

# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO  
INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS  
NATURALES

## **TESIS**

**“PERMEABILIDAD A CLORUROS Y CARBONATACIÓN EN  
CONCRETO CONTENIENDO MUCÍLAGO DE NOPAL Y  
ALGINATO”**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**Presenta:**

EDDISSON FRANCISCO HERNÁNDEZ

**DIRECTORES DE TESIS:**

DR. PRISCILIANO FELIPE DE JESÚS CANO BARRITA

DR. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, Junio 2012



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

## ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 21 del mes de mayo del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Permeabilidad a cloruros y carbonatación en concreto conteniendo mucílago de nopal y alginato"

**Hernández**                      **Eddisson Francisco**  
Apellido paterno                      materno                      nombre(s)  
Con registro: 

A	1	0	0	6	3	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISION REVISORA

Directores de tesis:

\_\_\_\_\_  
Dr. Prisciliano Felipe de Jesus Cano Barrita

\_\_\_\_\_  
Dr. Andrés Torres Acosta

\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Montes García

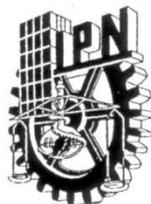
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Castellanos León

\_\_\_\_\_  
Dra. Lulcia Lagunez Rivera

### EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

\_\_\_\_\_  
Dr. Rafael Pérez Pacheco





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 21 del mes mayo del año 2012, el (la) que suscribe **Hernández Eddisson Francisco** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A100639**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dres. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y Andrés Torres Acosta y cede los derechos del trabajo titulado: **“Permeabilidad a cloruros y carbonatación en concreto conteniendo mucílago de nopal y alginato”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [edifh28@hotmail.com](mailto:edifh28@hotmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

**Hernández Eddisson Francisco**



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.



## RESUMEN

En esta investigación se utilizaron soluciones de mucílago de nopal y de alginato al 0.50% para sustituir el agua de mezclado, con el objetivo de determinar su efecto en los tiempos de fraguado e hidratación de pastas de cemento, así como en la resistencia a la compresión y en especial en las propiedades de durabilidad de concreto hidráulico. Las pastas de cemento y los concretos se elaboraron con relaciones agua/cemento = 0.30 y 0.60. En las pastas de cemento se determinaron los tiempos de fraguado con la aguja Vicat y se realizaron mediciones de espectroscopia infrarroja en función del tiempo para observar cambios en el proceso de hidratación del cemento a edades tempranas. Se colaron 288 especímenes cilíndricos de concreto midiendo 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud, los cuales se curaron en húmedo por 0 y 28 días a una temperatura de  $23 \pm 3$  °C. Las propiedades evaluadas en estado endurecido fueron la resistencia a la compresión, la absorción capilar de agua, la permeabilidad rápida a cloruros, la difusión de iones cloruro y la carbonatación a diferentes edades. Para conocer el posible efecto de estas adiciones en la solución de poro del concreto, se realizaron pruebas electroquímicas en varillas de acero embebidas en soluciones de mucílago de nopal y alginato a diferentes concentraciones. Los resultados en las pastas de cemento indican que las adiciones orgánicas incrementaron los tiempos de fraguado. Los espectros de FTIR mostraron únicamente un retardo en la aparición de portlandita en la pasta en estado fresco con relación a/c = 0.30 conteniendo mucílago de nopal. Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y propiedades de durabilidad indican en general una mejora en los concretos que contienen las adiciones orgánicas, dependiendo del tiempo de curado y edad del concreto. Las pruebas electroquímicas mostraron que las varillas embebidas en las adiciones estudiadas, principalmente las de mucílago de nopal, tuvieron mayor resistencia a la corrosión por cloruros.



## ABSTRACT

In this investigation cactus mucilage and alginate solutions were used at a concentration of 0.50% to replace the mixing water in cement pastes and concrete to determine their effect in setting times and hydration at early ages, as well as in compressive strength with particular emphasis in the durability properties of hydraulic concrete. The cement pastes and concrete mixtures were prepared with water to cement ratios of 0.30 and 0.60. In the cement pastes setting times with the Vicat needle were determined and FTIR measurements were undertaken at different ages to observe changes in the cement hydration. A total of 288 concrete specimen measuring 100 mm in diameter and 200 mm height were cast and moist cured for 0 and 28 days at a temperature of  $23 \pm 3$  °C. The properties measured in the hardened state were the compressive strength, capillary water absorption, rapid chloride permeability, chloride ion diffusion, and carbonation depth at different ages. In order to determine the possible effect of these additions in the concrete pore solution, electrochemical tests were performed on steel rods embedded in cactus mucilage and alginate solutions at different concentrations. The results in cement pastes indicate that the organic solutions increased the setting times. The FTIR spectra showed only a delay in the appearance of portlandite in the paste with water to cement ratio of 0.30, containing cactus mucilage. The results of compressive strength and durability properties in general indicate an improvement in the concrete mixtures containing the organic solutions, depending on the curing times and testing age. The electrochemical results showed that the steel rods embedded in the organic solutions, especially cactus mucilage, had a higher corrosion resistance to chlorides.



## **DEDICATORIA**

### **A DIOS**

Por darme la oportunidad de la vida y disfrutar con alegrías y pesares la dicha de estar vivo. Por ser la guía de mí camino, un padre amoroso y comprensivo que a cada momento me brinda su mano amiga para poder levantarme de cada una de mis caídas. Por darme la fortaleza de ser lo que hasta hoy he podido llegar a ser y por brindarme hermosas bendiciones a como son mi familia y amigos. *“Lo que sea que es, es en Dios, y sin Dios nada puede ser o concebirse”*-Baruch Spinoza.

### **A MI FAMILIA**

A mi madre María Dolores Hernández que con su sacrificio de madre y apoyo incondicional, ha sido el justo cimiento que me ha permitido crecer como hombre, profesional y padre de familia. A la memoria de mi hermano (q.e.p.d) Ronaldo Elías Zelaya Hernández del cual su recuerdo permanece imperturbable en mi mente y corazón. A mis tíos Milagros Hernández, Ramón García y Teresa Hernández que a lo largo de mi vida han influido en mi formación con su cariño y apoyo sincero.

### **A MI ESPOSA E HIJA**

A mi esposa Magdaly Yessenia Zeledón Acevedo que con su fe en Dios y amor verdadero se dispuso a acompañarme durante el tiempo que me tomó realizar esta empresa. Por su comprensión, ayuda y por ser de manera especial el eslabón fuerte que Dios nos ha puesto para mantener vivo la gracia del matrimonio. A mi pequeña hija, Virginia Marcela Hernández Zeledón por ser la fuerza motriz de mis esfuerzos y por la felicidad que me ha dado con el hecho de tenerla en vida.



## AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita**, por ser mi mentor en mi formación como investigador. Por su paciencia acompañada de su entrega a la enseñanza del que hacer científico, su humildad al compartir sus conocimientos, pero sobre todo, su apoyo, confianza y amistad sincera que me ha brindado.

Al **Dr. Andrés Antonio Torres Acosta**, por ser mi asesor y contribuir en el mejoramiento de mi trabajo de investigación. Agradezco su gestión y apoyo brindado durante mi estancia de investigación en la Universidad Marista de Querétaro, y de manera especial el calor humano y amistad que me brindó junto con su familia.

Al **Dr. Pedro Montes García**, por ser un formador de investigadores comprometidos por la buena práctica de la ciencia, por sus consejos y críticas constructivas hechas a mi trabajo de investigación con el propósito de mejorarlo.

Al **Instituto Politécnico Nacional y CIIDIR Unidad Oaxaca**, por ser la casa de estudio que me acogió para poder realizar mis estudios de posgrado y por todo el apoyo brindado.

Al **Instituto Politécnico Nacional**, por el apoyo económico de la beca de movilidad con la cual hice posible mi estancia de investigación y becas PIFI.

Al **Gobierno Mexicano**, por permitir que alumnos extranjeros ingresen a los programas de posgrado impartidos en toda la república en iguales condiciones y derechos que sus ciudadanos. Y de manera encarecida al **pueblo Mexicano** que es el benefactor de esta formación.

A mi comisión revisora: **Dr. Francisco Castellanos y Dra. Luicita Lagunez**, por su el tiempo invertido en la revisión de mi trabajo de tesis y comentarios hechos al respecto con el fin de mejorarlo.

A **mis compañeros del CIIDIR**, de manera especial a mi amigo Juanito Carrasco Benitez, que desde mi llegada a Oaxaca me brindó amistad sincera y ayudó en lo posible a sentirme como en casa. A Floriberto Díaz, Susana Hernández, Ana Rojas, Francisco Contreras y Jesús Rojas por su amistad y haber compartido juntos buenos momentos. A mis amigos del área de construcción y química: Ur Hernández, Frank León, Samuel Ramírez, Erika Fabiola, Filiberto y Laura Aquino; por su amistad y compañerismo.



Al **Conacyt** por financiar los proyectos: Resonancia magnética nuclear como técnica no destructiva y no invasiva para estudiar microestructura y fenómenos del transporte en medios porosos, Clave Conacyt CB 103763; Desarrollo tecnológico de aditivos sustentables de alto valor agregado para la industria del concreto: modificadores de viscosidad, aligerantes y desmoldantes. Conacyt-Herrozinc (2011), Clave Conacyt 150440; Desarrollo de aditivos, compuestos y energía sustentables para la industria del concreto. Conacyt-Herrozinc (2010), Clave Conacyt 137669.

A la **SIP del IPN** por financiar el proyecto: Resonancia magnética nuclear para la evaluación no destructiva del desarrollo de propiedades mecánicas y refinamiento de porosidad en materiales basados en cemento, Claves SIP-IPN 20100391, 20110616 (2009-2011)



## ÍNDICE

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
DEDICATORIA .....	v
A DIOS .....	v
A MI FAMILIA.....	v
A MI ESPOSA E HIJA .....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
JUSTIFICACIÓN.....	4
ANTECEDENTES.....	6
OBJETIVO GENERAL.....	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
HIPÓTESIS.....	15
CAPÍTULO II-MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	16
2.1 Concreto .....	16
2.1.1 Cemento portland.....	16
2.1.1.1 Composición química del cemento portland .....	17
2.1.1.2 Hidratación del cemento portland .....	18
2.1.1.2.1 Calor de hidratación .....	20
2.2 Durabilidad .....	22
2.2.1 Permeabilidad .....	23
2.2.1.1 Permeabilidad en concreto .....	24
2.2.1.2 Absorción capilar y porosidad.....	24
2.2.2 Difusión de iones cloruro en concreto.....	26
2.2.3 Carbonatación del concreto .....	29
2.2.3.1 Principales reacciones de carbonatación en el concreto .....	29
2.2.3.2 Factores que afectan la carbonatación.....	31



2.3 Espectroscopia IR.....	31
2.2.4 Corrosión del acero de refuerzo.....	33
<b>CAPÍTULO III-MATERIALES Y MÉTODO .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Materiales.....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Cemento.....	37
3.1.2 Agregados pétreos.....	37
3.1.3 Obtención y caracterización de mucílago de nopal.....	39
3.1.3.1 Extracción de mucílago de Nopal.....	39
3.1.4 Preparación de solución de alginato y caracterización.....	40
3.1.4.1 Preparación de solución de alginato al 0.50 %.....	40
3.1.5 Superplastificante.....	41
<b>3.2 Preparación y caracterización de pastas de cemento.....</b>	<b>41</b>
3.2.1 Tiempos de fraguado.....	41
3.2.2 Espectroscopia IR.....	42
<b>3.3 Mezclas de concreto.....</b>	<b>44</b>
3.3.1 Diseño de experimentos.....	44
3.3.2 Diseño y elaboración de mezclas para la fabricación de especímenes.....	45
3.3.3 Propiedades del Concreto endurecido.....	46
3.3.3.1 Resistencia a la compresión axial.....	46
3.3.3.2 Absorción capilar y porosidad.....	47
3.3.3.3 Permeabilidad y difusión de cloruros.....	49
3.3.3.3.1 Prueba rápida de permeabilidad a cloruros (RCPT).....	49
3.3.3.3.2 Coeficientes de difusión del ion cloruro.....	50
3.3.3.4 Carbonatación acelerada del concreto.....	52
<b>3.4 Pruebas electroquímicas en barras de acero.....</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO IV- RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1 Pastas de cemento.....</b>	<b>56</b>
4.1.1 Tiempo de fraguado.....	56
4.1.2 Espectroscopia IR.....	58
4.1.2.1 Mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i> .....	58
4.1.2.2 Alginato.....	59

4.1.2.3	Influencia de las adiciones de mucílago en las pastas de cemento.....	60
4.1.2.4	Influencia del alginato en las pastas de cemento .....	63
4.2	Influencia del mucílago de nopal y alginato en concreto .....	66
4.2.1	Resistencia a la compresión axial.....	66
4.2.2	Sorptividad y porosidad (ASTM C 642) .....	73
4.2.2.1	Sorptividad .....	73
4.2.2.2	Porosidad .....	76
4.2.3	Permeabilidad y difusión de cloruros.....	79
4.2.3.1	Prueba rápida de permeabilidad a cloruros (paso de carga en Coulombs) – ASTM C1202-97.....	79
4.2.3.2	Coefficientes de difusión del ion cloruro .....	85
4.2.4	Carbonatación acelerada del concreto .....	88
4.3	Pruebas electroquímicas .....	92
4.3.1	Potenciales de media celda .....	92
4.3.2	Resistencia a la polarización lineal .....	96
	CONCLUSIONES .....	100
	REFERENCIAS.....	102

### Índice de Figuras

Figura 1-	Velocidad de liberación de calor de pasta de cemento portland durante el fraguado y el endurecido a edades tempranas (Mehta y Monteiro, 2006). .....	21
Figura 2-	Modelo Holístico de deterioro del concreto por efectos ambientales (Mehta, 1998). ..	22
Figura 3-	Columna de concreto afectada por la carbonatación. ....	31
Figura 4-	Diagrama de una celda electrolítica. ....	34
Figura 5-	Curvas granulométricas del agregado grueso utilizado y límites ASTM C33-03 .....	38
Figura 6-	Curvas granulométricas del agregado fino utilizada y límites ASTM C33-03 .....	38
Figura 7-	Método de extracción de mucílago .....	40
Figura 8-	Hojas de nopal cortadas.....	40
Figura 9-	Aparato de Vicat.....	42
Figura 10-	Esquema de la prueba de absorción de agua por capilaridad.....	48
Figura 11-	Esquema de la prueba rápida de permeabilidad a cloruros. ....	49



Figura 12- Herramienta extractora de polvos de concreto. ....	51
Figura 13- Esquema de la prueba acelerada de carbonatación.....	53
Figura 14- Celdas electroquímicas control (agua), con mucilago (0.5% y 1%) y alginato (0.5% y 1%).....	54
Figura 15- Celdas electroquímicas con 7 varillas de acero de refuerzo .....	54
Figura 16- Potenciostato Gamry Instruments, Inc. PCI4/750, conectado a celda electroquímica. ....	55
Figura 17- Tiempos de fraguados para distintas pastas de cemento con relación a/c=0.30. ....	56
Figura 18- Tiempos de fraguados para distintas pastas de cemento con relación a/c=0.60. ....	57
Figura 19- Espectro de mucílago de Opuntia Ficus Indica.....	58
Figura 20- Espectro de IR para alginato.....	60
Figura 21- Espectros de pastas de cemento a/c=0.60 con adiciones de mucílago de nopal (1% de concentración) en función del tiempo. ....	61
Figura 22- Espectros de pastas de cemento a/c=0.30 con adiciones de mucílago de nopal (1% de concentración) en función del tiempo. ....	62
Figura 23- Espectros de pastas de cemento a/c=0.60 con adiciones de alginato (1% de concentración) en función del tiempo. ....	64
Figura 24- Espectros de las pastas de cemento a/c=0.30 con adiciones de alginato (1% de concentración) en función del tiempo. ....	65
Figura 25- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto HPC, a/c= 0.30 a los 60 días. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	66
Figura 26- Resistencia a la compresión axial en especímenes elaborados con concreto ordinario, autoconsolidable y de alto desempeño a edades de 28 y 56 días (Cano et al., 2010). Las barras de error indican una desviación estándar. ....	67
Figura 27- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto HPC, a/c= 0.30 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	68
Figura 28- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto ACI, a/c= 0.60 a los 60 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	69
Figura 29- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto ACI, a/c= 0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	71



Figura 30-Absorción de agua en cilindros de concretos relación $a/c=0.30$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	74
Figura 31-Absorción de agua en cilindros de concretos relación $a/c=0.60$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	74
Figura 32-Volumen de poros permeables en cilindros de concretos relación $a/c=0.30$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	77
Figura 33-Volumen de poros permeables en cilindros de concretos relación $a/c=0.60$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	78
Figura 34- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto HPC, $a/c= 0.30$ a los 60 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.....	79
Figura 35- Paso de carga (Coulombs) en especímenes elaborados con concreto ordinarios, autoconsolidables y de alto desempeño a edades de 28 días. (Cano et al., 2010). Las barras de error indican una desviación estándar. ....	80
Figura 36- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto HPC, $a/c= 0.30$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	81
Figura 37- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto ACI, $a/c= 0.60$ a los 60 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.....	82
Figura 38- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto ACI, $a/c= 0.60$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.....	83
Figura 39- Correlación entre RCPT y compresión a 120 días, HPC. ....	84
Figura 40- Correlación entre RCPT y compresión a 120 días, ACI. ....	85
Figura 41- Coeficientes de difusión de $Cl^-$ en especímenes de concreto HPC, $a/c=0.30$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	86
Figura 42- Coeficientes de difusión de $Cl^-$ en especímenes de concreto ACI, $a/c=0.60$ a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar. ....	87
Figura 43- Esquematización de toma de mediciones de profundidad de carbonatación en concretos ACI (a) y HPC (b).....	88
Figura 44- Profundidad de carbonatación en concretos HPC, $a/c=0.30$ a los 180 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.....	89
Figura 45- Profundidad de carbonatación en concretos ACI, $a/c=0.60$ a los 180 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.....	90



Figura 46- Coeficientes de carbonatación, concretos HPC, a/c=0.30 a los 180 días de edad. ....	91
Figura 47- Coeficientes de carbonatación, concretos ACI, a/c=0.60 a los 180 días de edad. ....	92
Figura 48-Potencial vs tiempo, celda control. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl. ....	93
Figura 49-Potencial vs tiempo, celda con mucílago de nopal a 0.50% de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl. ....	94
Figura 50-Potencial vs tiempo, celda con mucílago de nopal a 1.0 % de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl. ....	94
Figura 51-Potencial vs tiempo, celda con solución de alginato a 0.50 % de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.....	95
Figura 52-Potencial vs tiempo, celda con solución de alginato a 1.0 % de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.....	95
Figura 53-Rp promedios vs tiempo de todas las celdas electroquímicas probadas. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl. ....	97
Figura 54-Eficiencia inhibidora (%) vs concentración de cloruros en el electrolito. ....	99

### Índice de tablas

Tabla 1- Composición química del cemento portland .....	18
Tabla 2- Calor de hidratación de componentes del cemento portland (Mehta y Monteiro, 2006) .....	21
Tabla 3- Regiones de espectros de IR.....	32
Tabla 4- Composición química del cemento empleado .....	37
Tabla 5- Componentes principales del cemento empleado.....	37
Tabla 5- Caracterización de los agregados pétreos. ....	38
Tabla 7 - Características del súper-plastificante utilizado. ....	41
Tabla 8- Determinación del número de pastas de cemento .....	42
Tabla 9- Pastas de cemento con adiciones de mucílago y alginato para IR. ....	43
Tabla 10- Nomenclatura y Características de las muestras analizadas en IR .....	43
Tabla 11- Cantidad de especímenes elaborados para desarrollar el experimento.....	44
Tabla 12- cantidad de especímenes de concreto elaborados. ....	45



**Tabla 13- Proporciones para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto de las mezclas de concreto utilizadas..... 46**

**Tabla 14- Propiedades en estado fresco de los concretos elaborados. .... 46**

**Tabla 15- Criterios de evaluación en porcentaje de vacíos..... 49**

**Tabla 16– Valores según la norma ASTM C 1202 “permeabilidad a cloruros basado en paso de carga”. .... 50**

**Tabla 17- Porcentaje de humedad, 120 días..... 71**



## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo. Es un material compuesto resultante de mezclar en ciertas proporciones cemento portland, agua y agregados pétreos (Mehta, 1998). La industria de la construcción y la del concreto específicamente, representa una de las más grandes en el mundo como consecuencia de su alta demanda (Braston, 2005), razón por la cual se producen mundialmente aproximadamente ocho billones de metros cúbicos de concreto al año, lo que equivale a un poco más de un metro cúbico por persona en relación con la población mundial (Mehta, 1997).

Desde inicios del siglo XX hasta nuestros días, el empleo del concreto como material estructural para la construcción se ha intensificado debido a sus características de resistencia a la compresión, fácil moldeo y bajo costo (Wallevik, 2008). Sus aplicaciones a través del tiempo han sido muy diversas, siendo usado tanto en la construcción de aceras, pavimentos, puentes, viaductos, hasta enormes presas y edificios de gran altura. Anteriormente, el concreto se consideraba como un material con una vida útil larga. Sin embargo, basados en la experiencia acerca de los daños encontrados en muchas estructuras a lo largo de los años, se ha demostrado que esta aseveración no es correcta, teniendo como causa principal problemas de durabilidad relacionados con su exposición en ambientes hostiles (Mehta, 1999; Hernández-Castañeda et al, 2006).

Por lo tanto, cuando se reduce la durabilidad del concreto, se afecta el desempeño estructural que tendrán las construcciones, reduciendo su vida de servicio y en muchas ocasiones generando grandes repercusiones económicas, las que son consideradas como puntos claves al momento de determinar la rentabilidad de un proyecto (Hernández-Castañeda et al, 2006). Como respuesta a esta situación, se han desarrollado desde inicios de 1970 hasta la fecha distintos tipos de concreto mejorados a los que se les denominan “concretos de alto desempeño”, cuyo propósito es cumplir con los requerimientos de



diseño necesarios para alcanzar una mayor durabilidad (Mehta et al, 2001). Sin embargo tienen el inconveniente de que para poder elaborarlos se requiere del empleo de aditivos químicos y materiales suplementarios, además del cumplimiento de ciertos parámetros de diseño y de una buena práctica de elaboración para que sean efectivos (Branston, 2005, Navarro et al., 2005).

El uso de aditivos y materiales suplementarios en el concreto tiene como objetivo obtener un material más denso e impermeable que reduzca la penetración de agentes agresivos, aumente la resistencia a la compresión, reduzca el agrietamiento y proteja el acero de refuerzo; y con ello contribuya al mejoramiento de su durabilidad (Hoff, 1991).

En base a lo descrito anteriormente, en esta investigación se estudiará el uso del mucilago de nopal y alginato en pastas de cemento y concreto, con el propósito de brindarlos como alternativas de aditivos ecológicos y de bajo costo, que mejoren las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto hidráulico.

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El concreto como material de construcción tuvo gran impacto en los años 30 del siglo pasado, en ese entonces se creyó que las estructuras de concreto tendrían una vida útil al menos de 40 a 50 años y que requerirían de poco o nulo mantenimiento. Sin embargo, esta presunción no resultó del toda cierta y se justificó con el hecho de que muchos puentes de concreto construidos antes de 1970 en Estados Unidos presentaron diferentes grados de deterioro en la superficie de sus cubiertas, afectando la durabilidad de la estructura y reduciendo su vida útil, según el informe del National Materials Advisory Board en 1987 (Mehta, 1997).

El problema de durabilidad en estructuras de concreto ha generado implicaciones de carácter socio-económicas, ejemplo de ello es el caso de los Estados Unidos en 1986, donde la afectación en las estructuras de concreto del transporte intermodal tuvo un costo de \$ 20 billones de dólares por trabajos de reparación y mantenimiento, y el del Reino Unido, otro país industrializado, donde se destinan al año aproximadamente un 40%



de su inversión para el área de construcción, reparación y mantenimiento de estructuras y edificios, lo que representa un alto gasto de recursos que podrían ser utilizados de manera más benéfica en proyectos de carácter social (Buffenbarger, 1998; Neville, 2001).

El empleo del concreto como material de construcción se ha intensificado principalmente por el aumento poblacional y el crecimiento urbano, en la demanda de mayor cantidad de obras de infraestructura y vivienda (Mehta, 1997). Los problemas sobre durabilidad del concreto se han presentado principalmente en estructuras cercanas a sitios costeros, así como en las ciudades a grandes distancias de éstos.

La carbonatación es una reacción entre el bióxido de carbono en la atmósfera con el hidróxido de calcio, el cual es uno de los principales productos de la hidratación del cemento portland, teniendo como resultado la formación de carbonato de calcio. Este cambio de especies del material (hidróxido de calcio a carbonato de calcio) genera también una disminución en el pH del agua que está contenida en los poros del concreto, que puede ir de un pH mayor a 13, hasta un pH entre 9 y 10 (Moreno, 1999). Si el concreto se carbonata hasta la profundidad donde se encuentra el acero de refuerzo, su protección contra la corrosión, debida a los hidróxidos de fierro formados en su superficie por el pH alcalino del agua de poro del concreto, es eliminada (Pade et al, 2007).

En el caso de concretos expuestos a ambientes costeros, su durabilidad se reduce debido a la acción de agentes agresivos, tales como los iones cloruro y la humedad que penetran el material a través de su red de poros causándole deterioro. Algunos de estos agentes provocan daños directos al concreto, sin embargo el mayor daño es el causado por la corrosión del acero de refuerzo que reduce el área de su sección transversal, causando agrietamiento y desprendimiento del concreto, además de la disminución de la resistencia mecánica de las estructuras (Solís et al, 2005).

Para evitar el deterioro del concreto hoy en día existen mezclas que contienen materiales suplementarios y aditivos químicos que mejoran su durabilidad (Hoff, 1991). En los países altamente industrializados hacen uso de estos materiales con el propósito de mejorar la



resistencia mecánica e impermeabilidad en el concreto. De manera contraria, en los países en vías de desarrollo la implementación de estos materiales es casi nula como consecuencia de sus altos costos.

Ante esta situación se plantea la necesidad de investigar mezclas de concretos con aditivos naturales tales como el mucilago de nopal y alginato, con el propósito de determinar si su empleo conducirá a mejorar su durabilidad, específicamente en lo referente a reducir la permeabilidad a cloruros y la carbonatación. Los resultados a obtener podrían conducir a catalogar estos materiales como una alternativa económica para la sustitución de aditivos químicos y adiciones minerales, gracias a su abundancia en algunos países y a su bajo costo de producción, de manera específica para el caso del mucílago de nopal.

### **JUSTIFICACIÓN**

El empleo del concreto como material de construcción se ha incrementado, por ser de uso común en México y en el resto del mundo. Ejemplo de ello es el aumento en la producción anual de cemento (el principal componente aglutinante) en este país, el cual ha pasado de una producción en 1911 de aproximadamente de 7.5 miles de toneladas hasta 45 000 miles de toneladas en el 2009 (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. 2010). De manera paralela al incremento en el consumo de cemento en el mundo, la industria de la construcción ha progresado en términos tecnológicos relacionados con los concretos de alto desempeño, los cuales son logrados únicamente a través del uso de aditivos químicos y materiales suplementarios. Un ejemplo de éstos concretos es el autoconsolidable, el cual surgió de la necesidad de dar soluciones a los problemas de durabilidad ocasionados principalmente por la exposición de las estructuras de concreto a ambientes hostiles, así como la reducción costos y tiempo en la ejecución de proyectos (Zhu, 2003). La implementación de estos concretos ha traído grandes beneficios a la industria de la construcción tales como el aumento en la productividad, calidad y trabajabilidad del concreto.



México en la actualidad posee diversas empresas privadas dedicadas a la fabricación de cementos, ubicándolo en el 6to lugar a nivel mundial de producción (Nájera, 2002). Estas empresas se dedican además a la elaboración de concretos simples y especializados, realizados bajo normas nacionales e internacionales. El acceso a concretos especializados para construcciones de bajo valor económico como viviendas residenciales resulta muy costoso. Sin embargo, en proyectos de alto valor económico su empleo resulta factible dado que es una buena manera de asegurar la inversión a través del tiempo, debido a que incrementa la vida útil de la estructura y reduce los costos de mantenimiento. Una posible alternativa para tener acceso a estos tipos de concretos con menores costos de producción es mediante el uso de aditivos naturales con los cuales se logre mejorar algunas propiedades mecánicas y alcanzar una mayor durabilidad.

La experimentación con aditivos naturales como el mucílago de nopal y el alginato en pastas de cemento y concretos en esta investigación, tiene como propósito obtener información sobre los fenómenos de difusión de cloruros, carbonatación, permeabilidad a cloruros y sus propiedades mecánicas a diferentes edades. Es importante destacar que el uso de estos tipos de aditivos naturales podría contribuir a la reducción del uso de aditivos sintéticos que requieren de procesos industriales y que son dañinos al medio ambiente y de manera indirecta contribuir a la economía del país.



## **ANTECEDENTES**

Para dar soporte a esta investigación se hizo una revisión de estudios realizados anteriormente relacionados con el uso del mucílago de nopal y alginato en materiales basados en cemento. Es preciso señalar que no se encontró información similar al caso que se plantea, sin embargo, existen estudios sobre el uso del mucílago de nopal en concreto relacionados con el efecto que éste tiene en sus propiedades mecánicas y la difusión de iones cloruro, y sobre alginato, en su empleo como aditivos en materiales de construcción, de manera específica en materiales a base de arcilla con el objetivo de mejorar algunas de sus propiedades mecánicas.

### **Mucílago de nopal**

Cárdenas et al. (1997) el objetivo de su investigación fue el de evaluar el comportamiento reológico de los polisacáridos aislados presentes en el mucílago de nopal. Determinaron su peso molecular, el cual fue mayor que el reportado en investigaciones anteriores realizadas por Trachtenberg and Mayer (1982), lo que puede indicar la formación de grandes agregados macromoleculares en la solución. La extracción se hizo mediante ciclos de centrifugado a la solución obtenida de hervir a 80 °C hojas de nopal en solución de etanol, la que posteriormente fue liofilizada; el rendimiento obtenido fue de 0.7 g/kg de nopal. La distribución de masa molecular se hizo con un equipo de cromatografía convencional HPLC (cromatografía líquida de alta resolución), los resultados del análisis fue que el peso promedio ( $M_w$ ) y el promedio de masa molecular ( $M_n$ ) del extracto de mucílago fueron de  $3.4 \times 10^6$  y  $2.4 \times 10^6$  respectivamente, dando como resultado un índice de 1.4 en la relación  $M_w/M_n$ . El mucílago empleado para el comportamiento reológico se preparó con una solución de 0.1 M NaCl y 0.02% de azido sódico para prevenir el deterioro a temperatura ambiente. La geometría empleada fue cono-plato a temperatura de 20° C. Tres soluciones de mucílago fueron sujetas a pruebas de deformación oscilatorias de baja amplitud, el comportamiento mostrado fue el de una red desordenada o cadena enredada de polímeros. Los resultados de las curvas de esfuerzos de corte en soluciones con diferentes concentraciones (1%, 1.6% y 2%) fueron diferentes, mostrando



un comportamiento no newtoniano, a menudo descrito como pseudoplásticos el cual incrementa con la concentración. La interpretación que se ofrece al respecto mediante microscopia electrónica de barrido, es que se evidencia un gran ramal de agregados dispersos en la solución, que puede ser aprovechado para aplicaciones para la industria alimenticia, farmacéutica o de otra índole, como agente espesante, clarificante en bebidas de agua o como aglutinante.

Cárdenas et al. (1998), el objeto de su investigación fue proveer una explicación preliminar sobre el uso de mucílago de nopal como agente impermeabilizante en morteros de cal, basado que en México durante siglos se ha empleado el jugo de nopal en la preparación de morteros de cal para la restauración y protección de edificios históricos, debido a que mejora su desempeño contra la penetración de agua y el agrietamiento. Para su evaluación se elaboraron pastas con hidróxido de calcio y cal apagada comercial con mucílago de nopal en diferentes concentraciones (1%, 2% y 3%) con relaciones mucílago/cal-hidróxido de calcio de  $m/c=0.65\%$ , 1 % y 1.95%. El tamaño de las muestras preparadas fueron de 1.1 cm de alto y 1.3 cm de diámetro, las cuales fueron secadas al horno durante 4 horas a temperatura de 60 °C y sometidas a prueba de resistencia a la compresión. Los resultados muestran que en las pastas con relaciones mucílago/cal-hidróxido de calcio de  $m/c=0.65\%$  y 1%, se redujo la resistencia con respecto al control, debido a que se forma una estructura más quebradiza, argumentada por la modificación estructural provocada por los polisacáridos del nopal que forman una red de conectividad suave y heterogénea. Sin embargo, en la pastas con relación  $m/c= 1.95\%$  se observan incrementos en la resistencia, debido a la formación de una red inter-penetrada de polisacáridos e hidróxidos de calcio, formada cuando dos redes independientes se entrelazan unas con otras e incrementan la conectividad mecánica en toda la red, haciendo una estructura homogénea en toda la mezcla.

