce que el mucílago de nopal actúa como aditivo retardante de la hidratación. El uso de polisacáridos en cemento tiene influencia en la hidratación de las pasta de cemento, ya que actúan como agentes retardadores y no permiten la libre formación del hidróxido de calcio y del silicato hidratado de calcio (8). Esto último puede explicar por qué el mucílago de nopal, el cual es un

*nopal cactus mucilage. The crystalline products observed in both cases are in agreement with those reported in the literature on cement hydration (20, 21).*

*Figure 7 shows the diffractograms for cement pastes with w/c and m/c ratio = 0.45 at ages of 3 and 28 days; the crystalline products induced by cement hydration as well as calcium carbonate produced by the cement paste carbonation, are identified. The increase in the intensity of the peak corresponding to calcium hydroxide from 3 to 28 days of age is higher in the paste containing only water, compared to the one containing cactus mucilage. It can also be observed minor changes in the intensity of the peaks corresponding to  $C_3S$  and  $C_2S$  from 3 to 28 days of age.*

*Figure 8 presents the diffractograms for cement pastes with w/c and m/c ratio = 0.60 at ages of 3 and 28 days; the crystalline products induced by cement hydration as well as calcium carbonate produced by the cement paste carbonation, are also identified. A significant difference from the previous cases is the higher carbonation caused by the high permeability of the pastes. There is also a higher consumption of  $C_3S$  and  $C_2S$  in pastes containing only water.*

*According to the diffractograms presented and based on the SEM results, it can be affirmed that nopal cactus mucilage acts as a retarding admixture in the hydration process. Various polysaccharides have been reported to have an effect on cement paste hydration, acting as retardant agents and preventing the free formation of calcium hydroxide and calcium silicate hydroxide (8). This may explain why nopal cactus mucilage, which is a polysaccharide, acts as a*

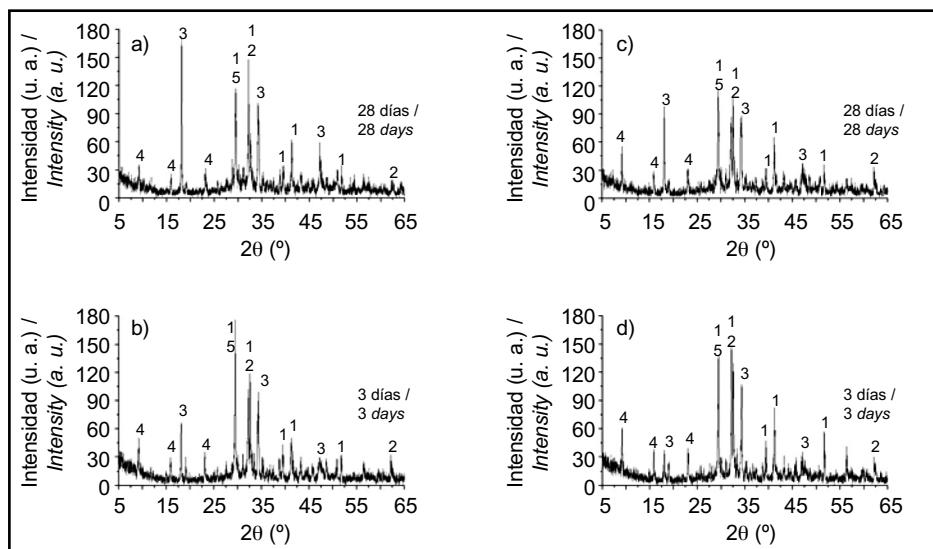


Figura 7. XRD de las pastas a/c (a, b) y m/c (c, d) = 0,45 a 3 y 28 días de edad. 1)  $C_3S$ , 2)  $C_2S$ , 3)  $Ca(OH)_2$ , 4) Ettringite, 5)  $CaCO_3$ .

