
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL
REGIONAL UNIDAD OAXACA**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS
NATURALES**
Especialidad en Ingeniería de Procesos

T E S I S

**“SECADO, ABSORCIÓN DE AGUA Y DIFUSIÓN DE CLORUROS EN
CONCRETO CONTENIENDO EXTRACTO DE NOPAL”.**

Para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

FERNANDO JULIÁN CABALLERO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. PRISCILIANO FELIPE DE JESÚS CANO BARRITA

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. Diciembre 2008.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 09 del mes diciembre del año 2008, el (la) que suscribe Julián Caballero Fernando alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B061464**, 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 Dr. Presiciliano Felipe de Jesús Cano Barrita. y cede los derechos del trabajo titulado: **"Secado, absorción de agua y difusión de cloruros en concreto conteniendo extracto de nopal"**, 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 ó aztk_jcf@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

JULIÁN CABALLERO FERNANDO



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CITIGIR
UNIDAD OAXACA
IPN

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se estudió el efecto en las propiedades de absorción capilar de agua, pérdida de humedad por secado y en el coeficiente de difusión del ion cloruro, al sustituir el agua de mezclado por una solución de mucílago de nopal al 3% en mezclas de concreto hidráulico. También se evaluó el impacto de los coeficientes de difusión dependientes del tiempo obtenidos, en el periodo de inicio de la corrosión del acero de refuerzo, utilizando el programa de computadora *Life 365* para analizar una estructura hipotética de concreto reforzado sujeta a condiciones específicas de temperatura y exposición a cloruros. Los materiales utilizados fueron cemento portland blanco, mucílago de nopal (*opuntia ficus indica*), agregados pétreos de río y agua destilada. Se diseñaron y elaboraron tres mezclas control con relaciones agua/cemento 0.30, 0.45 y 0.60, así como tres mezclas conteniendo una solución de mucilago de nopal al 3%. Con dichas mezclas se elaboraron especímenes de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, los cuales se curaron en húmedo por cero y siete días a $23 \pm 3^\circ\text{C}$. Los resultados de secado en ambiente natural indican que el mucílago de nopal contribuye a reducir la pérdida de humedad solo en la relación 0.30. En las relaciones 0.45 y 0.60 los especímenes conteniendo mucílago perdieron una mayor cantidad de agua que los especímenes control, lo cual se explica por la mayor porosidad capilar observada en los especímenes conteniendo mucilago y el efecto retardante de hidratación que éste posee. Los resultados de absorción capilar indican un efecto positivo del mucílago en las tres relaciones (0.30, 0.45 y 0.60), ya que se redujo la absorción capilar con respecto a las mezclas control. Con respecto a la difusión de cloruros, los especímenes con relación 0.30 y conteniendo mucílago poseen un menor coeficiente de difusión en todas las edades de prueba y en ambos tiempos de curado. En las relaciones 0.45 el mucílago de nopal disminuye el coeficiente de difusión hasta la edad de 120 días en ambos tiempos de curado. En la relación 0.60 el mucílago de nopal disminuye la difusión de cloruros solo cuando se tiene un tiempo de curado en húmedo de siete días. En todos los casos no se observó la reducción proporcional esperada del coeficiente de difusión de cloruros al tener la solución de mucilago de nopal una mayor viscosidad del agua. En la predicción del periodo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo, el mucílago de nopal incrementó dicho periodo en aproximadamente 15 años con respecto a la mezcla control. Debe mencionarse que este incremento solo se observó en la relación 0.30 con siete días de curado en húmedo. En las otras relaciones el incremento fue marginal.

ABSTRACT

In this research work, the effect on capillary water absorption, moisture loss, and chloride diffusion coefficient, resulting from the use of a 3% cactus mucilage solution to replace water in concrete mixtures was evaluated. Also, the effect of the time dependant chloride diffusion coefficient obtained on the initiation period for steel corrosion in a hypothetical concrete structure under specific environmental conditions and exposure to chlorides was evaluated using the software *Life 365*. The materials used were white Portland cement, cactus mucilage (*Opuntia ficus indica*), river aggregates and distilled water. Three control concrete mixtures were designed and prepared with water/cement ratios of 0.30, 0.45 and 0.60, and three mixtures with the same water/cement ratios containing a 3% cactus mucilage solution. Specimens measuring 100 mm in diameter and 200 mm in height were cast and cured for zero and seven days at $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Results from drying in a natural environment indicate that the cactus mucilage reduces moisture loss only at a ratio of 0.30. At the ratios of 0.45 and 0.60 the specimens prepared with cactus mucilage lost a higher amount of water compared to control specimens. This is explained by the higher capillary porosity observed in the specimens containing cactus mucilage and the hydration retarding effect of the mucilage. Results of capillary water absorption indicate that the cactus mucilage had a positive effect in all ratios (0.30, 0.45 and 0.60), showing a lower water absorption with respect to control mixtures. With respect to the chloride diffusion, specimens at a ratio of 0.30 and containing cactus mucilage showed a lower diffusion coefficient at all ages for both moist curing regimes. In the ratio 0.45, the cactus mucilage reduces the diffusion coefficient only at 120 days for both moist curing regimes. At a ratio of 0.60, the cactus mucilage reduces the chloride diffusion only when moist curing for seven days. In the prediction of the initiation period for the steel corrosion, the cactus mucilage increased this time by approximately 15 years with respect to the control specimens. This was only observed at a ratio of 0.30 and moist curing for seven days. The increase in other ratios was only marginal.

DEDICATORIA

A DIOS:

Por llenarme de bendiciones, por regalarme una familia tan maravillosa y ponerme en un camino que conforme lo descubro me gusta cada día más, recordándome así que a pesar de lo aprendido falta tanto por aprender.

A MIS PADRES:

Con especial cariño a mis padres Félix Julián y Esther Caballero, por todo el amor, apoyo, confianza y ejemplos que me han dado, pero sobre todo por abrigarme en una familia tan unida como la nuestra ... esto es solo un pequeño reconocimiento y agradecimiento a ello... Gracias!!!

A VIRIDIANA:

A unos días del gran día... Un día apareciste y decidiste alborotarme la vida... Gracias por ser, estar y existir...

A MIS HERMANOS:

José, Carlos y Oscarín, gracias por estar siempre a mi lado, contagiándome de sus alegrías y tristezas. Siempre lo hemos dicho, que aunque los años pasen, el amor y el cariño entre nosotros es el mismo que cuando éramos niños.

A:

Mis sobrinos: Luís, Daniel y la nena, porque a su pequeña edad nos alientan a seguir adelante alimentando nuestra fe y esperanza,

Mi cuñada: María de Jesús por el apoyo, comprensión y cariño.

A G R A D E C I M I E N T O S

Al Dr. **Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita**, por todo el apoyo que me ha brindado, por compartir todos sus conocimientos, tiempo y paciencia, pero sobre todas las cosas por brindarme su amistad y confianza.

Al comité tutorial y jurado: Dr. Pedro Montes, Dr. Andrés Pech, Dr. Juan Rodríguez y Dra. Yadira Gochi por sus comentarios y observaciones para mejorar el trabajo.

Al Instituto Politécnico Nacional y al CIIDIR Unidad Oaxaca, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y por haber cumplido el sueño de ser alumno Politécnico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada durante los estudios de maestría.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores

Por el apoyo económico brindado como parte del proyecto: “Polímeros naturales y adiciones minerales para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de materiales basados en cemento”, claves SIP IPN 20070154 y 20080213.

A mis compañeros del CIIDIR, Alejandro, Samuel, Roberto, Jacobo, Omar, Armando, gracias por la amistad brindada y por todo el apoyo.

ÍNDICE

Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Dedicatorias.....	v
Agradecimientos.....	vi
CAPITULO I	1
I.1. Introducción	1
I.2. Planteamiento del problema.....	4
I.3. Justificación.....	6
I.4. Antecedentes	7
I.5. Objetivo General	14
I.6. Objetivos específicos.....	14
I.7. Hipótesis.....	15
CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO.....	16
II.1. Generalidades sobre el concreto	16
II.1.1. Concreto.....	16
II.1.2. Componentes del cemento portland.....	16
II.2. Durabilidad del concreto.....	22
II.2.1. Importancia de la durabilidad	22
II.2.2. Causas de la durabilidad inadecuada	24
II.2.3. Transporte de agentes agresivos en el concreto.....	27
II.3. Secado	40
II.3.1 Métodos generales de secado.....	40
II.3.2. Contenido de humedad de los materiales.....	41
II.3.3. Curvas de velocidad de secado	41
II.3.4 Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constantes	42
II.3.5. Secado en el concreto.....	42
II.4. Polímeros Naturales	44
II.4.1. Mucílago de nopal.....	45
II.4.2. Composición química del mucílago de nopal (varios autores).....	46

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.	48
III.1. Materiales.	48
III.1.1 Cemento.....	48
III.1.2 Agregado grueso y fino	49
III.1.3 Agua.	49
III.1.4. Superplastificante.....	49
III.2. Métodos	50
III.2.1. Obtención del mucílago de nopal	50
III.2.3. Mezclas de concreto	52
III.2.4. Elaboración, curado y acondicionamiento de los especímenes	53
III.3. Caracterización del concreto en estado endurecido.....	55
III.3.1. Secado de concreto	55
III.3.2. Absorción capilar.....	55
III.3.3. Difusión de cloruros	57
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	62
IV.1 Secado de concreto.....	62
IV.1.1. Pérdida de humedad de especímenes relación a/c y m/c 0.30.....	62
IV.1.2. Pérdida de humedad de especímenes relación a/c y m/c 0.45.....	63
IV.1.3. Pérdida de humedad de especímenes relación a/c y m/c 0.60.....	65
IV.2 Absorción Capilar y porosidad.....	66
IV.2.1. Absorción Capilar y porosidad relación a/c y m/c 0.30	66
IV.2.2. Absorción Capilar y porosidad relación a/c y m/c 0.45	68
IV.2.3. Absorción Capilar y porosidad relación a/c y m/c 0.60	70
IV.2.4. Porosidad y resistencia a la comprensión.....	72
IV.2.5. Absorción capilar y secado.....	73
IV.3. Coeficientes de difusión de cloruros	75
IV.3.1. Coeficientes de difusión de cloruros relación 0.30	75
IV.3.2. Coeficientes de difusión de cloruros relación 0.45	77
IV.3.2. Coeficientes de difusión de cloruros relación 0.60	78
IV.4. Determinación del periodo de iniciación de la corrosión del acero de refuerzo.....	79
CONCLUSIONES	85

RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS	87
ANEXO 1.....	94
ANEXO 2.....	101

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Rango de evolución del calor del cemento Pórtland con una relación agua/cemento 0.40 (Neville, 1999)	21
<i>Figura 2.</i> Factores que influyen en la durabilidad del concreto armado (Borges et al, 2001)	26
<i>Figura 3.</i> Clasificación de poros por su tamaño.....	28
<i>Figura 4.</i> Diagrama esquemático del proceso de difusión molecular.	29
<i>Figura 5.</i> Comportamiento típico de absorción de agua por los especímenes de concreto.	39
<i>Figura 6.</i> Determinación de la capacidad de absorción.	40
<i>Figura 7.</i> Variación de la humedad relativa en el concreto.....	43
<i>Figura 8.</i> Macerado del nopal y proceso de molido.....	51
<i>Figura 9.</i> Filtración del mucílago de nopal	51
<i>Figura 10.</i> Diagrama de flujo del diseño metodológico.....	54
<i>Figura 11.</i> Seccionado de los especímenes de concreto de acuerdo a la posición de colado.	56
<i>Figura 12.</i> Prueba de absorción de agua por capilaridad.	56
<i>Figura 13.</i> Almacenamiento de especímenes expuestos a solución de cloruro de sodio	58
<i>Figura 14.</i> Herramienta extractora de polvos de concreto.	59
<i>Figura 15.</i> Temperatura anual utilizada para determinar el inicio de la corrosión del acero de refuerzo.	61
<i>Figura 16.</i> Pérdida de humedad a los 120 días de edad en especímenes de concreto de relación 0.30	62
<i>Figura 17.</i> Pérdida de humedad a los 120 días de edad en especímenes de concreto de relación 0.45	63
<i>Figura 18.</i> Pérdida de humedad a los 120 días de edad en especímenes de concreto de relación 0.60	65
<i>Figura 19.</i> Absorción capilar de agua en cilindros de concreto relación 0.30. Con una desviación estándar máxima de 0.009	66
<i>Figura 20.</i> Volumen de poros permeables en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.30. Con una desviación estándar máxima de 1.07.....	67
<i>Figura 21.</i> Absorción de agua en cilindros de concreto relación 0.45. Con una desviación estándar máxima de 0.010	68
<i>Figura 22.</i> Volumen de poros permeables en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.45	69
<i>Figura 23.</i> Absorción de agua en cilindros de concreto relación 0.60. Con una desviación estándar máxima de 0.016	70
<i>Figura 24.</i> Volumen de poros permeables en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.60	71
<i>Figura 25.</i> Relación entre resistencia a la compresión y porosidad.	72
<i>Figura 26.</i> Relación entre sorptividad y pérdida de humedad, a la edad de 120 días.	73
<i>Figura 27.</i> Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.30, a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.....	75
<i>Figura 28.</i> Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.45, a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.....	77