Chandra et al. (1998) experimentaron con morteros y concretos conteniendo soluciones de mucílago de nopal. Para la extracción del mucílago, se cortaron hojas de nopal en piezas delgadas y se mezclaron con agua, en proporción 1:3 por peso. Se almacenaron a



temperatura ambiente durante dos días en un contenedor plástico hermético y posteriormente se extrajo el mucílago. La proporción de los morteros fue 1:3 cemento-arena en peso, y con relación agua/cemento constante de  $a/c=0.50$ . Se elaboraron tres tipos de mortero, una control sin extracto de nopal y otras dos con mucílago de nopal al 50% y 100%, en sustitución del agua de mezclado. En cuanto a trabajabilidad, se encontró que el mucílago de nopal incrementó la plasticidad de los morteros, debido al efecto que producen los polisacáridos que contiene de disminuir la fricción entre las partículas, presentándose de manera más pronunciada en los morteros con mayor concentración, además que mejora sustancialmente la resistencia a la absorción de agua. Se pudo observar que el extracto de nopal produjo efectos retardantes en las muestras debido al carácter hidrofílico de los polisacáridos de retener agua, lo que conlleva a reaccionar más lento con el cemento; sin embargo a largo plazo mejora los productos de hidratación dado que reduce el tamaño y cantidad de los cristales de hidróxido de calcio, reduce el agrietamiento y aumenta la resistencia a la compresión.

Torres-Acosta et al. (2007), estudiaron en pastas de cemento y morteros los efectos que produce la adición de nopal y sábila deshidratada en la resistencia a la compresión y el beneficio del empleo del mucílago de nopal como agente modificador de viscosidad para la fabricación de concreto autoconsolidables. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión en morteros con adiciones de 1%, 2% y 4% de nopal y sábila deshidratada en peso en sustitución de cemento, muestran que los que contenían nopal tuvieron valores similares al control a pesar del aumento en la cantidad de agua necesaria para alcanzar un mismo valor de fluidez, en cambio los que contenían sábila se redujo hasta en 28%, con respecto al control. En las pastas de cemento elaboradas con mucílago de nopal, se reemplazó parte del cemento por polvo de caliza y ceniza volante en 30%, 40% y 50% en peso, con el propósito de reducir el costo del material cementante. De ellas, se estudió la viscosidad para lo cual se realizaron pruebas de fluidez, encontrándose que con las de mucílago de nopal incrementaron la viscosidad al reducir el área relativa de flujo. En los morteros realizados se empleó una relación fija agua/cemento de  $a/c=0.35$ , y dos tipos de



mezclas, un control (agua) y otra con 100% de mucílago de nopal por agua de mezclado, con curados de 1 y 7 días. Los resultados de resistencia a la compresión a los 28 y 56 días, mostraron que los morteros con mucílago de nopal incrementaron la resistencia hasta un 16% en comparación con el control, y que en pruebas de absorción de agua, las muestras con mucílago hacen morteros más impermeables con respecto al control.

Ramírez (2008), estudió la hidratación y microestructura de concreto conteniendo mucílago de nopal. Su experimentación consistió en emplear cemento portland blanco y mucílago de nopal extraído mediante el método escaldado o vapor, decantado y con 1% de benzoato de sodio para evitar su descomposición, para usarse en la elaboración de mezclas de mortero y concreto. Las mezclas de mortero con relación  $a/c=0.30, 0.45$  y  $0.60$ , se elaboraron con y sin mucílago de nopal, y se les realizaron pruebas de extensibilidad en la mesa de fluidez, tiempos de fraguado, se obtuvieron imágenes de la microestructura con microscopía electrónica de barrido (MEB), y se estudió hidratación del cemento mediante difracción de rayos X (DRX) a 28, 56 y 120 días. Las mezclas de concreto se diseñaron de acuerdo al método ACI 211, para las relaciones  $0.45$  y  $0.60$ , y para la relación  $0.30$ , se utilizó el método HPC. Los tiempos de curado en húmedo de los especímenes fueron de 0 y 7 días. Los resultados de las pruebas en pastas y concretos con relaciones agua/cemento de  $0.30, 0.45$  y  $0.60$ , fueron: que el mucílago aumentó la viscosidad y disminuyó la extensibilidad en las pastas de cemento; en la microestructura de la pasta no se formaron cristales de hidróxido de calcio a diferencia de la muestra de control, el mucilago actuó como agente retardante en el fraguado y hubo un aumento en la resistencia de compresión axial y en el módulo de elasticidad en los concretos con relación mucílago/cemento de  $0.30$ , y una reducción para los de  $0.45\%$  y  $0.60\%$  con respecto a las muestras de control.

Caballero (2008), estudió la absorción capilar de agua y la difusión de cloruros en concretos conteniendo mucílago de nopal. Para esta investigación, las mezclas fueron elaboradas con relaciones de mucílago/cemento de  $m/c=0.30, m/c=0.45$  y  $m/c=0.60$ . El curado de los especímenes se hizo a 0 y 7 días a temperatura ambiente de  $23\pm 3$  °C. Se



realizaron pruebas de secado, absorción capilar unidireccional (a los 28, 56 y 120 días), pruebas de porosidad y finalmente se determinó el coeficiente de difusión a cloruros de acuerdo el método NORDTEST NT BUILD 443, a distintas edades del concreto. Los resultados obtenidos fueron que en las mezclas con relación  $m/c=0.30$  se redujo la pérdida de humedad hasta 120 días a diferencia de las muestras sin mucílago, en tanto las muestras con relación  $m/c=0.45$  y  $m/c=0.60$  perdieron mayor cantidad de humedad. La absorción capilar se redujo en todas las muestras con adiciones, en cambio la porosidad capilar únicamente se hizo menor en las muestras con relación de  $m/c=0.30$ , esto con respecto a las mezclas control. Con respecto al coeficiente de difusión de cloruros, se encontró que éste fue menor en las muestras con relación  $m/c=0.30$  en las diferentes edades de prueba; sin embargo, en los especímenes con relación  $m/c=0.45$  y  $m/c=0.60$  se presentaron reducciones hasta los 120 días. Finalmente se concluye que en los concretos con relación  $m/c=0.30$  y con curado de siete días, el inicio de corrosión del acero se proyecta en un tiempo aproximado de 15 años con respecto al control; sin embargo, en los concretos con relaciones de  $m/c=0.45$  y  $m/c=0.60$  no se observa ningún beneficio en este sentido.

Torres-Acosta (2007), realizó investigación sobre el uso del mucílago de nopal como inhibidor de corrosión del acero de refuerzo. Realizó pruebas en barras de acero de 9.5 mm de diámetro colocadas en 4 celdas electroquímicas, una con solución de hidróxido de calcio saturada (HCS), y el resto con solución de nopal con 0.5, 1.0 y 2% de concentración. La estabilización potencial se hizo en 24 horas, y la contaminación de cloruros de 25 hasta 128 días. Las mediciones electroquímicas se hicieron de manera periódica usando una impedancia de 200 M $\Omega$ , además del empleo de un sistema de medición a la corrosión A PC14/750. El análisis microscópico se hizo en microscopio óptico después de su periodo de exposición y secadas en laboratorio por 7 días a temperatura ambiente, donde se fotografiaron los segmentos para posteriormente ser comparados.

El resultado obtenido fue que la solución de nopal como aditivo se comportó como un inhibidor a la corrosión del acero de refuerzo en soluciones alcalinas contaminadas con



cloruros. Los resultados de las pruebas de resistencia a la polarización del acero en soluciones alcalinas con mucílago fueron 4 veces mayores que las que no contenían solución nopal. Por otro lado, con base a imágenes por microscopia se observó que en la superficie del acero después de haber realizado la prueba, la resistencia a la corrosión mejoró debido a la formación de una capa densa de óxido/hidróxido resultado de la reacción del mucílago con el acero de refuerzo, inhibiendo el deterioro debido a los cloruros.

Mattone (2004) estudió con el objetivo de mejorar la técnica de bajareques, el uso de tierra reforzada con fibra de sisal estabilizada con cemento y pulpa de nopal. Realizó pruebas de resistencia a la tensión, resistencia a la abrasión, absorción de agua y pruebas de erosión; los resultados fueron comparados con otros obtenidos de aglutinantes tradicionales usados en la tecnología de suelo. Elaboró losas de cinco diferentes composiciones: suelo (control), suelo-cemento (10%), suelo-cemento (10%) con fibra de sisal (1%), suelo-cemento (10%) con fibra de polipropileno (1%), suelo-pulpa de cactus (33%). Los resultados de la prueba de tensión, muestran que las fibras mejoraron considerablemente la ductilidad (mejor con fibra de sisal), pero aumentaron la absorción de agua. Las muestras con pulpa de nopal redujeron la absorción de agua con respecto a las otras 4. En la prueba de abrasión, las muestras con fibras de polipropileno registraron el menor valor, sin embargo en la prueba de erosión fue mejor la de suelo-cemento. Además, se realizó pruebas de desempeño en un panel de bajareque hecho con fibra de sisal y pulpa de nopal, mediante numerosas pruebas de erosión, abrasión y absorción, dando como resultados valores muy bajos. Esto hace que la pulpa de nopal sea interesante de investigar para poder establecer sus efectos, además de ser un material natural y amigable al medio ambiente.

Tinoco-Vercosa et al. (2010) en su experimentación usaron como aditivos naturales para la fabricación de paneles de yeso, dos especies de nopal en solución (mucílago) y en polvo, con el objeto de reducir los costos de producción al sustituir los aditivos sintéticos. Se realizaron tablas de pasta de yeso de tamaño de 300 mm x 300 mm x 15 mm. Se utilizaron



dos tipos de mucílago de nopal (uno extraído mediante maceración y otro por escalde), los cuales agregaron en sustitución del agua de mezcla en 50% y 100%. El nopal deshidratado se agregó en 0.35% y 1% en peso, en sustitución de yeso o escayola. La relación agua/yeso del control fue de  $a/y=0.60$ , sin embargo en las mezclas con mucílago y polvo de nopal esta se redujo debido a la capacidad que presentan de retener agua. Los resultados de las pruebas de resistencia a la absorción de agua, muestran que los especímenes con polvo de nopal mostraron el menor valor de cantidad de agua absorbida, principalmente en los de 1%, mientras que en los con mucílago la mayor reducción se observó en las que contenían el 100% de mucílago extraído por maceración. En la prueba a flexión, los valores más altos se obtuvieron de las muestras elaboradas con mucílago por macerado con 50% de sustitución de agua de mezcla, en cambio en los con polvo de nopal sus valores fueron menores al control. Con base a los resultados obtenidos, se plantea la posibilidad de emplear la adición de mucílago para el desarrollo de una pasta de yeso consistente.

Martínez et al. (2008) estudiaron el comportamiento mecánico de cuatro mezclas de mortero elaboradas con cal apagada artesanalmente (C), adicionada con arena (A), ceniza volcánica (CE) y mucílago de nopal (M). Se cuantificó al área superficial de la cal apagada artesanalmente encontrándose que es 600% superior a la cal comercial industrial. Las mezclas de mortero fueron: CACEM, CACE, CAM, CA. Las muestras se realizaron por triplicado para evaluar la resistencia a la compresión, tensión y flexión a los 3, 7, 14, 21, 28 y 45 días de edad. Los resultados de la prueba de resistencia a la compresión, tensión y flexión, muestran que hubo incrementos en los morteros con ceniza volcánica y mucílago de nopal, así como de mejoramiento en la trabajabilidad en estado fresco (por el mucílago). Las relaciones tensión/compresión y flexión/compresión, fueron mayores en los morteros de cal apagada con ceniza y mucílago, en comparación con los de concreto. Se obtuvieron valores del 34-52% para relaciones tensión/compresión y 65-95% en flexión/compresión.



Ventolá et al. (2011) experimentaron con morteros de cal y aditivos naturales, con el propósito de mejorar sus propiedades, orientados hacia su utilización en la restauración de edificios históricos y de arquitectura rústica moderna a base de rocas naturales, como consecuencia de la poca afinidad química y física que presentan los morteros hechos con cemento portland con los materiales de estas construcciones. Los aditivos propuestos fueron goma animal, caseína, polvo de nopal, mucílago de nopal y aceite de olivo; todos ellos han sido usados en construcciones tradicionales principalmente en países de Latinoamérica. La inclusión del aditivo en los morteros se hizo en un 5% en peso de la cantidad de agua de mezcla. La relación agua/cal se estableció previamente de acuerdo a pruebas de fluidez. Se midió la resistencia a la compresión, pérdida de humedad, velocidad de carbonatación, porosidad, análisis mineralógica y textura (SEM) en todas las muestras. En la resistencia a la compresión, se observó que en todas las muestras con adiciones se mejoró con respecto al control, siendo los valores más altos los morteros con goma animal. En la prueba de pérdida de humedad por secado, los que contenían mucílago de nopal y polvo de nopal, registraron los menores valores, y en la prueba de carbonatación la mayor profundidad. El menor número y tamaño de poros se obtuvo con el aceite de olivo, lo que pudo ser corroborado con las imágenes obtenidas con el SEM. Con base a los resultados obtenidos, se puede aseverar que el empleo de estos morteros con estos tipos de aditivos es adecuado para usarse en la restauración de edificios históricos.

### **Alginato**

Petric et al. (2009) usaron el alginato como estabilizador de suelos junto con lana para la industria de la construcción. Experimentaron con lana de oveja y alginatos como aditivos para la estabilización de arcilla para utilizarla como material de construcción de viviendas de autoconstrucción y de bajo costo destinadas principalmente para regiones tropicales. Para llevar a cabo las pruebas, se procedió a preparar muestras, para lo cual se midieron y pesaron los materiales con precisión. Las proporciones de los materiales en las muestras se hicieron en 5 diferentes proporciones, debido a 5 tipos de arcillas utilizadas. Los



alginatos se agregaron en iguales proporciones y la lana en relaciones de 0.5 % y 0.25%. Las muestras secas se sometieron a pruebas de densidad, flexión y resistencia a la compresión mecánica. De estas pruebas se concluyó que la inclusión de fibra natural en la matriz de suelo, redujo el agrietamiento por retracción debido al proceso de secado, y que en la relación esfuerzo-deformación los suelos con fibra tuvieron mejores resultados. La implementación de alginato y fibra mantuvieron una matriz compacta, incrementando la resistencia a la compresión y en menor medida a la flexión.

### **Resumen sobre antecedentes.**

Los estudios descritos anteriormente son una buena referencia para esta investigación, debido a que nos brindan información sobre los modos de extracción, preparación y condiciones en que se utilizaron el mucílago de nopal en la elaboración de concreto y el alginato en la elaboración de materiales de construcción. Nos dan una perspectiva de los beneficios y desventajas que podríamos obtener en nuestro proyecto de investigación, cuando se emplean como aditivos orgánicos en mezclas de concretos cuyo principal objetivo es alcanzar mejoras en términos de durabilidad. Por otro lado, es preciso destacar que en las referencias no se encontraron estudios realizados en concreto conteniendo alginato, lo que sirve de motivación para estudiar en nuestra investigación el efecto de los alginato sobre la permeabilidad de agentes agresivos y carbonatación.

De manera general se puede argumentar que con esta investigación se puede marcar un precedente en el estudio de concretos y morteros con la adición de alginato de manera individual o en combinación con mucílago de nopal.



## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto del mucílago de nopal y alginato en la resistencia mecánica y durabilidad del concreto hidráulico, con el objeto de utilizarlos como aditivos naturales de bajo costo.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1- Determinar la resistencia mecánica a diferentes edades de concretos conteniendo mucílago de nopal y alginato.
- 2- Determinar los coeficientes de difusión y la permeabilidad rápida a cloruros en concretos conteniendo mucílago de nopal y alginato, de acuerdo a la norma NORDTEST BUILD 443 y la ASTM C1202-97, respectivamente.
- 3- Determinar el efecto inhibidor a la corrosión de las adiciones orgánicas en acero de refuerzo mediante pruebas electroquímicas.
- 4- Determinar el coeficiente de carbonatación en pruebas aceleradas de concretos conteniendo mucílago de nopal y alginato.

## **HIPÓTESIS**

- El uso de mucílago de nopal y alginato en concreto incrementa su resistencia a la compresión.
- El uso de mucílago de nopal y alginato en concreto reduce la absorción capilar de agua, la permeabilidad a cloruros, el coeficiente de difusión de cloruros y la profundidad de carbonatación, con respecto a los concretos controles.
- Las adiciones orgánicas reducen la corrosión del acero de refuerzo.



## CAPÍTULO II-MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 Concreto

El concreto es un material compuesto por una fase constituida por productos sólidos de hidratación del cemento y otra fase de partículas pétreas (agregados) (Solís et al, 2006). La pasta de hidratación está compuesta por cemento portland, aire atrapado y agua, formando una masa compacta que posteriormente se endurece como resultado de la reacción química entre el agua y el cemento (Mehta, 1998). La proporción de volumen de la pasta y agregados es del 25%-40% y de 60%-75% respectivamente. De manera general la composición del concreto es sencilla pero se vuelve compleja cuando se pretende obtener propiedades especiales en el concreto tanto en estado fresco como endurecido. En estado fresco puede ser por ejemplo un concreto que posea alta fluidez y resistencia a la segregación como el concreto autoconsolidable (Okamura and Masahiro, 2003). Otra propiedad requerida en el concreto puede ser mayor durabilidad en ambientes hostiles. Para obtener propiedades en el concreto es necesario utilizar aditivos químicos y materiales suplementarios (Bentz et al, 1998).

#### 2.1.1 Cemento portland

El cemento portland es el resultado de la molienda de una mezcla de arcilla, caliza y arena. Estos componentes son puestos al horno a una temperatura de 1450 °C, lo que produce cambios físicos y químicos en la mezcla. Las reacciones químicas que se llevan a cabo convierten los óxidos de calcio y sílice en silicatos de calcio, que son el principal constituyente del Clinker.

Según la norma ASTM 150 el cemento portland es el resultado de pulverizar clinker, el cual pasa de tamaños de entre 5 a 25 mm de diámetro hasta alcanzar 75  $\mu\text{m}$ . Este proceso se realiza en molinos de bola o de terminado en donde se agrega 5 % de yeso o de sulfato de calcio con el fin de controlar las reacciones del fraguado temprano y endurecido.



### 2.1.1.1 Composición química del cemento portland

Los principales componentes del cemento portland son:

- Silicato tricálcico ( $C_3S$ ). Es el principal componente obtenido del clinker y es el responsable de la alta resistencia a las edades tempranas en el concreto.
- Silicato dicálcico ( $C_2S$ ). Es el componente metastable, de poca resistencia a edades tempranas, pero que va adquiriendo mayores valores a lo largo del tiempo hasta ser comparables con los del  $C_3S$ .
- Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). Reacciona rápidamente al entrar en contacto con el agua, para retrasar el fraguado se le agrega yeso al cemento. No contribuye a mejorar la resistencia del concreto, así mismo las pastas conteniendo mayor cantidad de  $C_3A$  son sensibles al ataque por sulfatos, sin embargo durante la cocción del clinker actúa como fundente, posibilitando la combinación de la cal con la sílice.
- Ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ). Sin la presencia de este durante el tiempo de cocción las reacciones se haría muy lentas, quizás no se completarían, por lo que actúa como fundente, por otro lado no contribuye de manera significativa a la resistencia, además del ser el responsable del color gris de la mezcla.

Los compuestos más significativos en el cemento portland son los silicatos de calcio, y representan el 75 % del peso del cemento. Éstos al reaccionar con el agua producen hidróxido de calcio y silicatos de calcio hidratados. Los requerimientos de agua para ambos son similares, pero los hidróxidos producidos por el silicato tricálcico son mayores (más del doble) que el silicato dicálcico (Mehta, 1998). En la tabla 1 muestran los rangos de los principales óxidos que componen al cemento portland.

Tabla 1- Composición química del cemento portland

Componente	Mínimo	Promedio	Máximo	Numero de muestras
SiO <sub>2</sub> (%)	18.4	21.02	24.50	284
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.16	2.85	5.78	284
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.10	5.04	7.56	284
CaO (%)	58.10	64.18	68.00	284
MgO (%)	0.02	1.67	7.10	285
SO <sub>3</sub> (%)	0	2.58	5.35	280
Na <sub>2</sub> O (%)	0	0.24	0.78	263
K <sub>2</sub> O (%)	0.04	0.70	1.66	280
Álcali equivalente (%)	0.03	0.68	1.24	280
Cal libre (%)	0.03	1.243	3.68	132
Cloruro (%)	0	0.016	0.047	15
Sr (mg/kg)	0	532	19195	191
Zn(mg/kg)	0	22	321	191
Ti(mg/kg)	0	1059	4196	288
P(mg/kg)	0	389	2139	288
Mn(mg/kg)	0	315	2366	288

Lea's Chemistry of cement and concrete, 2004.

### 2.1.1.2 Hidratación del cemento portland

Los tipos de cementos portland disponibles comercialmente se encuentran clasificados según su uso y composición química; de las reacciones entre sus componentes (cemento y el agua), depende el desarrollo de su microestructura hasta su madurez (Mehta y Monteiro, 2006). Se hace uso del término de pasta de cemento hidratado a pastas elaboradas a partir de cemento portland, la cual constituye el principal aglomerante en el concreto. La importancia de la hidratación del cemento portland se debe a que su reacción con el agua genera productos sólidos con características cementantes.

Los mecanismos de hidratación del cemento portland son dos:

El primero es la hidratación de la solución total, que comprende la disolución de los compuestos anhidros a sus constituyentes iónicos, la formación de hidratos en la solución, y debido a su baja solubilidad la precipitación final de los hidratos de la solución sobresaturada. De esta manera el mecanismo de solución total contempla la

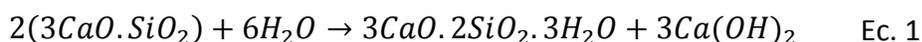


reorganización completa de los constituyentes de los compuestos originales durante la hidratación del cemento.

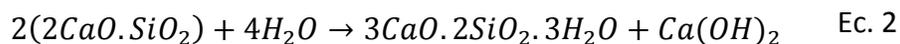
El otro mecanismo llamado topoquímica o hidratación del estado sólido, es en donde las reacciones se llevan a cabo directamente en la superficie de los compuestos anhidros sin que hayan sido disueltos. Debido a que el cemento está formado de una mezcla heterogénea de varios compuestos, el proceso de hidratación consiste en reacciones simultáneas de los compuestos anhidros, sin embargo no todos ellos se hidratan a la misma velocidad. Sobre esto se conoce que para la rigidización y el fraguado las reacciones más importantes son las de los aluminatos y silicatos, a los cuales se les atribuyen las características de endurecimiento (Mehta, 1998).

La hidratación del cemento es función de las reacciones entre sus minerales ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ ) y el agua, además, de la presencia de yeso y otros aditivos. Los productos de las reacciones son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados, los cuales se dan de la siguiente manera:

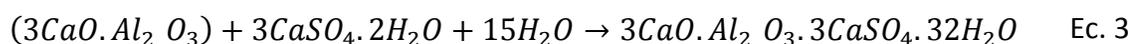
- $C_3S$  (alita): es el silicato cálcico más inestable presente en el cemento, y que al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como tobermorita gel y en hidróxido de calcio, así:



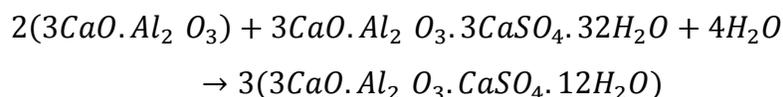
- $C_2S$  (Belita): al hidratarse también se convierte en tobermorita gel y en hidróxido de calcio, pero con menor cantidad de hidróxido.



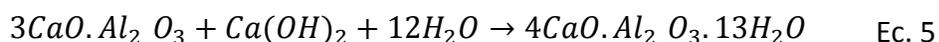
- $C_3A$  (Celita): al combinarse con yeso y agua produce etringita, la cual aparece a los pocos minutos de hidratación.



- El aluminato de calcio con la etringita y con agua se convierte en monosulfato.



- El aluminato de calcio (C<sub>3</sub>A) con el hidróxido de calcio y con agua se convierte en aluminato de calcio hidratado.



#### 2.1.1.2.1 Calor de hidratación

Los componentes del cemento portland son productos que se encuentran en desequilibrio, con alto grado energético que producen reacciones de altas temperaturas. Cuando el cemento es hidratado, sus componentes reaccionan con el agua con el fin de alcanzar el equilibrio; este proceso va acompañado de la liberación de energía en forma de calor (exotérmica). La cantidad total de calor liberado y su velocidad de liberación, de sus componentes puede ser usada como un indicativo de su reactividad. Por lo tanto, el estudio sobre el calor de hidratación puede ser usado para caracterizar el comportamiento del fraguado y endurecimiento del cemento.

Para analizar el calor de hidratación de cementos, Verbeck y Foster (1950), calcularon velocidades relativas de calor de hidratación debido a los 4 principales componentes del cemento, el cual puede ser predicho con la siguiente expresión:

$$H = aA + bB + cC + dD \quad \text{Ec. 6}$$

Tabla 2- Calor de hidratación de componentes del cemento portland (Mehta y Monteiro, 2006)

Componente	Calor de hidratación a edades (cal/g)		
	3 días	90 días	13 años
<b>C<sub>3</sub>S (A)</b>	58	104	122
<b>C<sub>2</sub>S (B)</b>	12	42	59
<b>C<sub>3</sub>A (C)</b>	212	311	324
<b>C<sub>4</sub>AF (D)</b>	69	98	102

A, B, C y D, son los porcentajes de los componentes presentes en el cemento, y a, b, c y d, representa un 1% de cada componente en el calor de hidratación, sin embargo estos varían con la edad. En cemento portland típico, las mayor liberación de calor se da en las primeras horas de hidratación, un 50% a los 3 días, y un 70% a los 7 días (ver Figura 1).

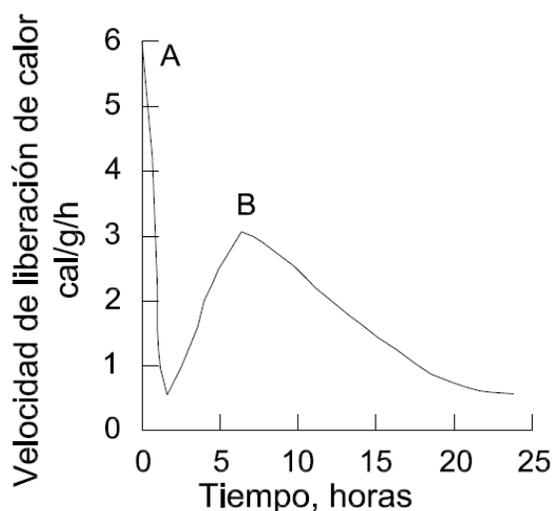


Figura 1- Velocidad de liberación de calor de pasta de cemento portland durante el fraguado y el endurecido a edades tempranas (Mehta y Monteiro, 2006).

## 2.2 Durabilidad

Según el comité ACI 201, la durabilidad del concreto de cemento portland se define como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, es decir, que el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio cuando se exponga al medio ambiente. Es preciso destacar que ningún material es intrínsecamente durable, como resultado de las interacciones ambientales, pues la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales cambian con el tiempo (ver Figura 2) (Mehta, 1998).

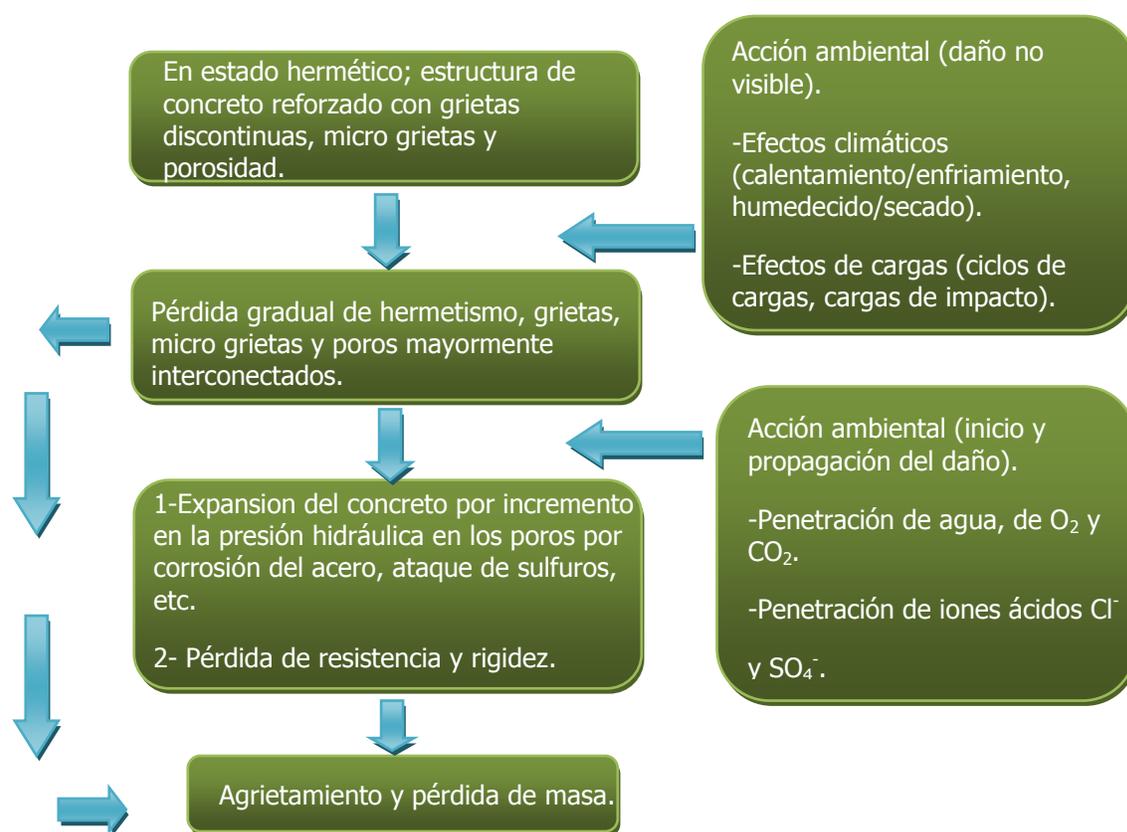


Figura 2-Modelo Holístico de deterioro del concreto por efectos ambientales (Mehta, 1998).

La intención de este concepto de durabilidad es lograr que las estructuras de concreto adquieran mayor vida útil o de servicio (Ormellese et al, 2009). Su importancia radica en evitar las implicaciones económicas en términos de costo de reparación, mantenimiento e inclusive de sustitución debido a altos niveles de deterioro que representa la construcción de estructuras de concreto de baja durabilidad. Los principales factores que reducen la



durabilidad en los concretos son: a) grietas y microgrietas, esto se debe al deterioro del concreto por la corrosión del acero de refuerzo, cuando el concreto es expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo, a ataque a sulfatos y a reacciones álcali sílice o por la difusión de iones agresivos (cloruros y sulfatos) al interior y b) el colocado, consolidación y curado también influyen en la durabilidad, debido a que si no son realizadas debidamente afectaran en alguna medida a esta propiedad.

### 2.2.1 Permeabilidad

En concreto hidráulico, el agua es el ingrediente que permite las reacciones de hidratación del cemento y facilita el mezclado de los agregados. Dependiendo de las condiciones ambientales y del espesor del elemento, la mayor parte del agua evaporable se pierde, dejando poros vacíos o no saturados. Un concreto no es vulnerable a fenómenos destructivos relacionados con el agua cuando hay muy poca o nada de agua evaporable después del secado, y si subsecuentemente es expuesto a condiciones ambientales de humedad no provoca la re-saturación de sus poros. Esta característica dependerá de su conductividad hidráulica, conocida como coeficiente de permeabilidad (k) o simplemente como permeabilidad (Mehta y Monteiro, 2006).

La permeabilidad está definida como la propiedad que gobierna la velocidad de flujo de un fluido dentro de un sólido poroso. Para flujos en estado estacionario, el coeficiente de permeabilidad (k) se determina por la expresión de Darcy:

$$\frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta H A}{L \mu} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$dt/dq$ = velocidad de flujo del fluido

$\mu$ = viscosidad del fluido

$\Delta H$ = gradiente de presión

A= área superficial



$L$  = espesor del sólido

### **2.2.1.1 Permeabilidad en concreto**

Teóricamente la introducción de partículas de agregados con baja permeabilidad en pastas de cemento con alta permeabilidad (especialmente en altas relaciones  $a/c$ ) se esperaría que ayuden a reducir la permeabilidad del sistema, al obstruir los canales de flujo en la matriz de cemento. Por lo tanto, pastas de cemento o concretos con iguales relaciones  $a/c$  y madurez deberían mostrar bajos coeficientes de permeabilidad, sin embargo en la práctica esto no sucede. La razón principal radica en los agregados; a mayor tamaño del agregado la permeabilidad aumenta, debido a que a temprana edad de hidratación, la zona de transición entre el agregado y la pasta es débil y vulnerable a agrietamiento por esfuerzos diferenciales como retracción por secado, térmica o cargas externas aplicadas. Estas grietas son mayores que los capilares en las pastas de cemento, por lo tanto establecen interconexiones en el sistema de poros que aumentan la permeabilidad. La resistencia del concreto y la permeabilidad están relacionadas mutuamente con la porosidad capilar, por lo tanto, una reducción en los poros capilares podría ser necesario para reducir la permeabilidad y aumentar la resistencia a la compresión en concretos hidráulicos (Mehta et al, 2006).

### **2.2.1.2 Absorción capilar y porosidad**

Es una prueba que se realiza con el propósito de determinar la absorción capilar y la porosidad de morteros y concretos como una medida de su compacidad. Por porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan dentro de la masa de concreto y mortero, y es una función de la relación agua/cemento, grado de hidratación, tipo y tiempo de curado (Durar, 1997).

Es preciso conocer algunas concepciones sobre la clasificación de tipos de poros, con base en su tamaño:



-Poros de gel: son de tamaño considerablemente pequeño, menor a 15-25 Å. Corresponden a espacios intersticiales del gel de cemento. Estos poros solo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades relativas menores a 20%.

-Poros capilares: son de forma variable, y su tamaño es del orden de entre 2 nm y 1 µm. Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta endurecida de cemento, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para la durabilidad del concreto.