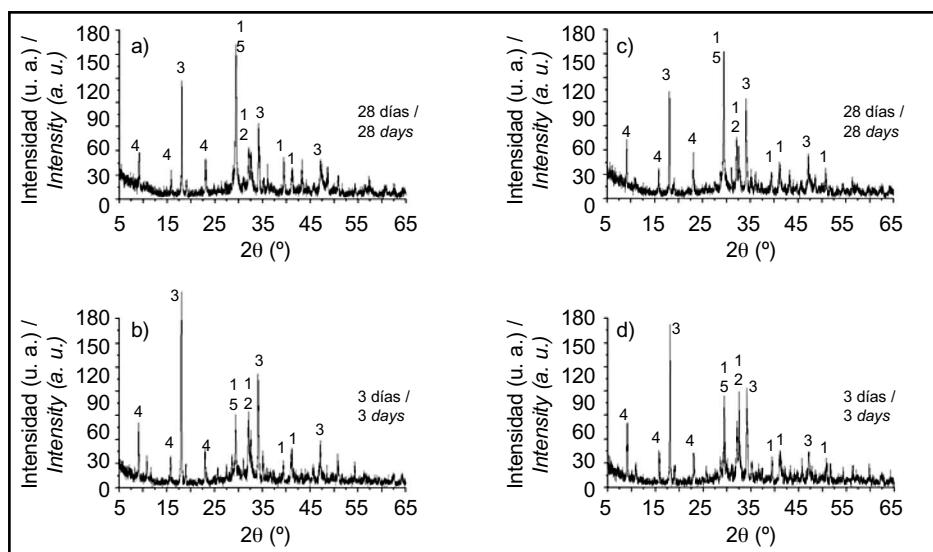


Figura 8. XRD de las pastas a/c (a, b) y m/c (c, d) = 0,60 a 3 y 28 días de edad. 1)  $C_3S$ , 2)  $C_2S$ , 3)  $Ca(OH)_2$ , 4) Ettringite, 5)  $CaCO_3$ .  
 Figure 8. XRD of pastes a/c (a, b) and m/c (c, d) = 0.60 at 3 and 28 days of age. 1)  $C_3S$ , 2)  $C_2S$ , 3)  $Ca(OH)_2$ , 4) Ettringite, 5)  $CaCO_3$ .

polisacárido, actúa como aditivo retardante. El peso molecular de los polisacáridos utilizados por otros investigadores (8) oscilan entre  $1,48 \times 10^6$  y  $11,6 \times 10^6$ , por lo que son similares a los pesos moleculares reportados del mucílago de nopal, los cuales varían entre  $1,56 \times 10^6$  y  $4,3 \times 10^6$  (22).

### 3.5. Absorción capilar de agua

En la Figura 9 se observa el efecto positivo del mucílago de nopal y el tiempo de curado en húmedo en la disminución de la absorción capilar, con excepción de los especímenes ensayados a 28 días y que fueron curados en húmedo por siete días. Debe notarse que la capacidad de retener agua del mucílago de nopal (6) contribuye a lograr un mayor grado de hidratación en los especímenes que no tuvieron curado en húmedo. Sin embargo, cuando existe un periodo de curado de siete días, los especímenes elaborados con mucílago de nopal mantienen prácticamente la misma capacidad de absorción a los 28 y 56 días de edad y estas son muy similares a la dada por los especímenes de referencia; esto es similar a lo reportado por Torres y Cano (23).

Para la relación a/c y m/c = 0,45 se muestra la Figura 10, donde se observa el efecto del mucílago de nopal al hacer al hormigón menos permeable, en comparación a los especímenes de referencia en todas las edades de prueba. Este efecto es más evidente en los especímenes que no tuvieron curado húmedo, lo cual es congruente con lo observado por Chandra et al. (6), quienes encontraron que el mucílago de nopal reduce la absorción de agua en especímenes de hormigón con relación m/c = 0,50 y cinco días de curado en húmedo. Esto también concuerda con lo reportado por Ruiz-García (7), quien encontró que el mucílago de nopal contribuye a disminuir la absorción capilar en pastas de

retardant additive. The molecular weight of the polysaccharides utilized by other researchers (8) ranged from  $1.48 \times 10^6$  to  $11.6 \times 10^6$ ; these values are similar to the molecular weights that have been reported for nopal cactus mucilage, which range from  $1.56 \times 10^6$  to  $4.3 \times 10^6$  (22).

### 3.5. Capillary water absorption

In Figure 9, the positive effect of nopal cactus mucilage and wet curing time on decreasing capillary absorption can be observed, with the exception of samples tested at 28 days after being moist cured for seven days. It should be noted that nopal cactus mucilage's water retention capacity (6) contributed to obtaining a greater degree of hydration in samples that were not moist cured. However, when cured for seven days, samples prepared with nopal cactus mucilage maintained practically the same absorption capacity at 28 and 56 days, and presented values very similar to those of the control; Torres & Cano (23) reported similar findings.