<i>Figura 29.</i> Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.60, a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.....	78
<i>Figura 30.</i> Iniciación de la corrosión del acero de refuerzo en la relación a/c=0.30 y m/c 0.30. a) cero días de curado, b) siete días de curado.	79
<i>Figura 31.</i> Vida de servicio y tiempo de propagación para las mezclas a/c 0.30 y m/c 0.30, con siete días de curado. (Life 365).....	80
<i>Figura 32.</i> Predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo para las mezclas a/c 0.30 y m/c 0.30.	80
<i>Figura 33.</i> Predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo para las mezclas a/c 0.45 y m/c 0.45	81
<i>Figura 34.</i> Predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo para las mezclas a/c 0.60 y m/c 0.60	82
<i>Figura 35.</i> Línea del tiempo y costos para una estructura hipotética relación a/c 0.30, siete días de curado	83
<i>Figura 36.</i> Línea del tiempo y costos para una estructura hipotética relación m/c 0.30, siete días de curado	83
<i>Figura 37.</i> Costo del ciclo de vida en valor presente. Estructura hipotética a/c y m/c 0.30 con curado de siete días.	84

Índice de tablas

<i>Tabla 1.</i> Óxidos y compuestos del cemento Portland	19
<i>Tabla 2.</i> Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en el concreto reforzado, según varios investigadores y límites máximos de contaminación de los materiales.	36
<i>Tabla 3.</i> Componentes del mucílago de nopal (diversos autores).....	46
<i>Tabla 4.</i> Características fisicoquímicas del mucílago de nopal <i>Opuntia Ficus Indica</i>	47
<i>Tabla 5.</i> Composición Química cemento blanco y CPO.....	48
<i>Tabla 6.</i> Caracterización de los agregados pétreos.....	49
<i>Tabla 7.</i> Proporcionamientos de las distintas mezclas utilizadas y propiedades en estado fresco.	52
<i>Tabla 8.</i> Determinación del número de especímenes de concreto.	53
<i>Tabla 9.</i> Valores de la constante m.....	79

CAPITULO I

I.1. Introducción

El concreto fabricado con cemento Portland es un material simple en apariencia con una naturaleza interna muy compleja. En contraste con esto, la versatilidad y economía del concreto lo han convertido en el material de construcción más usado en el mundo. El concreto está inmerso en toda actividad de desarrollo de cualquier país, razón que nos obliga a estudiar y profundizar la búsqueda de sus posibilidades potenciales y qué factores pueden vulnerarlo que le permita mantenerse como el material de construcción más utilizado (Borges, 2001)

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; gracias a esto se han logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio. Sin embargo, se han encontrado problemas de durabilidad relacionados con el medio ambiente en el que se encuentra expuesta la estructura (Skoczylas et al, 2006)

Los problemas de durabilidad empezaron a surgir antes de la mitad del siglo XX, por lo que la problemática no es nueva, sin embargo, las obras realizadas en épocas recientes siguen presentando problemas de esta naturaleza. Los agentes que afectan la durabilidad del concreto son de diversa índole y pueden ser clasificados en dos categorías: los agentes externos y los internos. Los externos son los que se encuentran en el medio ambiente o se deben a consideraciones de servicio. Entre estos se encuentran los iones cloruro, el dióxido de carbono, sulfatos, abrasión y ciclos de congelamiento y deshielo. Los agentes internos se hallan dentro del mismo concreto, como los iones cloruros incorporados en determinados aditivos y los álcalis del cemento que reaccionan con agregados potencialmente reactivos. La importancia de los agentes agresivos está en función del entorno en que se encuentran, velocidad de penetración y medio de transporte. Dichos agentes agresivos pueden ser gases, líquidos o iones (Metha, 1997; Mohr et al, 2004; Gardner et al 2004; Saetta, 2005)

Con la finalidad de reducir estos problemas en diversas partes del mundo se han realizado investigaciones, enfocadas a estudiar los mecanismos de transporte y velocidad a la cual los agentes agresivos penetran en el concreto (Thomas, 1999, 2000; Tong, et al 2001; Hanzic et al 2003; Mohammed et al 2003; Nokken et al, 2004). Así mismo, otras investigaciones se han enfocado a mejorar las características del concreto en estado fresco y endurecido, con base en la introducción de adiciones minerales como por ejemplo: subproductos de procesos industriales y puzolanas naturales (Wang et al , 2003; Nehdí et al, 2003). Estas adiciones por sí mismas no tienen propiedades cementantes, pero finamente divididas y en presencia de agua reaccionan químicamente a temperatura ambiente con el hidróxido de calcio, el cual es un producto de la hidratación del cemento, para formar compuestos con propiedades cementantes. Esto contribuye a disminuir la permeabilidad del concreto e incrementar no solo sus propiedades mecánicas, sino también su durabilidad. Como ejemplo de adiciones minerales tenemos la ceniza volante, humo de sílice, ceniza de cáscara de arroz, escoria de alto horno y vidrios volcánicos (Adnan, 2003; Love et al, 2007)

Por otra parte, existen aditivos químicos que mejoran las características del concreto en estado fresco y endurecido (Rixom et al, 1999). Los más frecuentemente utilizados son los agentes inclusores de aire, reductores de agua normales y de alto rango, retardantes y acelerantes de hidratación. Recientemente se han utilizado agentes modificadores de viscosidad (Saric-Coric et al, 2003). Desafortunadamente, la mayoría de estos aditivos son de alto costo, lo cual hace difícil su uso cotidiano en nuestro medio. Una alternativa es el uso de polímeros naturales con alta disponibilidad local, tales como el extracto de nopal que puede contribuir a mejorar las propiedades del concreto (Cano et al 2005; Acosta et al 2005, Chandra et al 1987,1997; Cárdenas et al 1997).

La presente tesis tiene como principales aportaciones, evaluar y estudiar el secado, la absorción capilar de agua y la difusión de cloruros en diferentes concretos conteniendo extracto de nopal, con datos experimentales propios, con el objeto de conocer los cambios en las propiedades de transporte producidos por la adición del mucílago de nopal en materiales basados en cemento.

El trabajo de investigación está conformado de cuatro capítulos. El Capítulo I muestra el planteamiento del problema, la justificación y los antecedentes sobre investigaciones hechas acerca del uso de mucílago de nopal en morteros y concretos para mejorar sus propiedades en estados fresco y endurecido, asimismo se presentan los objetivos de la investigación y las hipótesis planteadas. En el Capítulo II se presentan los fundamentos teóricos y conceptuales que sirven como sustento para el desarrollo de la investigación, tomando como base el transporte de agentes agresivos en el concreto por absorción capilar y difusión, así como la importancia que tiene la pérdida de humedad por secado en el concreto. En el Capítulo III se describen los materiales utilizados y los métodos usados durante la parte experimental de la investigación, la cual consistió en la preparación y caracterización de los materiales, así como la realización de las pruebas físicas a especímenes de concreto, las cuales principalmente fueron tres: 1) Evaluación de la pérdida de humedad por secado, 2) Absorción capilar de agua y 3) Difusión del cloruros. El Capítulo IV contiene los resultados obtenidos y su discusión correspondiente de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio. Por último se presentan las conclusiones de la investigación y recomendaciones para trabajos posteriores.

I.2. Planteamiento del problema

El concreto ha sido el material de construcción más utilizado en el mundo durante el último siglo, teniendo dos ventajas importantes sobre su principal competidor que es el acero: un menor costo inicial y un menor requerimiento de desarrollo industrial para su producción (Metha, 1998).

A últimas décadas se observa que el problema más importante en las construcciones de concreto es la falta de durabilidad de las estructuras en ambientes agresivos, principalmente los que contienen cloruros, sulfatos y humedad, que penetran a través de la red de poros del concreto (Metha, 1998; Castro, 2005). Los problemas de durabilidad se deben en gran medida a una selección inadecuada de materiales y a prácticas de construcción deficientes que dan como resultado un material muy poroso y permeable, lo cual facilita la penetración de estos agentes agresivos y causan su deterioro (Neville, 2001). De los problemas de durabilidad, el de corrosión del acero de refuerzo es quizá, el más importante. Al principio de la década de los 80's se realizó en España un estudio al respecto (San Juan y Castro, 2001). Los resultados son interesantes y se estimó que los problemas de durabilidad se debieron en un 16.5% a las deficiencias en la selección de los materiales, un 38% a errores de ejecución, y más del 40% a errores de diseño y/o cálculo.

Estos problemas de durabilidad en estructuras de concreto redundan en un impacto económico significativo. Por citar algunos ejemplos, en Estados Unidos se gastó durante seis años 20 millones de dólares hasta 1997, para hacer parte de reparaciones, quedando un elevado número de puentes por reparar (Borges, 2001). El Reino Unido, otro país industrializado, destina 40% de su inversión en construcción a la reparación y al mantenimiento de sus estructuras (Hernández, 2006). En México se desconoce la cantidad de estructuras de concreto que se encuentran dañadas o en proceso de corrosión del acero de refuerzo.

Sin embargo los problemas de durabilidad no solo tienen su impacto en el ámbito económico, tiene también un impacto muy importante en la ecología, si se toma en cuenta que para reparar o sustituir una estructura se necesita el uso de nuevos materiales, esto es de suma importancia debido a que por cada tonelada de cemento que se produce se emite a la atmósfera aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono (CO_2), por otra parte la producción mundial de concreto al año es de 1600 millones de toneladas, que contabiliza aproximadamente el 7% de la carga global del dióxido de carbono en la atmósfera (Bremner, 2001; Hernández, 2006). En México la producción de cemento para el año 2004 fue de 33.2 millones de toneladas y para el año 2006 ascendió a 38 millones de toneladas (Cámara Nacional del Cemento CANACEM). Otro dato importante, se estima que globalmente al año se consume 10^{10} toneladas de arena, grava y roca triturada. El concreto también requiere grandes cantidades de agua, se estima que asciende anualmente a 10^9 metros cúbicos (Bremner, 2001)

Considerando que la selección adecuada de materiales es uno de los factores que puede mejorar el desempeño del concreto desde el punto de vista de durabilidad, una posibilidad es la utilización de adiciones minerales tales como la ceniza volante, humo de sílice, ceniza de cáscara de arroz, escoria de alto horno y puzolanas naturales (Adnan, 2003; Love et al, 2007, Wang et al, 2003; Nehdí et al, 2003; Paya et al, 2002; Escalante et al, 2005; Amahjour et al, 2002), las cuales contribuyen a mejorar las características del concreto en estado fresco y endurecido, disminuyendo la permeabilidad del concreto e incrementado sus propiedades mecánicas. Debe mencionarse que el uso de estas adiciones puede requerir del empleo de reductores de agua de alto rango (ACI, 2001), especialmente cuando se elabora concreto con baja relación agua/cemento. En otros casos podrá requerirse del empleo de aditivos modificadores de viscosidad, especialmente para concreto auto-consolidable (Lachemi et al, 2004, Saric-Coric et al., 2003).