-Poros de aire atrapado: son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto durante su manipulación en estado fresco. No suelen estar interconectados entre si y su dimensión es variable, aunque generalmente son tan grandes como 3nm. Aunque afectan la resistencia mecánica en cuanto a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos benéficos.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el mortero o concreto se encuentra en contacto con agua líquida (Torres-Acosta, 2009). La prueba que lo determina es la sorptividad, la cual determina la velocidad por absorción capilar en un cilindro de concreto, sobre pequeños soportes y en la parte inferior con un nivel de agua de 2-5 mm, de acuerdo con la norma ASTM C-642. Se expresa de la siguiente manera:

$$i = St^{1/2} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$i$  = incremento en peso  $\text{gr}/\text{mm}^2$  a partir del contacto con el agua.

$t$  = tiempo en minutos (tiempo en el cual se determinó el peso del espécimen)

$S$  = sorptividad medida en  $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$



La prueba para determinar el porcentaje total de vacíos, se basa en la norma ASTM C-642, la cual consiste en saturar los poros de especímenes secos con agua, hasta alcanzar un peso constante. La cantidad de agua absorbida es el volumen que ocupan los vacíos dentro del espécimen expresados en porcentaje respecto a su volumen total.

### **2.2.2 Difusión de iones cloruro en concreto**

El mayor deterioro en las estructuras de concreto reforzado es provocado por la corrosión cuando se encuentran expuestas a ambientes con agentes agresivos, principalmente iones cloruro, los cuales penetran a través de la red de poros (Song et al, 2006). Los iones cloruro son los principales agentes encargados de destruir la capa pasiva que protege el refuerzo en el concreto cuando se encuentra en condiciones alcalinas con pH entre 12.5 y 13.5 (Castro, 2001).

La absorción capilar y la difusión, son los principales mecanismos mediante los cuales el ion cloruro puede penetrar al concreto. De estos mecanismos, el más común es el de difusión, en donde el movimiento de iones cloruros se da bajo un gradiente de concentración con la existencia de una fase líquida continua.

La importancia de conocer sobre el fenómeno de difusión de iones cloruros al interior del concreto, se debe a que el coeficiente de difusión obtenido en las mezclas de concreto, es utilizado para determinar el periodo de iniciación de la corrosión del acero de refuerzo y de manera subsecuente la vida de servicio de las estructuras. Esto se debe a que los iones cloruros son los principales responsables de la destrucción de la capa pasiva del refuerzo que se forma en concreto de condiciones alcalinas, cuando las estructuras de concreto reforzado se encuentran expuestas a ambientes contaminados con cloruros, activando de esta manera la corrosión en el refuerzo (Erdogdu et al, 2003). A altos niveles de corrosión en el acero de refuerzo se producen desprendimientos, agrietamientos y deterioros en el concreto, debido a la expansión de los productos de corrosión del acero (los cuales son de 2-4 veces mayor en volumen del material que sustituyen) y la reducción del área efectiva del refuerzo, afectando de manera crítica la integridad de las estructuras (Torres-Acosta and Martínez-Madrid, 2003, Sideris et al, 2004, Torres-Acosta et al. 2007). En concretos,



es preciso destacar que el coeficiente de difusión de cloruros disminuye a través del tiempo debido a los procesos de hidratación que se dan, los que reducen los poros y concentraciones al interior (Mehta et al, 1998).

La penetración de cloruros en el concreto se describe de la manera más simple por medio de la segunda ley de Fick (estado no estacionario), Ec. 9.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

C= es el contenido o concentración de cloruros

D= es el coeficiente de difusión aparente

x= profundidad (medida a partir de la cara expuesta)

t= tiempo

Cuando las condiciones de frontera son  $C_{(x=0, t>0)}=C_0$  (concentración en la superficie constante), y las condiciones iniciales  $C_{(x>0, t=0)}=0$  (concentración inicial en el concreto 0), se tiene la siguiente solución expresada por la Ec. 10:

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$C(x,t)$ =concentración de cloruros a una profundidad x, en un tiempo de exposición t.

$C_0$ = Concentración de cloruros en la superficie expuesta.

X= Profundidad medida desde la superficie expuesta

D= Coeficiente de difusión aparente.

t= tiempo de exposición

erf= función error

El coeficiente de difusión de la ec.10 para estructuras de concreto es aparente. Esto se debe principalmente porque no se toma en cuenta la variación en concentración en la



superficie ni las variaciones que el coeficiente sufre con respecto al tiempo, debido a los cambios en la hidratación.

Para considerar el efecto del tiempo en el coeficiente de difusión, se emplea la siguiente ecuación:

$$D(t) = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$D(t)$ = coeficiente de difusión al tiempo  $t$ .

$D_{ref}$ = coeficiente de difusión al tiempo  $t_{ref}$  (usualmente 28 días)

$m$ = constante (depende de las proporciones de las mezclas)

El valor de  $m$  es una constante y estará en dependencia del tipo de cemento y mezcla. Bramforth (1999) propuso valores de  $m$ , para concreto ordinario  $m=0.264$ , ceniza volante  $m=0.70$  y escoria de alto horno  $m=0.62$ .

Por otro lado, la difusión también depende del efecto de la temperatura. La que se incluye en la siguiente ecuación:

$$D(t) = D_{ref} \cdot \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

$D(t)$ = coeficiente de difusión en el tiempo  $t$  y temperatura  $T_{ref}$ .

$D_{ref}$ = coeficiente de difusión en el tiempo  $t_{ref}$  y temperatura  $T_{ref}$ .

$U$ = energía de activación del proceso de difusión (35000J/mol)

$R$ = constante universal de los gases (8.314472 J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>)

### 2.2.3 Carbonatación del concreto

La carbonatación es la reacción química en la que el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono y forma carbonato de calcio insoluble:



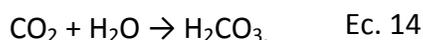
El concreto como material de construcción requiere de cemento portland como aglutinante del compuesto. Debido a que es el material más producido en el mundo, en la industria del cemento, por cada tonelada producida se genera una tonelada de dióxido de carbono que es emitida a la atmósfera (Aitcin, 2000), gas que es el principal causante del efecto invernadero en la tierra. Toda esta acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera provenientes de las diversas industrias, favorece al proceso de carbonatación en el concreto. Cuando ocurre la carbonatación en el concreto, se reduce el pH en la solución de poro de las zonas carbonatadas. Esta pérdida en el pH se convierte en un problema, debido a que afecta el ambiente altamente alcalino que posee inicialmente (rango de pH de 12 a 13) con el cual protege al acero de refuerzo contra la corrosión. Esta protección se da por la formación de una capa de óxido pasivo en la superficie del acero, que es la que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales de deshielo y ambientes marinos.

#### 2.2.3.1 Principales reacciones de carbonatación en el concreto

Los poros del concreto bajo condiciones cíclicas de humedad, contienen:

- Agua ( $H_2O$ )
- Hidróxido de calcio o cal [ $Ca(OH)_2$ ]

Cuando el  $CO_2$  del aire entra en contacto con el agua contenida en los poros del concreto, forma ácido carbónico de acuerdo a lo siguiente:

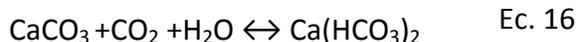


El ácido carbónico neutraliza el hidróxido de calcio y forma carbonato de calcio sólido, de pH neutro (Montaini, 1996).

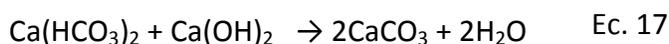


Alto pH                  Bajo pH                  pH neutro

Generalmente el agua contiene calcio y magnesio en forma de bicarbonatos (como  $\text{Ca(HCO}_3)_2$  y  $\text{Mg(HCO}_3)_2$ ), concentrándose el primero en mayor cantidad. Este compuesto aparece en el agua, constituyendo el siguiente equilibrio:



En estas condiciones de  $\text{CO}_2$  libre no es perjudicial, pero cuando su cantidad aumenta se rompe el equilibrio y se torna agresivo, esto se da en combinación con altas concentraciones de humedad y se expresa de la manera siguiente:



Cuando la carbonatación progresa hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento del concreto (ver Figura 3).

Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, ésta puede ser devastadora y muy costosa de reparar. Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando también hay cloruros en el concreto. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero (Montani, 2000). Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruros necesarios para producir corrosión se hace significativamente menor (con 100 ppm o menos). Por esta razón, en investigaciones acerca de las condiciones que favorecen al proceso de corrosión para la mayoría de las estructuras de concreto, debe siempre incluirse un análisis de la profundidad de carbonatación.



Figura 3- Columna de concreto afectada por la carbonatación.

### 2.2.3.2 Factores que afectan la carbonatación

La carbonatación es un proceso que es completamente natural y se ve afectado por la humedad y la permeabilidad del concreto los cuales propician el aumento de carbonatación. El avance de éste se da rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre 55 y 60 %, de manera contraria a una humedad más baja disminuye, debido a que no hay suficiente agua disponible en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio. En cantidades por encima de 75 % de humedad relativa, la situación se revierte, debido que los poros se bloquean progresivamente con agua; aunque esto permite que se disuelva libremente el hidróxido de calcio, evita en gran medida el ingreso del dióxido de carbono (Montani, 2000).

### 2.3 Espectroscopia IR

La espectroscopia por infrarrojo, es una técnica que se utiliza para determinar de manera rápida los grupos funcionales de materiales orgánicos e inorgánicos (Settle, 1997). Consiste simplemente en medir la absorción de energía a diferentes frecuencias de infrarrojo dentro la escala de frecuencia infrarroja. La radiación infrarroja dentro del espectro electromagnético tiene un número de ondas aproximadamente de 13000 a 10  $\text{cm}^{-1}$ , o longitudes de ondas desde 0.78 a 1000  $\mu\text{m}$ .



La posición de absorción por IR, se representa generalmente como número de ondas ( $\tilde{\nu}$ ) o longitud de ondas ( $\lambda$ ). El número de ondas está definido por el número de ondas por unidad de longitud y es directamente proporcional a la frecuencia, como también de la absorción de energía IR, su unidad de medida del número de onda es  $\text{cm}^{-1}$ , en contraste, la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia y a su energía asociada. Su equivalencia se da por la siguiente expresión:

$$\tilde{\nu} (\text{cm}^{-1}) = \frac{1}{\lambda (\mu\text{m})} \times 10^4 \quad \text{Ec. 18}$$

La información se representa generalmente como un espectro con longitud de ondas o número de ondas en el eje "x" y la intensidad de absorción o porcentaje de transmitancia en el eje "y". La transmitancia es la relación entre la fuerza de radiación transmitida a la muestra (I) y el poder de incidencia sobre la muestra ( $I_0$ ). La absorbencia (A) es logaritmo base 10 del inverso de la transmitancia (T), expresado como:

$$A = \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) = -\log_{10} T = -\log_{10} \frac{I}{I_0} \quad \text{Ec. 19}$$

Las regiones de espectroscopia por IR, se dividen en tres áreas: cercano IR, medio IR y lejano IR.

Tabla 3- Regiones de espectros de IR.

Absorción IR	Cercano IR	Medio IR	Lejano IR
Número de ondas	13 000 – 4000 $\text{cm}^{-1}$	4000 – 200 $\text{cm}^{-1}$	200-10 $\text{cm}^{-1}$
Longitud de onda	0.78-2.5 $\mu\text{m}$	2.5-50 $\mu\text{m}$	50-1000 $\mu\text{m}$

La teoría consiste en que, a temperaturas sobre el cero absoluto, todos los átomos en las moléculas están en continua vibración unos respecto a otros, por lo tanto, cuando la frecuencia de una vibración específica es igual a la frecuencia de radiación IR dirigida sobre la molécula, ésta absorbe radiación.



Con respecto a los modos normales de vibración, se tiene que la radiación IR tiene energía suficiente para excitar movimientos vibracionales o rotacionales en una molécula. Los niveles de energía de la radiación IR están entre 160 y 2400 kJ/mol. El rango de número de onda que se utiliza en la espectroscopía de IR es de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . El espectro IR usualmente presenta bandas marcadas que son cinco, características de cada tipo específico de vibración molecular. Diferentes moléculas absorben energía IR a diferentes longitudes de onda, por lo que el espectro infrarrojo contiene información cualitativa y cuantitativa del material muestreado. Las moléculas pueden ser representadas como esferas (átomos) unidas por un resorte (enlace químico covalente), cada par de átomos unidos representa un oscilador armónico simple. Para que un enlace absorba radiación infrarroja, deben cumplirse dos condiciones:

- a) Que la vibración del par de átomos tenga la misma frecuencia que la radiación incidente.
- b) Que durante la vibración exista un cambio en el momento dipolar.

Los modos normales de vibración son movimientos colectivos particulares de los átomos que son independientes unos de otros en el sentido de que si uno de ellos es excitado, éste no estimulara ningún otro movimiento normal. Los diversos estiramientos (stretching) y oscilaciones (bending) para un grupo AX<sub>2</sub> que aparece en una porción de una molécula (Neal, 1992).

#### **2.2.4 Corrosión del acero de refuerzo**

Los metales que utilizamos en nuestra vida diaria, desde grifos de agua, autobuses, automóviles, edificios, aviones, utensilios de cocina y obras de construcción, son de acero o algún material metálico. Aunque el hombre busca que sean estables en la atmósfera y posean vida larga, éstos se degradan con el tiempo de diferentes maneras y pierden sus propiedades. Esto se debe a que la atmósfera contiene oxígeno y otros elementos que reaccionan con el acero y lo degradan hasta retornar a su estado natural más estable (Rodríguez et al, 1999). El retorno espontáneo a su estado natural combinado de estos

materiales es la corrosión, y puede definirse como la degradación paulatina de los materiales metálicos debido al medio que los rodea, produciendo un deterioro en sus propiedades físicas y químicas (Ávila, 2002).

El proceso de corrosión en los metales es un proceso químico, cuando se refiere a un sistema no electrolítico como gases y vapores o líquidos no conductores; y es electroquímico cuando se presentan reacciones de oxidación y reducción, estableciéndose intercambios de electrones y consecuentemente el paso de una corriente eléctrica entre un ánodo y un cátodo a través de un medio conductor, como una pila galvánica (Uhlig, 1970).

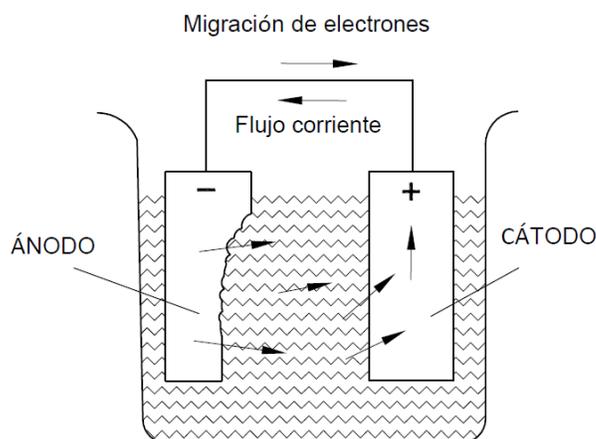


Figura 4-Diagrama de una celda electrolítica.

Las reacciones electroquímicas se presentan generalmente en un medio acuoso y toman parte especies químicas y cargas eléctricas. Este tipo de reacciones generan un proceso instantáneo que denota la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión y donde ocurre la reacción de oxidación), una catódica (donde se produce la reacción de reducción), un electrolito y un contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo. El electrolito es una solución que conduce la electricidad, debido a la presencia de iones (Ávila, 2002).

Los cátodos o ánodos involucrados en el proceso de corrosión se conocen como electrodos y para que se lleve a cabo el proceso de corrosión ambos deben estar sumergidos en un electrolito. La corriente circula desde el cátodo al ánodo; en el electrolito el transporte de la corriente eléctrica se da del ánodo al cátodo. Cuando esto



sucede, se da pérdida de metal en aquellos lugares del ánodo en que la corriente abandone el electrodo para pasar al electrolito. Este tipo de corrosión también se presenta cuando dos metales son diferentes, tienen actividades diferentes sumergidos en un electrolito y conectados entre sí, produciendo un flujo de electrones del metal más activo o anódico al más noble o catódico, dejando al material anódico con una diferencia de electrones.

Esto trae como consecuencia que el ánodo se disuelva, es decir, se corroa. A este tipo de actividad electroquímica se le conoce como corrosión galvánica, y constituye el principio de las llamadas pilas secas. Cualquier par galvánico es capaz de crear energía en forma de una diferencia de potencial capaz de mover electrones (Torres-Acosta et al, 2009).

La cinética de la corrosión de metales indica la cantidad de metal por unidad de tiempo que se está disolviendo en el medio dado, cuando un sistema está desplazado de una situación de equilibrio (ASM, 1998).

Butler y Volmer desarrollaron la teoría cinética electroquímica, obteniendo una expresión para la velocidad de reacción de transferencia electrónica bajo la influencia de un campo eléctrico, por lo que dicha relación representa la ecuación fundamental de la cinética electroquímica para transferencia de carga de electrodos.

$$i = i_0 \exp(1 - \beta)\eta^{RT/F} - \exp(-\beta)\eta^{RT/F} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde  $i$  es la corriente neta,  $i_0$  la corriente de intercambio,  $\eta$  el sobre potencial,  $\beta$  el coeficiente de simetría (para corrosión toma un valor de 0.5),  $R$  la constante de los gases,  $T$  representa la temperatura absoluta y  $F$  la constante de Faraday. Esta ecuación es semejante a la función seno hiperbólico, cuando se representa en una gráfica de potencial en función de la corriente, la cual se conoce como curva de polarización. Cuando el sobre potencial es pequeño  $<0,05$  V, la ecuación de Butler-Volmer se simplifica:

$$i = i_0 \eta^{RT/nF} \quad \text{Ec. 21}$$



Por lo que la curva se puede considerar lineal y la pendiente de la curva de polarización, tiene unidades de resistencia eléctrica que se conoce como resistencia a la polarización  $R_p$ , que es la resistencia de transferencia de carga bajo ciertas condiciones. Un valor de  $i_0$  grande representa una  $R_p$  pequeña y viceversa. Por las leyes de Faraday, esta puede ser convertida a velocidad de corrosión.

$$R_p = \frac{Rt_i}{nFi_0} \quad \text{Ec. 22}$$

$R_p$  está en unidades  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  de tal manera que las unidades de  $I_{\text{corr}}$  serían  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Se calcula mediante las pendientes catódicas y anódicas de la curva de polarización cíclica, (se asume una constante que oscila entre 26mV para metales activos y 52mV para metales pasivos). La  $R_p$  resulta de aplicar una pequeña perturbación eléctrica a las varillas y medir el cambio de potencial o intensidad que se produce.

$$R_p = \left( \frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad \text{Ec. 23}$$

Los valores obtenidos en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  se pueden transformar en pérdida de espesor por unidad de tiempo mediante la ley de Faraday.

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{años}} = \frac{Mi_{\text{corr}}}{nF\delta} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde  $n$  es el número de electrones de intercambio o transferidos,  $I_{\text{corr}}$  la corriente en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $F$  la constante de Faraday,  $M$  el peso molecular del metal y  $\delta$  la densidad del metal.

## CAPÍTULO III-MATERIALES Y MÉTODO

### 3.1 Materiales

#### 3.1.1 Cemento

El cemento utilizado para la elaboración de los especímenes y pastas de cemento fue cemento portland ordinario CPO-30RS marca APASCO, el cual satisface las norma ASTM C-150 y la norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004. Con base a los óxidos principales de su composición química se calcularon los cuatro principales componentes del cemento portland ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) (ver tabla 4 y 5).

Tabla 4- Composición química del cemento empleado

		Elemento / compuesto												
Cemento	PXC	FeO	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	
<b>CPO 30 RS</b>	5.39	N.D	2.78	3.69	58.77	3.97	0.31	1.58	0.10	0.18	0.10	18.77	0.17	

Tabla 5- Componentes principales del cemento empleado

Nombre	Abreviatura	Porcentaje (%)
Silicato tricálcico	$C_3S$	66.13
Silicato dicálcico	$C_2S$	3.92
Aluminato tricálcico	$C_3A$	3.06
Aluminoferrito tetracálcico	$C_4AF$	12.08

#### 3.1.2 Agregados pétreos

Para la obtención de muestras significativas de los agregados se realizó según la norma ASTM D 75-97, Standard Practice for Sampling Aggregates y la Mexicana NMX-C-30.

La arena utilizada en esta investigación fue extraída del río Atoyac. El tamaño máximo de la grava empleada fue de 3/8". La caracterización de los agregados pétreos se realizó de acuerdo a las normas ASTM C 33-03(análisis granulométrico de grava), ASTM C 125-00,

ASTM C 70-01, C 127-01 y C 566-04(absorción, densidad relativa y contenido de humedad) y ASTM C 29-97 (peso volumétrico seco suelto y compacto). Los resultados de la caracterización de los agregados pétreos se muestran en la tabla 5, y en las Figuras 5 y 6.

Tabla 6- Caracterización de los agregados pétreos.

Agregado	P.V.S.S (Kg/m <sup>3</sup> )	P.V.S.C (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Densidad relativa	Módulo de finura
Arena	1621	1712	2.08	2.59	2.67
Grava	1448	1528	2.98	2.50	

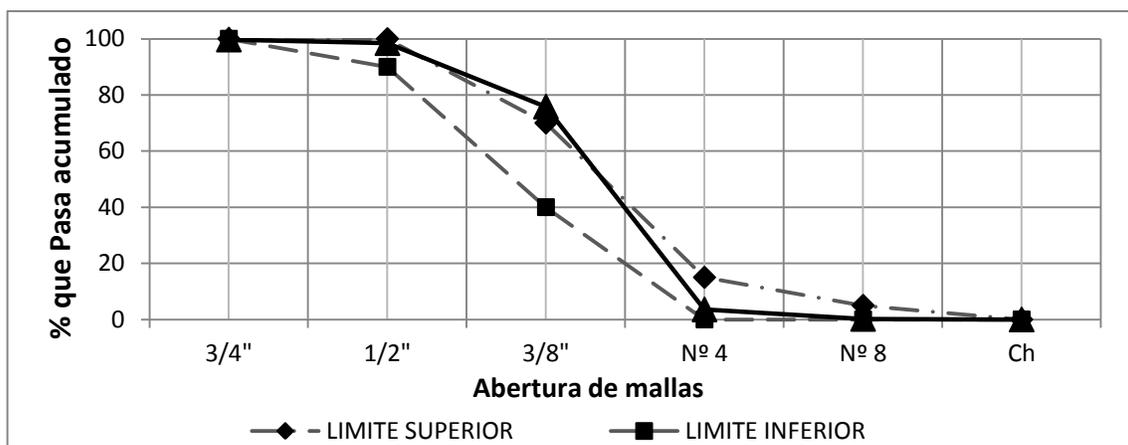


Figura 5- Curvas granulométricas del agregado grueso utilizado y límites ASTM C33-03

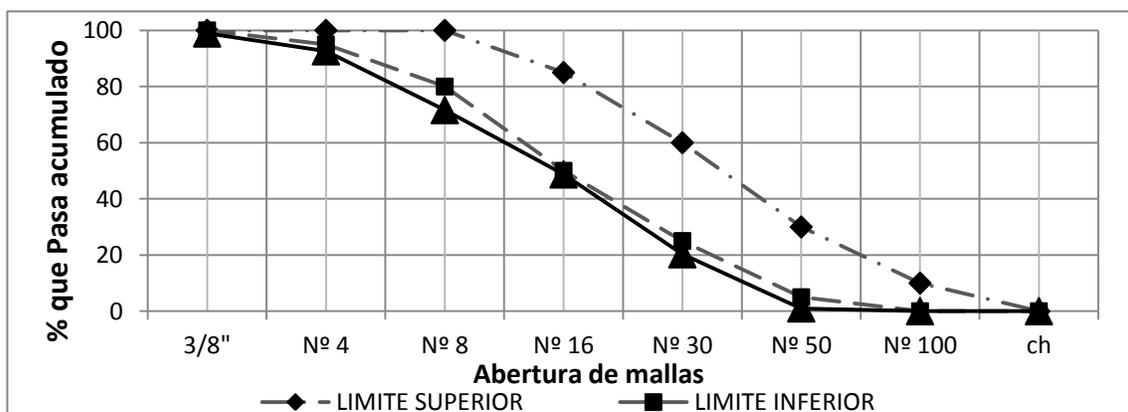


Figura 6- Curvas granulométricas del agregado fino utilizada y límites ASTM C33-03



### **3.1.3 Obtención y caracterización de mucílago de nopal**

El tipo de nopal empleado fue de la especie *Opuntia ficus-indica* colectadas en el Rancho “La Nopalera” ubicado en San Bartolo Coyotepec en el Valle de Oaxaca. La selección de este tipo de cactus, se basó en el conocimiento local sobre el uso del extracto de nopal como aditivo para mejorar ciertas propiedades de materiales de construcción y de estudios realizados previamente por investigadores en el área de concreto (Torres-Acosta y Cano-Barrita, 2007; Ramírez-Arellanes, 2008; Caballero, 2008). El método de extracción seleccionado fue el de escaldado, después de realizar pruebas preliminares de extracción para obtener un mucílago con concentración y viscosidad adecuadas.

#### **3.1.3.1 Extracción de mucílago de Nopal**

El método utilizado fue el de escaldado o de vapor (Helen 2000), debido a que evita la pérdida por lavado de componentes hidrosolubles en alimentos de gran superficie relativa. Las hojas de nopal se cortaron con un rayador de plátanos de manera transversal y se mezclaron con agua destilada a una relación 1:1.5 por peso. Posteriormente se cocieron durante 3 horas sometidos a agitación constante en estufa a temperatura no mayor de 60 °C (ver figuras 7 y 8), luego se filtró por los tamices #16 (1.19 mm), # 100 (0.149 mm) y # 200 (0.074 mm), y finalmente se midió su concentración medida en grados Brix mediante un refractómetro, de donde se obtuvo un valor de 2 %. La solución obtenida se preservó adicionando benzoato de sodio al 0.5% por peso. En extracciones preliminares se determinó que la exposición del nopal a temperaturas mayores a los 60°C en tiempos mayores a 30 minutos, reduce la viscosidad.

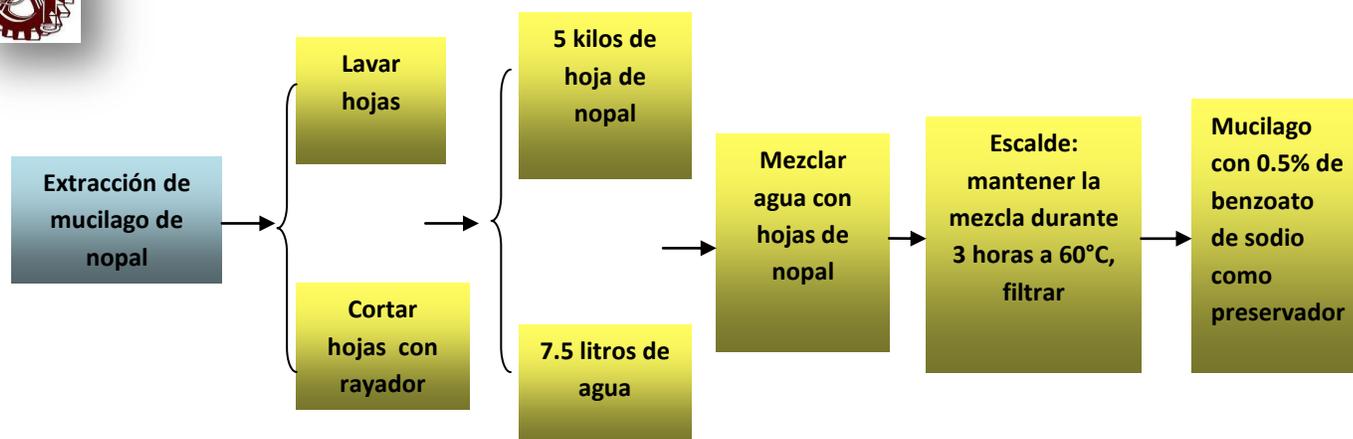


Figura 7- Método de extracción de mucilago



Figura 8- Hojas de nopal cortadas

### 3.1.4 Preparación de solución de alginato y caracterización

El valor de la concentración de la solución de alginato empleada fue de 0.50%, el cual se obtuvo de estudios reológicos realizados por Cano et al., (2010), comparando los resultados de un agente modificador de viscosidad comercial con el de soluciones de mucilago y alginato a diferentes concentraciones.

#### 3.1.4.1 Preparación de solución de alginato al 0.50 %

Se mezcló alginato con agua destilada a una relación 1:1 por volumen y se agitó de manera constante hasta obtener cierta homogeneidad. En cantidades de 1 litro de solución aproximadamente, se aplicó baño maría a una temperatura controlada de 40° C durante 5 minutos, ésto con el propósito de facilitar el filtrado. Los tamices empleados en el proceso de filtrado fueron: # 30 (0.59 mm), # 50 (0.297mm) y # 100 (0.149 mm). La

concentración de la solución después del último filtro fue de 2.3 % en grados Brix, la que posteriormente se diluyó hasta alcanzar 0.5 % (sustituto de agua de mezclado).

### 3.1.5 Superplastificante

Se empleó como reductor de agua de alto rango basado en carboxilatos, el superplastificante comercial Plastol 4000 (ver tabla 7), el cual cumple con la norma ASTM C 494-04 (aditivos tipo F). El propósito de la adición de este aditivo en la mezcla de concretos de baja relación agua/cemento (HPC  $a/c=0.30$ ), fue aumentar la trabajabilidad del concreto. La dosificación empleada se hizo según la ficha técnica del fabricante y con base en pruebas preliminares. La cantidad adicionada fue de 9 ml por cada kilogramo de cemento.

Tabla 7 - Características del súper-plastificante utilizado.

Material	Generación	Tipo	G.E (Kg/l)	Contenido de sólidos	Contenido de líquido	Dosificación
Plastol 4000	4	F	1.09	30 %	70 %	2-15 cm <sup>3</sup> /kg cemento

## 3.2 Preparación y caracterización de pastas de cemento

### 3.2.1 Tiempos de fraguado

Las pastas de cemento utilizadas para realizar las pruebas de tiempo de fraguado con las agujas de Vicat (ver Figura 9), se hicieron con relaciones  $a/c=0.30$  y  $0.60$ . Se elaboraron 8 pastas de cemento de acuerdo con la norma ASTM C 305-99, por duplicado para determinar el tiempo de fraguado, para un total de 16 pastillas (ver tabla 8). Las muestras control se elaboraron únicamente conteniendo agua y las restantes conteniendo soluciones de mucílago de nopal, alginato y mucílago/alginato a una concentración de 0.50 %.

Tabla 8- Determinación del número de pastas de cemento

Factores	Niveles	Variabes respuesta
a/c (agua/cemento)		Tiempo de fraguado
m/c (mucílago/cemento)		Viscosidad
al/c (alginato/cemento)	0.30 y 0.60	
mal/c (mucílago-alginato/cemento)		



Figura 9- Aparato de Vicat.

### 3.2.2 Espectroscopia IR

Se obtuvieron espectros de espectroscopia infrarroja (IR) del mucílago de nopal, solución de alginato y agente modificador de viscosidad comercial. Se prepararon seis pastas de cemento con relaciones  $a/c= 0.30$  y  $a/c=0.60$  tal como se detalla en la tabla 9.

Tabla 9- Pastas de cemento con adiciones de mucílago y alginato para IR.

Relación a/c	Tipo de solución en la mezcla	Concentración
0.30	Control	Ninguna
	Mucílago	0.5% y 1%
	Alginato	
0.60	Control	Ninguna
	Mucílago	0.5% y 1%
	Alginato	

Se obtuvieron espectros IR para todas las mezclas en estado fresco y en estado sólido al 1, 3 y 7 día de hidratación. Para poder llevar a cabo las lecturas en estado sólido se molió en el día de prueba una parte de cada muestra en un mortero de porcelana hasta obtener un polvo fino (cribado por el tamiz 200), con el propósito de obtener lecturas homogéneas del material y evitar dañar el cristal del equipo al momento de ser limpiado. Las lecturas de los espectros de IR se realizaron en un Espectrómetro Perkin Elmer, en un rango de infrarrojo medio, de un número de onda de 7000 a 700  $\text{cm}^{-1}$ .

Tabla 10- Nomenclatura y características de las muestras analizadas en IR

Características	Nomenclatura
Mucílago de nopal	Mucílago al 0.50% y 1%
Solución de alginato	Alginato al 0.50% y 1%
Pasta de cemento relación a/c= 0.30	Control 0.30
Pasta de cemento relación a/c=0.60	Control 0.60
Pastas de cemento con adición de alginato y/o mucílago a concentraciones de 0.5% y	Mezcla al 0.50% y Mezcla al 1%

1% (estado fresco)

**Espectros de pastas de cemento control a/c=0.30 y a/c=0.60, a 1 día, 3 días y 7 días de hidratación**

Control día 1, Control día 2, y Control día 3

**Espectros de pastas de cemento a/c= 0.30 y a/c=0.60, con mucílago y/o alginato a 0.5 y 1%, a 1 día, 3 días y 7 días de hidratación**

Mezcla día 1, Mezcla día 2 y Mezcla día 3

### 3.3 Mezclas de concreto.

#### 3.3.1 Diseño de experimentos

La cantidad de especímenes realizados necesarios para llevar a cabo la fase experimental en esta investigación, se determinó con base al número de factores y niveles que incurren en el diseño experimental tal como se observa en la tabla 11.

Tabla 11- Cantidad de especímenes elaborados para desarrollar el experimento.