Figure 10 shows the results for w/c or m/c = 0.45; the decrease in permeability caused by the addition of nopal cactus mucilage can be observed at all testing ages. This effect is most evident in the samples that were not moist cured; this concurs with the findings of Chandra et al. (6), who found that nopal cactus mucilage reduces water absorption in concrete samples with an m/c ratio of 0.50 and 5 days of moist curing. It also agrees with the results found by Ruiz-García (7), who reported that nopal cactus mucilage contributes to decreasing capillary absorption in cement pastes with short moist curing periods. Capillary absorption for the w/c or m/c = 0.60 was found

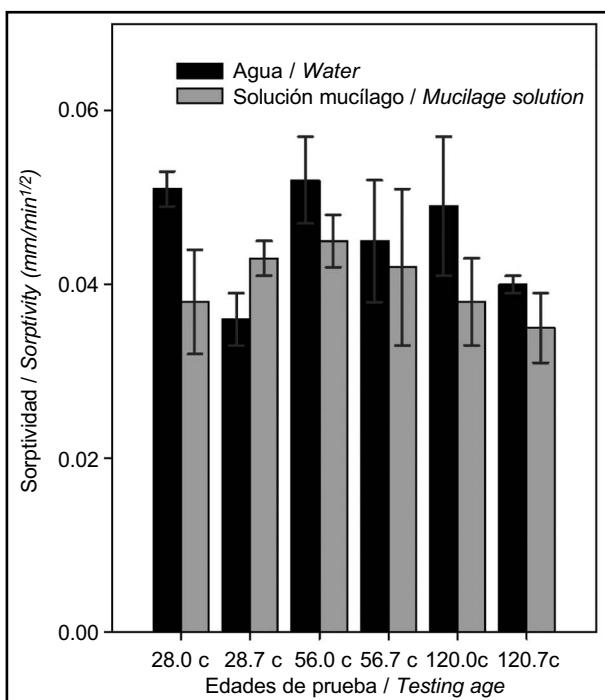


Figura 9. Absorción capilar de agua en hormigón con relación a/c o m/c = 0,30 (0c = cero días de curado en húmedo, 7c = siete días de curado en húmedo). Las barras de error indican una desviación estándar.

Figure 9. Capillary water absorption in concrete with w/c or m/c ratio = 0.30 (0c = zero days of moist curing, 7c = seven days of moist curing). Error bars indicate one standard deviation.

cemento con períodos de curados cortos. En lo que se refiere a la relación a/c y m/c = 0,60, la absorción capilar tiene la misma tendencia que la relación a/c y m/c = 0,45 (Figura 11).

### 3.6. Coeficiente de difusión de cloruros

Los coeficientes de difusión de cloruros para las mezclas a/c y m/c = 0,30 a edades de prueba de 28, 56 y 120 días se presentan en la Figura 12, observando, como se esperaba, que a medida que se incrementa la edad de los especímenes los coeficientes de difusión disminuyen, debido a la continua hidratación del cemento (24). Asimismo, se observa el efecto que tiene el periodo de curado en húmedo al contribuir a una mayor hidratación del cemento, con lo que se reduce la permeabilidad de la pasta de cemento.

También se observa que el mucílago de nopal contribuyó a disminuir el coeficiente de difusión de cloruros en ambos tiempos de curado, como en todas las edades de prueba. A la edad de 120 días en los especímenes con mucílago de nopal que tuvieron un curado de siete días, el coeficiente fue menor en aproximadamente un 20% respecto a los concretos controles (a/c).

En la Figura 13 se muestran los coeficientes de difusión obtenidos en las mezclas a/c y m/c=0,45. Se observa

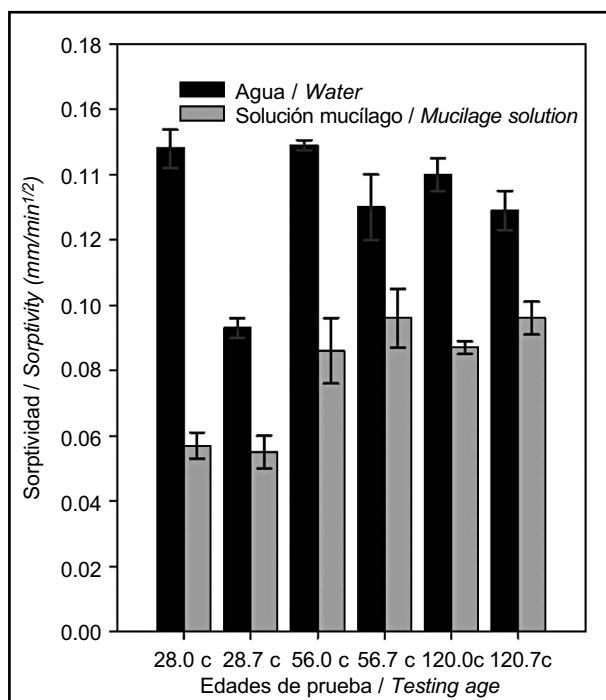


Figura 10. Absorción capilar de agua en cilindros de concreto con relación a/c o m/c = 0,45 (0c = cero días de curado en húmedo, 7c = siete días de curado en húmedo). Las barras de error indican una desviación estándar.