Desafortunadamente, en México el costo de las adiciones minerales, especialmente la ceniza volante y el humo de sílice, así como de los aditivos químicos es alto, lo cual reduce la posibilidad de emplearlos de manera cotidiana en la fabricación de concreto para estructuras comunes. Es por esto que es necesario explorar el uso de materiales alternativos económicos, de alta disponibilidad en nuestro medio y amigables con el ambiente.

I.3. Justificación

Actualmente existen en el mercado diferentes aditivos químicos que permiten mejorar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido (Rixom y Mailvaganam, 1999). Recientemente, el desarrollo de concreto autoconsolidable ha requerido del uso de aditivos modificadores de viscosidad para producir mezclas altamente fluidas y sin segregación (Saric-Coric et al, 2003). Sin embargo, en México estos aditivos son de importación y su alto costo los hace poco competitivos en nuestro medio. Una alternativa es el uso de polímeros naturales, los cuales pueden contribuir a mejorar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido probablemente con un mínimo incremento o disminución en el costo. Como es el caso del mucílago de nopal que mejora algunas propiedades del concreto, como por ejemplo, su resistencia a la segregación en estado fresco (Cano et al., 2006).

En México existen más de 2500 especies de nopal, disponible en muchas regiones áridas y semiáridas de nuestro país. Se producen 572,624 toneladas de nopal, las cuales se cultivan en 10,400 ha. con un rendimiento promedio de 55.06 ton/ha. Además su uso en la industria de la construcción puede tener un impacto social ya que de esta manera se le proporciona un valor agregado a la producción de esta planta y mejorar su rentabilidad (FPC, 2003).

En el estado de Oaxaca se tiene una amplia disponibilidad de esta planta y por lo tanto es factible su uso de manera económica. Es por lo anterior que se justifica esta investigación al estudiar los efectos que el extracto de nopal tiene sobre las propiedades del concreto en estado endurecido y poder garantizar una adecuada resistencia mecánica y una mayor durabilidad del concreto, que de obtenerse los resultados esperados posteriormente pensar en industrializar esta aplicación en el campo de la construcción.

I.4. Antecedentes

En lo que respecta al uso del mucílago de nopal en materiales basados en cemento, se encontró en la literatura lo siguiente:

1.4.1 Uso del extracto de nopal en mortero y concreto.

Chandra *et al.* (1998) investigaron el efecto que tiene el uso del mucílago de nopal en las propiedades de mortero y concreto ordinario. La relación agua/cemento fue de 0.50 para todas las mezclas, utilizaron una solución de mucílago de nopal para reemplazar el 0%, 50% y 100% el agua de mezclado. Los especímenes se hicieron por series de 3, fueron curados por 5 días en húmedo y posteriormente se colocaron por 22 días en un cuarto con clima controlado a 20°C y 55% de humedad relativa. Los resultados indicaron que la trabajabilidad del mortero mezclado con 50% de solución de mucílago fue mejor que la mezcla de referencia, pero se observó un mayor efecto benéfico en la mezcla que se le adicionó solución de mucílago de nopal al 100%, esto debido al efecto que proporcionan los polisacáridos del nopal que reducen la fricción. Además demostraron que el mucílago de nopal interacciona con los productos de la hidratación del cemento y reduce el tamaño y cantidad de los cristales de hidróxido de calcio. El mucílago de nopal posee propiedades retardantes, lo cual retrasó el desarrollo de la resistencia a edad temprana, ya que la resistencia a la compresión a los 28 días fue mayor en los especímenes de referencia, después la resistencia mejoró y a los 90 días los especímenes a los que se les adicionó solución de nopal al 100% sobrepasaron notablemente la resistencia alcanzada por los especímenes de referencia. En cuanto a la absorción de agua, ésta disminuyó en los especímenes que tenían 50% de solución de mucílago, pero se redujo aun más en los especímenes que tenían 100% de solución de extracto de nopal. Esto se debe en parte a la capa que forma el extracto de nopal y en parte debido a los complejos de calcio formados durante la interacción del extracto con los iones divalentes de calcio, de la misma forma que pasa en los polímeros sintéticos, se sellan los poros y de ésta manera hace una estructura más compacta.

1.4.2. Uso del mucílago de nopal en morteros de cal para la protección de edificios históricos.

Cárdenas et al. (1998) realizaron un estudio para explicar los beneficios obtenidos con uso del mucílago de nopal en morteros de cal y que han sido utilizados durante siglos para restaurar y proteger construcciones debido a su desempeño contra la penetración de agua y agrietamiento. Estos investigadores prepararon pastas de cal mezcladas con diferentes concentraciones de mucílago de nopal en proporciones de 0.65%, 1% y 1.95% de mucílago por $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o cal apagada comercial. Las pastas secas obtenidas fueron evaluadas en su resistencia a la compresión. Los resultados mostraron que al mezclar hidróxido de calcio con mucílago de nopal, se produce una mezcla que tiene una resistencia a la compresión inferior comparada con una mezcla control, debido a que la estructura homogénea de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sin el extracto se ve afectada por la inclusión de las cadenas del polímero y por lo tanto se reduce la resistencia. Es interesante observar que a medida que la cantidad de mucílago se incrementó, las propiedades mecánicas también se incrementaron debido a la formación de una red homogénea de mucílago nopal.

1.4.3. Uso del mucílago como agente modificador de viscosidad.

Cano et al. (2005), realizaron un estudio para utilizar el mucílago de nopal como agente modificador de viscosidad y aplicarlo en la elaboración de concreto autoconsolidable. Los resultados obtenidos mostraron que el mucílago es efectivo para incrementar la viscosidad de la pasta de cemento, con lo que se incrementa la resistencia a la segregación del concreto. Se encontró también que el extracto de nopal actúa como un retardante de fraguado y que además en concretos con alta relación agua/cemento contribuye a reducir la pérdida de humedad debido a que el polímero absorbe agua, lo que puede contribuir a incrementar el grado de hidratación de la pasta y por consiguiente incrementar la resistencia a la compresión y reducir la porosidad y permeabilidad. En los experimentos realizados se observó un incremento significativo en la resistencia a la compresión (13%), así como también una reducción de porosidad y permeabilidad.

1.4.4. Uso del extracto nopal como inhibidor de corrosión del acero de refuerzo.

Acosta et al (2005), evaluaron el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo en el concreto fabricado con adiciones naturales como el nopal deshidratado. Elaboraron especímenes de concreto con el 1% y 2% de nopal deshidratado como reemplazo del cemento. Electroquímicamente los resultados indicaron que la mezcla de concreto preparada con solución de nopal, aumentó la resistencia del concreto y la resistencia del acero contra la corrosión actuando como inhibidor. Sus resultados preliminares de estos investigadores sugieren que la adición de nopal en tales concentraciones puede ser adecuada para mejorar las características de durabilidad en estructuras de concreto.

1.4.5. Propiedades en estado fresco y microestructura de pastas de cemento y resistencia de concreto conteniendo mucílago de nopal

Ramírez (2008), evaluó el efecto del mucílago de nopal en la microestructura de pastas de cemento, así como la resistencia a la compresión en concreto. Elaboró especímenes de pastas con relación agua/cemento y mucílago/cemento 0.30, 0.45, y 0.60. Determinó los tiempos de fraguado y extensibilidad. Los especímenes fueron caracterizados por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX). Las mezclas de concreto fueron con relaciones agua/cemento y mucílago/cemento de 0.30, 0.45 y 0.60. En los concretos determinaron la resistencia a la compresión. Los resultados de difracción de rayos X permitieron identificar las fases mineralógicas producidas por la hidratación del cemento, donde se observa la influencia del mucílago de nopal en la hidratación, indicando que el mucílago actúa como retardante de la hidratación. Con relación a la resistencia a compresión axial, observaron que los concretos 0.45 y 0.60 con mucílago, desarrollan una menor resistencia que los concretos conteniendo solo agua, lo cual puede ser explicados en parte por el mayor contenido de aire en las mezclas conteniendo mucílago. Por el contrario, en el concreto con relación m/c de 0.30 el mucílago contribuye a incrementar la resistencia mecánica en un 5%. Los resultados de tiempos de fraguado indican que el mucílago los incrementa hasta en un 100% con respecto

las pastas que contienen solo agua. La extensibilidad de las pastas muestra que el mucílago actúa también como un agente viscoso.

I.4.6. Interacción de los polímeros y adiciones orgánicas en el proceso de hidratación del cemento

Chandra et al (1987) menciona que existen dos teorías para el mecanismo de interacción entre los polímeros y los componentes del cemento. En la primera teoría no hay interacción entre el polímero y el concreto, durante la hidratación la parte hidrofílica del polímero se orienta hacia la fase del agua mientras que la parte hidrofóbica se dirige hacia los poros capilares no saturados de agua, posteriormente en el secado se elimina el agua y las partículas hidrofóbicas se unen para formar una película. La otra teoría es que el polímero interactúa con los productos de hidratación del cemento portland y forma complejos, esto crea un tipo de refuerzo en el concreto y produce membranas semipermeables. Estos investigadores adicionaron varios polímeros como acetato de polivinilo, poliestireno y otros copolímeros. En sus resultados reportan que los polímeros y las adiciones orgánicas interactúan recíprocamente con los componentes del cemento Portland cuando están en contacto con el agua. Esta interacción se debe a la unión iónica, provocando enlaces cruzados que inhiben la formación de la película polimérica e influyen considerablemente el proceso de cristalización durante el endurecimiento del concreto.

Algunas sustancias orgánicas de bajo peso molecular también tienen una influencia considerable en el cemento Portland durante su reacción con el agua. El comportamiento de los componentes del cemento Portland en su estado puro es diferente al mezclarse con el agua, que cuando se presentan juntos. Por lo tanto, las interacciones de polímeros así como otros compuestos orgánicos de bajo peso molecular, se comportarán diferente al mezclarse con los compuestos del cemento Portland, que si se mezclaran con los componentes del cemento Portland en su estado puro. Por lo tanto, los mecanismos de la interacción no están claros, en esta situación es muy difícil explicar el mecanismo de la interacción entre los polímeros y los componentes del cemento Portland en el proceso de

hidratación.

I.4.7. Influencia de proteínas en algunas propiedades del mortero de cemento de Portland

Chandra et al (1987), estudiaron la influencia de algunas proteínas en el contenido de aire, adherencia, resistencia a la compresión y absorción de agua en morteros elaborados con cemento Portland, las proteínas usadas fueron el gluten de harina la cual es el responsable de darle la elasticidad a la masa de harina, la caseína de la leche, y la proteína Purina 500 E extraída del aceite en Suecia. Elaboraron especímenes de cemento–arena (1:3) y adicionaron proteínas en diferentes proporciones, variando la relación a/c. Tuvieron dos condiciones de curado, la primera al vapor a 70°C por 20 horas, y la segunda fue curado normal con 5 días sumergido en agua y 21 días a una temperatura controlada de 20°C y humedad relativa de 55%. En sus resultados observaron que el contenido de aire en los morteros con adiciones alcanzaban hasta un 8%, mencionando que las proteínas trabajan de la misma manera que otros agentes inclusores de aire, son acumuladas por los residuos del aminoácido, arregladas en cadenas largas y ensambladas. En la naturaleza la secuencia de los residuos del aminoácido a lo largo de la cadena es única. Estas cadenas pueden ser acumuladas por segmentos, cada uno de los cuales puede tener carácter polar y no polar dependiendo de qué aminoácido predomine. Los segmentos polares forman una cadena hidrofílica, mientras que los no polares forman una cadena hidrofóbica. Así una sola molécula de la proteína puede tener varios segmentos hidrofóbicos e hidrofílicos a lo largo de la cadena. El enlace iónico prevalece en la región hidrofílica, mientras que los enlaces no polares son predominantes en las regiones hidrofóbicas. Esto activa la superficie de las proteínas. Esta actividad superficial puede ser la causa principal del contenido de aire alto.