Factores	Niveles	Variable respuesta
<b>Relación solución/cemento</b>	0.30 y 0.60	- Coeficiente de difusión y Permeabilidad rápida a cloruros
<b>Soluciones (fluidos)</b>	a/c (agua/cemento) (mucílago/cemento) (alginato/cemento) (mucílago, alginato/cemento)	m/c al/c ma/c -Profundidad de carbonatación
<b>Tiempo de curado (días)</b>	0 y 28	-Resistencia mecánica
<b>Edades de prueba (días)</b>	60 y 120	

$2^3 * 4^1 * 9 = 288$  –tres factores con dos niveles, un factor con un nivel y 9 réplicas (Diseño factorial asimétrico)

El tamaño de los cilindros colados fueron de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura. Según el diseño experimental se requirió de 9 especímenes por cada diseño de mezcla, esto, en función de las pruebas realizadas en estados endurecidos para obtener las

variables respuestas que son: resistencia a la compresión, cloruros y carbonatación (cada una con tres réplicas). Los especímenes tuvieron dos tratamiento de curados, uno de 0 y otro de 28 días en húmedo a temperatura controlada de  $23 \pm 3C^{\circ}$ .

El total de especímenes realizados fue de 288 especímenes (ver tabla 12), donde 72 son de control (36 por cada relación a/c), 72 conteniendo mucílago de nopal, 72 con alginato y 72 con alginato y mucílago.

Tabla 12- cantidad de especímenes de concreto elaborados.

Tipo de solución empleada en la mezcla	Relación a/c	Tiempo de curado en húmedo (días)				totales por tipo de mezcla
		0		28		
		Edad de prueba (días)		Edad de prueba (días)		
		60	120	60	120	
agua/cemento	0.30	9	9	9	9	36
	0.60	9	9	9	9	36
mucilago/cemento	0.30	9	9	9	9	36
	0.60	9	9	9	9	36
Alginato/cemento	0.30	9	9	9	9	36
	0.60	9	9	9	9	36
Mucilago -alginato/ cemento	0.30	9	9	9	9	36
	0.60	9	9	9	9	36
<b>Totales</b>		72	72	72	72	<b>288</b>

### 3.3.2 Diseño y elaboración de mezclas para la fabricación de especímenes

Se diseñaron dos tipos de concreto, un con relación a/c= 0.30 y otro con relación a/c= 0.60, que representan los tipos de concreto de alto desempeño y ordinario, respectivamente. La primer mezcla de concreto se diseñó de acuerdo con el método HPC (Aitcin, 1990) y la segunda mezcla por el método de volúmenes absolutos del ACI (Kosmastka, 1992) (ver tabla 13). En cada tipo de concreto emplearon tres diferentes soluciones para sustituir el agua de mezclado (control): mucílago (solución al 0.5%), alginato (solución al 0.5%) y la última conteniendo partes iguales de mucílago y alginato (al 0.5%).

Tabla 13- Proporciones para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto de las mezclas de concreto utilizadas

Materiales	Tipo de concreto	
	HPC (a/c=0.30)	ACI (a/c=0.60)
<b>Agregado grueso (Kg)</b>	974	860
<b>Agregado fino (Kg)</b>	672	797
<b>Cemento (Kg)</b>	519	345
<b>Agua (Kg)</b>	157	207
<b>Superplastificante (ml)</b>	4671	

Para la elaboración de las mezclas se utilizó una revolvedora con capacidad de un saco de 50 Kg, y para la compactación uniforme de los cilindros se empleó una mesa vibratoria. Se aplicó vibrado por un tiempo de 3-5 segundos para las mezclas ACI y de 5-8 segundos para los HPC. Las mezclas se caracterizaron en estado fresco mediante pruebas de revenimiento, peso volumétrico, contenido de aire y temperatura (Tabla 14).

Tabla 14- Propiedades en estado fresco de los concretos elaborados.

Tipo de solución empleada en la mezcla	Revenimiento (cm)		Contenido de aire (%)		Temperatura (°C)		Peso Volumétrico (Kg/m <sup>3</sup> )	
	HPC	ACI	HPC	ACI	HPC	ACI	HPC	ACI
	a/c=0.30	a/c=0.60	a/c=0.30	a/c=0.60	a/c=0.30	a/c=0.60	a/c=0.30	a/c=0.60
<b>Agua</b>	20.0	16.2	1.5	1.5	24.0	24.5	2331	2260
<b>Mucílago</b>	21.0	19.0	1.9	2.4	24.5	23.5	2341	2245
<b>Alginato</b>	21.0	14.0	2.3	2.5	23.5	22.0	2331	2227
<b>Mucílago-alginato</b>	21.0	15.4	2.1	2.1	22.0	24.0	2349	2231

### 3.3.3 Propiedades del Concreto endurecido

#### 3.3.3.1 Resistencia a la compresión axial

La resistencia a la compresión axial de los especímenes de concreto se determinó a las edades de 60 y 120 días en una prensa hidráulica marca Elvec con capacidad de 120 toneladas. El procedimiento del ensaye se hizo de acuerdo a la norma ASTM C39-03.



Todas las pruebas se hicieron por triplicado. Para nivelar las caras de aplicación de carga se emplearon discos de neopreno y la velocidad de aplicación de carga fue 240 kg/s.

Se realizó un análisis de varianza de los datos obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión axial de las dos edades de prueba, con el propósito de determinar qué factores son los que influyen en los resultados. El análisis estadístico se hizo con el software NCS 2007.

### **3.3.3.2 Absorción capilar y porosidad**

Las pruebas de sorptividad y porosidad se realizaron únicamente en los especímenes de concreto con 120 días de edad, debido a que en un principio no se contempló en el diseño de experimentos, Sin embargo, se procedió a realizarlas para tener mayor criterio al momento del análisis de resultados de las pruebas de permeabilidad a cloruros ASTM C 1202-97 y de resistencia a la compresión. El procedimiento para determinar la absorción capilar se hizo según la norma ASTM C 642-97, por triplicado. Los especímenes fueron de tamaño de 100 mm de diámetro x 100 mm de altura, fueron secados al horno a 105 °C hasta alcanzar peso constante con diferencia no mayor de 0.5% en intervalos de 24 horas, posteriormente se enfriaron y se les aplicó resina epóxica en la parte curva, dejando libre una para la prueba de absorción, se dejaron durante 24 horas a temperatura ambiente para propiciar el secado de la resina. Nuevamente se metieron al horno hasta alcanzar un peso constante y luego de enfriados, se procedió a realizar la prueba de absorción.

Se colocaron las muestras en recipientes plásticos con soportes en la cara inferior de los especímenes para permitir la absorción libre del agua. El nivel de agua fue mantenido entre 2-5 mm por encima del nivel de la cara inferior del espécimen (ver Figura 10). Las lecturas de pesado se hicieron a los 5,10, 15, 20, 30, 60, 120, 240, 480, 1440 y 2880 minutos, para lo cual se retiraba el espécimen del recipiente y se eliminaba con una franela húmeda el exceso de agua, pesándolo posteriormente en una báscula digital con precisión de 0.10 g.

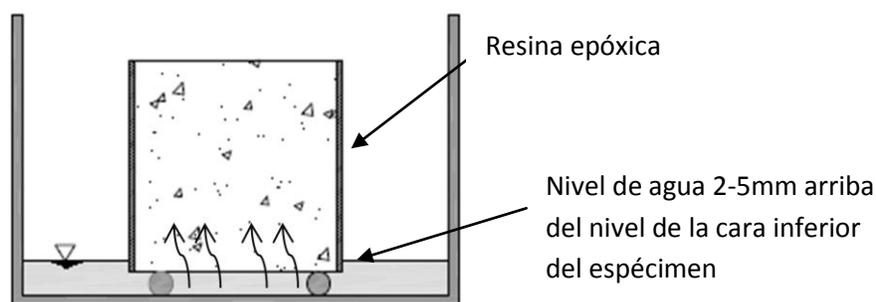


Figura 10- Esquema de la prueba de absorción de agua por capilaridad

La sorptividad se determinó con la Ec 8, como sigue:

$$i = St^{1/2} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$i$ = incremento en peso  $g/mm^2$  a partir del contacto con el agua.

$t$ = tiempo en minutos (tiempo en el cual se determinó el peso del espécimen)

$S$ = sorptividad medida en  $mm/min^{0.5}$

Para determinar el porcentaje total de vacíos, los especímenes fueron puestos a saturar en agua, hirviéndolos durante 5 horas para después dejarlos en saturación mínimo por 24 horas. El peso registrado superficialmente seco y saturado, corresponde al peso saturado, luego estos fueron pesados sumergidos en agua (peso sumergido). Finalmente fueron puestos al horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas hasta alcanzar peso constante (peso seco).

La porosidad total se expresa en porcentaje por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de porosidad total} = \frac{W_{saturado} - W_{seco}}{W_{saturado} - W_{sumergido}} \times 100 \quad \text{Ec. 25}$$

De acuerdo con la Red DURAR (1997), los criterios para evaluar la calidad de los morteros y concretos en función del porcentaje de vacíos se muestra en la tabla 15.

Tabla 15- Criterios de evaluación en porcentaje de vacíos.

Porcentaje total de vacíos	Características del concreto o mortero
< 10%	Indica un mortero de buena calidad y compacidad
10% - 15%	Indica un mortero de moderada calidad
> 15%	Indica un mortero de durabilidad inadecuada

### 3.3.3.3 Permeabilidad y difusión de cloruros

#### 3.3.3.3.1 Prueba rápida de permeabilidad a cloruros (RCPT)

Se realizó la prueba rápida de permeabilidad a cloruros según las norma ASTM C 1202-97 o ASSTHO T 277, a los especímenes a edades de 60 y 120 días. Para llevarla a cabo, se cortaron piezas de 50 mm de espesor y 100 mm de diámetro, que posteriormente fueron sometidas a saturación durante tres horas en un contenedor con agua desionizada conectada a una bomba de vacío (20 mm Hg, 0.03 atm). Al finalizar las tres horas se liberó el vacío y se dejaron en saturación en agua desionizada durante 16 horas. Una vez saturadas, se secaron las rodajas y colocaron en celdas con reservorios de soluciones, una de NaCl al 3.0 % y la otra NaOH al 0.30 N (Ver Figura 11). La prueba consistió en aplicar un flujo de corriente eléctrica a través del espécimen durante 6 horas a un voltaje mantenido de 60 V (Prakash et al, 2002).

Se hicieron corridas de 6 muestras (3 sin curados y 3 curados) del mismo tipo de mezcla; los resultados obtenidos se evaluaron según el índice de permeabilidad a cloruros de acuerdo a la tabla 16.

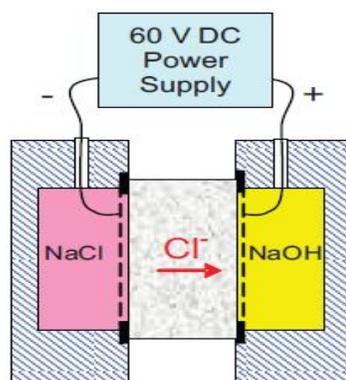


Figura 11- Esquema de la prueba rápida de permeabilidad a cloruros.



Tabla 16– Valores según la norma ASTM C 1202 “permeabilidad a cloruros basado en paso de carga”.

Permeabilidad a cloruros	Paso de cargas (Coulombs)	Tipo de concreto típico
Alta	>4000	Alta relación a/c (>0.6) para concreto convencional
Moderada	2000 a 4000	moderada relación a/c (0.4 -0.5) para concreto convencional
Baja	1000 a 2000	Baja relación a/c (<0.4) para concreto convencional
Muy baja	100 a 1000	Concretos con aditivos inhibidores, concretos sellados
Despreciable	<100	Concreto poliméricos

#### 3.3.3.3.2 Coeficientes de difusión del ion cloruro

En la prueba del método acelerado de penetración del ion cloruro, se usaron especímenes de concreto de 120 días de edad. De acuerdo con la norma NORDTEST NT BUILD 443, los especímenes se cortaron a la mitad con el propósito de usar una de ellas como control y la otra para ser expuesta a una solución de NaCl al 16.5%.

Antes de la exposición a una solución de NaCl al 16.5% (2.8M), los especímenes fueron inmersos en una solución de  $\text{Ca(OH)}_2$  al 0.30 % de concentración a 23°C en un contenedor plástico cerrado. Posteriormente se pesaron cada 24 horas hasta que la variación fuera menor del 0.1% del peso en cada muestra. Una vez estabilizado, se secaron superficialmente por un tiempo de una hora y se aplicó un recubrimiento epóxico de aproximadamente 1 mm de espesor, excepto la cara a exponer, dejándose secar durante 24 horas hasta alcanzar el endurecimiento del recubrimiento, luego fueron inmersos nuevamente en la solución de  $\text{Ca(OH)}_2$  para alcanzar el equilibrio como se describió anteriormente. Posteriormente fueron expuestos a una la solución de NaCl al 16.5% durante 35 días.



Figura 12- Herramienta extractora de polvos de concreto.

Después del tiempo de exposición se extrajo el polvo de 8 capas en cada muestra, cada una con un espesor de dos milímetros mediante una herramienta extractora (ver Figura 12). Se obtuvo un mínimo de 5 g de polvo por capa y se determinó la concentración de cloruros por el método de titulación Volhard según la norma NT BUILD 208. Esta norma consiste en precipitar los iones cloruros con nitrato de plata en forma de cloruros de plata, los cuales se titulan con solución de tiocianato de amonio. Para determinar el contenido de cloruros se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{Peso \% Cl}^{-} = 3.545 \frac{V_1 N_1 - V_2 N_2}{m} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

V1= Cantidad agregada de solución de nitrato de plata

N1= Normalidad de la solución de nitrato de plata

V2= Cantidad de solución de tiocianato de amonio durante la titulación

N2= Normalidad de la solución de tiocianato de amonio

m= peso de la muestra (g)

Posteriormente se usó el programa TableCurve 2D™ para determinar la concentración superficial y el coeficiente de difusión, ajustando los perfiles de concentración de cloruros obtenidos a la solución de la 2da ley de Fick para las condiciones de frontera e iniciales indicadas en la sección 2.2.2.

$$C(x, t) = C_0(1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right]) \quad \text{Ec. 10}$$

De manera similar a los resultados de resistencia a la compresión, se elaboró el análisis de varianza de los datos a las dos edades de prueba, con el propósito de determinar si la adición de mucílago de nopal y alginato en concretos influye en los resultados.

#### **3.3.3.4 Carbonatación acelerada del concreto**

La prueba acelerada a carbonatación se llevó a cabo en especímenes de concreto de 180 días de edad, a los cuales se les aplicó resina epóxica en sus extremos, para dejar libre a exposición el área superficial curva. Posteriormente fueron colocados en la cámara de carbonatación de condiciones ambientales de  $60\% \pm 5\%$  de humedad relativa y temperatura de  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , y de concentración de  $\text{CO}_2$  de 4.40%; tal como se detalla en la Figura 13. La determinación del frente de carbonatación se realizó a los 120 días después de iniciar la exposición.

El frente de carbonatación fue determinado rociando los especímenes cortados transversalmente con fenolftaleína al 1% en alcohol (indicador de la profundidad de carbonatación). Después del rociado, se hicieron apreciables las áreas carbonatadas sin cambios de color, y las no carbonatadas (con un pH mayor de 9 a 9.5) que adquirieron un color rosado brillante. Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente progresó el "frente" de carbonatación dentro del concreto.

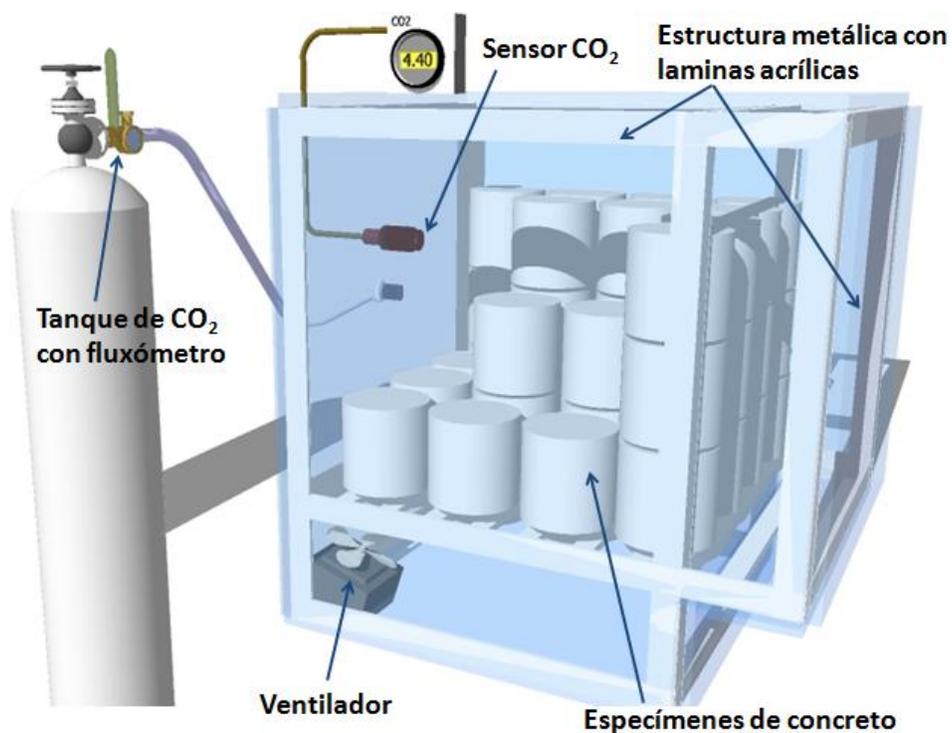


Figura 13- Esquema de la prueba acelerada de carbonatación.

Conocida la profundidad de carbonatación y el tiempo de exposición, se procedió a calcular el coeficiente de carbonatación mediante la ecuación siguiente:

$$d = Kt^{0.5} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

d=profundidad de carbonatación

t=tiempo de exposición

K=coeficiente de carbonatación.

El coeficiente de carbonatación calculado es útil para determinar el tiempo necesario en una estructura para que el frente de carbonatación alcance el acero de refuerzo colocado a cierta profundidad en distintos ambientes naturales.

### 3.4 Pruebas electroquímicas en barras de acero

Para determinar si el mucílago de nopal y la solución de alginato, poseen propiedades inhibitoras de corrosión en acero de refuerzo, se realizó un experimento similar al reportado por Torres-Acosta (2007). Se elaboraron 5 celdas electroquímicas conteniendo como medio electrolítico agua (control), mucílago de nopal a 0.5% y 1%, y alginato a 0.5% y 1%. Inicialmente se colocaron 5 varillas de acero al carbón de 9.5 mm de diámetro en cada celda (a excepción el control, 4), y posteriormente se agregaron dos más a cada una al mes de haber dado inicio la experimentación (ver Figura 14 y 15). Esto, se hizo porque las varillas iniciales no se pasivaron en el medio alcalino con pH 13 (saturados en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) al mes, probablemente porque fueron las mismas utilizadas por Torres-Acosta (2007) en su experimentación, y quedaron activas por la presencia de cloruros, a pesar que se limpiaron mecánicamente y con acetona para evitar su presencia.



Figura 14- Celdas electroquímicas control (agua), con mucilago (0.5% y 1%) y alginato (0.5% y 1%).



Figura 15- Celdas electroquímicas con 7 varillas de acero de refuerzo

Diariamente se tomaron lecturas de potencial usando un voltímetro en DC con  $200\text{ m}\Omega$  de impedancia. Todas las mediciones fueron realizadas vs un electrodo de calomel saturado (SCE) colocado dentro de cada celda cada vez que se tomaba la lectura de potencial. El equipo usado para hacer las mediciones de  $R_p$  aparente, fue un potencióstato Gamry Instruments, Inc. Reference 600 (ver Figura 16). El electrodo de referencia empleado fue el SCE de marca Gamry, y como contra electrodo se usó una barra de grafito. El potencial impuesto fue variable desde circuito de potencial abierto en la dirección catódica, con una cantidad de  $20\text{mV}$  y velocidad de escaneo de  $0.05\text{ mV s}^{-1}$ . Los valores de  $R_p$  fueron estimados de la pendiente de la curva.

Posteriormente a la etapa de pasivación, se procedió a contaminar cada celda con NaCl, en diferentes proporciones cada 7 días, hasta alcanzar el estado activo por corrosión en todas las varillas. Con los resultados se podrá determinar cuáles de las soluciones empleadas presentan un comportamiento inhibitor de corrosión para el acero de refuerzo.



Figura 16- Potencióstato Gamry Instruments, Inc. PCI4/750, conectado a celda electroquímica.

## CAPÍTULO IV- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Pastas de cemento

#### 4.1.1 Tiempo de fraguado

Los resultados del tiempo de fraguado para las mezclas con relación  $a/c=0.30$  se muestran en la Figura 17. El tiempo de fraguado inicial de las pastas que contenían mucílago de nopal aumentó en 16.7% con respecto al control, en tanto las que contenían alginato y mucílago/alginato no presentaron incrementos, los valores que mostraron fueron muy cercanos al control. En tanto, en el tiempo de fraguado final las pastas con mucílago de nopal, alginato y mucílago/alginato lo retardaron en 16.1%, 1% y 15.1%, respectivamente.

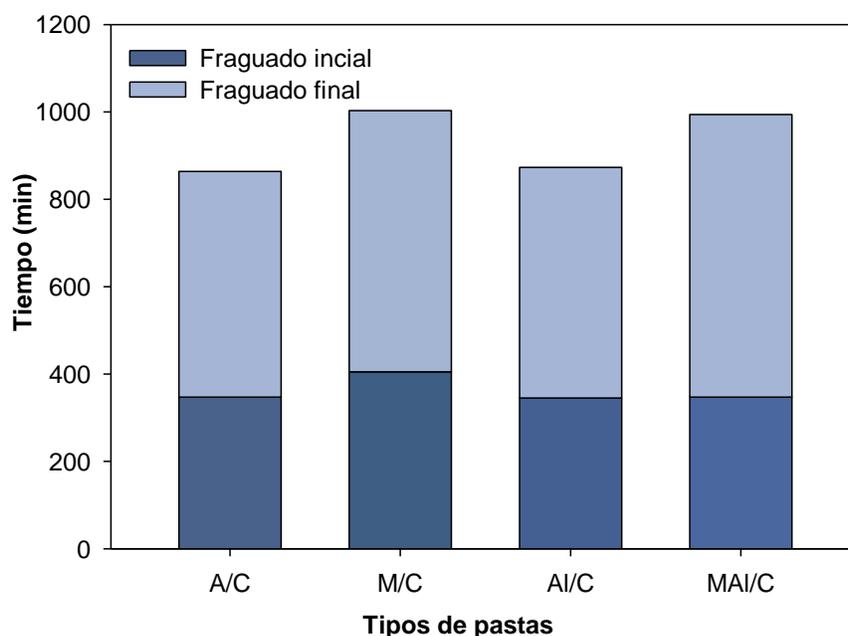


Figura 17- Tiempos de fraguados para distintas pastas de cemento con relación  $a/c=0.30$ .

En la Figura 18, se presenta los tiempos de fraguado para las mezclas con relación  $a/c=0.60$ . El tiempo de inicio de fraguado de las mezclas que contienen mucílago de nopal se retardó en 68.23% con respecto al control, y los de alginato y mucílago/alginato en 24.84% y 56.60% respectivamente. En el tiempo de fraguado final, las pastas con aditivos se retardaron en orden de 23.10% en las con mucílago, 3.14% las con alginato y 8.51% las con mucílago/alginato, con respecto al control. Con base a lo anterior, es evidente que el

mucílago de nopal tuvo efectos retardantes en el proceso de hidratación del cemento y en mayor medida en altas relaciones agua/cemento. Por otro lado, a pesar de que el contenido de agua en las relaciones  $a/c=0.30$  es bajo, el mucílago de nopal tuvo efectos sobre la hidratación del cemento, retardando el tiempo de fraguado tanto al inicio como al final de la prueba, lo que puede ser de beneficio al proceso de hidratación para estos tipos de concretos. El retardo observado en los tiempos de fraguado, especialmente en los concretos de relación  $a/c=0.60$ , puede ser aprovechado en condiciones de clima cálido, donde se hace necesario el uso de aditivos retardantes comerciales.

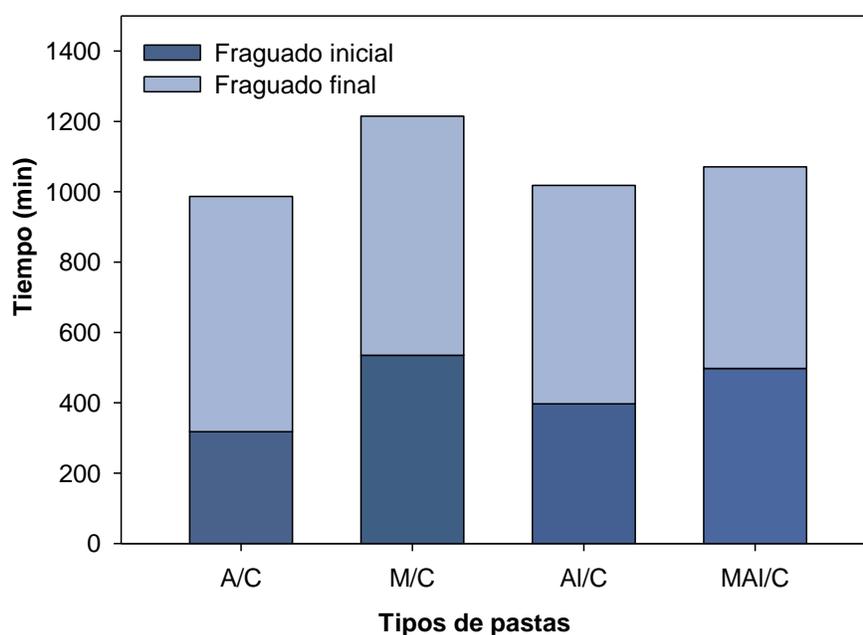


Figura 18- Tiempos de fraguados para distintas pastas de cemento con relación  $a/c=0.60$ .

## 4.1.2 Espectroscopia IR

### 4.1.2.1 Mucílago de *Opuntia ficus indica*

En la Figura 19 se muestra el espectro IR del mucílago de Nopal de *Opuntia Ficus Indica*, el cual está determinado por las bandas principales asociadas a los movimientos de los enlaces moleculares característicos que lo constituyen. En la zona de estiramientos, entre 4000 y 2500  $\text{cm}^{-1}$  se presentan dos picos principales. El primero en 3479  $\text{cm}^{-1}$ , amplio e intenso asociado con los estiramientos del enlace O-H pertenecientes al agua del mucílago o por los O-H de los polisacáridos, con presencia de una banda traslapada perteneciente al grupo N-H de una amida secundaria, tal como lo menciona Chandra et al (1998). El segundo, ubicado en 2930  $\text{cm}^{-1}$ , de forma bifurcada y con intensidad similar que el anterior, perteneciente a estiramientos tipo C-H encontrados tanto en polisacáridos como en algunos aminoácidos. En la zona de movimientos moleculares de enlaces dobles (2000 y 1500  $\text{cm}^{-1}$ ) se observan dos picos; el primero en 1634  $\text{cm}^{-1}$  agudo e intenso y el segundo en 1547  $\text{cm}^{-1}$  que parece ser un brazo del pico anterior con forma bifurcada.

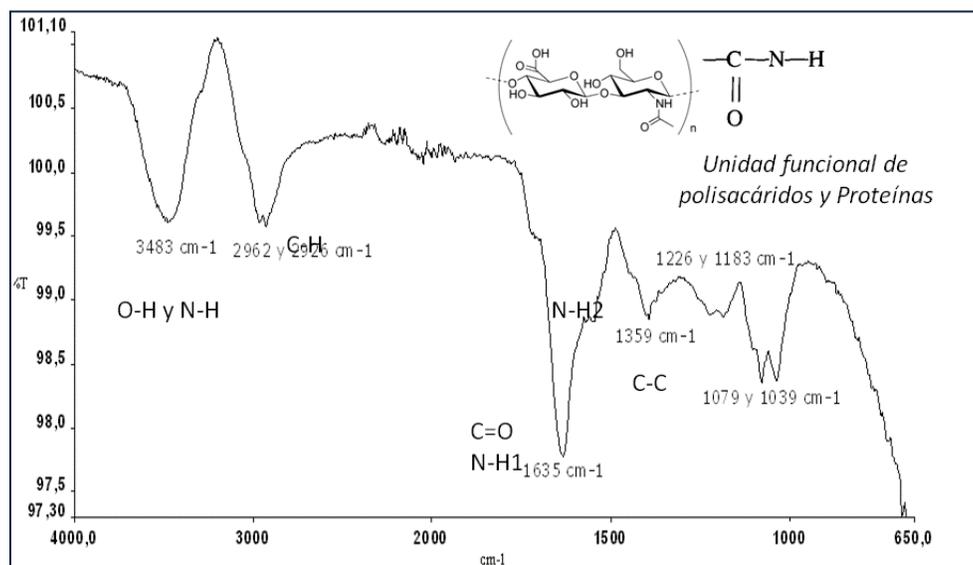


Figura 19- Espectro de mucílago de Opuntia Ficus Indica

El primer pico es característico de los estiramientos en el carbono alfa y beta correspondiente al grupo C=O de una acetona (entre los 1800 y 1600  $\text{cm}^{-1}$ ) con una vibración de deformación N-H asociado a la presencia de una amida primaria; y el segundo

en  $1547\text{ cm}^{-1}$  aparece como una banda bifurcada que corresponde a las deformaciones de los grupos N-H de una amida secundaria.

En la región de los enlaces C-O ( $1500\text{ cm}^{-1}$  -  $1000\text{ cm}^{-1}$ ), se presentan tres picos principales. El que se ubica en  $1394\text{ cm}^{-1}$  está asociado a los estiramientos tipo C-O y a los C-C (cerca de  $1400\text{ cm}^{-1}$ ), en tanto los otros dos picos de forma bifurcada, no corresponden a un número de onda característico, que pueden deberse a la presencia de polisacáridos.

El resultado muestra la presencia de proteínas y polisacáridos en la muestra de mucílago de nopal, debido a que los grupos amida encontrados son los principales grupos funcionales asociados a la estructura química de un aminoácido, tal como lo describen en investigaciones previas (Griffiths et al, 1907; Sands et al, 1929).

#### **4.1.2.2 Alginato**

En la Figura 20 se muestra el espectro de la solución de alginato. En la zona de los estiramientos de O-H se encuentra un pico de intensidad fuerte y ancho ( $3369\text{ cm}^{-1}$ ) el cual está asociado con la presencia de los grupos O-H de los ácidos urónicos (ácido gulurónico y ácido manurónico), que son los principales componentes del ácido algínico. En  $2117\text{ cm}^{-1}$  se observa un pico amplio de muy poca intensidad asociado a los estiramientos C-H y en  $1634\text{ cm}^{-1}$  otro pico amplio de fuerte intensidad, que corresponde a los estiramientos C=O pertenecientes al grupo del ácido carboxílico de los ácidos urónicos antes mencionados. Al final del espectro, alrededor de  $1117\text{ cm}^{-1}$ , se encuentra un pico muy pequeño que representa los estiramientos C-C correspondientes al anillo que forma parte de estos mismos ácidos. De acuerdo con estos resultados, se puede decir que el alginato está compuesto únicamente por polisacáridos, confirmando lo encontrado en investigaciones previas (Arvizú et al, 2002).

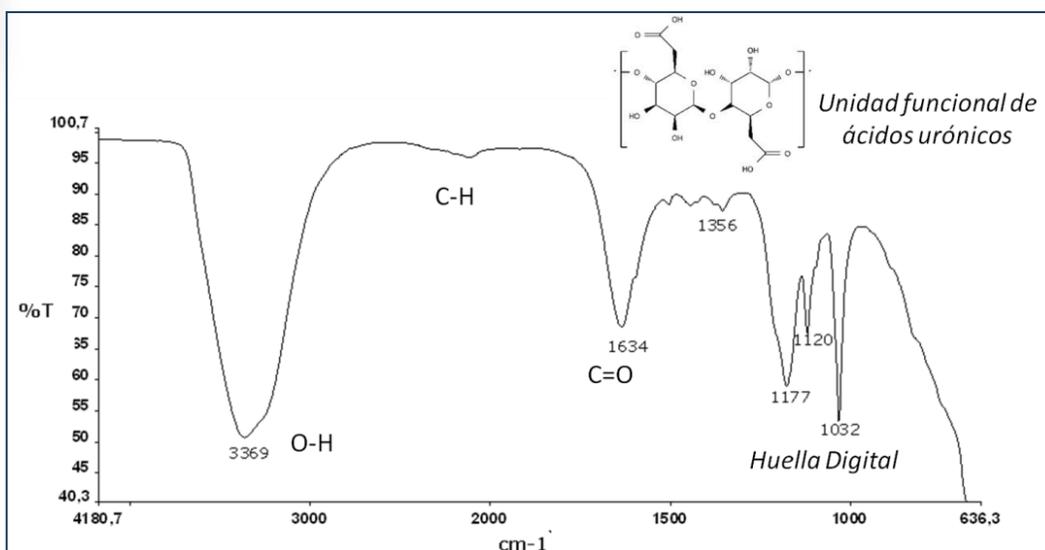


Figura 20- Espectro de IR para alginato.

#### 4.1.2.3 Influencia de las adiciones de mucílago en las pastas de cemento

Para simplificar el análisis de los espectros IR de las pastas de cemento obtenidas y por la similitud en los primeros días de estado endurecido (1 y 2 día); en las Figuras que se presentan a continuación se muestran únicamente los espectros de pastas de cemento en estado fresco y al tercer día de edad, tanto para el control y de pastas con aditivos (mucílago de nopal y alginato, a 1% de concentración que es el valor con el cual se observa mayormente el efecto de los aditivos).