Figure 10. Capillary water absorption in concrete with w/c or m/c ratio = 0.45 (0c = zero days of moist curing, 7c = seven days of moist curing). Error bars indicate one standard deviation.

to have the same trend as the w/c or m/c = 0.45 ratio (Figure 11).

### 3.6. Chloride diffusion coefficients

Figure 12 shows the chloride diffusion coefficients for pastes w/c or m/c = 0.30 at 28, 56, and 120 days. As can be expected, diffusion coefficients decrease with an increase in the age of the samples, due to the continuous hydration of the cement (24). Furthermore, the effects of the moist curing period in contributing to greater hydration of the cement can be observed, leading to reduced permeability of the cement paste.

In addition, it can be observed that nopal cactus mucilage contributed to decreasing the chloride diffusion coefficient in for both curing periods, as well as for all testing ages. At 120 days, samples with nopal cactus mucilage that had been moist cured for 7 days exhibited diffusion coefficients approximately 20% lower than those of the controls (w/c).

Figure 13 shows the diffusion coefficients obtained for w/c or m/c = 0.45 mixtures. The effect of moist curing time in

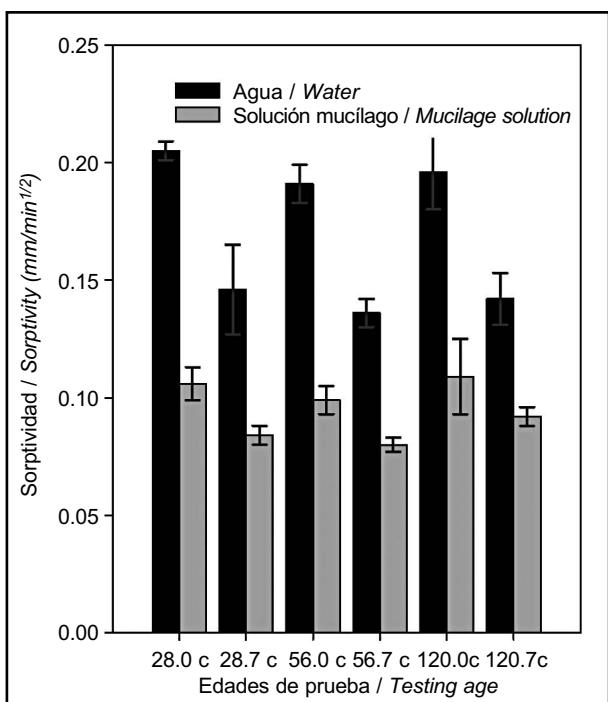


Figura 11. Absorción capilar de agua en cilindros de hormigón con relación a/c o m/c = 0,60 (0c = cero días de curado en húmedo, 7c = siete días de curado en húmedo). Las barras de error indican una desviación estándar.

Figure 11. Capillary water absorption in concrete with w/c or m/c ratio = 0.60 (0c = zero days of moist curing, 7c = seven days of moist curing). Error bars indicate one standard deviation.

también el efecto del tiempo de curado en húmedo al disminuir la penetración de cloruros debido a una mayor hidratación de la pasta de cemento. En lo que respecta al efecto que tiene el mucílago de nopal en el coeficiente de difusión de cloruros con respecto a la mezcla de referencia, se observa que en ambos tipos de curado los especímenes conteniendo mucílago de nopal presentan al inicio un mayor coeficiente de difusión y a 120 días disminuye con respecto al control. Esto es debido al efecto retardante de hidratación del mucílago de nopal. La diferencia en esta edad es del 10% para los especímenes que tuvieron siete días de curado y de solo el 6% para los que no tuvieron curado.

En los hormigones con relación a/c y m/c = 0,60, el tipo de curado también influye en los coeficientes de difusión, siendo su efecto el esperado. Sin embargo, en el caso de cero días de curado, el efecto retardante del mucílago de nopal ocasiona que el hormigón sufra una mayor pérdida de agua por secado con respecto al control y por lo tanto sea más poroso y permeable, reflejándose en un mayor coeficiente de difusión de cloruros. Por el contrario, el curado en húmedo por siete días contribuye a mitigar el problema de pérdida de humedad temprana, y entonces el mucílago de nopal produce una reducción del coeficiente de difusión con respecto al control en todas las edades (Figura 14).