En lo que respecta a los resultados de adherencia, los morteros con adiciones de proteínas tuvieron una excelente adherencia entre la pasta de cemento y los agregados. En los resultados de resistencia a la compresión los especímenes que tuvieron un curado normal mostraron una reducción pequeña comparada con la muestra control. Para los especímenes que fueron curados a temperatura alta la resistencia a la compresión se vió

disminuida notablemente, lo cual indica que las proteínas tienen un comportamiento diferente en temperaturas altas. Así, la estructura del poro es también afectada a temperaturas altas y esto tiene una influencia en la disminución de la resistencia mecánica. En los resultados de absorción de agua, los especímenes de mortero con adiciones de proteínas absorbieron menos agua en comparación a los especímenes sin adición, incluso cuando tuvieron un mayor contenido de aire. Esto implica que las proteínas introducen una característica hidrofóbica en los especímenes del mortero. Este carácter hidrofóbico de los especímenes del cemento se atribuye a la presencia de proteínas. En la forma nativa la mayoría de las proteínas solubles tienen una estructura de una cadena en espiral larga unida por enlaces secundarios, las cadenas individuales abarcan cientos de unidades de aminoácidos ligados a la amida.

Hay por lo menos tres tipos de cambios que las moléculas de la proteína experimentan cuando se mezclan con el mortero del cemento:

- 1.- Separación y el desenrollamiento de las cadenas, por un tipo de alteración de las moléculas conocidas como desnaturalización y orientación.
- 2.-Hidrólisis de la cadena, partiéndose en partes de un peso molecular más bajo.
- 3.-Formación de sales con los álcalis y complejos a través del ligamiento con iones de metal.

La interacción de la parte hidrofílica de las proteínas con el Ca(OH)_2 producido durante la hidratación del cemento forma complejos de calcio (Ca). Este fenómeno es igual en el caso de los polímeros y el Ca(OH)_2 . En esta investigación, observaron que los morteros con adiciones de proteínas aumenta el tiempo de fraguado. Esto puede ser debido a los complejos formados con los iones de Ca. El desenrollamiento de las cadenas produce una superficie más hidrofóbica, estas partes se unen y producen más complejos de Ca cuando están en contacto con Ca(OH)_2 , así la propiedad hidrofóbica con la adición de la proteína en la pasta de cemento aumenta el tiempo de fraguado.

1.4. 8. Uso de la pulpa de nopal para estabilizar suelo en Bahareque.

Mattone (2005) realizó una investigación relacionada con el uso de la pulpa del nopal como alternativa al uso de cemento para estabilizar suelo reforzado con fibra de sisal para aplicaciones en Bahareque. Realizó pruebas de flexión, resistencia a la abrasión, absorción de agua y erosión. El desempeño del suelo reforzado con fibra de sisal y estabilizado con cemento fue mejor que el estabilizado con pulpa de nopal. Sin embargo, el uso de la pulpa de nopal como un agente estabilizador para mejorar el comportamiento del suelo es interesante debido a que es un material natural y ecológico.

1.4.9. Otros usos del extracto de nopal.

Recientemente un estudio hecho en Cuba (López, 2000) comparó la capacidad de purificación del extracto de nopal con otros agentes tradicionales como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$. Sus resultados indican que el cactus tiene un comportamiento similar al sulfato de aluminio en la purificación del agua. El mucílago redujo la demanda química del oxígeno (DQO). También eliminó metales tales como Fe, Al y Mn, así como coliformes fecales y después del tratamiento el agua no tuvo ningún olor desagradable (Saenz 2004)..

Por otra parte en Perú, (Ramsey, 1999), estudió el uso del mucílago de nopal para lograr un aumento en la adherencia del mortero. Cabe mencionar que estos resultados no fueron los previstos. Esto, según Goycoolea *et al.* (2000) no prueba la hipótesis que el mucílago aumenta la adherencia del mortero.

Gardiner *et al.* (1999) inició la primera investigación sobre un extracto del nopal usado para mejorar la infiltración del agua en el suelo. Concluyó que el uso del extracto aumenta la infiltración del agua en el suelo, pero todavía sigue habiendo preguntas al respecto.

I.5. Objetivo General

Utilizar el extracto de nopal como un aditivo natural en la elaboración de concreto, con el fin de evaluar su potencial para reducir la pérdida de humedad por secado, la absorción capilar de agua y la difusión de iones cloruro en especímenes de concreto.

I.6. Objetivos específicos

- Diseñar y elaborar mezclas de concreto de relaciones agua/cemento 0.30, 0.45 y 0.60, para después sustituir el agua de mezclado por una solución de mucílago de nopal y obtener mezclas con relaciones mucílago/cemento 0.30, 0.45 y 0.60 y hacer un análisis comparativo entre ambas mezclas.
- Evaluar el proceso de secado de especímenes de concreto relaciones agua/cemento y mucílago/cemento 0.30, 0.45 y 0.60 en condiciones de ambiente natural a través de absorción capilar y evaluar el efecto que tiene el mucílago de nopal comparado con las mezclas que solo contienen agua.
- Determinar la capacidad para absorber agua en especímenes de concreto relaciones agua/cemento y mucílago/cemento 0.30, 0.45 y 0.60 a través de absorción capilar y evaluar el efecto que tiene el mucílago de nopal comparado con las mezclas que solo contienen agua.
- Estimar el coeficiente de difusión de cloruros y el cambio en el coeficiente de difusión en función del tiempo, en especímenes de concreto relaciones agua/cemento y mucílago/cemento 0.30, 0.45 y 0.60, con el objeto de determinar el impacto del uso del extracto de nopal en el periodo de iniciación de la corrosión del acero de refuerzo en una estructura hipotética.

I.7. Hipótesis

- El uso del extracto de nopal en el concreto disminuye la pérdida de humedad por secado y la absorción capilar de agua, con respecto a la que contiene solo agua (mezcla de referencia).
- El uso del extracto de nopal en el concreto disminuye la difusión de cloruros e incrementa el periodo de iniciación de la corrosión en el acero de refuerzo, con respecto a la mezcla de referencia.

CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

II.1. Generalidades sobre el concreto

II.1.1. Concreto

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta compuesta de cemento Portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada), para formar una masa compacta pues la pasta endurece debida a la reacción química entre el cemento y el agua. A la mezcla de estos materiales se le puede añadir otros productos para mejorar características determinadas.

Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto, por su parte los agregados constituyen del 60 al 75% por lo cual su selección debe hacerse con especial cuidado. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas (Metha, 1998; Neville, 1999)

II.1.2. Componentes del cemento portland

El cemento Portland está formado básicamente por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción a una temperatura aproximada de 1450 °C de una mezcla de caliza y arcilla, que recibe el nombre de clinker y de un material empleado como regulador de fraguado que, generalmente es yeso hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Taylor, 2001; Lea's, 2004).

El cemento Portland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de varios compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90 por ciento o más del peso del cemento Portland y son: el silicato tricálcico (C_3S), el silicato dicálcico (C_2S), el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferroaluminato tetracálcico (C_4AIF).

Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los diversos tipos de cemento Portland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

Silicato tricálcico o alita (C₃S). Este componente se puede considerar como el principal o decisivo del clinker, confiriendo altas resistencias iniciales al concreto.

Silicato dicálcico o belita (C₂S). Este componente que es metastable, da poca resistencia en los primeros días, pero luego va desarrollando progresivamente hasta alcanzar el silicato tricálcico.

Los dos silicatos de calcio, constituyen cerca del 75 % del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, - fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional (Taylor, 2001). Ambos silicatos requieren aproximadamente la misma cantidad de agua para su hidratación, pero el C₃S produce más del doble de Ca(OH)₂ que el que se forma mediante la hidratación del C₂S.

Haciendo la suposición aproximada de que el C₃S₂H₃ es el producto final de la hidratación de C₃S, así como del C₂S, las reacciones de hidratación pueden escribirse (como guía no como ecuaciones exactas estequiométricas) en la forma siguiente:

Para C₃S



Para C₂S



Aluminato tricálcico (C₃A) o felita: No se recomienda la presencia de C₃A en el cemento, pues casi no contribuye a reforzarlo, excepto a edades muy tempranas, su hidratación es rapidísima al tomar contacto con el agua. Para retrasar su actividad se utiliza yeso que actúa como regulador de fraguado. Hay que tener presente que los clinkers que poseen un contenido alto de aluminato tricálcico dan lugar a pastas, morteros y concretos muy sensibles al ataque por sulfatos. El C₃A actúa como fundente y, de este modo, reduce la temperatura de cocción del clinker y facilita la combinación de cal y sílice; por esta razón, el C₃A es útil en la fabricación del cemento.

Un efecto positivo del C₃A es su capacidad para ligar cloruros, reduciendo el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo. La forma principal de ligado de iones de cloruro es por la reacción con C₃A para formar cloraluminato de calcio (3CaO.Al₂O₃.CaCl₂.10H₂O), llamado también sal de Friedel. Una reacción similar sucede con el C₄AF que da como resultado cloroferrita de calcio (3CaO.FeO₃.CaCl₂.10H₂O).

Ferroaluminato tetracálcico (C₄AF). El C₄AF también actúa como fundente. Sin este compuesto las reacciones en el horno avanzarían en forma mucho más lenta y, probablemente, serían incompletas. Se hidrata con cierta rapidez pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de efectos del color gris se debe a este compuesto.

El yeso no sólo reacciona con el C₃A, pues con el C₄AF forma sulfoferrita cálcica, al igual que sulfoaluminato cálcico, y su presencia puede acelerar la hidratación de los silicatos. La cantidad de yeso añadida al clinker de cemento debe vigilarse cuidadosamente; en particular, un exceso de yeso lleva a una expansión y al rompimiento consecuente de la pasta fraguada de cemento. El contenido óptimo de yeso se determina mediante observaciones de la generación de calor de hidratación.

El cemento Portland consta de varios compuestos como ya se mencionó, sin embargo, cuando se realiza un análisis químico del cemento los resultados se presentan en términos de óxidos de los elementos presentes. Esto es porque la determinación directa

de la composición de los compuestos requiere equipo y técnicas especiales. Se acostumbra expresar los óxidos individuales y los compuestos de del cemento utilizando las siguientes abreviaturas (Metha, 1998).

Tabla 1. Óxidos y compuestos del cemento Portland

Óxido	Abreviatura	Compuesto	Abreviatura
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
SO_3	S	$3\text{CaO} \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2

II.1.3 Hidratación del cemento portland

La propiedad de liga de la pasta de cemento Portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación, la cual comienza tan pronto el cemento entra en contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma un aumento sobre su superficie mismo que gradualmente se extiende hasta enlazarse con otras partículas de cemento o hasta que se adhiere a las sustancias adyacentes. Esta reconstitución tiene como resultado la progresiva rigidización, endurecimiento y desarrollo de la resistencia. La hidratación prosigue mientras se disponga de espacio para los productos de la hidratación y se tengan condiciones favorables de humedad (curado) y temperatura. A medida que la hidratación continua, el concreto se vuelve más duro y más resistente. La mayor parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia tienen lugar durante el primer mes del ciclo de vida del concreto, pero continua aunque más lentamente, durante un largo periodo.

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el silicato hidratado de calcio. Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo que, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable.

Puesto que la hidratación del cemento es una reacción exotérmica, la rapidez de evolución del calor es una indicación de la rapidez de hidratación. Esto demuestra que hay tres picos en la rapidez de hidratación en los primeros tres días, desde la primera vez a que el cemento se pone en contacto con el agua. La figura 1 muestra una gráfica de la rapidez de evolución del calor contra el tiempo. Podemos ver el primer pico, el cual es muy alto, y que corresponde a la hidratación inicial en la superficie de las partículas de cemento, que comprende generalmente el C_3A . La duración de este alto régimen de hidratación es muy corta, y allí sigue un periodo llamado latente, algunas veces llamado también periodo de inducción, durante el cual la rapidez es muy baja. Este periodo comprende una o dos horas, durante las cuales la pasta de cemento es trabajable (Neville, 1999; Lea's, 2004).