En la Figura 21 se muestran los espectros de las pastas  $a/c=0.60$  control y con mucílago de nopal en función del tiempo. De los espectros de pastas de cemento en estado fresco, el pico entre  $3700-3100\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a los movimientos de los enlaces O-H del agua libre y de S-O de la etringita, son similares en ambas mezclas; esto también ocurre en el pico ubicado en  $1635\text{ cm}^{-1}$  asociado a las deformaciones H-O-H del agua. Con ello se evidencia que las amidas primarias presentes en el mucílago no ejercen ningún efecto en los grupos funcionales de las pastas en estado fresco. En  $1427\text{ cm}^{-1}$  se registra un pico poco perceptible y de poca intensidad únicamente en las pastas con mucílago, el cual puede estar asociado con la presencia de la amida secundaria del mucílago, la que puede ser responsable de la mejora en la trabajabilidad en las pastas de cemento (Chandra et al, 1998). Finalmente, el pico en  $1110\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la formación de la etringita no presenta diferencia en las mezclas.

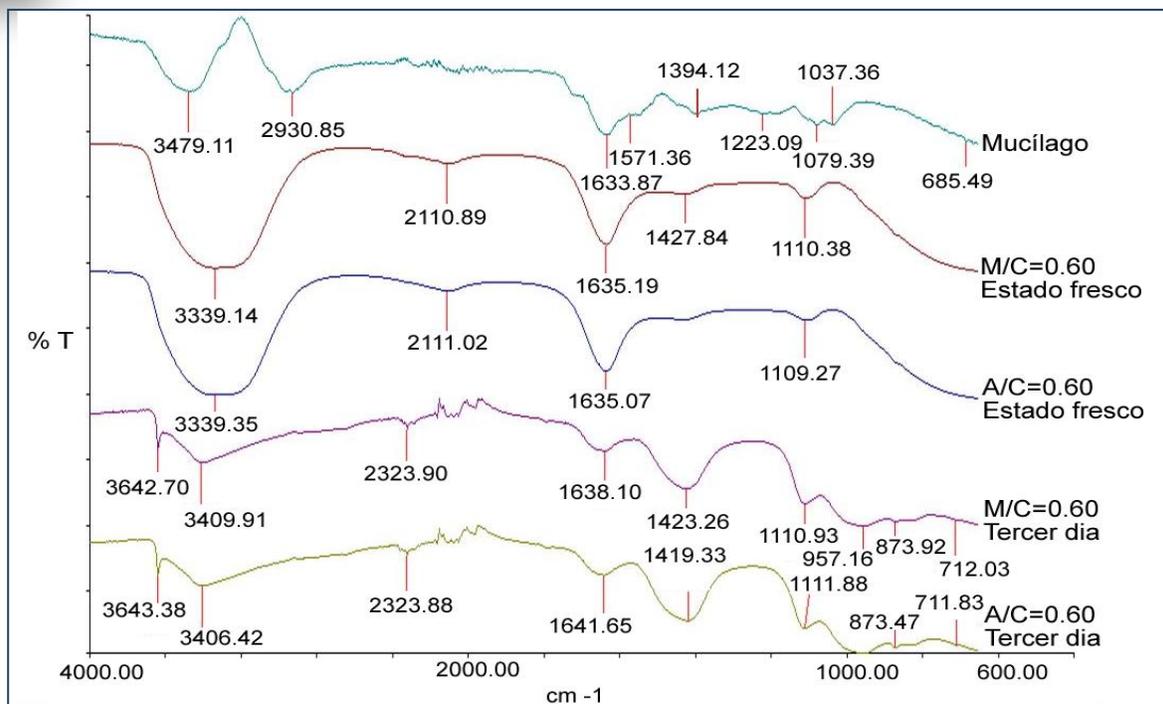


Figura 21- Espectros de pastas de cemento a/c=0.60 con adiciones de mucílago de nopal (1% de concentración) en función del tiempo.

Al analizar los espectros en función del tiempo, se observa que los picos asociados con el agua disminuyen debido al avance de la hidratación del cemento, así como la presencia en  $1420\text{ cm}^{-1}$  de un pico de forma amplia y poca intensidad (menor en la pasta con mucílago de nopal), el cual está asociado a la formación de productos de hidratación del cemento como la portlandita. En la zona de la huella digital, en ambas pastas se presentan picos a  $1110\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a etringita, en  $960\text{ cm}^{-1}$  los picos característicos de los enlaces Si-O de las pastas hidratadas y a  $870\text{ cm}^{-1}$  los asociados a  $\text{CO}_3$  y fases silicato. Al ser menos intenso el pico en  $1420\text{ cm}^{-1}$  en las pastas de cemento con mucílago de nopal, se puede considerar que este tiene efectos en la formación de cristales de portlandita que pueden afectar las propiedades del concreto endurecido, tal como lo describen Chandra et al (1998).

En la Figura 22, se presentan los espectros IR obtenidos de pastas de cemento con relación a/c=0.30 control y con mucílago de nopal en función del tiempo. En estado fresco, en  $3350\text{ cm}^{-1}$  los picos correspondientes a los estiramientos O-H y S-O, y los de

1635  $\text{cm}^{-1}$  de O-H del agua, son similares en ambas mezclas. De igual forma que en las pastas  $a/c=0.60$ , en 1424  $\text{cm}^{-1}$  la presencia de portlandita y calcita es menor en las pastas con mucílago que el control. En la zona de la huella digital, el pico en 1109  $\text{cm}^{-1}$  que corresponde a la etringita es menos intenso en las pastas con mucílago de nopal.

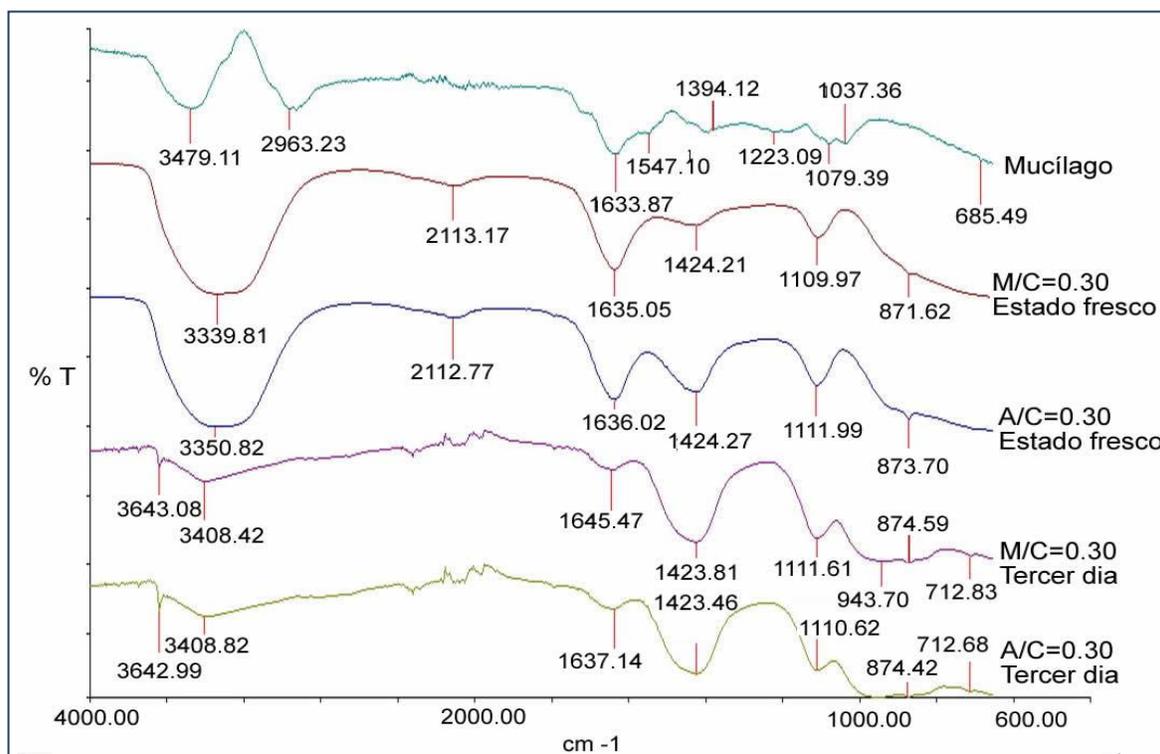


Figura 22- Espectros de pastas de cemento  $a/c=0.30$  con adiciones de mucílago de nopal (1% de concentración) en función del tiempo.

Al tercer día, desaparecen los estiramientos O-H en 3550  $\text{cm}^{-1}$ , debido al proceso de hidratación y descenso de la concentración de agua libre. El pico en 1635  $\text{cm}^{-1}$  se hace menos intenso en ambas mezclas. En 1423  $\text{cm}^{-1}$  los picos asociados con la portlandita y calcita se hacen menos intensos en el control que en la pasta con mucílago. La formación de etringita en 1110  $\text{cm}^{-1}$ , es más intenso en las pastas con mucílago que el control. Debido a la alta disponibilidad de iones de calcio, el mucílago de nopal, actúa de manera similar a los polímeros sintéticos; el grupo carboxilo que posee puede que haya formado compuestos complejos con los iones divalentes del calcio, dando como resultado un ligero incremento en la intensidad del pico en 1423  $\text{cm}^{-1}$ .



Con base a lo descrito anteriormente, se puede decir que no hay modificación significativa en las principales vibraciones de la hidratación de la pasta de cemento a causa de la adición del mucílago de nopal. Sin embargo, aunque no se presencia en las pastas endurecidas los picos de los polisacáridos, se puede pensar que los grupos carboxilos y aminas del mucílago de nopal están formando nuevos enlaces o fuerzas de atracción con elementos metálicos en estado libre como el calcio, de tal manera que estén actuando como agentes ligantes, y quizá estos movimientos se encuentran traslapados con los enlaces Ca-O que aparecen durante el proceso de hidratación. Posiblemente los alcances y limitaciones en esta zona del infrarrojo impiden observar estas vibraciones, ya que se observan con más frecuencia los movimientos moleculares de los compuestos con más contenido de origen orgánico.

#### **4.1.2.4 Influencia del alginato en las pastas de cemento**

En la Figura 23, se muestran los espectros de solución de alginato, pastas de cemento con relación a/c=0.60 control y de alginato en función del tiempo. En estado fresco, los pico en  $3340\text{ cm}^{-1}$  y  $1635\text{ cm}^{-1}$  corresponden a los estiramientos O-H del agua libre, los cuales son similares en ambas mezclas. En  $1417\text{ cm}^{-1}$  se observa el grupo carboxilo perteneciente al alginato únicamente en las pastas con aditivo. El pico en  $1109\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde a la formación de etringita es similar en ambas mezclas. Con el paso del tiempo se observa que en todas las mezclas desaparecen los picos asociados a la presencia de agua como consecuencia del proceso de hidratación; además se muestra la presencia de un pico ancho en  $1400\text{ cm}^{-1}$  que es atribuido a la formación de calcita y portlandita de menor intensidad en el control. En la mezcla control aparece en  $1100\text{ cm}^{-1}$  un pico que corresponde con la formación de la etringita, el cual es modificado o retardado en la mezcla con alginato; posteriormente en ambas mezclas se observan los picos en  $958\text{ cm}^{-1}$  y  $870\text{ cm}^{-1}$ , que se refieren a la aparición de las fases silicato y las vibraciones de los carbonatos de calcio.

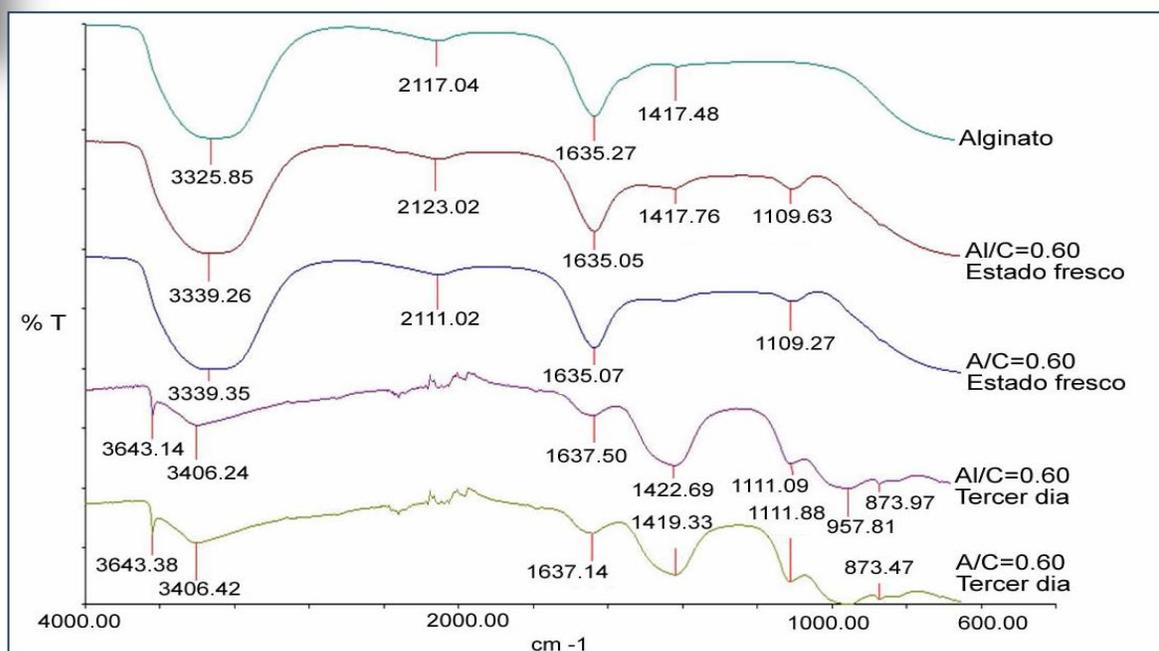


Figura 23- Espectros de pastas de cemento  $a/c=0.60$  con adiciones de alginato (1% de concentración) en función del tiempo.

Los espectros de pastas de cemento con relación  $a/c=0.30$  conteniendo alginato y en función del tiempo, se muestran en la Figura 24. En esta Figura, igualmente que la anterior, se presentan los picos característicos atribuidos a la presencia de agua libre, la aparición acelerada de portlandita, calcita, etringita y fases silicato.

Estado fresco, en ambas pastas (control y alginato) se observa que los picos relacionados a los estiramientos O-H del agua, los con la presencia de calcita y portlandita, etringita y los asociado a los enlaces Si-O de las fases silicato de la pasta hidratada, son similares en ambas pastas. Con el paso del tiempo, en ambas mezclas se puede observar un decremento en la intensidad de los picos asociados con el agua, debido al avance de hidratación de las pastas. Además, se presenta de forma más evidente la presencia de los picos en  $1400\text{ cm}^{-1}$  (calcita y portlandita) y en  $1110\text{ cm}^{-1}$  (etringita). Los picos en  $946\text{ cm}^{-1}$  y  $876\text{ cm}^{-1}$  corresponden a las fases silicato y a los carbonatos respectivamente. No se observan diferencias significativas en ninguno de los grupos funcionales en ambas mezclas.

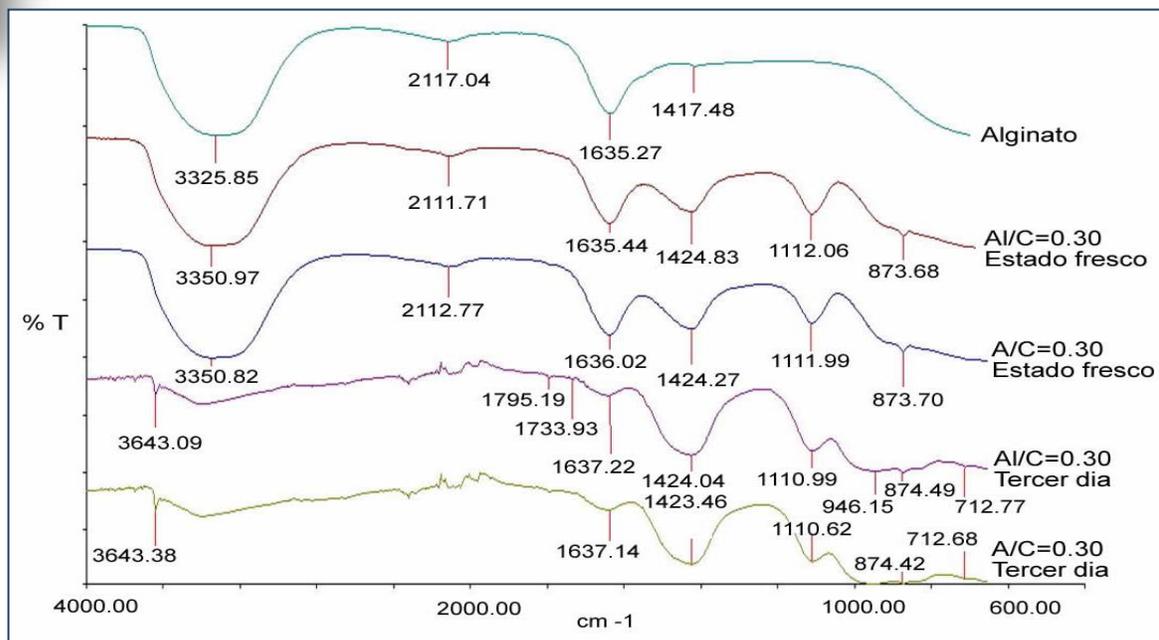


Figura 24- Espectros de las pastas de cemento a/c=0.30 con adiciones de alginato (1% de concentración) en función del tiempo.

Con respecto a lo descrito anteriormente, aparentemente la adición de alginato no modifican de alguna manera las vibraciones características del avance de hidratación de una pasta de cemento, aunque se ha reportado que se da la formación de geles entre los ácidos urónicos de los alginato y los iones Calcio. Es posible que haya un cierto mecanismo de retardo en la hidratación, como apareció en uno de los espectros; sin embargo esta aseveración se hace bajo reservas, dado que los resultados obtenidos no son suficientes para aclarar esta situación.

## 4.2 Influencia del mucílago de nopal y alginato en concreto

### 4.2.1 Resistencia a la compresión axial

Los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos HPC, relación a/c=0.30 a la edad de 60 días, se observa en la Figura 25. Los resultados de las mezclas que contienen mucílago, alginato y mucílago/alginato sin curado, no presentan incrementos significativos con respecto a la muestra control (1.92 %, 0.72% y 0.16% respectivamente). Para el caso de los especímenes curados en húmedo durante 28 días, los que contienen mucílago, alginato y mucílago/alginato, la resistencia se vio afectada de manera considerable, reduciéndose en 3.84 %, 10.8 % y 7.17 %, respectivamente. A pesar de la pérdida de resistencia a la compresión en las mezclas con mucílago de nopal, el porcentaje reducido es relativamente bajo en comparación con los de alginato y mucílago/alginato; es decir que su efecto no fue tan perjudicial y podría ser compensado con alguna ventaja que pueda presentar en las propiedades químicas del espécimen.

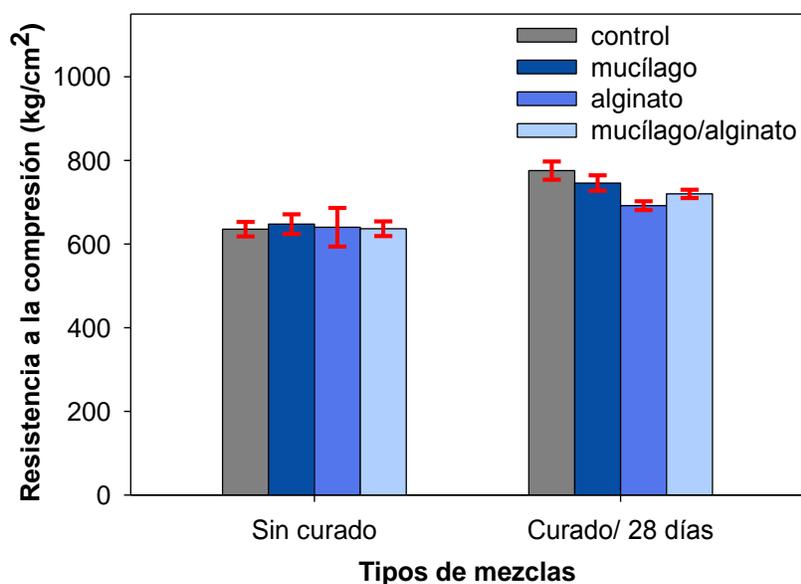
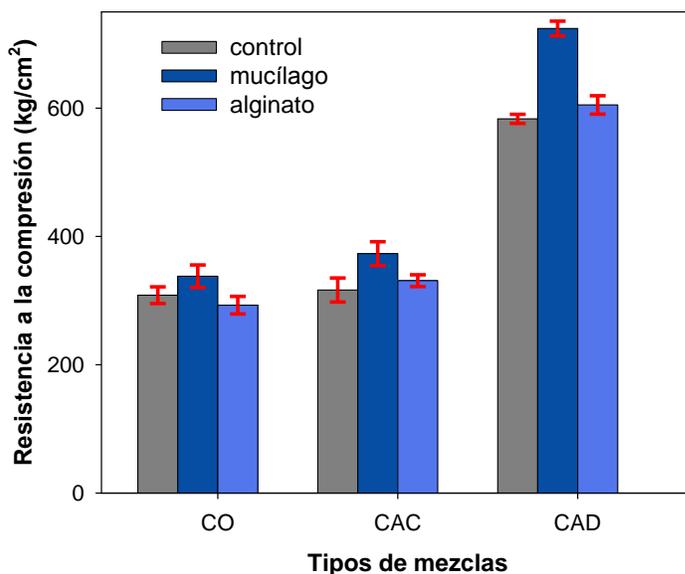


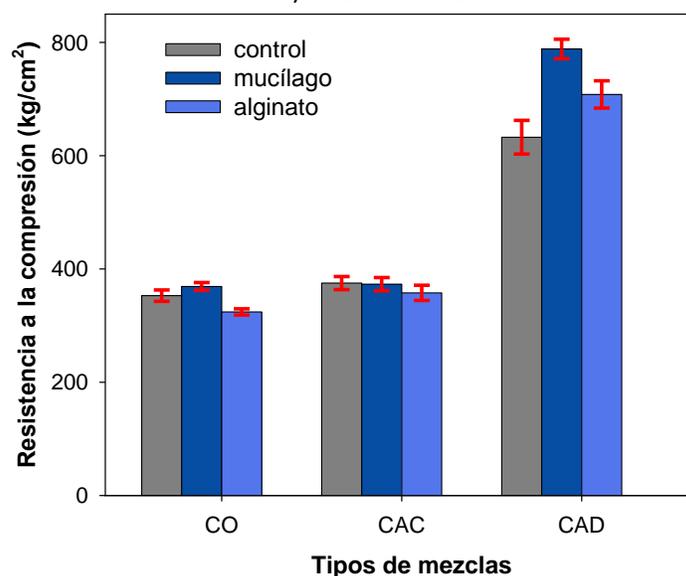
Figura 25- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto HPC, a/c= 0.30 a los 60 días. Las barras de error indican una desviación estándar.

Estas tendencias son diferentes a las mostradas en la Figura 26, correspondiente a otro estudio realizado con mezclas de concreto conteniendo mucílago de nopal y alginato, y

curado en húmedo (cuarto húmedo) hasta la edad de prueba (Cano et al, 2010). En la Figura se observa que para el caso de los concretos de alto desempeño (CAD) la inclusión del mucílago incrementa significativamente la resistencia con respecto al control. Sin embargo, en los que contienen alginato el efecto positivo se da hasta los 56 días de edad.



a) 28 días de edad



b) 56 días de edad

Figura 26- Resistencia a la compresión axial en especímenes elaborados con concreto ordinario, autoconsolidable y de alto desempeño a edades de 28 y 56 días (Cano et al., 2010). Las barras de error indican una desviación estándar.

Los resultados de resistencia a la compresión de los concretos  $a/c=0.30$  a los 120 días, se muestran en la Figura 27. Se observa que se dan reducciones de resistencia en los especímenes controles, principalmente en los que fueron curados en húmedo, con un 15% menos de resistencia en comparación con los resultados de 60 días. Debido a esta situación se realizó por el método Duncan la comparación de pares de medias entre los resultados de 60 y 120 días para cada tipo de mezcla, encontrándose que únicamente en las mezclas HPC control con curado existen diferencias significativas. El resto de especímenes no presentan grandes variaciones, es decir que sus valores son estadísticamente similares a los de 60 días. Los incrementos con respecto al control fueron del 8% para los que contienen mucílago de nopal sin curado y 13% en los con curado.

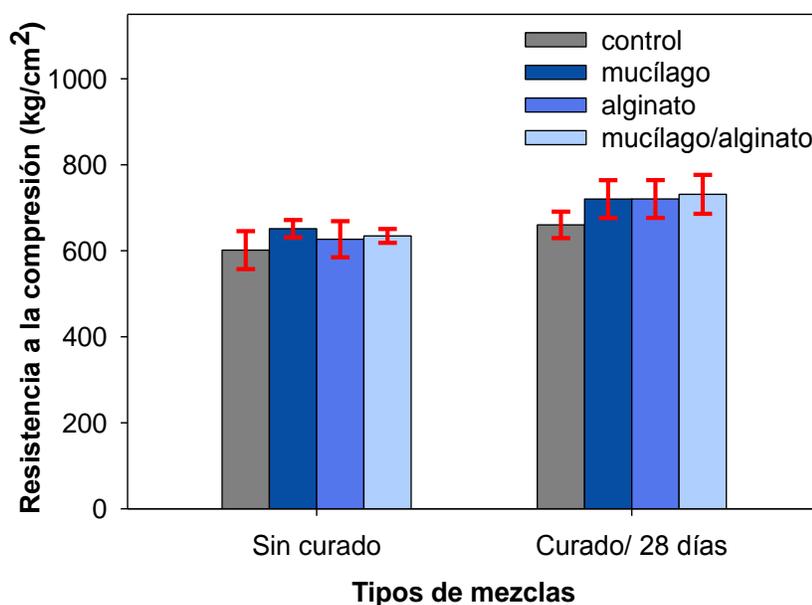


Figura 27- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto HPC,  $a/c= 0.30$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

A los resultados de resistencia a la compresión de ambas edades de prueba y tipos de curado, se les hizo un análisis estadístico de varianza mediante una ANOVA (Anexo 1). Los resultados muestran que los valores de resistencia a la compresión de los concretos con aditivos son similares a los del control; la única diferencia que se encuentran es la que se

da debido al tipo de curado, en donde los concretos con curado en húmedo registran los valores más altos, tanto para las mezclas con y sin aditivos.

Para el caso de los concretos ACI de relación  $a/c=0.60$  a los 60 días de edad, los resultados de la prueba de resistencia a la compresión se presentan en la Figura 28. En esta Figura es evidente que los concretos sin curado y con adiciones orgánicas presentan incrementos significativos con respecto al control (17.37% mucílago, 9.64% alginato y 18.77% mucílago/alginato). En cambio, los resultados de los especímenes con adiciones que fueron curados durante 28 días en húmedo, mostraron reducciones en la resistencia a la compresión con respecto al control (1.56% mucílago, 17.54% alginato y 3.03% mucílago/alginato). Con base a lo anterior, se puede afirmar que el empleo del mucílago de nopal es benéfico en la elaboración de concretos sin curado, pues mejora de manera considerable su resistencia a la compresión axial hasta en 17% con respecto al control. Por otro lado, la reducción que estos experimentaron en condiciones de curado es despreciable si se compara con el control. Para el caso de los que concretos que contienen mucílago/alginato, los valores de incremento y reducción son similares a los que contienen mucílago, por lo que se puede atribuir a este aditivo el crédito de ser el causante de dichos resultados.

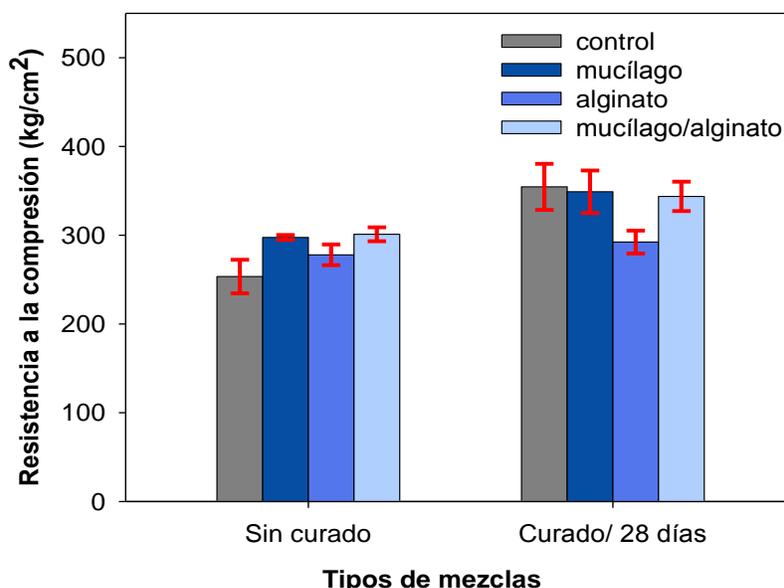


Figura 28- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto ACI,  $a/c= 0.60$  a los 60 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.



Los resultados obtenidos de los especímenes curados con adiciones orgánicas contrastan con los presentados en la Figura 26 para concreto ordinario (CO), en el sentido que no se obtuvo la ganancia marginal de resistencia con respecto al control que presentan en los concretos que contienen mucílago de nopal; sin embargo si se comparan estos valores con los obtenidos en esta investigación se puede asumir que son similares.

Los resultados de resistencia a la compresión de los concretos ACI a los 120 días de edad, se muestran en la Figura 29. De la misma manera que los concretos HPC a la edad de 120 días, en las mezclas ACI se dieron reducciones en los valores de resistencia a la compresión en comparación con los de 60 días, principalmente en los especímenes control curado (12%), los que contienen mucílago de nopal sin curado (9%) y mucílago de nopal curado (7%). Para el caso del resto de especímenes, los valores se mantuvieron similares en ambas edades. Debido a esta situación, se realizó el análisis de comparación pares de medias por el método de Duncan, con el propósito de saber si estas reducciones fueron significativas para las diversas mezclas; el resultado obtenido fue que únicamente los especímenes que contienen mucílago de nopal sin curado presentan diferencias importantes con respecto a su par a 60 días.

De la misma manera que a los HPC, se hizo el análisis de varianza ANOVA para los concretos ACI de ambas edades y tipos de curado (Anexo 1). Este análisis muestra que los factores: mezclas, tipo de curado, edad y la interacción de mezcla y tipo de curado, establecieron diferencias importantes entre los datos de compresión. Con base a lo anterior, se afirma que el incremento y reducción en la resistencia a la compresión de los concretos con mucílago y alginato, a los 60 y 120 días de edad se debe a la incorporación del aditivo.

Con el propósito de poder dar una explicación sobre qué fue lo que provocó las reducciones en los valores de resistencia a la compresión axial en las mezclas HPC y ACI a los 120 días de edad (principalmente en los controles) con respecto a los valores de 60 días, se determinó el contenido de humedad promedio en los especímenes con el fin de

conocer si las condiciones de humedad de prueba fueron similares para todos las mezclas.

Los resultados se muestran en la tabla 17.

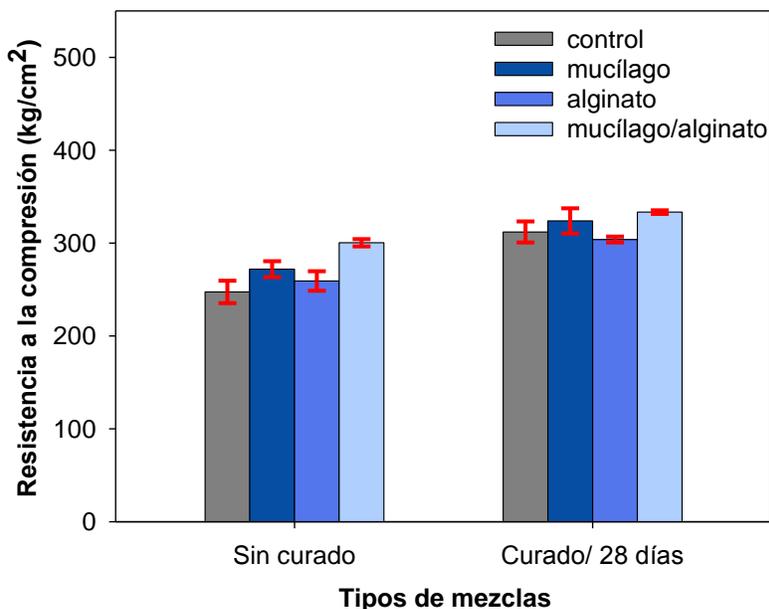


Figura 29- Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto ACI, a/c= 0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

Tabla 17- Porcentaje de humedad, 120 días.

Mezcla	% Humedad	Mayor %
06CS2	2.14	
06MS2	2.57	20.31
06AS2	2.69	26.08
06MAS2	2.82	32.03
06CC2	2.68	
06MC2	3.22	19.90
06AC2	2.97	10.65
06MAC2	3.18	18.40
03CS2	2.56	
03MS2	2.44	-4.41
03AS2	2.69	5.37
03MAS2	2.85	11.39
03CC2	2.89	
03MC2	2.35	-18.82
03AC2	2.99	3.65
03MAC2	3.23	11.83



El contenido de humedad de los especímenes HPC control sin curado y curado, fue mayor que los que contienen mucílago de nopal. En la tabla 17, se observa que los HPC con mucílago sin curado, presentan un 4.40% menos de humedad que el control y sus resultados de compresión axial fueron similares a los de 60 días. En este sentido, este 4.40% mayor de humedad del control pudo haber sido obtenido del ambiente durante el tiempo de almacenamiento, donde los cambios de temperatura y humedad relativa (aunque este valor es mínimo), pudo provocar efectos negativos en la resistencia al momento de la prueba (Kumbhar et al, 2011; Shoukry et al, 2011). De igual manera, los concretos controles con curado tuvieron hasta un 19% más humedad que los que contenían mucílago de nopal curado y de igual proporción fue la reducción en la resistencia axial a la compresión. Aunque el resto de las mezclas tienen valores de humedad mayores que los controles, sus valores de resistencia a la compresión no fueron afectadas. La baja cantidad de agua de los concretos con mucílago de nopal, se encuentra relacionada con el bajo volumen de poros y absorción capilar, haciéndolo menos permeable que el control. En el caso de los concretos con alginato y mucílago/alginato, aunque presentan mayor cantidad de humedad, su resistencia no fue afectada por poseer menor volumen de poros y por la propiedad del mucílago de nopal de formar enlaces fuertes al momento de la hidratación del cemento (Cárdenas et al, 1998; Chandra et al, 1998). Este criterio, puede ser igualmente empleado en los concretos con relación  $a/c=0.60$  a 120 días, donde los controles mostraron reducciones de resistencia mecánica y los con aditivos se mantuvieron similares a los de 60 días.