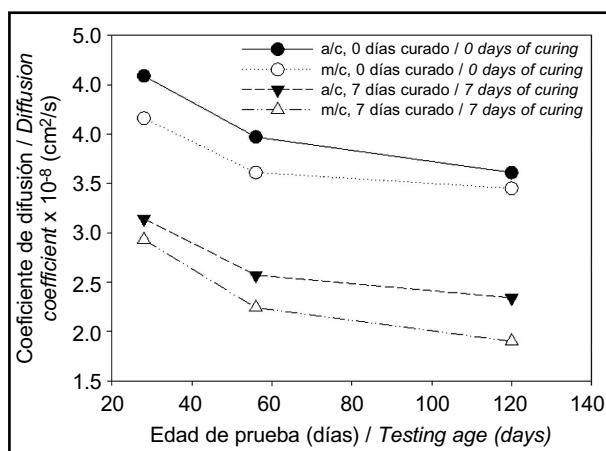


Figura 12. Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de hormigón relación a/c o m/c = 0,30 a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.

Figure 12. Chloride diffusion coefficients in concrete mixtures w/c or m/c = 0.30 at testing ages of 28, 56 and 120 days.

decreasing chloride penetration can be observed, due to greater hydration of the cement paste. With respect to the effect of nopal cactus mucilage on the chloride diffusion coefficient, it can be observed that for both curing times, samples prepared with nopal cactus mucilage present a tendency towards decreased chloride penetration with respect to the control, increasing with increased sample age. This is due to the fact that the nopal cactus mucilage retards the hydration reactions of the cement, thus allowing for a better chloride penetration result up to 120 days of age. The difference at this age was found to be 10% for samples that had 7 days of curing, and barely 6% for samples that were not cured.

In concretes with w/c or m/c ratio = 0.60, the curing type also affected the diffusion coefficient, as it was expected. However, in case of zero days of moist curing, the retarding effect of nopal cactus mucilage causes higher loss of water by drying with respect to control, and therefore the material is more porous and permeable, resulting in a higher chloride diffusion coefficients. Contrary to this, moist curing for seven days avoids water loss by drying at early ages, allowing the nopal cactus mucilage to reduce the diffusion coefficients with respect to the control at all testing ages (Figure 14).

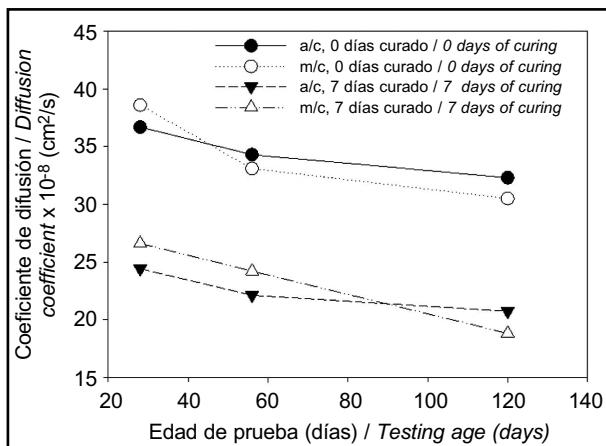


Figura 13. Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de hormigón relación a/c o m/c = 0,45 a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.

Figure 13. Chloride diffusion coefficients in concrete mixtures with w/c or m/c = 0.45 at testing ages of 28, 56 and 120 days.

El efecto esperado de la adición de mucílago de nopal al hormigón sería una importante reducción del coeficiente de difusión de cloruros, causado por un incremento en la viscosidad de la solución de poro (25). Se sabe que el funcionamiento de las moléculas como barreras de difusión está en función de su tamaño (26), por lo que las moléculas de alto peso molecular, que aumentan drásticamente la viscosidad de la solución, en concentraciones bajas no tienen ningún efecto medible en la difusión. Inversamente, en las moléculas de bajo peso molecular la reducción es proporcional al aumento de viscosidad, es decir, duplicar la viscosidad de la solución produce un coeficiente de difusión a la mitad del obtenido en la solución original.