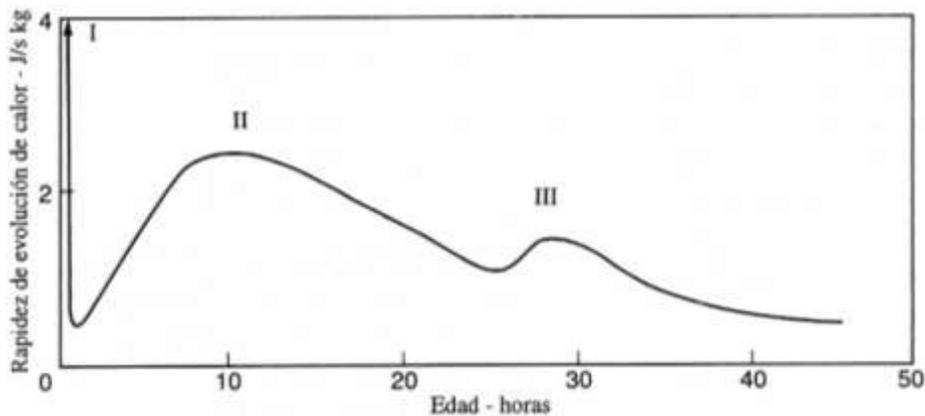


Figura 1. Rango de evolución del calor del cemento Pórtland con una relación agua/cemento 0.40 (Neville, 1999)

En seguida, la capa superficial se destruye, posiblemente por un mecanismo osmótico o por el crecimiento de los cristales de hidróxido de calcio. La rapidez de hidratación aumenta muy lentamente, y los productos de hidratación de los granos individuales se ponen en contacto unos con otros; entonces ocurre el fraguado. La rapidez de evolución del calor alcanza un segundo pico, comúnmente a las 10 horas, pero algunas veces tan temprano como a las 4 horas.

Después de este pico, la rapidez de hidratación disminuye por un periodo largo, la difusión a través de los poros de los productos de hidratación llega a ser el factor que controla dicha rapidez. Con la mayor parte de los cementos, pero no con todos, hay un aumento renovado en la rapidez de hidratación hasta un tercer pico, inferior, entre las 18 y 30 horas. Este pico se relaciona con una reacción renovada de C_3A , que sigue al consumo total de yeso. La llegada del segundo pico se acelera por la presencia de los álcalis, por una alta finura de las partículas de cemento y por un aumento de temperatura. Debido a la similitud en el proceso de hidratación de silicatos de calcio puros y de cementos Portland comerciales, ellos muestran desarrollo similar de resistencia. Se alcanza una resistencia considerable mucho antes de que hayan terminado las reacciones de hidratación y pareciera que una pequeña cantidad de hidrato se adhiere junto con el resto sin hidratar; la hidratación adicional da por resultado un pequeño aumento de resistencia.

II.2. Durabilidad del concreto

La durabilidad del concreto es definida como la capacidad que tiene el concreto para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga a su medio ambiente (Mehta, 1998).

Ningún material es intrínsecamente durable, como resultado de interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales cambian con el tiempo. Se supone que un material alcanza el final de su vida de servicio, cuando sus propiedades bajo ciertas condiciones de uso se han deteriorado a tal punto que continuar utilizando tal material se considera inseguro o antieconómico.

II.2.1. Importancia de la durabilidad

Se acepta generalmente ahora que al diseñar estructuras, las características de durabilidad de los materiales considerados deberán evaluarse tan cuidadosamente como otros aspectos tales como las propiedades mecánicas y el costo inicial. Primeramente hay una apreciación mejor de las implicaciones socioeconómicas de durabilidad. Cada vez más, los costos de reparación y de sustitución de las estructuras que se requieren por fallas del material, se han convertido en una parte importante del costo del ciclo de vida de una construcción. La escalada de los costos de sustitución de las estructuras y el creciente énfasis en el costo de ciclo de vida y no del costo inicial, están obligando a los ingenieros a estar consientes de la durabilidad.

Cada año, los gobiernos de muchos países gastan miles de millones de dólares para reparar o demoler estructuras cuya causa de deterioro es mayoritariamente la corrosión del acero de refuerzo (Jacott, 2004). En México, el estudio de la durabilidad en las estructuras, cobra importancia si se toma en cuenta que el país cuenta con 10 000 km de litorales y que la actividad económica de gran parte de su población se centra en sus costas.

Por otra parte se entiende que existe una íntima relación entre la durabilidad de los materiales y la ecología. La conservación de los recursos naturales haciendo durar más los materiales es, después de todo, una acción ecológica (Metha, 1998). El mundo necesita un ambiente amigable con el uso de materiales de construcción, debido a que se desea disminuir las emisiones de CO₂, ahorrar la energía de los recursos no renovables, y al mismo tiempo reducir al mínimo la basura producida en el uso de estos materiales (Bremner, 2001)

Los tiempos actuales conllevan a la economía de los recursos a maximizar su beneficio y optimizar su desempeño. La perspectiva y visión de la construcción actual es distinta a la de hace algunos años, por ejemplo, la sequía en algunos países han mostrado que el agua no es inagotable, la carencia de agregado de buena calidad ha obligado a trasladar distancias más largas, que requieren más tiempo y elevan los costos.

Muy ligado a lo anterior, se encuentra el impacto que el concreto tiene hacia el ambiente, y por lo cual se hace necesario que las estructuras de concreto sean más durables. Se tienen cifras que por cada tonelada de cemento producido, se emite a la atmosfera una tonelada de CO₂, de la cual 0.5 tonelada viene de la descomposición de la caliza y la otra mitad es generada por la central eléctrica que suministra la electricidad para girar el horno y los molinos de bola para moler el cemento, más el combustible quemado para encender el horno (Bremner, 2001).

En términos de mezclas de concreto convencionales, aproximadamente 480 kg de CO₂ son emitidos por m³ de concreto ó 20 kilogramos de CO₂ por 100 kilogramos de concreto producido. Todo esto asciende a aproximadamente el 7 % del total CO₂ generado por todo el mundo.

II.2.2. Causas de la durabilidad inadecuada

Estadísticamente resulta difícil determinar las causas de durabilidad en estructuras de concreto. Como se mencionó, a principios de la década de los 80's, se realizó en España un estudio al respecto, los resultados indicaron que en un 16% las fallas se debían a una inadecuada selección de los materiales. Otros estudios más recientes elevan al 30% la falta de durabilidad por las mismas razones (Sanjuán y Castro, 2001),

Dichos datos indican que para lograr un concreto durable se deben considerar todos los aspectos de calidad de los materiales, así como el conocimiento de las condiciones de servicio para un diseño correcto y un proceso constructivo adecuado.

Con base a lo anterior Metha propone un modelo holístico para la durabilidad en estructuras de concreto reforzadas. Este modelo señala que para que una estructura de concreto alcance una durabilidad adecuada se deberán cumplir cuatro condiciones: una adecuada selección de los materiales, un buen proporcionamiento de las mezclas, adecuada elaboración, consolidación y curado, y por ultimo un diseño estructural óptimo (Metha, 1998).

Cabe resaltar que una durabilidad inadecuada no sólo es el resultado de las condiciones anteriores, existen agentes que causan el deterioro de las estructuras de concreto y pueden ser el producto ya sea de factores externos o internos. Las acciones pueden ser físicas, químicas o mecánicas. Las causas físicas del deterioro incluyen los efectos de la alta temperatura o de las diferencias de expansión térmica del agregado y de la pasta de cemento endurecida. Una causa importante de daño es la congelación y deshielo alternadas y la acción asociada de sales para descongelar (Sanjuán y Castro, 2001). Las causas químicas del deterioro incluyen las reacciones álcali – sílice y álcali – carbonato. El daño mecánico es causado por impacto, abrasión, erosión o cavitación. El ataque externo ocurre principalmente a través de la acción de iones agresivos tales como cloruros, sulfatos, o de dióxido de carbono, además de muchos líquidos y gases naturales o industriales.

La importancia de los agentes agresivos está en función del entorno en que se encuentran, velocidad de penetración, medio de transporte, y las condiciones en las que se realice la exposición.

Se deberá observar que los procesos físicos y químicos del deterioro actúan de una manera sinérgica. En esta etapa, el deterioro del concreto raramente es producto de una causa aislada: el concreto puede ser con frecuencia satisfactorio a pesar de algunas características inconvenientes pero, con un elemento adicional adverso, puede ocurrir el daño. Por esta razón, a veces es difícil asignar el deterioro a algún elemento particular, pero la calidad del concreto, en el sentido amplio de la palabra, aunque con una referencia especial a la permeabilidad, casi siempre entra en el cuadro. Realmente, con la excepción del daño mecánico, todas las influencias adversas sobre la durabilidad comprenden el transporte de fluidos a través del concreto. Por esta razón, la consideración de la durabilidad requiere una comprensión de los fenómenos involucrados (Metha, 1998; Neville, 1999).

En la figura 2, se muestran los factores que influyen en la durabilidad de estructuras de concreto armado.

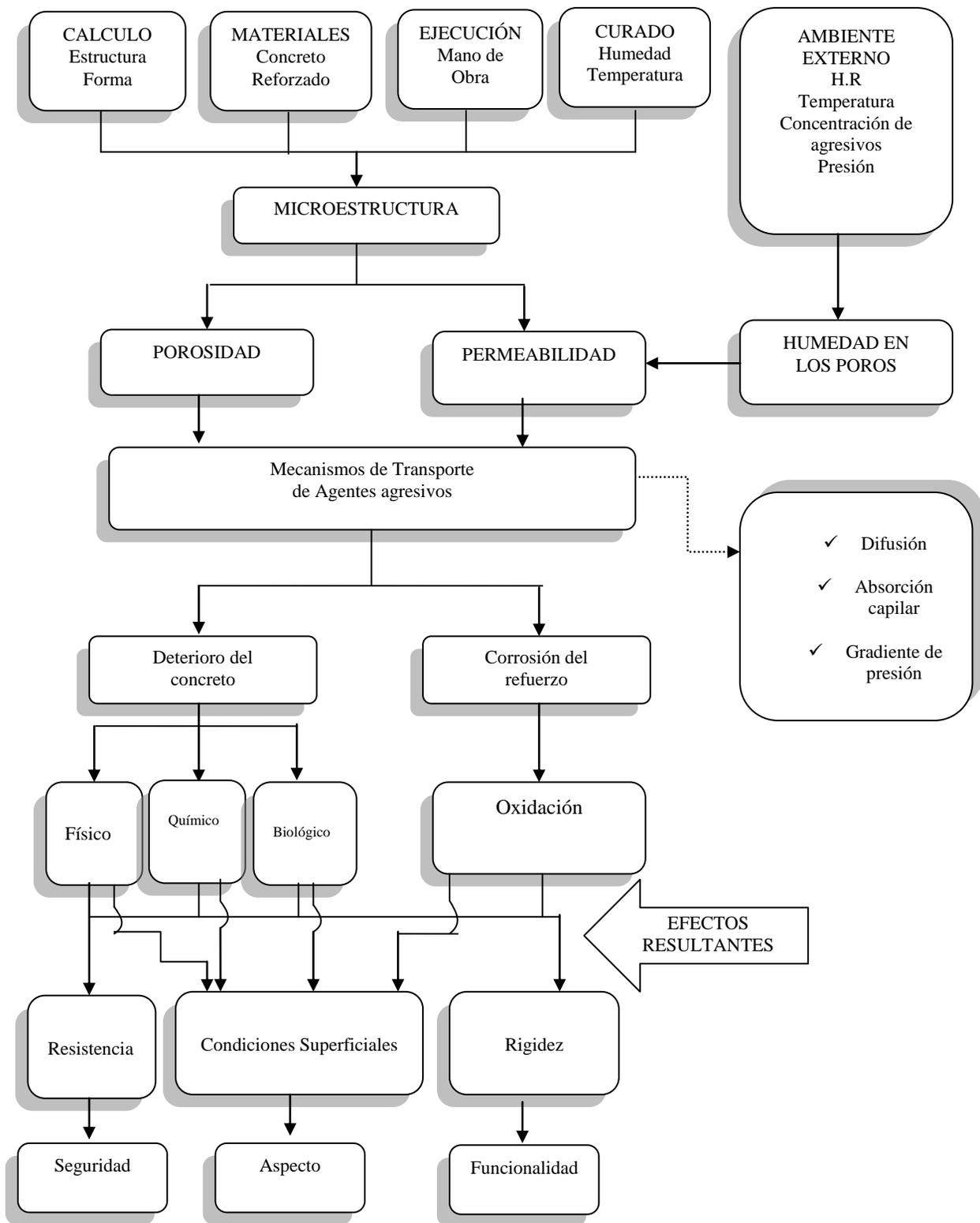


Figura 2. Factores que influyen en la durabilidad del concreto armado (Borges et al, 2001)