Los resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 60 días, en casi todas las mezclas y tratamientos, son similares a los encontrados por Cano et al (2010) con curado continuo en cuarto húmedo hasta la edad de prueba, a excepción los HPC control curado, los cuales poseen valor superior al que reportan.

## 4.2.2 Sorptividad y porosidad (ASTM C 642)

### 4.2.2.1 Sorptividad

La absorción capilar de agua en concreto está determinada por la sorptividad, la cual se define como la capacidad que éstos tienen para absorber agua a través de sus poros capilares, favorecido por las interconexiones en su interior, por lo tanto, es considerada como un indicativo de permeabilidad en concretos (Hall et al, 2002; Nokken et al, 2004). Las pruebas de sorptividad se realizaron en especímenes de concreto con edad de 120 días, con un tiempo máximo de exposición de 48 horas. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 30, para concretos HPC  $a/c=0.30$  y Figura 31, de mezclas de concreto ACI  $a/c=0.60$ .

En la Figura 30, se observa que los concretos que contienen mucílago de nopal tuvieron la menor absorción capilar de agua en comparación con los de control, con un 14% menos en las mezclas conteniendo mucílago de nopal sin curado y 20% en las con curado en húmedo. Para el caso de los concretos que contienen alginato, la sorptividad se redujo pero en menor medida que en los con mucílago de nopal. A pesar que las adiciones de mucílago de nopal y alginato en las mezclas de concreto redujeron la sorptividad, las mezclas que contiene a ambas soluciones no mostraron mejoras; su capacidad de absorción de agua fue similar a la del control. Además de las adiciones orgánicas, se puede observar que la reducción en la sorptividad, también estuvo influenciada por el tipo de curado.

En las mezclas de concreto ACI  $a/c=0.60$ , los resultados de absorción capilar fueron diferentes a los mostrados en las mezclas HPC, donde existe reducción de absorción capilar por el tipo de mezcla y tratamientos. Se observa un mayor porcentaje de absorción capilar en todas las mezclas con aditivos respecto al control y pequeñas reducciones entre los tipos de curados. Los incrementos en las mezclas fueron de 54% en las que contienen alginato sin curado, 27% para las con mucílago sin curado, 34% en las con alginato curados y 16% en las con mucílago curados.

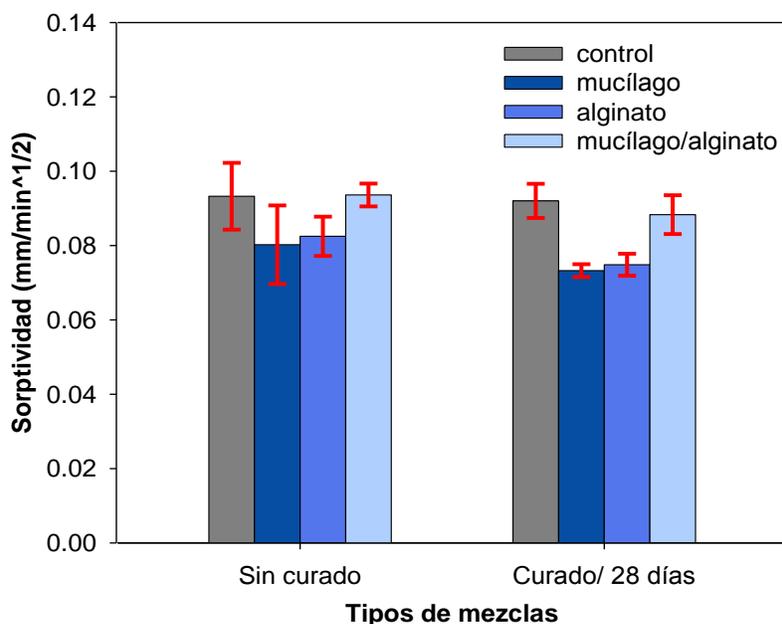


Figura 30-Absorción de agua en cilindros de concretos relación  $a/c=0.30$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

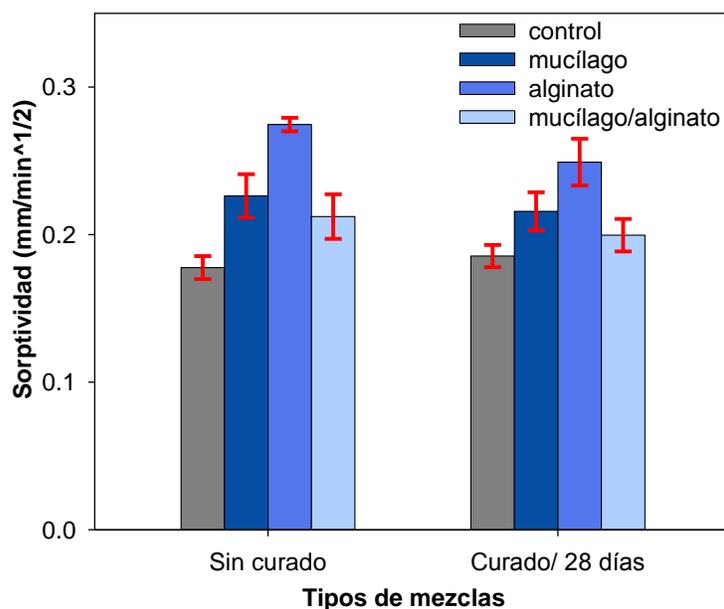


Figura 31-Absorción de agua en cilindros de concretos relación  $a/c=0.60$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

Una posible explicación de la reducción en la absorción de agua de los concretos de alto desempeño con adiciones de mucílago de nopal, es la que puede estar relacionada con la capacidad que tienen los grupos carboxilos de los polisacáridos presentes en el mucílago de retener agua, que actúan como agentes retardantes durante la etapa de maduración,



reduciendo la formación de grietas y mejorando la hidratación de las pasta de cemento. Además, de la formación de enlaces complejos que forman los residuos de aminoácidos de las proteínas presentes con los iones divalentes de calcio, produciendo una matriz de concreto más densa, menos porosa e interconectada (Chandra et al, 1998).

Lo anteriormente descrito puede observarse en los espectros IR de las pastas de cemento con mucílago de nopal de la Figura 22, donde en estado fresco, los picos que corresponde a la formación de los productos de hidratación como la portlandita y etringita son menores que en el control. Sin embargo, al tercer día de madurez no se observan diferencias significativas entre las mezclas con y sin aditivos, esto puede deberse a que los enlaces complejos que producen las amidas del mucílago de nopal en la pasta de cemento no se pueden diferenciar en los espectros de IR.

Otra posible respuesta acerca de lo que contribuye a la reducción de la sorptividad en estos concretos, es la que está relacionada con la formación de cristales de oxalato de calcio precipitados en la pasta de cemento, por la presencia del ácido oxálico en el mucílago de nopal (Abrajan, 2008). La precipitación de estos cristales dentro de los poros del concreto, los haría funcionar como un agente sellador de su interconectividad y como reductor de tamaño, haciéndolos de esta manera más impermeables (Arvaniti et al, 2010).

Para el caso de los concretos que contienen alginato, la reducción en la absorción de agua puede estar relacionada con la capacidad del alginato dentro de la pasta de cemento de retener agua y formar geles en presencia de iones multivalentes como el calcio, debido a las líneas de monómeros de ácido manurónico y gulurónico que lo constituyen (Sriamornsak et al, 2008). Por lo tanto, al actuar como un agente retardante beneficia al proceso de hidratación del concreto, de la misma manera que lo hace el mucílago de nopal.

En los concretos ACI con aditivos; una posible explicación de la mayor capacidad de absorción de agua para el caso de los que contienen mucílago de nopal es que los segmentos de proteínas no polares que estos poseen actúan como inclusores de aire. Esto



puede notarse en los valores del peso volumétrico en estado fresco, los cuales son menores que el control (ver tabla 14). Al comparar los valores de resistencia a la compresión en estado endurecido con respecto al control, se observan incrementos en los sin curado y en los curados su valor promedio es similar al control. Esto quiere decir que la mayor cantidad de poros e interconexión entre los mismos ocasionados por el aditivo, no produce afectaciones en la resistencia, pero sí en la permeabilidad.

La explicación sobre la capacidad de absorción de agua de los concretos ACI conteniendo alginato, es que el incremento que mostraron con respecto al control pudo deberse a la propiedad de este aditivo de formar gel con el agua en presencia de ciertas especies iónicas, y que al ser una mezcla con relación agua/cemento alta potencializa una mayor cantidad de estos. Al atrapar agua, el alginato reduce la disponibilidad de esta para poder llevar de manera plena la hidratación del cemento en estado fresco; lo que da lugar a la formación de microesferas de gel que atrapan aire y provoca un efecto similar al de los inclusores de aire. Esto explica, como este biopolímero reduce el peso volumétrico de estas mezclas en estado fresco, de manera similar como ocurre con los concretos con mucílago de nopal (ver tabla 14).

Por otro lado, el espacio ocupado por los geles en estado fresco hasta su endurecimiento, proveen al concreto mayor volumen de poros y por ende mayor capacidad de absorción de agua. Sin embargo, a pesar de esta situación, los valores obtenidos en la resistencia a la compresión no se vieron afectados, por el contrario en algunos casos esta aumentó, quizás por la disponibilidad de humedad a edades tardías que quizás haya mejorado el proceso de hidratación (concretos sin curado) o por la formación de enlaces complejos entre las especies iónicas del cemento y las de las adiciones orgánicas.

#### **4.2.2.2 Porosidad**

El volumen de poros permeable, indica la proporción del volumen del concreto ocupado por poros, de acuerdo con la norma ASTM C 642-97. Los resultados obtenidos de porosidad se observan en las Figuras 32 y 33, para los concretos con relación  $a/c=0.30$  y  $a/c=0.60$ , respectivamente. Al observar ambas figuras, se hace evidente la influencia que

tiene la relación  $a/c$  sobre la porosidad en los especímenes, siendo mayor en las que poseen mayor relación  $a/c$ . En los concretos con relación  $a/c=0.30$ , las mezclas con aditivos fueron los que presentaron el menor porcentaje de poros; sin embargo en los concretos  $a/c=0.60$  sus porcentajes fueron mayores. En la Figura 32, se observa que los concretos que contienen mucílago de nopal muestran el menor volumen de poros con respecto al control en un 40% y 36 %, para las mezclas sin curados y curados respectivamente.

Los valores de porosidad de los concretos con relación  $a/c=0.30$  de esta investigación, muestran una tendencia similar a los reportados por Caballero (2008); donde el menor porcentaje de poros de los especímenes estuvo vinculado con la adición del mucílago de nopal y por el tipo de curado. Aunque, por otro lado los valores de porosidad obtenidos en este trabajo en comparación con los que ahí se reportan, fueron menores.

La reducción en la porosidad de los especímenes HPC con aditivos está relacionada tal como se describe en la sección de sorptividad, por la capacidad de estos aditivos de retener agua y formar enlaces complejos, lo que contribuye al mejoramiento de la hidratación de la pasta de cemento, formando una estructura más densa.

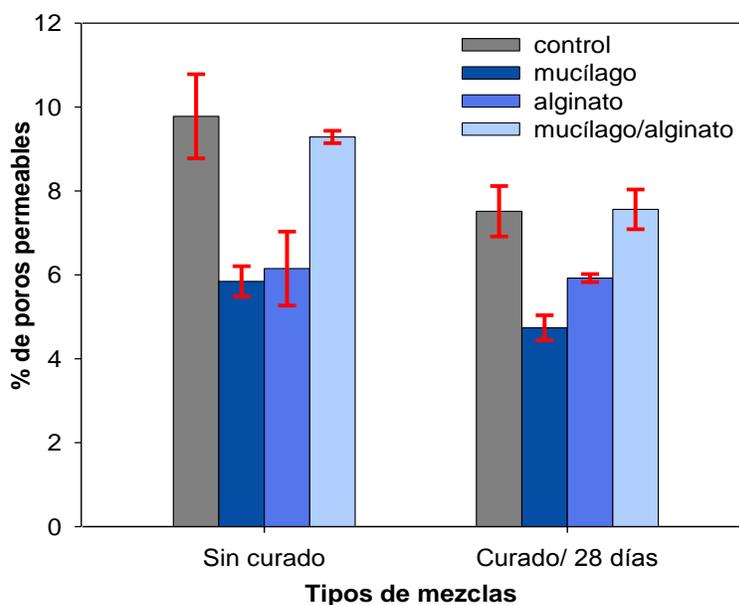


Figura 32-Volumen de poros permeables en cilindros de concretos relación  $a/c=0.30$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

En la Figura 33 se muestran los resultados obtenidos de porosidad de las mezclas ACI. Los concretos con adiciones orgánicas presentan mayor cantidad de volumen de poros con respecto al control, en ambos tipos de curado. Los valores de porosidad en las mezclas con adiciones orgánicas fueron similares en ambos tratamientos. Los incrementos debido a los aditivos fueron de 15% para los con mucílago sin curado y 6% en los curados, y en los concretos conteniendo alginato fueron de 14% en los sin curado y 7% en los curados.

De manera similar a lo discutido en sección de sorptividad para concretos ACI, el incremento en la porosidad de los concretos con adiciones orgánicas; para el caso del mucílago de nopal, se debió a la fase no polar de las cadenas aminas de las proteínas que poseen, las cuales producen una fase hidrofóbica que trabaja similar a los inclusores de aire sintéticos. En cambio, para los concretos que contienen alginato, el incremento en la porosidad se pudo deber a la capacidad que estos tienen de formar gel con agua en presencia de iones de calcio, lo cual reduciría la disponibilidad del agua de mezcla en estado fresco necesario para propiciar el buen proceso de hidratación total de la solución. Posteriormente, el agua ligada al gel sería absorbida durante el proceso de hidratación de manera lenta para continuar con la formación de nuevos productos de hidratación, dejando libre parte de los espacios ocupados por las esferas de gel formadas durante el mezclado.

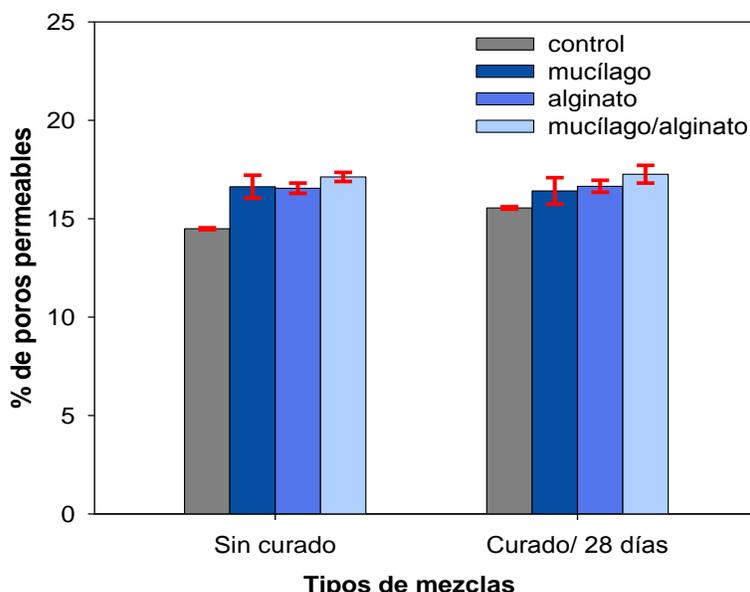


Figura 33-Volumen de poros permeables en cilindros de concretos relación  $a/c=0.60$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

## 4.2.3 Permeabilidad y difusión de cloruros

### 4.2.3.1 Prueba rápida de permeabilidad a cloruros (paso de carga en Coulombs) – ASTM C1202-97

Los resultados de la prueba rápida de permeabilidad a iones cloruros (ASTM C 1202-97) de los especímenes HPC, con relación  $a/c=0.30$  a los 60 días de edad, se muestran en la Figura 34. Según la gráfica, los especímenes con mucílago de nopal, alginato y mucílago/alginato, presentan menores valores de paso de carga en comparación con los de control, tanto para los especímenes sin curado y con curado. La disminución o mejoramiento en la resistencia a la penetración de iones cloruros de los concretos sin curado conteniendo mucílago de nopal, alginato y mucílago/alginato, fue de 8.13%, 8.40% y 19.54% respectivamente. En este caso, es evidente que las mezclas con mucílago/alginato, fue donde se presentó la mayor reducción de paso de carga, por lo que podría ser considerada en aplicaciones prácticas para construcciones cercanas a ambientes marinos.

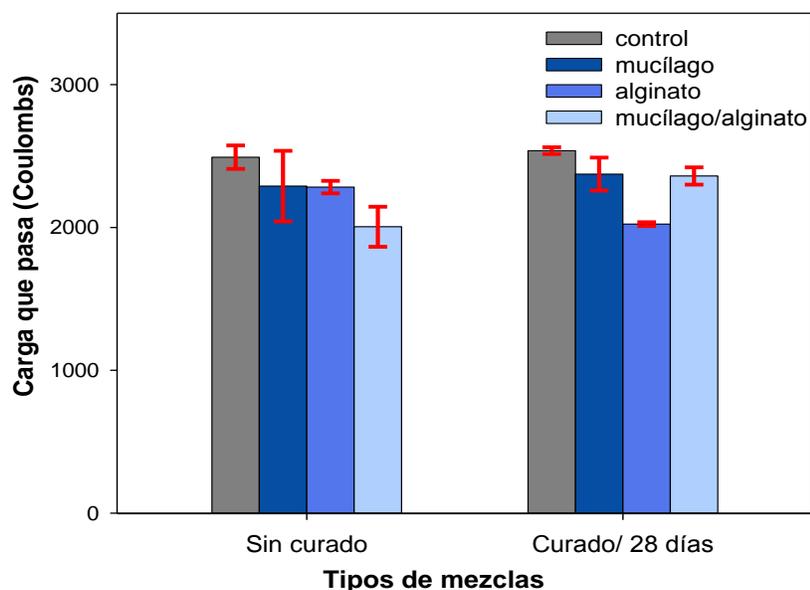


Figura 34- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto HPC,  $a/c= 0.30$  a los 60 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

Para el caso de los especímenes curados en húmedo durante 28 días, las reducciones fueron de 6.46%, 20.26% y 6.99% para mucílago, alginato y mucílago/alginato, respectivamente. Aquí se observa que las mezclas conteniendo únicamente alginato,

fueron las que presentaron los menores valores de paso de carga, esto en comparación tanto con su par sin curado como con el resto de tipos de mezclas; dejando en evidencia el efecto benéfico que puede generar este tipo de aditivo cuando se adiciona a concretos, especialmente en términos de durabilidad.

La reducción del paso de carga que muestran estos tipos de concretos está estrechamente relacionada con la poca interconectividad y reducción del tamaño de poros. Esto se confirma con los resultados obtenidos en la prueba de sorptividad, donde los concretos con adiciones fueron los que mostraron la menor capacidad de absorción de agua. Un factor por el cual los concretos HPC conteniendo alginato presentaron menor valor de paso de carga, puede deberse a que la presencia de humedad y especies iónicas tanto del cemento como del alginato presente en las pasta pudieron haber creado ciertos enlaces químicos dentro de la matriz que impiden el transporte de iones  $Cl^-$  a través del concreto.

Los resultados de los concretos HPC con adiciones orgánicas son acorde a los obtenidos por Cano et al (2010), donde se observó que el mucílago de nopal y los alginato reducen la permeabilidad de iones cloruros (Figura 35).

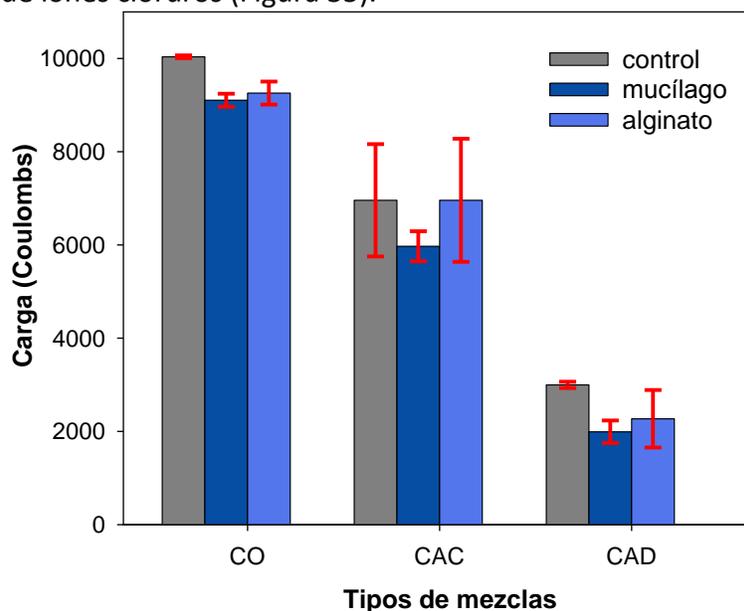


Figura 35- Paso de carga (Coulombs) en especímenes elaborados con concreto ordinarios, autoconsolidables y de alto desempeño a edades de 28 días. (Cano et al., 2010). Las barras de error indican una desviación estándar.

En la Figura 36, se muestran los resultados de paso de carga de los concretos HPC a los 120 días. Se puede observar que se mantuvo la tendencia de reducción de paso de carga de la edad de los 60 días, presentando mayores reducciones los concretos con mucílago/alginato sin curado con un 22% y los con alginato con curado en 20%, con respecto al control.

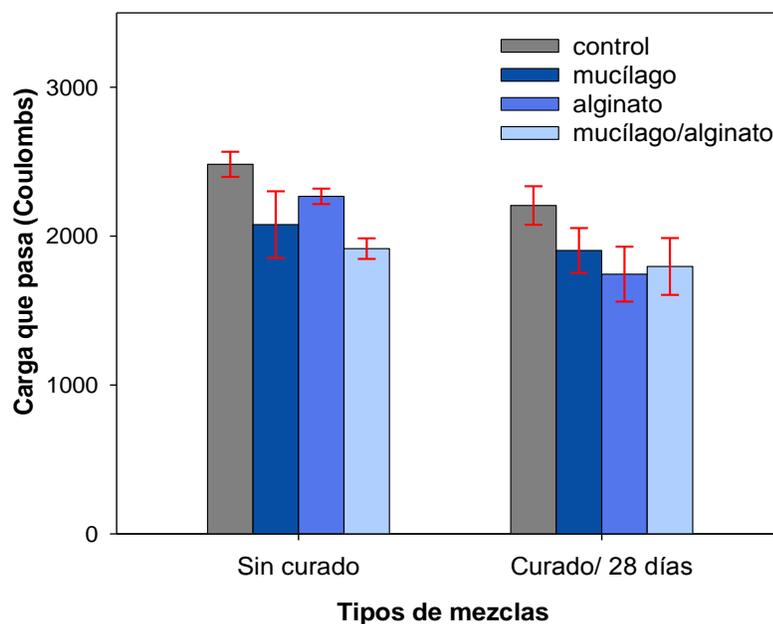


Figura 36- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto HPC,  $a/c=0.30$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

En el análisis de varianza ANOVA se muestra que la reducción en la permeabilidad a cloruros estuvo influenciada por el tipo de mezcla (aditivos), el curado, la edad y la interacción entre el curado y la edad (Anexo 1). Tal como se observa en las Figuras 34 y 36, donde los concretos con aditivos fueron los que presentaron menor paso de carga con respecto al control, y en mayor medida los con curado.

Los resultados de los especímenes ACI, de relación  $a/c=0.60$  a los 60 días de edad, se muestran en la Figura 37. En esta gráfica, se observa que los especímenes con adiciones orgánicas, no presentaron mejoras en la reducción del paso de carga en comparación con los de control, tanto para los especímenes sin curado y con curado. El aumento en la permeabilidad de los concretos conteniendo mucílago, alginato y mucílago/alginato,

respecto a los de control sin curado, fue de 6.81 %, 12.14 % y 1.78 % respectivamente. Aquí se aprecia que las mezclas con mucílago de nopal y alginato no mostraron ningún efecto favorable en esta prueba, por el contrario, los valores nos indican que son más permeables al ingreso de agentes agresivos.

Para el caso de los especímenes curados en húmedo durante 28 días con adiciones orgánicas, el incremento en el paso de carga fue de 12.39 %, 24.24 % y 16.79 % para los especímenes con mucílago de nopal, alginato y mucílago/alginato, respectivamente. Es preciso observar que en comparación con los especímenes con aditivos sin curado, estos porcentajes son relativamente más altos, lo que indica un desmejoramiento en términos de resistencia a la penetración de iones agresivos.

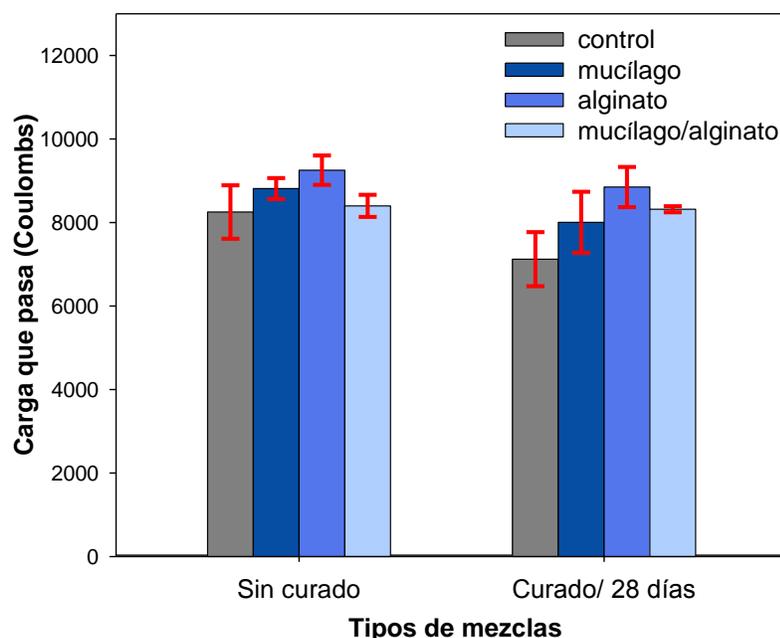


Figura 37- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto ACI,  $a/c= 0.60$  a los 60 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

Los resultados obtenidos en los especímenes ACI que fueron expuestos a curado continuo por Cano et al. (2010), presentan reducciones de paso de carga con respecto al control. Estas reducciones fueron del 9.30% y 7.80%, para los que concretos que contienen mucílago y alginato respectivamente. Sin embargo, esta comparación no es concluyente debido a que corresponde a distintas edades de prueba.

A los 120 días de edad se incrementó el paso de carga de los controles, tal como se observa en la Figura 38, sin embargo, los concretos con adiciones de mucílago y alginato mantuvieron sus valores. Las reducciones más importantes de paso de carga con respecto al control a los 120 días fueron en los concretos con mucílago/alginato sin curado y con curado, en 10% y 12%, respectivamente.

Aunque los valores de paso de carga en las mezclas ACI corresponden a altos valores de permeabilidad, ésta tiende a reducirse con la edad gracias al aditivo agregado. Esto se debe a la capacidad de ambos aditivos (mucílago y alginato) de formar enlaces químicos con sales dentro de la matriz de concreto (Cárdenas et al, 1998; Medina-Torres et al, 2000, Pathak et al, 2010).

Los datos mostrados de permeabilidad a cloruros ASTM C1202-97 de este trabajo en comparación con los de Cano et al (2010) (Figura 35) son menores, principalmente con los concretos con adiciones orgánica a los 120 días de edad. Las mezclas HPC conteniendo mucílago de nopal fueron menores en 5% (mezclas con curado), y los ACI con mucílago en 9% sin curado y 13% curados. Los HPC con alginato fueron menores en un 23%, para el caso de los curados, y en los ACI en un 8% tanto para los sin curados como en los con curado.

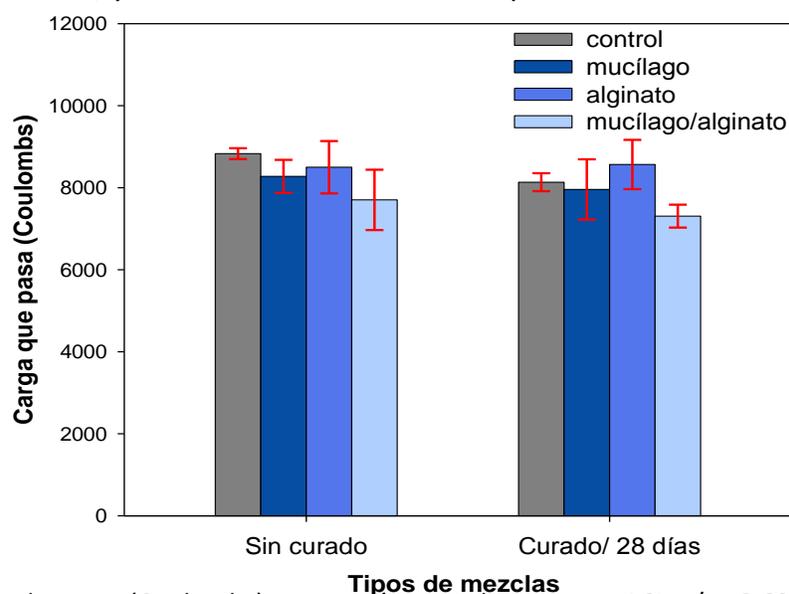


Figura 38- Paso de carga (Coulombs) en especímenes de concreto ACI,  $a/c= 0.60$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

El análisis de varianza ANOVA, realizado para los valores obtenidos en los concretos ACI, muestra que la permeabilidad a cloruros estuvo influenciada por el tipo de curado y la interacción entre el tipo de mezcla (aditivos) y la edad (ver Anexo 1). Es decir, que aunque en la Figura 37, los concretos con mucílago y alginato presentan mayor paso de carga que el control, la permeabilidad se reduce cuando se cura en húmedo (a 60 días). A los 120 días, los concretos con aditivos, presentaron menores valores de paso de carga que el control.

Los resultados obtenidos de la prueba de permeabilidad a cloruros (ASTM C1202-97), se graficaron con los valores correspondientes de resistencia a la compresión a las edades de 60 y 120 días. A los 60 días se encontró que no existe una buena correlación entre los datos, tanto para los concretos HPC y ACI, sin embargo, a los 120 días se da un buen ajuste lineal entre ellos. La correlación que se establece indica que a mayores valores de resistencia a la compresión, corresponde menores valores de paso de carga. Para el caso de concretos con relación  $a/c=0.30$  el mayor coeficiente de correlación  $R^2$  se obtuvo de los concretos que fueron curados y para el caso de los ACI, en los sin curado (ver Figura 39 y 40).

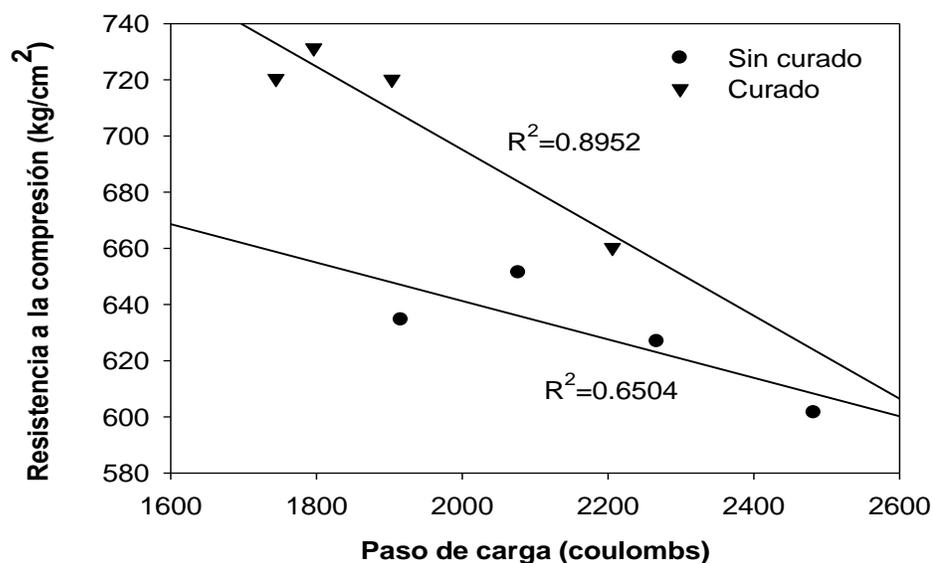


Figura 39- Correlación entre RCPT y compresión a 120 días, HPC.