Con base en la ecuación de Stokes-Einstein, se tiene [1]

$$D_0 = \frac{K_B T}{6\pi\eta_0 r} \quad [1]$$

donde:

$D_0$ : coeficiente de difusión  
 $K_B$ : constante Boltzmann  
 $T$ : temperatura absoluta  
 $\eta_0$ : viscosidad del fluido  
 $r$ : radio de la partícula

Con la ecuación [1] se calculó el coeficiente de difusión del ión cloruro en solución de mucílago y agua, esto para determinar la variación en la difusión del ión cloruro en ambos fluidos. Para el mucílago se consideró una viscosidad de 11 centipoises y para el agua una viscosidad de 1 centipoise a temperatura de 23 °C, el radio de la partícula del ión cloruro de  $1.81 \times 10^{-8}$  cm (27).

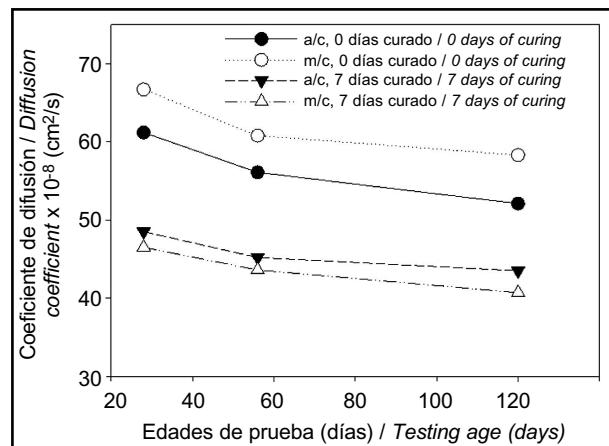


Figura 14. Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de hormigón relación a/c o m/c = 0,60 a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.

Figure 14. Chloride diffusion coefficients in concrete mixtures with w/c or m/c = 0.60 at testing ages of 28, 56 and 120 days.

The expected effect of the addition of nopal cactus mucilage to concrete could be an important reduction of the chloride diffusion coefficient, caused by an increase in viscosity of the pore solution (25). It is known that molecules work as diffusion barriers depending on their size (26); thus, molecules with high molecular weight that drastically increase the viscosity of the solution have no measurable effect on diffusion in low concentrations. Conversely, the reduction in diffusion caused by molecules with low molecular weight is proportional to the increase in viscosity. That is to say, doubling the viscosity of the solution produces a diffusion coefficient with half the value of that obtained from the original solution.

The Stokes-Einstein equation gives [1]

$$D_0 = \frac{K_B T}{6\pi\eta_0 r} \quad [1]$$

where:

$D_0$ : diffusion coefficient  
 $K_B$ : Boltzmann's constant  
 $T$ : absolute temperature  
 $\eta_0$ : viscosity of the fluid  
 $r$ : particle radius

Chloride ion diffusion coefficients were calculated using Equation [1] for mucilage solution and water, in order to determine the variation in chloride ion diffusion for both fluids. A viscosity of 11 centipoise for the mucilage and 1 centipoise for the water were considered, at a temperature of 23 °C with a chloride ion particle radius of  $1.81 \times 10^{-8}$  cm (27).

Para la solución de mucílago de nopal se obtuvo un coeficiente de difusión de cloruros de  $1,0889 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ , mientras que para el agua se tuvo un coeficiente  $1,197 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Este último coeficiente concuerda con lo reportado en la literatura (27, 28). Estos resultados indican que la difusión de cloruros en la solución de mucílago debería ser 11 veces menor que en agua, aunque esto no se observa en los resultados experimentales, donde el coeficiente de difusión solo fue menor en un 20% a la edad de 120 días con cero días de curado, y en otros casos el coeficiente de difusión fue mayor que en los especímenes conteniendo solo agua. Al realizar esta comparación debemos tomar en cuenta que se desconoce qué cambios en viscosidad tiene la solución de poro conteniendo mucílago, causados por la hidratación del cemento y el secado de los especímenes en ambiente natural.