II.2.3. Transporte de agentes agresivos en el concreto

Hay tres fluidos principalmente importantes que pueden penetrar en el concreto: agua, pura o con iones agresivos, dióxido de carbono y oxígeno. Ellos se pueden mover a través del concreto de diferentes maneras, pero todo el transporte depende de la pasta de cemento hidratado. La durabilidad del concreto depende de manera importante de la facilidad con la cual los fluidos, tanto líquidos como gases, pueden entrar en el concreto y moverse a través de él; a esto se le llama comúnmente permeabilidad del concreto. Hablando estrictamente, la permeabilidad se refiere al flujo a través de un medio poroso.

Ahora, el movimiento de los fluidos a través del concreto sucede no solamente por el flujo a través del sistema poroso, sino también por difusión y por absorción capilar, así que el interés está realmente en la penetrabilidad del concreto; el término "permeabilidad", aceptado comúnmente se utilizará para el movimiento total de fluidos hacia adentro y a través del concreto, excepto cuando, por razones de claridad, necesite hacerse distinción entre los tipos de flujo (Neville, 1999)

En lo que respecta a la influencia del sistema de poros, la distribución del tamaño de estos influye sobre el tipo y velocidad de los mecanismos de transporte. El tamaño de los poros de la pasta de cemento (figura 3), abarca varios órdenes de magnitud lo que permite clasificarlos según su origen y características en: poros de compactación, de aire incluido, capilares y de gel. La resistencia del concreto a los ataques de sustancias y gases está sujeta al tipo de poro que se tenga. El poro capilar es el que más influye en ello.

De acuerdo con Powers et al (1948) la resistencia a la compresión de pastas de concreto hidratada, puede correlacionarse con la porosidad capilar mediante la ecuación 3.

$$f_{cp} = f_{cpo} (1 - V_{cp})^n \quad \text{Ec. 3}$$

donde f_{cp} = resistencia a la compresión de la pasta (concreto),
 f_{co} = resistencia a la compresión de la pasta libre de poros capilares,
 V_{cp} = Porosidad capilar,
 n = exponente .

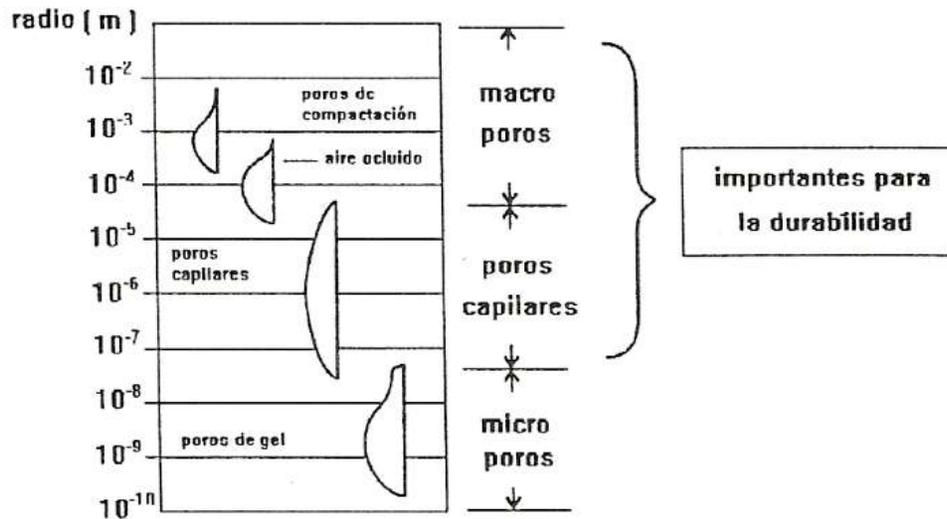


Figura 3. Clasificación de poros por su tamaño.

Entonces, por causa de la existencia de poros de diferentes clases, de los cuales algunos contribuyen a la permeabilidad y otros no, es importante distinguir entre porosidad y permeabilidad. Porosidad es una medida de la proporción del volumen total del concreto ocupado por poros, y se acostumbra expresarla en porcentaje. Si la porosidad es alta y los poros están interconectados, estos contribuyen al transporte de los fluidos a través del concreto, de manera que su permeabilidad es alta. Por otro lado, si los poros son discontinuos o inefectivos de otra manera con respecto al transporte, entonces la permeabilidad es baja, aún si su porosidad es alta.

En lo que corresponde a la facilidad de movimiento de los fluidos a través del concreto, llamada libremente permeabilidad, se deberán distinguir tres mecanismos. La permeabilidad se refiere al flujo sujeto a un diferencial de presión. Difusión es el proceso en el cual el fluido se mueve sujeto a un gradiente en concentración. La absorción es el resultado de la capilaridad en los poros del concreto que están abiertos al medio ambiente. Solo puede ocurrir acción capilar en concreto seco o parcialmente saturado, no hay absorción de agua en concreto completamente saturado (Hall, et al 1989).

II.2.3.1 Difusión

Es el proceso en el cual las especies se mueven debido a un gradiente de concentración.

La difusión molecular (o transporte molecular) puede definirse como la transferencia (o desplazamiento) de moléculas individuales a través de un fluido por medio de los desplazamientos individuales y aleatorios de las moléculas. Podemos imaginar a las moléculas desplazándose en línea recta y cambiando su dirección al rebotar con otras moléculas cuando chocan. Puesto que las moléculas se desplazan en trayectoria al azar, la difusión molecular a veces se llama también *proceso con trayectoria aleatoria*.

En la figura 4, se muestra esquemáticamente el proceso de difusión molecular. Se ilustra la trayectoria desordenada que la molécula A puede seguir al difundirse del punto (1) al (2) a través de las moléculas B. La difusión neta de A se realiza de una región de alta concentración a otra de baja concentración (Geankoplis, 1999).

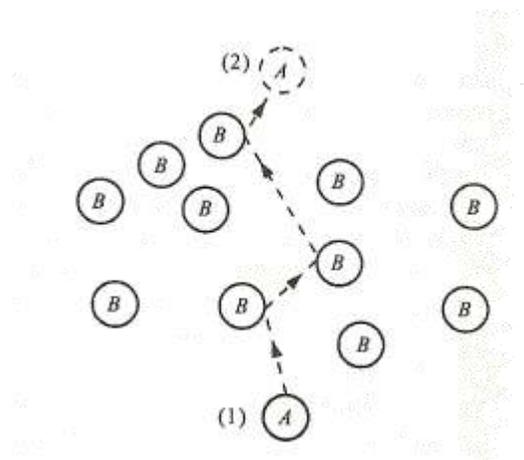


Figura 4. Diagrama esquemático del proceso de difusión molecular.

II.2.3.1.1 Difusión de cloruros en concreto

El concreto posee una característica de gran importancia para la construcción, protege natural y eficazmente las estructuras de acero contra la corrosión causada por el medio ambiente. Dicha protección se debe, en primer lugar, a que la solución contenida en

los poros de concreto tiene un pH fuertemente alcalino, y por ello, mantiene inactivo naturalmente al acero. El hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos y principalmente los óxidos de Na y K (álcalis) presentes en el cemento hacen posible que el pH de la fase acuosa contenida en los poros de concreto fabricado con cemento Pórtland fluctúe entre 12.5-13.5. En dichos valores de pH se forma espontáneamente una capa pasivante de óxidos de hierro transparente, compacta y continua, la cual preserva al acero de la corrosión por periodos indefinidos, aún en presencia de humedades elevadas en el concreto endurecido (Castro, 2001).

Además de la protección por inactividad química, el concreto proporciona al refuerzo una protección física contra los agentes externos causantes de la corrosión del acero ya que limita el acceso del agua, oxígeno, cloruros y otras sustancias que pueden tomar parte en los procesos de corrosión. Sin embargo, debido a su red de poros y fácil tendencia a la formación de grietas, el concreto no constituye una barrera perfecta.

Cuando la cantidad de iones cloruros acumulada en la interfase del concreto y el acero de refuerzo excede la concentración de iones hidroxilo en una cierta cantidad, es inminente el ataque por corrosión al acero de refuerzo, al menos que en la interfase acero-concreto no exista oxígeno. El mecanismo de transporte de los iones cloruros a través de estructuras de concreto ha sido un foco de considerable atención e investigación. Diversas investigaciones que han tratado este tema, mencionan que el transporte por difusión de los iones cloruros en el concreto, es el proceso de mayor importancia en relación a la corrosión del acero de refuerzo (Arvind et al, 2002).

Estudios previos muestran que la difusión de iones cloruros a través del concreto, es un fenómeno complejo y dependiente del tiempo, controlado por diferentes parámetros interdependientes. Algunos de los factores importantes que influyen en la difusión de los iones cloruro son la relación agua/cemento, la temperatura del ambiente alrededor de la estructura que se encuentra sujeta al ataque por cloruros, condiciones de exposición, tipo de cemento, temperatura y tiempo de curado, la presencia de materiales cementantes suplementarios tales como: cenizas volantes, escoria de alto horno y humo de sílice. El

coeficiente de difusión de cloruros disminuye con respecto al tiempo, debido a un aumento en la hidratación del cemento y al ligado de los cloruros (Nokken, 2004)

Normalmente se considera que la segunda ley de difusión de Fick (Ecuación 4) gobierna el proceso de difusión de cloruros en concreto (Thomas, 2000; Luciano et al, 1999, Nielsen et al, 2002)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

donde c = es el contenido de cloruros,
 D = es el coeficiente de difusión aparente,
 x = profundidad (medida a partir de la cara expuesta),
 t = tiempo.

Cuando la Ec. 4 está sujeta a las siguientes condiciones de frontera $C=C_0$, $x=0$ y $t \geq 0$, y a la condición inicial $C=0$ para $x > 0$, $t=0$, su solución es la ecuación 5.

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4De \cdot t}} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

$C(x,t)$ = Concentración de cloruros a una profundidad x , en un tiempo de exposición t ,
 C_s = Concentración de cloruros en la superficie expuesta,
 C_i = Concentración de cloruros inicial,
 x = Profundidad medida desde la superficie expuesta,
 D = Coeficiente de difusión aparente,
 t = tiempo de exposición,
 erf = función error.

El coeficiente de difusión de cloruros que se determina en las estructuras de concreto, es un coeficiente de difusión aparente, debido a que la segunda Ley de Fick, no toma en cuenta la variación de la concentración de la solución en la superficie, ni tampoco considera el cambio del coeficiente de difusión con respecto al tiempo, ni los efectos de la temperatura (Nokken et al, 2004)

El coeficiente de difusión de cloruros aparente, incluye el efecto de los cloruros ligados y puede incluir el ingreso de cloruros por otros medios de transporte como absorción capilar y convección, pero esto va a depender de las condiciones ambientales y de exposición a las que esté sometida la estructura de concreto. En estas condiciones la combinación de estos efectos, puede aumentar el contenido de cloruros en el concreto, y dar lugar a un coeficiente mayor. Las pruebas de difusión en estado estacionario eliminan la influencia del transporte de cloruros por las alternativas citadas, solo que los periodos de exposición del espécimen a la solución de cloruros para obtener realmente una estimación del coeficiente de difusión de cloruros de alta calidad podrían ser de años. (Luciano, 1999).