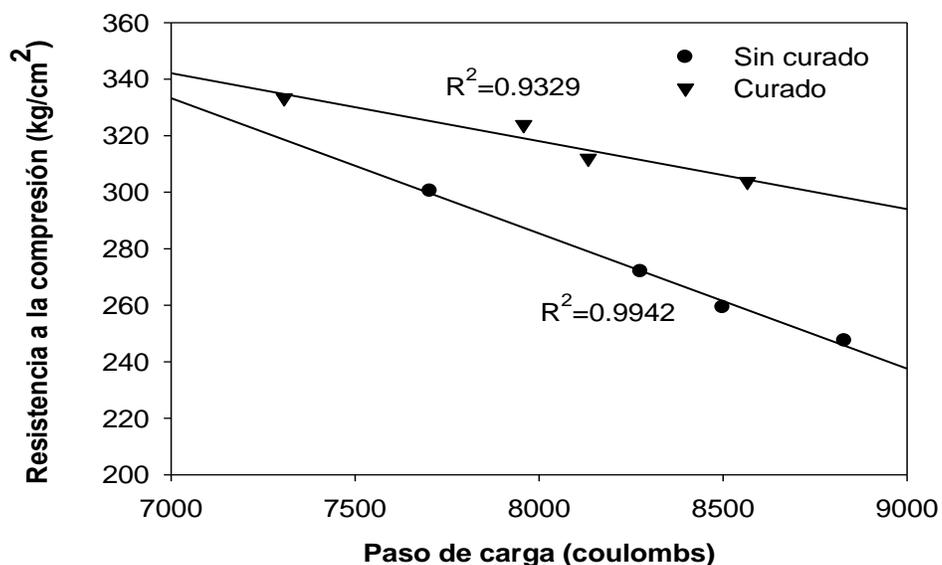


Figura 40- Correlación entre RCPT y compresión a 120 días, ACI.

#### 4.2.3.2 Coeficientes de difusión del ion cloruro

Los coeficientes de difusión de iones cloruros obtenidos por titulación química, se observan en las Figuras 41 y 42, para mezclas con relaciones  $a/c=0.30$  y  $0.60$  respectivamente. En la Figura 41 se muestran los coeficientes de difusión de las mezclas  $a/c=0.30$ , en esta gráfica es evidente que las que las mezclas que contienen adiciones orgánicas muestran reducciones considerables en sus coeficientes con respecto al control. Las reducciones observadas fueron del 46% y 41% en concretos que contienen mucílago de nopal y alginato sin curado, respectivamente. Si se observan las Figuras 30 y 32, sobre absorción capilar y volumen de poros, se aprecia que este comportamiento en el coeficiente de difusión tiene relación estrecha con estos resultados; es decir que se vio influenciada por la menor capacidad de absorción capilar y la menor porosidad de las mezclas con aditivos en comparación con el control. Otro factor que quizás haya influido en la disminución de los coeficientes de difusión es la presencia de los polisacáridos de los aditivos, los cuales al entrar en contacto con el agua existe la posibilidad de que modifiquen la viscosidad de la solución de poros haciéndola más viscosa y por ende pueden actuar como una barrera física a la difusión, tal como lo describe Bentz et al (2008). Si se comparan estos datos con los resultados de la prueba rápida de permeabilidad a iones cloruros de la figura 36, los resultados muestran un

comportamiento similar, sin embargo, con este método únicamente se puede apreciar una tendencia acertada pero no precisa a como se observa por el método de titulación química. Para las mezclas que fueron curadas en húmedo por 28 días, las reducciones de las mezclas con adiciones fueron en orden de 43% y 28%, para las mezclas que contienen mucílago de nopal y alginato, respectivamente.

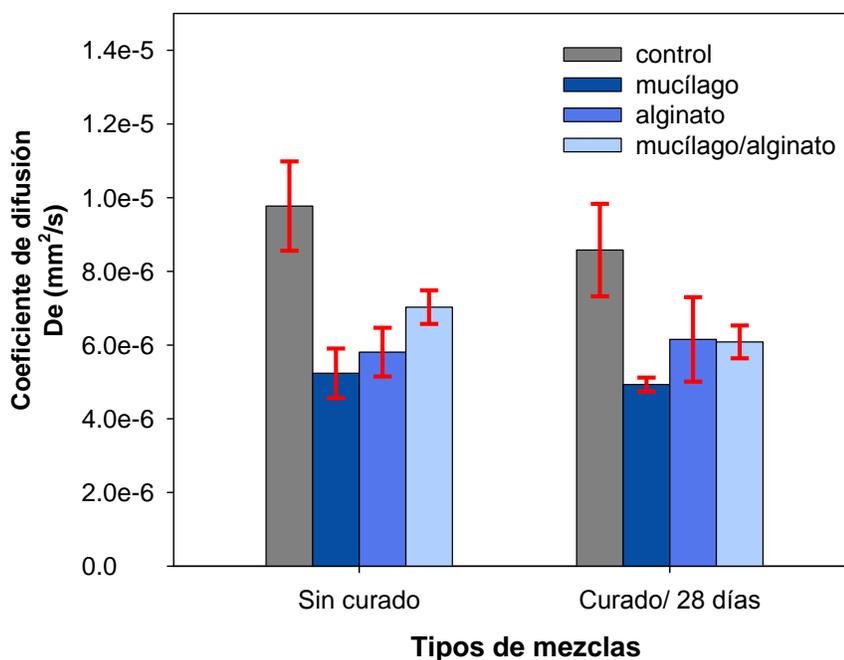


Figura 41- Coeficientes de difusión de Cl<sup>-</sup> en especímenes de concreto HPC, a/c=0.30 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

En la Figura 42 se muestran los coeficientes de difusión de las mezclas a/c=0.60, las cuales de manera similar a las mezclas HPC presentan reducciones considerables con respecto al control. Las reducciones fueron de 40% y 63% en los concretos que contienen mucílago de nopal y alginato sin curado, respectivamente. Aunque en las Figuras 31 y 33, sobre absorción capilar y volumen de poros, los valores de los especímenes con adiciones fueron mayores que el control, la permeabilidad a iones cloruros por difusión se redujo de manera similar a los resultados obtenidos en la prueba rápida de permeabilidad a cloruros a 120 días de edad (ver Figura 38). Esto puede explicarse que por deberse a una relación alta de agua cemento, la cantidad de polisacáridos presentes en los aditivos es mayor, y al haber una re saturación de poros con agua, existe la posibilidad de que estos actúen sobre

la solución de poros haciéndola más viscosa, y de manera similar a lo expuesto anteriormente, actúen como una barrera física a la difusión. Otra posible explicación que se puede dar es que debido a que los valores de absorción y porosidad de las mezclas con aditivos son similares al control, se pudieron haber desarrollado durante el tiempo de exposición a cloruros nuevas especies iónicas al interior, creando nuevos enlaces químicos como el de los oxalatos presentes en el mucílago de nopal que al precipitarse en oxalatos de calcio puede actuar como un agente tapa poros que pueden reducir la permeabilidad en los concretos (Arvaniti et al, 2010); y para el caso de los que contienen alginato la explicación es la que está relacionada con su capacidad de formar enlaces complejos con ciertas especies iónicas (Pathak et al,2008). En las mezclas que fueron curadas en húmedo por 28 días, las reducciones de las mezclas con adiciones orgánicas fueron en orden de 42% y 56% con respecto al control, para las mezclas que contienen mucílago de nopal y alginato, respectivamente.

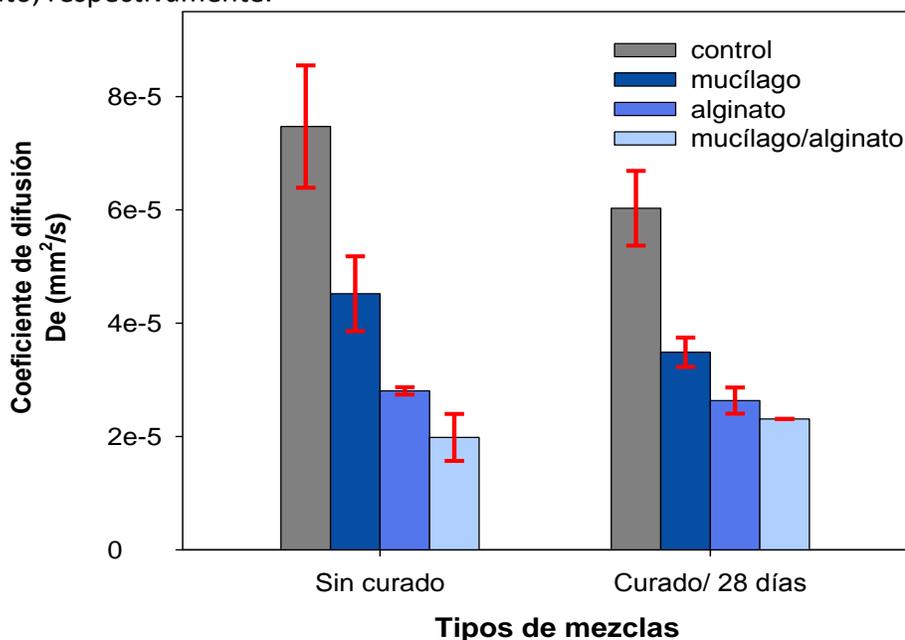


Figura 42- Coeficientes de difusión de Cl<sup>-</sup> en especímenes de concreto ACI, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

#### 4.2.4 Carbonatación acelerada del concreto

La carbonatación acelerada es una prueba muy importante para el estudio del fenómeno de la carbonatación en estructuras de concreto reforzado. Con este método, se acorta el periodo de carbonatación por algunas pocas semanas, lo que en condiciones ambientales tomaría muchos años. Aunque es conveniente para el diseño de estructuras de concreto el conocer la profundidad de carbonatación en condiciones ambientales; con la prueba acelerada se puede predecir la profundidad de carbonatación para diferentes tipos de mezcla con ciertas condiciones ambientales (Sisomphon & Franke, 2007). Las mediciones se tomaron como se detalla en la Figura 43.

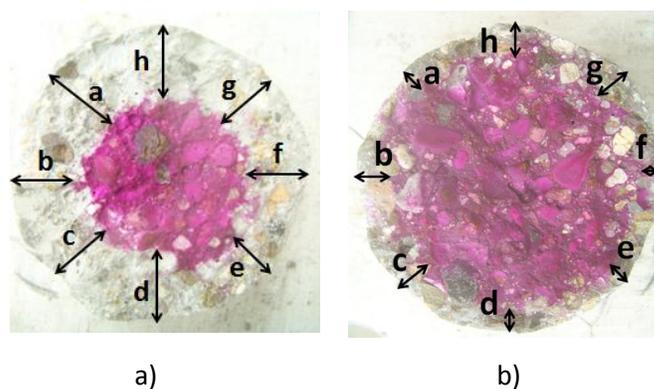


Figura 43- Esquematización de toma de mediciones de profundidad de carbonatación en concretos ACI (a) y HPC (b).

En las Figuras 44 y 45, se presentan los resultados de profundidad de carbonatación de las mezclas de concreto de relación  $a/c=0.30$  y  $a/c=0.60$ . En la Figura 44, correspondiente a los concretos HPC, se observa que las mezclas que contienen mucílago de nopal y alginato sin curado, reducen el frente de carbonatación hasta en 85% y 44% aproximadamente con respecto al control. Aunque la reducción de la carbonatación debido a la adición de los aditivos orgánicos en estos concretos es significativa con respecto al control; en condiciones reales donde la concentración ambiental es de 0.04% y con humedad relativa y temperaturas ideales, es improbable que este fenómeno alcance las zonas cercanas al acero de refuerzo mínimas de 25 mm de profundidad durante su vida de servicio (ver Tabla 9 en Anexos). Esto está relacionado con la baja porosidad, que produce baja permeabilidad.

Para el caso de las mezclas que fueron curadas, el control y las que contienen mucílago de nopal no presentan carbonatación, únicamente se da en las mezclas que contienen alginato, ésto a pesar de que son mezclas menos permeables y porosas que el control (ver Figura 30 y 32). Esto puede estar relacionado con la capacidad del alginato de formar enlaces con el calcio, que lo hace disponible en mayor cantidad que en las otras mezclas pudiendo reaccionar con el  $\text{CO}_2$  que haya logrado penetrar. De la misma manera que en los casos sin curado, la profundidad de carbonatación que se alcanza en estos concretos es despreciable si se extrapola a escala real, por lo tanto no se considera una amenaza a la durabilidad de estructuras de concreto reforzado con este tipo de mezcla.

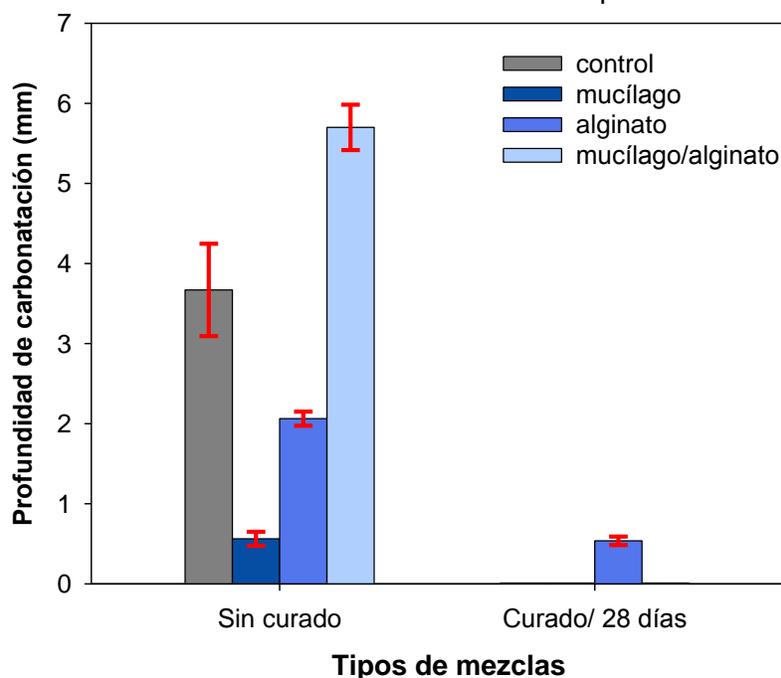


Figura 44- Profundidad de carbonatación en concretos HPC,  $a/c=0.30$  a los 180 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

En la Figura 45, se muestra el frente de carbonatación de mezclas de concreto de relación  $a/c=0.60$ . En los concretos sin curado, la mayor reducción en el frente de carbonatación se presentó en las mezclas que contienen mucílago de nopal, en 29% aproximadamente con respecto al control, en cambio en los que contienen alginato se incrementa en un 3% aproximadamente. Aunque en los resultados de absorción capilar las mezclas con mucílago de nopal fueron más absorbentes que el control (Figura 31), y en las de

porosidad fueron ligeramente similar (Figura 33), el frente de carbonatación se reduce. Una explicación es la que establece que debido a la acción acidificante del dióxido de carbono se libera hidróxido de calcio que a su vez libera iones de  $\text{Ca}^{++}$ , el cual favorecido por rastros del polisacárido que retienen humedad suficiente, reaccionan con el  $\text{CO}_2$  y forman el carbonato de calcio insoluble, que se precipita reduciendo el tamaño y la conexión entre los poros del concreto (Ventola et al, 2011). Dado que la porosidad es similar al control, las mezclas que contienen mucílago de nopal, forman mayor cantidad de carbonatos de calcio en los poros de las capas superficiales del concreto, lo que reduce la permeabilidad y a su vez la profundidad de carbonatación. En tanto, el ligero incremento en los especímenes con alginato, se pudo haber debido a la mejor interconectividad entre sus poros (ver Figura 31), que pudo permitir mayor paso de dióxido de carbono aún cuando su porosidad es similar a la del mucílago.

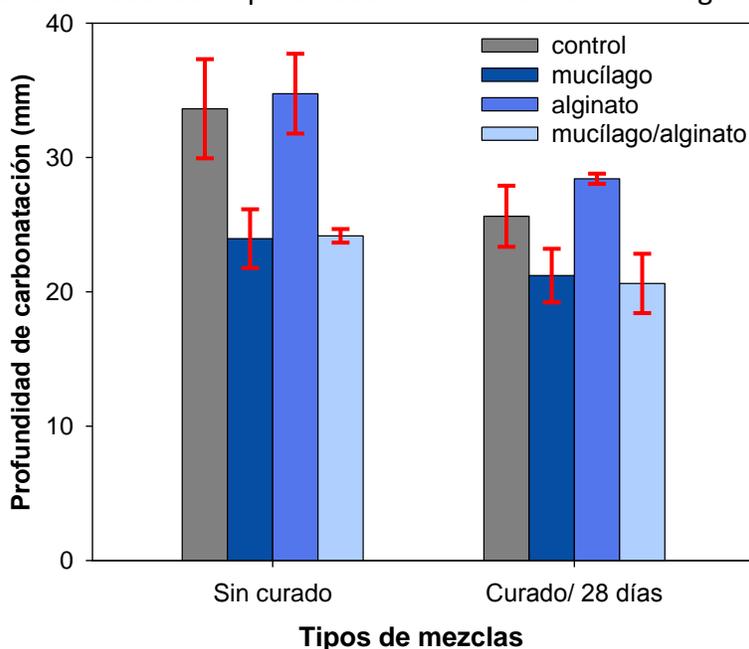


Figura 45- Profundidad de carbonatación en concretos ACI,  $a/c=0.60$  a los 180 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.

Para el caso de los concretos ACI curados, el frente de carbonatación se redujo en comparación con las mezclas sin curado. La mayor reducción con respecto al control se presenta en las mezclas con mucílago de nopal en un 17% aproximadamente. De manera similar a lo explicado anteriormente, la reducción en las mezclas con mucílago de nopal,

se debe principalmente a la acción de los polisacáridos presentes. Por otro lado, las mezclas que contienen alginato aumentan ligeramente el frente de carbonatación (de la misma manera que los sin curados está relacionada con su mayor interconexión de poros o permeabilidad).

Para el cálculo del coeficiente de carbonatación en condiciones ambientales con base al coeficiente de carbonatación obtenido de la prueba acelerada en las diferentes mezclas, se emplea la siguiente ecuación (Sisomphon & Franke, 2007):

$$\frac{K_{acc}}{K_{amb}} = \frac{\sqrt{C1_{acc}}}{\sqrt{C2_{amb}}} \quad \text{Ec. 28}$$

Dónde:

$K_{acc}$ =Coeficiente de carbonatación de prueba acelerada

$K_{amb}$ = Coeficiente de carbonatación ambiental

$C1_{acc}$ =Concentración de  $CO_2$  en prueba acelerada

$C2_{amb}$ =Concentración de  $CO_2$  ambiental

Los coeficientes de carbonatación para las diversas mezclas se muestran en las Figuras 46 y 47.

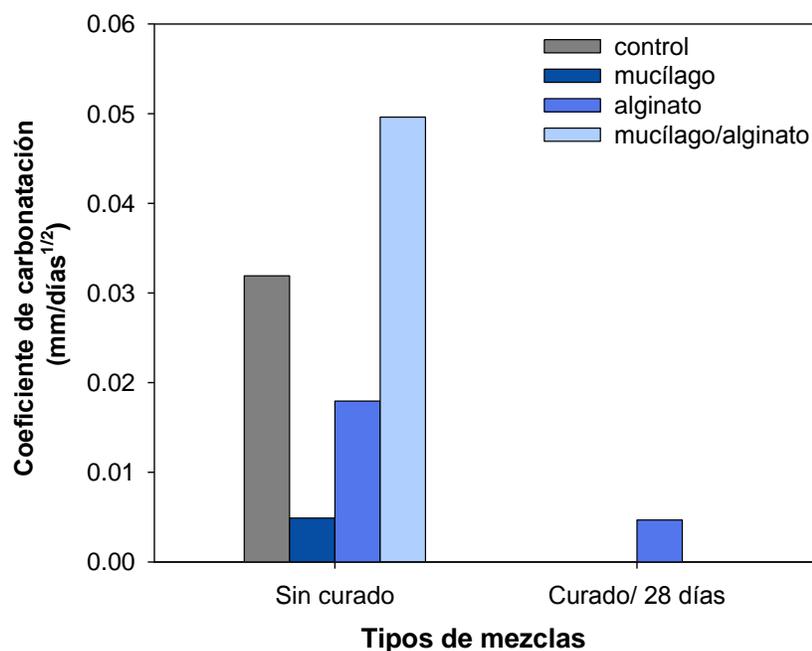


Figura 46- Coeficientes de carbonatación, concretos HPC, a/c=0.30 a los 180 días de edad.

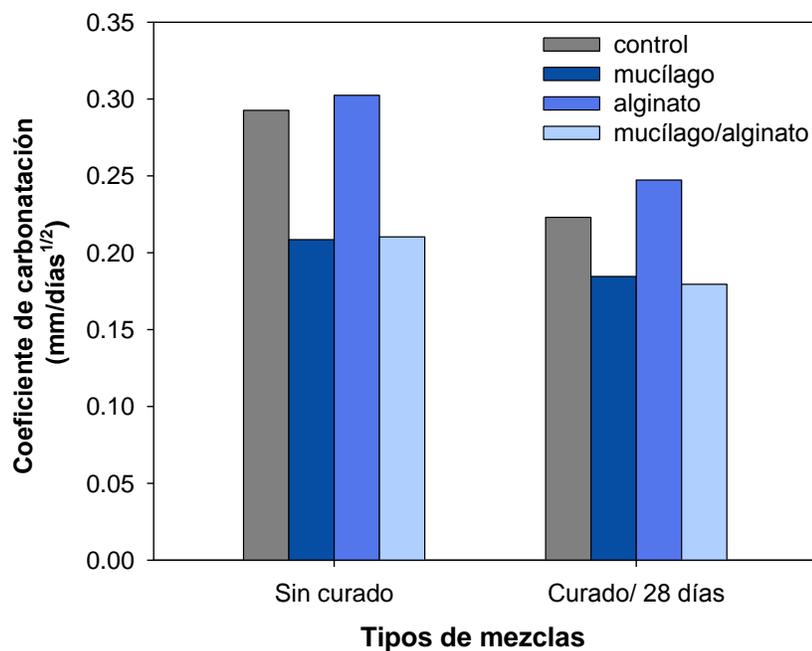


Figura 47- Coeficientes de carbonatación, concretos ACI, a/c=0.60 a los 180 días de edad.

### 4.3 Pruebas electroquímicas

#### 4.3.1 Potenciales de media celda

En las Figuras 48 a la 52, se muestran los valores de potenciales de media celda vs tiempo de las últimas varillas de acero agregadas a cada celda. Los valores de potenciales de media celda y  $R_p$  (resistencia a la polarización lineal) de las primeras varillas utilizadas no se tomaron en cuenta en la discusión de resultados, debido a que no alcanzaron el nivel de pasivación deseado necesario para proceder a someterlos a contaminación con cloruros.

Los resultados finales obtenidos en esta experimentación, muestran una tendencia inhibitoria a la corrosión de las soluciones de mucílago de nopal y alginato con distintas concentraciones en barras de acero de refuerzo bajo contaminación de cloruros. Para poder asumir de manera confiable esta propiedad de las soluciones, se recomienda realizar nuevamente esta experimentación con un mayor número de replicas o realizar mediciones de este tipo en acero de refuerzo embebido en concretos o morteros elaborados con este tipo de adiciones.

Durante la etapa de pasivación de las barras de acero en las celdas saturadas con hidróxido de calcio, los valores de potencial de los controles fueron más altos en comparación con el resto de celdas (-0.134 vs SCE). Los potenciales de las barras en celdas con nopal y alginato, fueron aumentando desde valores más negativos a más positivos (-0.40 hasta de -0.20), a pesar de mostrar caídas de potencial entre los 5 y 10 días, para posteriormente incrementar hasta los 14 días (edad a la cual las barras de acero en las diferentes soluciones alcanzan el nivel de pasivación deseado, medido a través de pruebas de  $R_p$ ). Este fenómeno podría explicarse tal como lo describe Torres-Acosta (2007), debido al agotamiento del oxígeno en el electrolito, el cual reduce la velocidad de formación de óxidos/hidróxidos en la superficie de las barras de las celdas con aditivos, y por lo tanto de la actividad de corrosión (tal como se aprecia en los resultados de  $R_p$ ).

Posteriormente a la contaminación con cloruros en cada celda, se puede observar que los valores de potencial caen desde valores pasivos (-0.134 vs SCE) hasta valores más activos (-0.478 vs SCE). Los valores finales de potenciales de las barras de acero en las celdas con mucílago de nopal y alginato, mostraron valores ligeramente más positivos que el control.

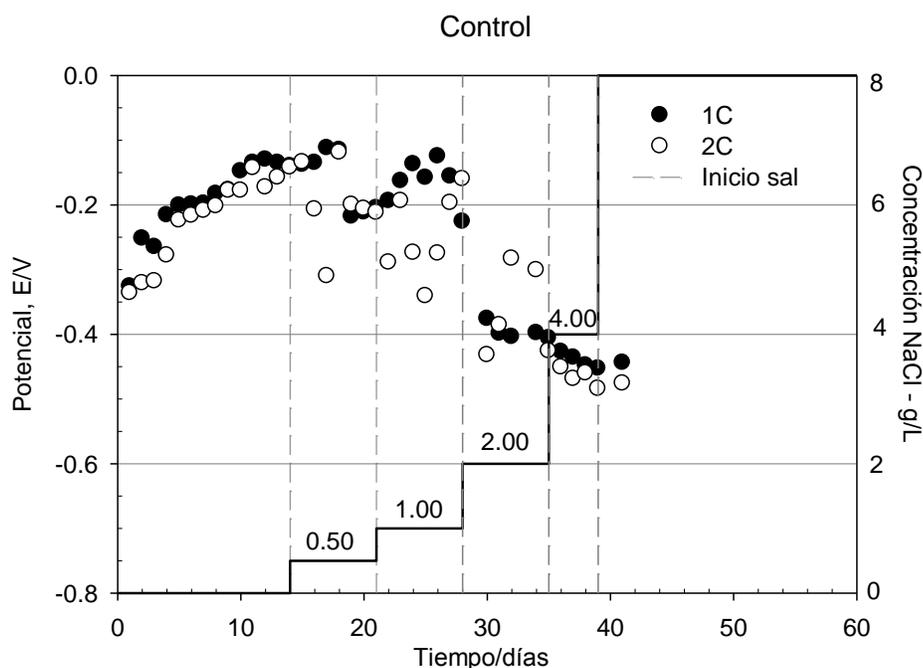


Figura 48-Potencial vs tiempo, celda control. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.

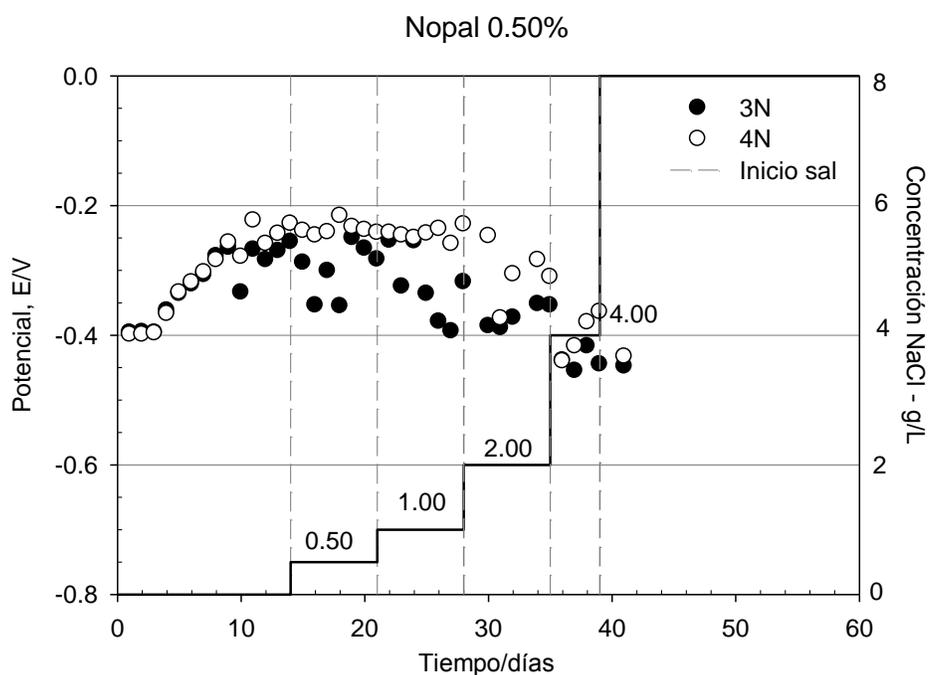


Figura 49-Potencial vs tiempo, celda con mucílago de nopal a 0.50% de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.

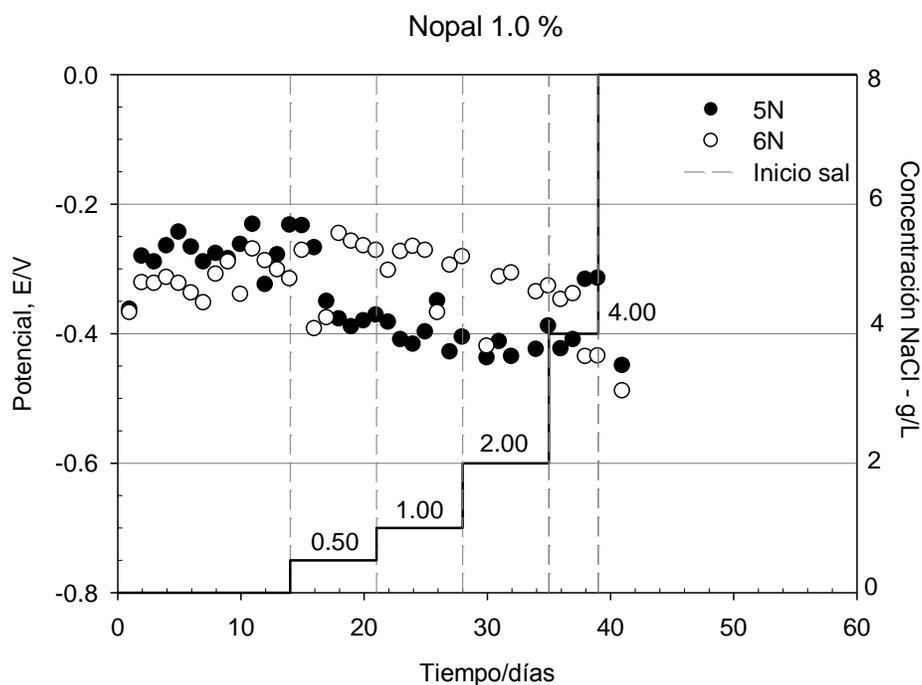


Figura 50-Potencial vs tiempo, celda con mucílago de nopal a 1.0 % de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.

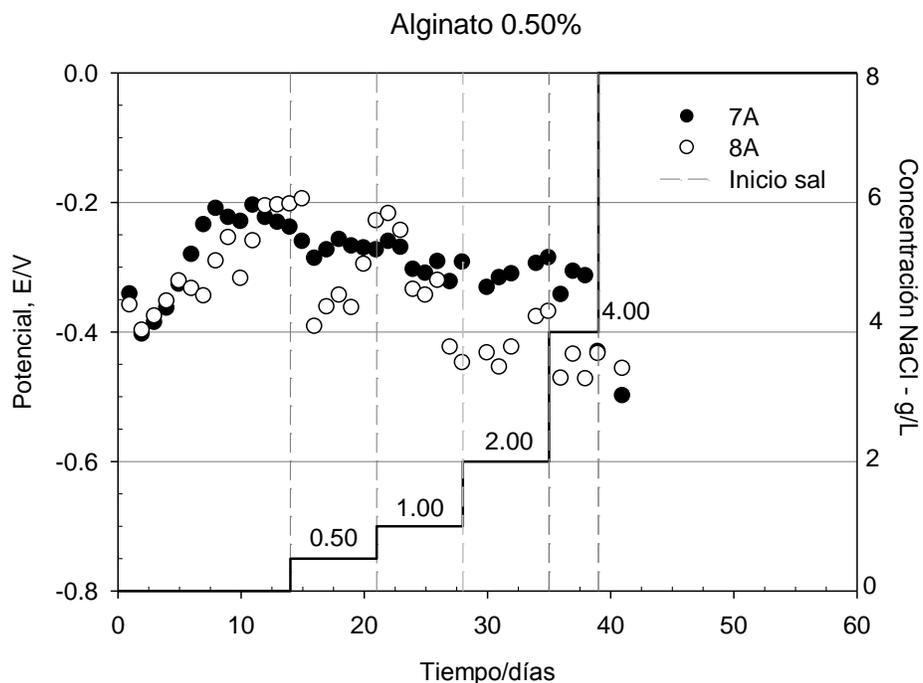


Figura 51-Potencial vs tiempo, celda con solución de alginato a 0.50 % de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.

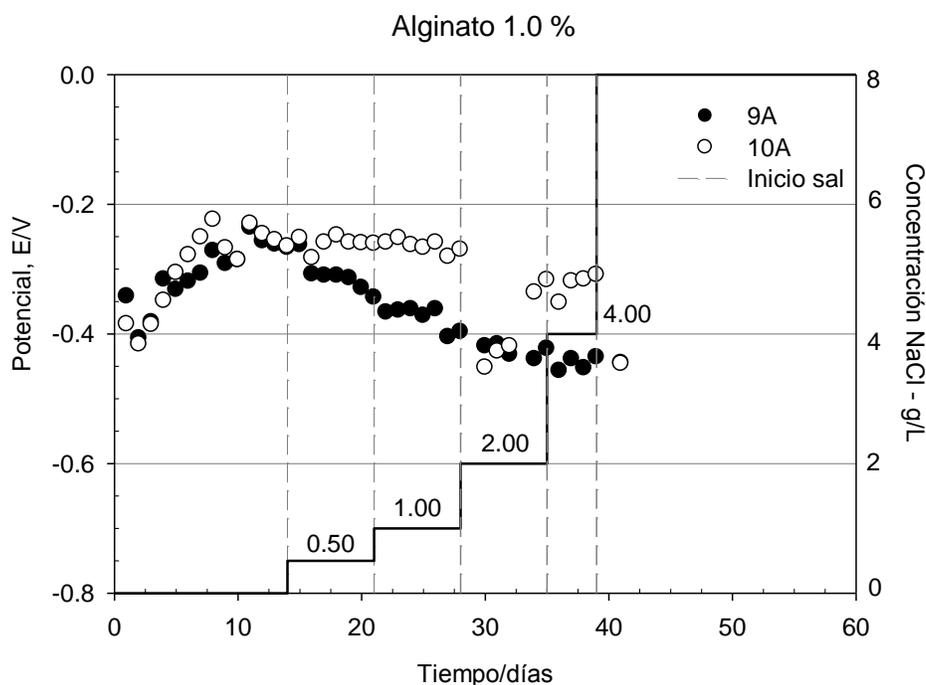


Figura 52-Potencial vs tiempo, celda con solución de alginato a 1.0 % de concentración. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.