#### 4. CONCLUSIONES

- El mucílago de nopal disminuye la fluidez en las pastas de cemento, actuando como aditivo modificador de viscosidad, además de actuar como aditivo retardante al incrementar los tiempos de fraguado.
- En la microestructura de las pastas elaboradas con a/c se observan cristales de hidróxido de calcio, silicato hidratado de calcio y etringita; sin embargo, en las pastas de m/c solo se aprecia etringita y el silicato hidratado de calcio.
- Los resultados de XRD indican una menor reducción del C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S entre 3 y 28 días de edad en las pastas conteniendo mucílago de nopal, comparado con las pastas conteniendo solo agua, mostrando el efecto del mucílago como retardante de la hidratación del cemento.
- El mucílago de nopal redujo significativamente la absorción capilar de agua en todas las mezclas de hormigón curadas por cero y siete días en húmedo con respecto a las mezclas control.
- El coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón conteniendo mucílago de nopal, relación m/c = 0,30, fue menor en todas las edades de prueba y ambos tipos de curado con respecto al control. En el hormigón con relación m/c = 0,45, el mucílago de nopal contribuyó a disminuir el coeficiente de difusión solo hasta 120 días de edad en ambos tipos de curado con respecto al control. En lo que respecta a la relación m/c = 0,60, el mucílago de nopal solo contribuyó a disminuir el coeficiente de difusión en el hormigón curado en húmedo por siete días con respecto al control.

#### AGRADECIMIENTOS

Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México el apoyo económico otorgado al proyecto "Resonancia

The nopal cactus mucilage solution was found to have a chloride diffusion coefficient of  $1.0889 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ , whereas the water was found to have a coefficient of  $1.197 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ . This latter coefficient is in concordance with what is reported in the literature (27, 28). The results indicate that chloride diffusion in the mucilage solution should be 11 times lower than diffusion in water; however, this was not observed in the experimental results, where the diffusion coefficient was only lower by 20% at 120 days with zero days of curing and in other cases the diffusion coefficient was higher than in the specimens containing only water. When considering this discrepancy, it should be acknowledged that the changes in viscosity of the pore solution containing mucilage as a result of cement hydration and drying the samples in natural environment are unknown.

#### 4. CONCLUSIONS

- Nopal cactus mucilage decreases the fluidity of the pastes, acting as a viscosity modifying admixture, in addition to act as a retarding admixture, extending setting times.
- Calcium hydroxide, calcium silicate hydrate, and ettringite crystals can be observed in the microstructure of pastes prepared with w/c; in contrast, pastes prepared with m/c only exhibit ettringite and calcium silicate hydrate crystals.
- X-ray diffraction results indicate a small reduction of C<sub>3</sub>S and C<sub>2</sub>S between 3 and 28 days of age in pastes containing nopal cactus mucilage, compared to pastes containing only water, showing the retarding effect of mucilage on cement hydration.
- Nopal cactus mucilage significantly reduced capillary water absorption in all concrete mixtures moist cured for zero and seven days, with respect to the control mixtures.
- The chloride diffusion coefficient for concrete with m/c ratio=0.30, containing nopal cactus mucilage, was lower at all testing ages and for both moist curing periods, compared to the control. For concrete with m/c ratio= 0.45, nopal cactus mucilage contributed to decreasing the diffusion coefficient up to the age of 120 days for both curing times. For the concrete with m/c ratio=0.60, nopal cactus mucilage was found to decrease the diffusion coefficient only in concrete moist cured for seven days, compared to the control.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) of Mexico for funding the project "Resonancia

magnética nuclear como técnica no destructiva y no invasiva para estudiar microestructura y fenómenos del transporte en medios porosos”, Clave CB 103763, así como a la SIP del Instituto Politécnico Nacional de México por el apoyo económico al proyecto “Resonancia magnética nuclear para la evaluación no destructiva del desarrollo de propiedades mecánicas y refinamiento de porosidad en materiales basados en cemento”, clave SIP 20090461, 20100391 y 20110616.

Samuel Ramírez Arellanes y Fernando Julián Caballero agradecen al CONACYT la beca de estudios de Maestría recibida.

*magnética nuclear como técnica no destructiva y no invasiva para estudiar microestructura y fenómenos del transporte en medios porosos”, ID code CB 103763, as well as the SIP of the Instituto Politécnico Nacional of Mexico for funding the project “Resonancia magnética nuclear para la evaluación no destructiva del desarrollo de propiedades mecánicas y refinamiento de porosidad en materiales basados en cemento”, ID codes 20090461, 20100391, and 20110616.*

*Samuel Ramirez Arellanes and Fernando Julian Caballero would like to thank CONACYT for their generous Master’s degree scholarships.*

## BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Borges, P.; Castillo, R.; Carpio, J.; Pazini, J.; San Juan, M.: *Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. (2001).
- (2) Hernández-Castañeda, O.; Mendoza-Escobedo, C.: “Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico”, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. VII, nº 8 (2006), pp. 57-70.
- (3) Carino, N. J.; Clifton, J. R.: “High-Performance Concrete: Research Needs to Enhance its Use”, *Concrete International*, vol. 13, nº 9 (1991), pp. 70-76.
- (4) Neville, A. M.: *Properties of Concrete*, Longman Group Limited (1995).
- (5) Cardenas, A.; Arguelles, W. M.; Goycoolea, F. M.: “On the Possible Role of Opuntia ficus-indica Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings”, *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, vol. 3 (1998), pp. 1-8.
- (6) Chandra, S.; Eklund, L.; Villarreal R. R.: “Use of Cactus in Mortars and Concrete”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, nº 1 (1998), pp. 41-51 ([http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00254-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00254-8)).
- (7) Ruiz-García, S.: *Concreto autoconsolidable para climas cálidos utilizando solución de extracto de nopal y polvo de caliza*, MSc Thesis, Instituto Tecnológico de Oaxaca, México (2005).
- (8) Peschard, A.; Govin, A.; Grosseau, P.; Guilhot, B.; Guyonnet, R.: “Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 11 (2004), pp. 2153-2158 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.001>).
- (9) Coordinación General de comunicación social y divulgación, comunicado de prensa, IPN (2006).
- (10) Charley, H.: *Tecnología de alimentos, procesos químicos y físicos en la preparación de alimentos*, Limusa, México (2000).
- (11) ASTM C 305-99 Standard: Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency, ASTM International, West Conshohocken, PA (1999), 3 pp.
- (12) ASTM C230/C230M-08 Standard: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA (1999), 6 pp.
- (13) ASTM C807-08 Standard: Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle, ASTM International, West Conshohocken, PA (1999), 3 pp.
- (14) ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, ACI 211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan (1991).
- (15) Aitcin, P. C.; Metha, P. K.: “Principles Underlying Production of High-Performance Concrete”, The American Society for Testing and Materials, *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 12, nº 2 (1990), pp. 70-78.
- (16) ASTM C39/C39M-04 Standard: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA (1999), 6 pp.
- (17) ASTM C642-06 Standard: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA (1999), 3 pp.
- (18) NT BUILD 443, Approved 1995-11, NORDTEST METHOD “Concrete, hardened: accelerated chloride penetration”, *NORDTEST*, Tekniikantie 12, FIN-02150 ESPOO, Finlandia.
- (19) Knapen, E.; Gemert, D. V.: “Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, nº 1 (2009), pp. 6-13 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.10.003>).
- (20) Roncero, J.; Valls, S.; Gettu, R.: “Study of the influence of superplasticizers on the hydration of cement paste using nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction techniques”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, nº 1 (2002), pp. 103-108 ([http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00636-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00636-6)).

- (21) Tagnit-Hamou, A.; Saric-Coric, M.; Rivard, P.: "Internal deterioration of concrete by the oxidation of pyrrhotitic aggregates", *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, nº 1 (2005), pp. 99-107 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.030>).
- (22) Sáenz, C.; Sepúlveda, E.; Matsuhiro, B.: "Opuntia ssp mucilage's: a functional component with industrial perspectives", *Journal of Arid environment*, vol. 57, nº. 3 (2004), pp. 275-290 ([http://dx.doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00106-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00106-X)).
- (23) Torres-Acosta, A. A.; Cano-Barrita, P. F. de J.: "Las bondades del nopal", *Construcción y Tecnología*, nº 233 (2007), pp. 44-49.
- (24) Martín-Pérez, B.; Zibara, H.; Hooton R. D.; Thomas, M. D. A.: "A study of the effect of chloride binding on service life predictions", *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, nº 8 (2000), pp. 1215-1223 ([http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00339-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00339-2)).
- (25) Bentz, D. P.; Peltz, M. A.; Snyder K. A.; Davis J. M.: "VERDiCT: Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology", *Concrete International*, vol. 31, nº 1 (2009), pp. 31-36.
- (26) Shimizu, T.; Kenndler, E.: "Capillary electrophoresis of small solutes in linear polymer solutions: Relation between ionic mobility, diffusion coefficient and viscosity", *Electrophoresis*, vol. 20, nº 17 (1999), pp. 3364-3372 ([http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2683\(19991101\)20:17<3364::AID-ELPS3364>3.0.CO;2-X](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1522-2683(19991101)20:17<3364::AID-ELPS3364>3.0.CO;2-X)).
- (27) Cussler, E. L.: *Diffusion mass transfer in fluid systems*, second edition, Cambridge University Press (1997).
- (28) Pivonka, P.; Hellmich, C.; Smith, D.: "Microscopic effects on chloride diffusivity of cement pastes a scale-transition analysis", *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 12 (2004), pp. 2251-2260 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.010>).

\* \* \*