El tiempo requerido en los procedimientos convencionales para la determinación de este coeficiente, ha motivado a desarrollar métodos de prueba aceleradas, es decir, que el tiempo de exposición del espécimen de concreto a la solución de cloruros no sean periodos excesivamente largos. Estos procedimientos usan combinaciones de incremento en la concentración de cloruros en la solución de exposición, incrementan la temperatura del ambiente. Estos métodos acelerados tienen la gran ventaja de determinar con razonable exactitud el coeficiente de difusión de cloruros en cuestión de semanas.

Los efectos de cambio del coeficiente de difusión con respecto al tiempo, debido principalmente a la hidratación continua de la pasta de cemento, se consideran en la ecuación 6 (Mangat y Molloy, 1994).

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad \text{Ec. 6}$$

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 dependiente de variables tales como el tipo de cemento usado, proporciones de mezcla, y es utilizado para explicar el índice de reducción de la difusividad con el tiempo. Algunos modelos consideran que el coeficiente de difusión que disminuye hasta los 25 años y después de este periodo se considera constante (Life 365, 2008). Este parámetro contribuye a mejorar la exactitud de las predicciones de la vida de servicio de las estructuras de concreto (Stanish, 2002).

Bamforth (1999) propuso valores para m basado en una revisión de los coeficientes de difusión publicados en más de 30 fuentes. Para concreto ordinario el valor de m es 0.264, concreto con ceniza volante 0.700 y concreto con escoria de alto horno 0.620, los cuales se basan en la información publicada principalmente en estudios marinos. Este autor no proporciona ninguna indicación en cuanto a cómo el valor *de m* cambia con el nivel de ceniza volante y de la escoria. Muchos de los estudios referidos se basaron en niveles relativamente altos de las cenizas volantes (30 a 50%) y de la escoria (50 a 70%).

Investigadores como Bamforth (1998), Thomas et al. (1999), Tang et al, (1992), Maage et al. (1995) y Stanish (2002), también han demostrado que el coeficiente de difusión de cloruro está en función del tiempo y de la temperatura.

La temperatura T en el concreto varía de acuerdo a la localización geográfica de la estructura y sus efectos en la difusión de cloruros se toma en cuenta con la ecuación 7,

$$D(t) = D_{ref} \cdot \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad \text{Ec. 7}$$

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 (35000 J/mol),

R = constante de los gases,

T = temperatura absoluta.

Un método alternativo para conocer el coeficiente de difusión de un concreto a partir de sus materiales constituyentes, temperatura, condiciones de curado, está en función de un modelo empírico propuesto por Luciano *et al.* (1999). Este modelo proporciona una ecuación para estimar el coeficiente de difusión de cloruros (CDC), con solo conocer las proporciones de la mezcla. Esta ecuación fue desarrollada a partir del análisis estadístico de una base de datos de coeficientes de difusión de cloruros, y tiene su potencial uso como una herramienta de ingeniería para realizar de manera preliminar una primera aproximación de las proporciones de mezcla necesarias para satisfacer los criterios de diseño por durabilidad de una estructura.

II.2.3.1.2 Influencia de la viscosidad en la difusión.

Gordon en 1937 citado por Bentz (2008), en una investigación sobre la difusión de electrolitos, deriva las ecuaciones que indican que la difusión debe ser proporcional a la viscosidad del líquido o la solución que contiene el electrolito. Una dependencia inversa entre la difusión de los coeficientes y la viscosidad de solución también está presente en la conocida relación Stokes-Einstein (Ecuación 8):

$$D_o = \frac{k_B T}{6\pi\eta_0 r} \quad \text{Ec. (8)}$$

donde: D = coeficiente de difusión del ion,
 K_B = constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2\cdot\text{K}$),
 T = Temperatura en grados Kelvin,
 r = radio de la partícula que se difunde,
 η = la viscosidad de la solución.

Esta ecuación sugiere que la difusión, se puede disminuir aumentando la viscosidad de la solución. Las mismas moléculas que interactúan con el agua para aumentar la viscosidad de la solución, también pueden actuar como barreras físicas para reducir la tasa de difusión iónica. El tamaño de estas moléculas es fundamental para su desempeño como barreras de difusión. Las moléculas de alto peso molecular que aumentan drásticamente la viscosidad de la solución, en concentraciones bajas no tienen ningún efecto medible en la difusión. Inversamente, en las moléculas de bajo peso molecular la reducción es proporcional al aumento medido en viscosidad, es decir, duplicar la viscosidad de la solución produce un coeficiente de difusión a la mitad del obtenido en la solución original. El aumento de una viscosidad al doble, produce un coeficiente de difusión a la mitad del de la solución original (Bentz, 2008).

II.2.3.1.3. Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en concreto reforzado

En la literatura encontramos una gama de valores presentados en diferentes países por diversos autores, un resumen se presenta en la tabla 2. El contenido límite de cloruros se expresa comúnmente en porcentaje por peso de cemento (%CL ppc), en porcentaje por peso de concreto (%CL pp de concreto) o en kg de Cl por m^3 de concreto. Se considera apropiado tomar el valor de 0.4-0.5% de cloruros por peso de cemento (RILEM).

Tabla 2. Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en el concreto reforzado, según varios investigadores y límites máximos de contaminación de los materiales.

Autor o reglamento	Año	Contenido de cloruros límite	
		(Kg/m ³ de concreto)	(% por peso de cemento)
Hausmann	1967	0.2-2.8	-
Clear	1976	0.81	0.2
Everett y Treadway	1980	-	0.4-1
Berke. Gau	1982	0.6-0.9	-
Comité Euro-Internacional du Beton (Europa)	1982	-	0.35-1
FWHA (Estados Unidos)	1985	-	0.3
BS-8110-1985 (Reino Unido)	1985	-	0.2-0.4*
RILEM	1987	-	0.4
EH-88 (España)**	1988	-	0.4
Pr EN-206 (España)**	-	-	0.4
ACI-318-89 (Estados Unidos)	1989	-	0.15-0.3-1**
Roy, Liam y Northwood	-	-	-
Mustafa y Yusof	1993	-	0.4
Castro y Maldonado	1994	0.376	-
	1994	1.0-2.0	-

Fuente: Castro, 2001

*El límite varía en función del tipo de cemento.

**El límite varía en función de la agresividad ambiental.

II.2.3.2 Absorción Capilar

El agua es la causa principal de la degradación de los materiales de construcción. Debido a que penetra en medios porosos, es un medio de transporte para agentes agresivos como los iones cloruro, y a temperaturas bajas se congela. Cuando un material poroso como el concreto se pone en contacto con un líquido, por ejemplo agua, esta es absorbida dentro de los poros del material por fuerzas capilares. Las fuerzas capilares son determinadas por la tensión superficial del líquido, el ángulo de contacto entre el líquido y las paredes del poro, y el radio de los poros.

El volumen de espacio de poros en el concreto, a diferencia de la facilidad con la cual un fluido puede penetrarlo, se mide por la absorción; las dos cantidades no están relacionadas necesariamente (Neville, 1999).

Para monitorear la humedad en materiales, existen varios métodos disponibles. Uno simple y por lo tanto ampliamente utilizado es el método gravimétrico, con el cual es posible obtener datos sobre la cantidad de humedad dentro del espécimen, pero su distribución no puede ser establecida.

Los procesos dinámicos de movimiento de humedad en los materiales, se pueden observar por resonancia magnética, rayos gamma o por radiografía del neutrón (RN), sin embargo, para seleccionar el método más apropiado, es esencial conocer las limitaciones de cada uno de ellos. La resonancia magnética es útil para materiales como arcillas o arenas, pero para materiales de construcción como el concreto, la señal es demasiado débil. Los rayos gamma no pueden dar resultados satisfactorios cuando el contenido de agua es menor de 5 g en un volumen de 100 cm³. La RN es un método apropiado debido a que el concreto es un material con un coeficiente de atenuación bajo para los neutrones, aunque tiene su limitante en el grueso del espécimen, esto debido a la intensidad del flujo del neutrón (Hanzie et al 2003).

Para propósitos prácticos, lo que presenta mayor interés es la característica de absorción de la zona exterior del concreto (la cual ofrece protección al acero de refuerzo). Por esa razón, se han desarrollado pruebas que miden la absorción superficial.

En esencia, la rapidez de absorción del agua por la zona superficial del concreto se determina durante un periodo prescrito (que varía entre 10 min. y 1 hora) bajo cargas de 200 mm. de agua, esta carga es sólo ligeramente mayor que la que sería causada por lluvia vigorosa. La rapidez de absorción superficial inicial se expresa en milímetros por metro cuadrado por segundo. La absorción inicial después de 10 minutos que sea mayor de 0.50 ml/m² por segundo se considerara alta, y la que sea menor de 0.25 ml/m² por segundo, baja.

Los valores correspondientes después de 2 horas son, respectivamente, mayores de 0.15 ml/m² por segundo y menores de 0.07 ml/m² por segundo.

La masa de agua que el concreto absorbe durante la prueba depende del contenido preexistente de humedad. Por esta razón, los resultados de la prueba de absorción superficial inicial no se pueden interpretar con prontitud, a menos que el concreto haya estado acondicionado para un estado higrométrico conocido antes de las pruebas. Este requerimiento no se puede satisfacer en el concreto en el sitio mismo. En consecuencia, un valor bajo de la absorción superficial inicial se puede deber, o bien a las características inherentes de baja absorción del concreto probado, o bien al hecho de que los poros del concreto de calidad pobre ya están llenos de agua.

En el concreto la prueba que determina la absorción capilar es la sorptividad, la cual se define, como la capacidad que tiene el concreto para absorber agua a través de capilaridad (Hall, 2002; Nokken , 2004)

La prueba de sorptividad determina la velocidad de absorción por ascensión capilar en un cilindro de concreto el cual descansa en unos pequeños soportes de manera tal que, solo la parte mas baja del cilindro quede sumergida de 2 a 5mm. El incremento del peso del cilindro con el tiempo es registrado. (ASTM designation: C 642-97, 2000)

Ha sido mostrado que existe una relación de la forma:

$$i = St^{1/2} \quad \text{Ec. (9)}$$

donde

i = incremento en peso en gr./mm² desde el inicio de la prueba por unidad de área en la sección transversal en contacto con el agua; como el incremento en peso es debido al ingreso de agua, 1 gr. es equivalente a 1 mm³, así que i puede ser expresado en mm,

t = tiempo, medido en minutos, en el cual el peso es determinado, y

S = sorptividad en mm/min^{0.5}.

En la práctica no es fácil medir el valor de i como un ascenso en el nivel de agua en el concreto, el cual se manifiesta por su propio color oscuro. En casos así, la i es medida directamente en milímetros.

En la figura 5 se observa un proceso típico de absorción de agua en un cilindro de concreto.