### 4.3.2 Resistencia a la polarización lineal

Los valores de la resistencia a la polarización lineal han sido usados como una manera indirecta de medición de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en concretos y medios electrolíticos, empleando la expresión de velocidad de corrosión aparente:

$$i_{CORR} = Bx 10^6Rp^{-1} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde  $i_{CORR}$  es la velocidad de corrosión aparente ( $\mu\text{A cm}^{-2}$ ) y B es una constante obtenida con las pendientes de Tafel (V), igual a 0.026 V para aceros activos y 0.052 V para aceros pasivos. Utilizando un valor de velocidad de corrosión de  $0.02 \mu\text{A cm}^{-2}$ , para determinar los valores de Rp necesarios, con valores de B, tanto para aceros en estado pasivo como activos, se obtienen los límites de  $260 \text{ K}\Omega\text{cm}^2$  y  $130 \text{ K}\Omega\text{cm}^2$  (umbral de incertidumbre de corrosión), los cuales han sido utilizados en esta investigación como límites de seguridad contra la corrosión.

El criterio empleado para establecer el estado pasivo de las barras de acero en medio alcalino de pH 13, fue que los valores de Rp fueran superior al límite de corrosión encontrados con un valor de  $B=0.052$ , para aceros en estado pasivo dando como resultado  $260 \text{ K}\Omega\text{cm}^2$ . Durante la etapa de pasivación, se puede observar que las barras de acero embebidas en mucílago de nopal y alginato, presentan caídas en los valores entre los días 5 y 7, sin embargo, posteriormente tienden a aumentar de manera considerable, probablemente por la formación de una capa de óxidos más densa en la superficie (Torres-Acosta, 2007). Una vez alcanzado este valor, se procedió a añadir cloruros en todas las celdas en proporciones de 0.5, 1, 2, 4 y 8 g/L (cada 7 días), con el propósito de comparar el efecto de las adiciones con respecto a los controles. El valor más alto de Rp alcanzado a los 14 días, fue de  $2338 \text{ K}\Omega\text{cm}^2$  en las barras de acero en solución de mucílago de nopal a 1 %, mientras que el de los controles fue de  $333 \text{ K}\Omega\text{cm}^2$  (ver Figura 53).

En la Figura 53 se muestran los valores promedios de Rp de las varillas de acero, en las diferentes soluciones. A 21 días después de dar inicio a la contaminación con cloruros, los valores de Rp de los controles son similares a los obtenidos al final del experimento de 35

$K\Omega\text{cm}^2$ , en cambio los con adiciones presentan valores muy altos aun sobre los límites de corrosión; principalmente los con mucílago de nopal a 1%, con  $1700 K\Omega\text{cm}^2$  y en menor medida los con alginato a 1% con valor de  $195 K\Omega\text{cm}^2$ .

Al final de la experimentación (27 días posterior al inicio de contaminación con cloruros), con una concentración de NaCl de 8 g/L en cada celda, los valores de Rp de las barras de acero en soluciones de mucílago de nopal a 1% y alginato a 0.50 % presentaron valores superiores al límite de corrosión para aceros activos. Sobre esta situación se plantea la posibilidad de que en futuras experimentaciones de la misma naturaleza, se expongan a las varillas por un mayor tiempo, o en su defecto (si con ello no se presentan cambios), aumentar la concentración de cloruros hasta alcanzar la concentración crítica necesaria para llevar dichos valores cercanos a los de control.

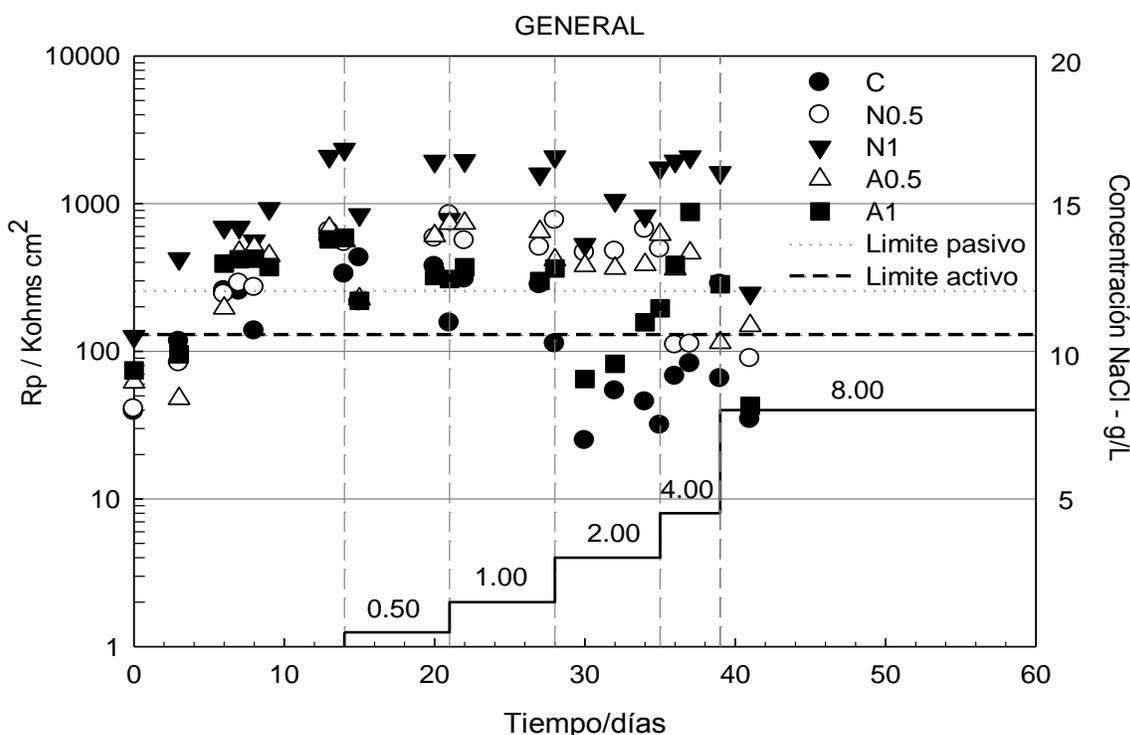


Figura 53-Rp promedios vs tiempo de todas las celdas electroquímicas probadas. Las líneas verticales indican las etapas de contaminación con NaCl.



Este comportamiento de mayor resistencia a la corrosión encontrado, se apoya de la teoría de que el mucílago de nopal funciona como un inhibidor a la corrosión de barras de acero, cuando se contaminan con cloruros el medio alcalino en el que se encuentran (Torres-Acosta, 2007).

La eficiencia como inhibidor a la corrosión estimada (%), se calculó usando la siguiente expresión (Sastri et al, 2005):

$$EI (\%) = \frac{R_{to}^{-1} - R_{ti}^{-1}}{R_{to}^{-1}} \times 100 \quad \text{Ec. 30}$$

Donde  $R_{ti}^{-1}$  y  $R_{to}^{-1}$  son las resistencia a la polarización aparente con y sin adiciones orgánicas en tiempos de prueba  $t$ , respectivamente. En la Figura 54 se muestran los resultados de la eficiencia inhibidora a la corrosión de las soluciones en función de la concentración de cloruros en un medio alcalino. En la Figura se puede observar que el mayor valor de eficiencia alcanzado por todas las soluciones con respecto al control se da cuando se encuentran contaminadas con 2 g/L de NaCl (0.034 M/L), siendo el más alto el de mucílago de nopal a 1% con un 98%, seguido por alginato a 0.50 % con un 96%, muy cercano el de mucílago de nopal a 0.50% con un 94% y el más bajo el de alginato a 1% con un 84%. Al final del experimento con una concentración de 8 gr/L de NaCl (0.136 M/L), los valores de eficiencia disminuyeron hasta un 86% en los con mucílago de nopal a 1%, un 77% en con alginato con 0.50%, 61% con mucílago de nopal a 0.50% y el valor más bajo de un 19% en los con alginato a 1%.

Los resultados de eficiencia inhibidora de este experimento en comparación con los de Torres-Acosta (2007), se puede observar que son mayores tanto a los 2 g/L de NaCl (donde se alcanzan los mayores porcentajes) como a los 4 g/L de NaCl (donde no ya no se observan cambios significativos en los resultados). A los 2 g/L de NaCl, se reporta una eficiencia de 85% aproximadamente, tanto en los con mucílago de nopal a 2% y 0.50% de concentración, y de un 40% con mucílago de nopal a 1.0%. A 4 g/L de NaCl, los mayores

valores son de un 80% para los con mucílago a 2% y 0.50%, y el menor de 50% en los con mucílago a 1%.

Una de las razones por la cual los valores de eficiencia inhibidora encontrados en esta experimentación fueron más altos con respecto a los de Torres-Acosta (2007), se debe a que el tipo de mucílago utilizado, fue extraído directamente en forma de solución de hojas de nopal, en cambio el obtenido por Torres-Acosta (2007) se preparó con nopal deshidratado.

Un dato interesante también encontrado en este trabajo, fue que la concentración tuvo influencia sobre la eficiencia inhibidora que mostraron las soluciones. A mayor concentración del mucílago de nopal, mayor fue su eficiencia. Aunque en los alginato no se muestra esta correspondencia de mejoramiento con la concentración, la información obtenida sirve como un precedente de estudio para este tipo de soluciones, las que pueden ser orientadas al mejoramiento de las propiedades de materiales base cemento con respecto al fenómeno de corrosión del acero de refuerzo.

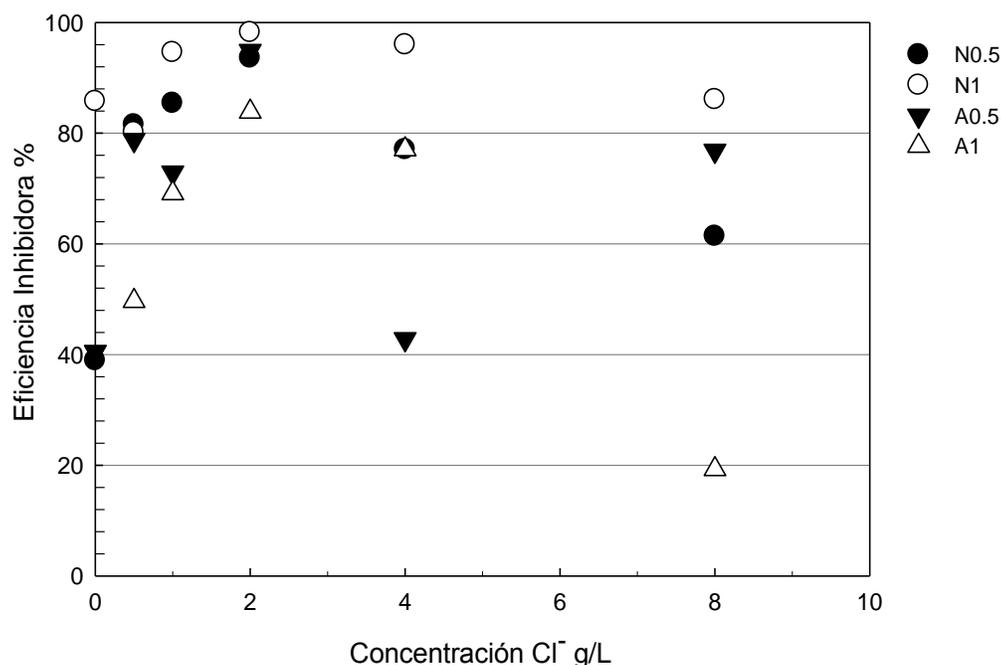


Figura 54-Eficiencia inhibidora (%) vs concentración de cloruros en el electrolito.



## CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se tienen las siguientes conclusiones:

- La inclusión de mucílago de nopal y alginato en las pastas de cemento estudiadas incrementó los tiempos de fraguado, especialmente el mucílago de nopal en pastas con relación agua/cemento=0.60.
- Los espectros IR de pastas de cemento con mucílago de nopal con relación a/c=0.30 muestran un retardo en la formación de portlandita en estado fresco. En estado endurecido no se observan diferencias en los grupos funcionales de las pastas que contienen adiciones orgánicas y con el control.
- Estadísticamente, los resultados obtenidos de resistencia a la compresión axial de concretos con relación a/c=0.30, con y sin aditivos orgánicos son similares.
- La adición de mucílago de nopal y alginato sólo mejoró la resistencia a la compresión axial de los concretos con relación a/c=0.60 sin curado en ambas edades.
- La absorción capilar de agua y el volumen de poros se redujo en los concretos con relación a/c=0.30 que contenían ambas adiciones orgánicas con ambos tipos de curado. En los concretos con relación a/c=0.60, ambas propiedades se incrementaron.
- La permeabilidad a cloruros en los especímenes con relación a/c=0.30 con aditivos se redujo significativamente en ambos tipos de curado y edades de prueba. Para el caso de los especímenes con aditivos con relación a/c=0.60, a los 60 días de edad fueron más permeables que el control, sin embargo a los 120 días de edad esta se redujo, principalmente en las mezclas sin curado.
- Se observó una relación lineal inversa entre la resistencia a la compresión axial y la permeabilidad a cloruros a los 120 días de edad, para ambas relaciones a/c.
- Los coeficientes de difusión de iones cloruro de las mezclas conteniendo mucílago de nopal y alginato, en ambas relaciones a/c y tipos de curado, fueron menores que el control.



- En los concretos con relación  $a/c=0.30$  con mucílago de nopal y alginato se redujo el frente de carbonatación en ambos tipos de curado. En los concretos con relación  $a/c=0.60$ , únicamente los que contienen mucílago de nopal redujeron el frente de carbonatación, mientras que los que contienen alginato son similares al control.
- Los resultados de las pruebas electroquímicas muestran que las adiciones orgánicas proporcionan propiedades inhibitorias de la corrosión del acero de refuerzo en un medio alcalino contaminado con iones cloruro.



## **REFERENCIAS**

- Abrajan M. A., “Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible”. Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- Aitcin, C., Pierre, C., Metha, K. (1990), “Principles underlying production of high-performance concrete”. The American Society for testing and materials. Cement, concrete and aggregates. Vol 12. No.2. pp 70-78.
- Arvizu-Higuera D. L., Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos E., (2002) Parámetros que afectan la conversión del ácido algínico en alginato de sodio. *Ciencias Marinas* 28 (1): 27-36.
- Arvaniti E. C., Lioliou M.G., Paraskeva C. A., Payatakes A. C., Ostvold T., Koutsoukos P. G., “Calcium oxalate crystallization on concrete heterogeneities”. *ICHEME*, 88 (2010) 1455-1460.
- ASM Handbook, 1998. Corrosion, vol. 13, 15-45, 77-123, 466-477.
- American Society of Testing and Materials, (2000). Annual Book of ASTM Standards, Section Four, Construction, Volume 04.2 Construction, Concrete and Aggregates. USA; ASTM; 2000.
- Ávila, J., Genescá, J. (2002), *Más allá de la herrumbre I*, 3ª. Ed. La ciencia para todos, México, 25-86.
- Bamforth, P. (1998). Spreadsheet model for reinforcement corrosion in structures exposed to chlorides. In *concrete under severe conditions 2* (Ed. O.E. G.Jorv, K Sakai and N, Banthia), E&FN Spon, London, pp. 64-75.
- Bentz D. P., Haecker C.J., “An argument for using coarse cements in high-performance concretes”, *Cement and Concrete Research*, 29 (1999) 615-618.
- Borges, P; Castillo, R; Pazini, J; San Juan, M (2001). “Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones. Instituto Mexicano de cemento y concreto. A.C.
- Caballero J. F., “Secado, absorción de agua y difusión de cloruros en concreto conteniendo extracto de nopal”, maestría en Conservación y aprovechamiento de los recursos naturales, (Director: P.F. de J. Cano Barrita), CIIDIR IPN Oaxaca, 2008.



- Cano-Barrita, P.F de J., Lagunes-Rivera Luicita., Hernández-Toledo U. I., León-Martínez F.M., Ignacio-Caballero F., Abad-Zárata E. F., Aquino-González L.V., Ramírez-Arellanes S., Hernández E.F.,. “Desarrollo de aditivos, compuestos y energía sustentables para la industria del concreto. Proyecto Conacyt-Herrozinc, (2010) Clave 137669.
- Cárdenas A., Higuera-Ciapara I., Goycoolea F.M. “Rheology and Aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution”, J.PACD, 1997.
- Cárdenas A., Arguelles W.M., and Goycoolea F.M., “On possible role of *Opuntia Ficus Indica* mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings”, en journal of the Profesional Association for Cactus Development, 3, 1998, 64.
- Chandra S., Aavik J., “Use of cactus in mortars and concrete”, Cement and Concrete, 28 (1998) 41.
- Chandra S., Eklund L., Villarreal R.R., “Influence of proteins on some properties of portland cement mortar”, the journal Cement Composites and Lightweight”, 3 (1987) 91.
- Erdogdu S., Kondratova I.L., Bremner T.W., “ Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements”, Cement and Concrete Research, 34 (2004) 603-609.
- Friedemann K., Stallmach F., Karger J., “NMR diffusion and relaxation studies during cement hydration-A non-destructive approach for clarification of mechanism of internal post curing of cementitious materials”, Cement and Concrete Research. 36 (2006) 817-826.
- Galán Marín C., Rivera Gómez C., Petric J., “Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre”, Construcción and Building, 2010.
- Geological Survey U.S., Mineral Commodity Summaries. 2010.
- Griffiths D. And Hare RF., Chem Abs, 1, 603 (1907)



- Hernández-Castañeda O., Mendoza-Escobedo C.J., “Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico”, INGENIERÍA Investigación y Tecnología VII. 1. 57-70, 2006
- Hewlett P., “LEA’S-Chemistry of cement and concrete”. 4 (2004).
- Hoff G. C., “Durable concrete-Offshore”, Raymundo Rivera International Symposium on Durability of Concrete, 1991.
- Jiménez-Alvarez, Téllez-Jurado L.. “Efecto de un aditivo plastificante comercial sobre la estructura cristalina de la plagioclasa utilizada en la fabricación de blocks ligeros de concreto”. Superficies y Vacío 23(S) 104-108, agosto de (2010)
- Lura P., Jensen O. M., Igarashi S., “Experimental observation of internal water curing of concrete”, Materials and Structures (2007) 40: 211-220.
- Martínez, w.; Alonso, E. M.; Rubio, J. C; Bedolla, J. A.; Velasco, F. A. Torres, A. A. “Comportamiento Mecánico de Morteros de Cal Apagada Artesanalmente, Adicionados con Mucílago de Cactácea y Ceniza Volcánica, para su uso en Restauración y Conservación de Monumentos Coloniales”. Revista de la Construcción [en línea] 2008, vol. 7 [citado 2011-10-10]. Disponible en Internet:<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=127612584009>. I SSN 0717-7925.
- Mattone R., “Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique”, Cement & Concrete Composites, 27(2005),611.
- Mclachlan, J, 1985., “Microalgae (seaweeds): industrial resources and their utilization plant soil, 89,pp. 137-57.
- Mehta P. K., Monteiro P.J.M, “Concreto-estructura, propiedades y materiales”, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, (1998).
- Mehta P. K., Monteiro P.J.M, “Microstructure, properties and materials”, 3 McGraw-Hill (2006).
- Mehta P. K., “Durability-Critical issues for the future”, Concrete International, 1997.



- Mehta P. K, "Advancements in Concrete Technology", Concrete International, 1999).
- Mehta P.K, Burrows R.W., "Building durable structures in the 21st century", The Indian Concrete Journal, 2001.
- Eric Ivan Moreno E.I., Castro-Borges P., Genesca-Llongueras J, "Carbonation-Induced Corrosion of Concrete Coastal Buildings in the North of Yucatan, Mexico", NACE International, 1999.
- Neal Cox, J.«Fourier Transform infrared Spectroscopy.» Cap. 8 de Encyclopedia of materials Characterization - Surfaces, Interfaces, Thin Films, de Charles A. Evans, Jr., Shaun Wilson. C. Richard Brundle, 422-424. Elsevier. Online version, (1992).
- Neville, A. (2001) Maintenance and durability of concrete structures. Concrete international.
- Ormellese M., Lazzari L., Goidanich S., Fumagalli G., Brenna A., "A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete", Corrosion Science, 51 (2009)2959-2968.
- Okamura and Masahiro, "Self-compacting Concrete", Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No.1, 5-15 (2003).
- Pade C, Guimaraes M. The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective. Cement and concrete research, 2007.
- Pathak, T.S., Yun, J.-H, Lee, J., & Paeng,K.-J, "Effect of calcium ion (cross-linker) concentration on porosity, surface morphology and thermal behavior of calcium alginates prepared from algae (Undaria pinnatifida), Carbohydrate Polymers (2008), doi:10.1016/j.carbpol.2010.03.025.
- Petric-Gray J., Galán-Marín C., Rivera-Gómez C., Rodríguez-García R., Osta-Fort P., "On soil stabilization with alginate and wool for construction industry", 11th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (NOMAT 2009).
- Potter K., Balcom B. J., Carpenter T.A., Hall L.D., " The gelation of sodium alginate with calcium ions studied by magnetic resonance imaging (MRI)", Carbohydrate reserch, 257 (1994) 117-126.
- Prakash J., Chan J. C., "Rapid chloride permeability testing", Hanley-Wood (2002).



- Ramírez Arellanes S., “Determinación de las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto conteniendo mucilago de nopal como aditivo natural”, maestría en Conservación y aprovechamiento de los recursos naturales, (Directores: P.F. de J. Cano Barrita y Carlos Gómez Yáñez), CIIDIR IPN Oaxaca, 2008.
- Red DURAR, “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado”, Ciencia y Tecnología para el desarrollo, CYTED, Maracaibo, Venezuela. (1997)
- Sands, L. Klass, R. J. Chem. Soc. 51, 3441-3448 (1929).
- Sastri VS, Elboudjaini M, Perumareddi JR (2005) Corrosion 61:933
- Sideris K.K, Savva A.E, “Durability of mixture containing calcium nitrite based corrosion inhibitor”, Cement & concrete composites, 2004.
- Solís R. G., Moreno E. I., Borges P. C., “Durabilidad en la estructura del concreto de vivienda en zona costera”, Revista Académica Universidad Autónoma de Yucatán, 9-1 (2005) 13-18.
- 
- Sisomphon K., Franke L., “Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials”, Cement and Concrete Research, 37 (2007) 1647-1653.
- Song H., Lee C., Ann K.Y., “ Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments”, Cement and Concrete , 30 (2008) 113-121.
- Sriamornsak P, Nunthanid J, Luangtana-anan M, Weerapol Y, Puttipipatkachorn S., “Alginate-based pellets prepared by extrusion/spheronization: Effect of the amount and type of sodium alginate and calcium salts”, European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. 69 (2008) 274-284.
- Thiery M., Villain G., Dangla P., Platret G., “Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical Kinetics”, Cement and Concrete Research. 37 (2007) 1047-1058.



- Tinoco-Vercosa A.C, Goncalves J., “Uso de pastas de yeso mucílago de cactus: efectos sobre la absorción de agua y resistencia a la flexión”, *Ambiente construido*, 10 (2010) 139-151.
- Torres Acosta A.A., “Opuntia Ficus Indica (Nopal) Mucilage as a steel corrosion inhibitor in alkaline media”, *journal of applied electrochemistry*, 2007, en prensa.
- Wallevik J. E., “Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown”, *Cement and Concrete Research*. 39 (2009) 14-29.
- Torres-Acosta A.A., Cano-Barrita PF de J. “Las bondades del nopal”, *Construcción y tecnología*, 2007.
- Torres-Acosta A.A., Celis-Martínez E.C., Molina-Martínez W., Lomeli-Gonzales G.M., “Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas”, *IMT* (2009).
- Torres-Acosta and Martínez-Madrid., “Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment”, *journal of materials in civil engineering*, Vol. 15, NO.4, 344-353, (2003).
- Torres-Acosta A.A, Martinez-Molina W, Herbert-Urquiza E, Luna-Ortiz A.D., “La normativa mexicana para cementos: ¿qué es lo que realmente obtenemos?”. *IC Ingeniería Civil*, No 510, (2011).
- Trezza M. A. “Hydration Study of Ordinary Portland Cement in the Presence of Zinc Ions”. *Materials Research*, Vol. 10, No. 4, 331-334, (2007).
- Uhlig, H. (1970). *Corrosión y control de la corrosión*, 7<sup>a</sup>. Ed, Editorial Urmo, España: 92-125, 155-165.
- Ventolá L., Vendrell M., Giraldez P., Merino L., “Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics”, *Construction and building materials*, 25 (2011) 3313-3318.
- Zhu W., Bartos P. J.M., “Permeation properties of self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 921-926.



## ANEXO 1

Tabla 1-Analisis de varianza de resistencia a la compresión HPC a los 60 y 120 días.

Análisis de varianza de resistencia - 60 días					
Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Probabilidad
A: mezcla	3	9635.188	3211.729	2.47	0.079736
B: curado	1	<b>91648.43</b>	<b>91648.43</b>	<b>70.48</b>	<b>0.000000*</b>
AB	3	4130.1	1376.7	1.06	0.380245
C: edad	1	3618.395	3618.395	2.78	0.10504
AC	3	8297.519	2765.84	2.13	0.116217
BC	1	745.1329	745.1329	0.57	0.454584
ABC	3	10763.67	3587.891	2.76	0.058241
S	32	41608.78	1300.274		
Total (Ajustado)	47	170447.2			
Total	48				

\* Terminó significativa alfa = 0.05

Tabla 2-Analisis de varianza de resistencia a la compresión ACI a los 60 y 120 días.

Análisis de varianza de resistencia - 120 días					
Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Probabilidad
A: mezcla	3	11929.19	3976.397	17.18	0.000001*
B: curado	1	28142.64	28142.64	121.56	0.000000*
AB	3	6104.348	2034.783	8.79	0.000214*
C: edad	1	3346.303	3346.303	14.45	0.000609*
AC	3	844.4299	281.4766	1.22	0.319857
BC	1	188.443	188.443	0.81	0.373687
ABC	3	1027.42	342.4734	1.48	0.238727
S	32	7408.262	231.5082		
Total (Ajustado)	47	58991.04			
Total	48				

\* Terminó significativa alfa= 0.05

**Análisis de varianza- Paso de carga (Coulomb)**

Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Probabilidad
A: mezcla	3	735266	245088.7	7.08	0.000929*
B: curado	1	240384.9	240384.9	6.94	0.013018*
AB	3	205985.7	68661.88	1.98	0.136978
C: edad	1	1019101	1019101	29.44	0.000006*
AC	3	245396.8	81798.95	2.36	0.090334
BC	1	202816	202816	5.86	0.021558*
ABC	3	35684.63	11894.88	0.34	0.793987
S	31	1073276	34621.8		
Total (Ajustado)	46	3813742			
Total	47				

\* Terminó significativo alfa= 0.05

Tabla 3-Análisis de varianza de permeabilidad a cloruros ASTM C1202 HPC a 60 y 120 días.

Tabla 4-Análisis de varianza de permeabilidad a cloruros ASTM C1202 ACI a 60 y 120 días.

**Análisis de varianza- Paso de carga (Coulomb)**

Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Probabilidad
A: mezcla	3	2749079	916359.6	2.36	0.091033
B: curado	1	1908781	1908781	4.92	0.034240*
AB	3	479320.2	159773.4	0.41	0.745608
C: edad	1	261440.2	261440.2	0.67	0.418115
AC	3	5561362	1853787	4.78	0.007712*
BC	1	460940.3	460940.3	1.19	0.284326
ABC	3	1409869	469956.2	1.21	0.322456
S	30	1.16E+07	387857.4		
Total (Ajustado)	45	2.55E+07			
Total	46				

\* Terminó significativo alfa= 0.05



Tabla 5-Absorción capilar relación a/c= 0.30, edad 120 días.

	Edad: 120 días							
	Curado: 0 días				Curado: 28 días			
	a/c	m/c	al/c	ma/c	a/c	m/c	al/c	ma/c
Sorptividad (mm/min <sup>1/2</sup> )	0.093±0.002	0.080±0.010	0.083±0.005	0.094±0.003	0.092±0.004	0.073±0.001	0.075±0.003	0.088±0.005
Absorción total después de la inmersión y hervido 5 hrs.	4.41±0.44	2.58±0.18	2.68±0.39	4.03±0.07	3.40±0.25	2.10±0.15	2.57±0.05	3.27±0.20
Volumen de poros permeables	9.78±1.00	5.84±0.36	6.15±0.88	9.29±0.15	7.52±0.60	4.74±0.29	5.92±0.10	7.56±0.47
Distancia de penetración del agua (mm) a:								
4 horas	2.20	1.91	1.72	1.97	2.10	1.66	1.50	1.73
8 horas	2.69	2.34	2.21	2.57	2.58	2.05	1.96	2.27
1 día	4.01	3.50	3.47	3.98	3.91	3.13	3.14	3.64
2 días	5.00	4.31	4.43	5.02	4.94	3.93	4.02	4.74

Tabla 6-Absorción capilar relación a/c= 0.60, edad 120 días.

	Edad: 120 días							
	Curado: 0 días				Curado: 28 días			
	a/c	m/c	al/c	ma/c	a/c	m/c	al/c	ma/c
Sorptividad (mm/min <sup>1/2</sup> )	0.18±0.008	0.23±0.015	0.27±0.004	0.21±0.015	0.19±0.008	0.22±0.013	0.25±0.016	0.20±0.011
Absorción total después de la inmersión y hervido 5 hrs.	6.78±0.06	8.03±0.29	7.91±0.12	7.85±0.10	7.27±0.01	7.85±0.33	8.02±0.19	7.92±0.25
Volumen de poros permeables	14.50±0.05	16.63±0.58	16.55±0.27	17.12±0.23	15.55±0.07	16.41±0.68	16.65±0.30	17.26±0.45
Distancia de penetración del agua (mm) a:								
4 horas	5.90	4.77	5.44	4.01	4.34	4.32	4.72	3.67
8 horas	7.46	5.95	6.87	5.31	5.52	5.44	6.00	4.87
1 día	9.42	9.34	11.16	8.65	8.90	8.75	9.93	8.05
2 días	9.53	12.14	14.74	11.39	9.95	11.58	13.37	10.71



Tabla 7- Valores de resistencia a la compresión en concretos, a 60 y 120 días.

Tipo de solución empleada en la mezcla	Curado (días)	Resistencia a la compresión axial (kg/cm <sup>2</sup> )			
		60 días		120 días	
		a/c		a/c	
		0.30	0.60	0.30	0.60
Agua/cemento	0	635.6	253.5	601.5	247.4
	28	775.6	354.5	660.3	312.0
Mucílago/cemento	0	647.8	297.5	651.3	271.9
	28	745.8	349.0	720.2	323.9
Alginato/cemento	0	640.2	277.9	626.8	259.2
	28	691.8	292.3	720.5	303.8
Mucílago-alginato/cemento	0	636.6	301.1	634.6	300.4
	28	720.0	343.7	731.3	333.4

Tabla 8- Valores de paso de carga (Coulomb) en concretos, a 60 y 120 días.

Tipo de solución empleada en la mezcla	Curado (días)	Paso de carga (Coulomb)			
		60 días		120 días	
		a/c		a/c	
		0.30	0.60	0.30	0.60
Agua/cemento	0	2492.0	8251.5	2482.5	8830.3
	28	2537.7	7122.7	2206.0	8134.0
Mucílago/cemento	0	2289.5	8813.7	2077.3	8276.3
	28	2373.7	8005.7	1903.5	7958.3
Alginato/cemento	0	2282.7	9253.7	2267.3	8499.5
	28	2023.5	8849.5	1744.5	8566.3
Mucílago-alginato/cemento	0	2005.0	8398.3	1916.0	7703.7
	28	2360.3	8318.5	1796.3	7307.3



Tabla 9- Predicción del tiempo para carbonatar 25 mm de concreto.

<b>Mezcla</b>	<b>Kacc (mm/dia<sup>1/2</sup>)</b>	<b>Kamb (mm/dia<sup>1/2</sup>)</b>	<b>D=25mm, años</b>
<b>06CS</b>	3.07	0.29	20.0
<b>06MS</b>	2.19	0.21	39.38
<b>06AS</b>	3.17	0.30	18.72
<b>06MAS</b>	2.21	0.21	38.70
<b>06CC</b>	2.34	0.22	34.42
<b>06MC</b>	1.94	0.18	50.25
<b>06AC</b>	2.59	0.25	27.99
<b>06MAC</b>	1.88	0.18	53.13
<b>03CS</b>	0.33	0.03	> 60
<b>03MS</b>	0.05	0.00	> 60
<b>03AS</b>	0.19	0.02	> 60
<b>03MAS</b>	0.52	0.05	> 60
<b>03CC</b>	-	-	> 60
<b>03MC</b>	-	-	> 60
<b>03AC</b>	0.05	0.00	> 60
<b>03MAC</b>	-	-	> 60