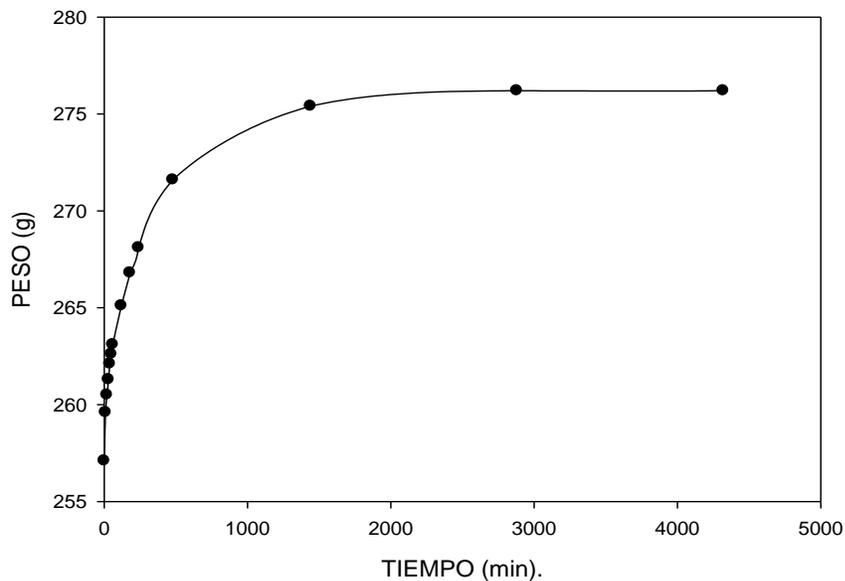


Figura 5 Comportamiento típico de absorción de agua por los especímenes de concreto.

Nótese el comportamiento que tiene el espécimen al estar en contacto con el agua, la mayor parte de absorción se da en los primeros minutos esto se nota al aumentar el peso del espécimen, después de un determinado tiempo el espécimen sigue absorbiendo pero con una velocidad lenta, el peso se incrementa hasta llegar a una masa constante, es cuando se dice que llegó a su nivel máximo de saturación o está cerca de su saturación capilar.

El coeficiente de absorción capilar (sorptividad) es la pendiente de la recta ajustada por el método de mínimos cuadrados a los datos de incremento en peso por unidad de área y la raíz cuadrada del tiempo. El punto de origen es ignorado normalmente debido al rápido llenado de los poros en la superficie del concreto.

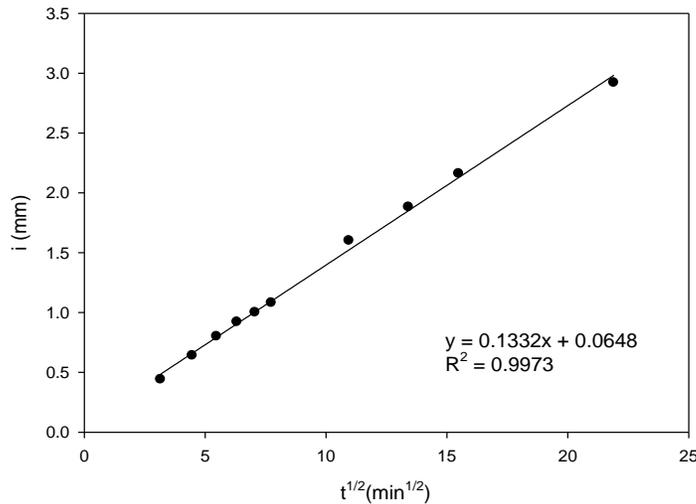


Figura 6. Determinación de la capacidad de absorción.

Como en la prueba de absorción superficial inicial, cuanto más alto es el contenido de humedad del concreto más bajo es la medida de sorptividad para que, si es posible, el espécimen debe ser condicionado a los 105°C antes de ser ensayado.

II.3. Secado

En general, secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire (Geankoplis,1999).

II.3.1 Métodos generales de secado

Los métodos y procesos de secado se clasifican de diferentes maneras; se dividen en procesos de lotes, cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo, o continuos, si el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Los procesos de secado se clasifican también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua: (1) en la primera categoría el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire; (2) en el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto por una pared metálica o por radiación.

II.3.2. Contenido de humedad de los materiales

Una variable importante en el secado de los materiales es la humedad del aire en contacto un sólido de determinada humedad. Supóngase que un sólido húmedo se pone en contacto con una corriente de aire con humedad H y temperatura constantes. Después de haber expuesto el sólido un tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio, llega un momento en que dicho sólido tiene un contenido de humedad definido. Este valor se conoce como contenido de humedad de equilibrio del material en las condiciones especificadas de humedad y temperatura del aire. En general, el contenido de humedad se expresa en base seca como kilogramo de agua por kilogramo de sólido sin humedad (completamente seco). El contenido de humedad de equilibrio de un sólido disminuye al aumentar la temperatura (Geankoplis, 1999).

II.3.3. Curvas de velocidad de secado

Para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material, se procede a colocar una muestra en una bandeja. La pérdida en peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación; al realizar estos experimentos se deben de tomar ciertas precauciones para obtener datos útiles en condiciones que semejen lo más posible a las que imperarán en operaciones a gran escala. La velocidad, la humedad, la temperatura y la dirección del aire deben ser las mismas y constantes para simular un secado en condiciones constantes.

II.3.4 Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constantes

Conversión de los datos a curva de secado. Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total W del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos de t horas en el periodo de secado por los siguientes procedimientos. Primero se recalculan los datos. Si W es el peso del sólido húmedo en kilogramos totales de agua más sólido seco y W_s es el peso del sólido seco en kilogramos,

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} = \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg. Sólido seco}} \quad \text{Ec. 10.}$$

II.3.5. Secado en el concreto

Las características de los materiales elaborados a base de cemento cambian con el tiempo. Estas características del concreto como resistencia, módulo elástico y contracción, son influenciadas perceptiblemente por el calor de hidratación y el contenido de agua en el concreto en las edades tempranas (Kim et al, 1999).

La disminución de la humedad, significa la diferencia de la humedad en peso en cierta edad descontada de la humedad al inicio de la prueba (Jiang et al, 2005).

La pérdida de humedad en el concreto desempeña un papel importante en la afectación de sus características de durabilidad y resistencia. Así mismo, una reducción de la humedad interna en el concreto, aumentará el riesgo de contracción y agrietamiento en la estructura (Jiang et al, 2005).

El cambio de la humedad en el concreto normal expuesto a un ambiente seco es gobernado principalmente por la difusión de humedad, aunque la pérdida de humedad también se ve afectada por el secado mismo, esto significa, que un concreto continúa

hidratándose acompañado con el consumo de agua libre, lo cual da lugar a una reducción de la humedad.

Si el concreto se expone a un ambiente de aire a edades tempranas, el movimiento del agua ocurre debido a difusión de la humedad, por lo que, la distribución de la humedad en una sección representativa llega a ser no uniforme. Además, el autosecado en el concreto ocurre debido a la hidratación del cemento. Por lo tanto, la pérdida de humedad en el concreto en edad temprana, es el resultado de la difusión de la humedad y del autosecado.

La figura siguiente esquematiza la variación de la humedad relativa en el concreto expuesto a un ambiente de aire en edades tempranas.

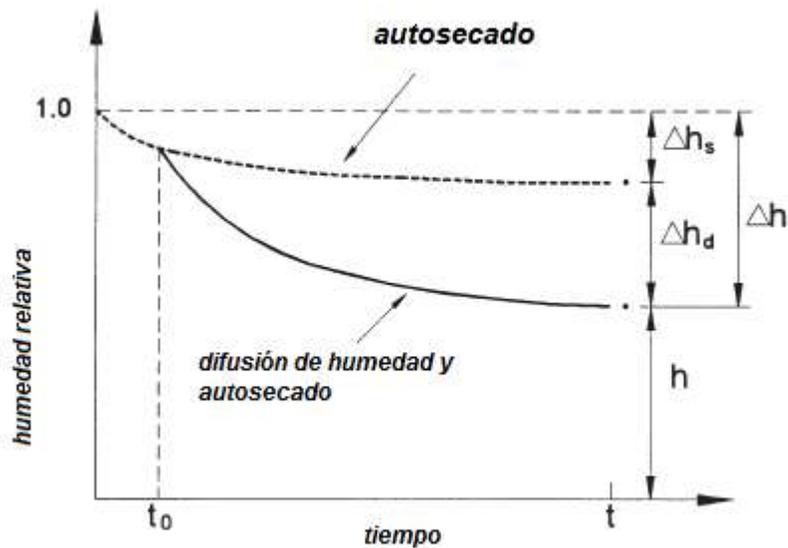


Figura 7. Variación de la humedad relativa en el concreto.

En el tiempo t_0 cuando el secado comienza, la humedad relativa interna disminuye parcialmente debido al autosecado. Después cuando el concreto se expone al aire, la humedad relativa interna sigue disminuyendo debido a la difusión de la humedad (Kim et al, 1999).

Los índices de pérdida de humedad son principalmente dependientes de las características del concreto, como relación agua/cemento, condiciones de secado externas, microestructura del concreto.

II.4. Polímeros Naturales

Un polímero (del griego poly, muchos; meros, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de peso molecular bajo es el monómero. Si el polímero es rigurosamente uniforme en peso molecular y estructura molecular, su grado de polimerización es indicado por un numeral griego, según el número de unidades de monómero que contiene; así, hablamos de dímeros, trímeros, tetramero, pentámero y sucesivos.

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Mucho antes de que existieran los plásticos y los polímeros sintéticos, remontándonos a los mismos orígenes de la tierra, la naturaleza se valía de los polímeros naturales para hacer posible la vida

Existen polímeros naturales como el algodón, formado por fibras de celulosas. La celulosa se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel. La seda y la lana son otros ejemplos. El hule de los árboles de hevea y de los arbustos de Guayule, son también polímeros naturales importantes. Los polímeros naturales incluyen al ARN y al ADN, vitales en genes y en los procesos de la vida. Por cierto, el ARN mensajero es el que hace posible la existencia de las proteínas, los péptidos y las enzimas. En este grupo se encuentran incluidos los polisacáridos (azúcares) y los polipéptidos como la seda, la queratina y el cabello. El caucho natural es también un polímero natural, constituido sólo por carbono e hidrógeno.

Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas. Lo que distingue a los

polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases

II.4.1. Mucílago de nopal

El nopal además de su alto valor nutricional, en la actualidad es uno de los polímeros naturales más utilizados, que cuando se le extrae el mucílago (solución viscosa) es utilizado en diferentes campos de la industria. En algunos países, los granjeros utilizan mucílago del cactus para purificar el agua potable (López, 2000). Otro uso tradicional es para mejorar la pintura de casa. Recientemente, un extracto de cactus fue probado para mejorar la infiltración del agua en suelos (Gardiner et al, 1999).

El género del opuntia pertenece a la familia de Cactaceae y es también conocido como la planta o nopal de la pera del cacto. Esta cosecha abundante se distribuye en las regiones áridas y semiáridas de muchos países: Argentina, Perú, Bolivia, el Brasil, los Estados Unidos (Texas), España, Italia, África (Marruecos, Túnez, Etiopía), Israel, África y México. La planta se utiliza principalmente para la producción de la fruta de tuna, aunque en algunos países también se utiliza como vehículo (nopalitos) para el consumo humano o para el forraje. (Sáenz., 2004)

El mucílago es un carbohidrato complejo, parte de la fibra dietética. Entre una de las propiedades más importantes de este vegetal está el conservar el agua incluso bajo condiciones climáticas desfavorables, debido a la presencia de mucílagos que al formar redes moleculares tridimensionales son capaces de retener grandes cantidades de agua (Cárdenas et al, 1998). Por debajo de la cutícula que cubre una penca u hoja de nopal, se encuentra una sustancia en forma de pulpa (gel), la cual está conformada de células que contienen mono- o di –sacáridos, los cuales interactúan y producen polisacáridos (Chandra et al., 1998).

El mucílago es un polisacárido fibroso, de una forma altamente ramificada, compuesto por un contenido alto en azúcares. Esta molécula es muy larga y compleja, es pegajosa y por lo tanto poco manejable, para una *Opuntia ficus Indica*, cada molécula del mucílago puede contener por encima de 30,000 subunidades de azúcar, o residuos.

II.4.2. Composición química del mucílago de nopal (varios autores)

Diversos investigadores, refiriéndose no siempre a la misma especie, han estudiado la composición química del mucílago de nopal, los resultados concuerdan en lo siguiente: Los azúcares más abundantes tienen cinco o seis átomos de carbono y poseen los siguientes: arabinose, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido urónico (Amin et al 1970; Srivastava et al 1974; Trachtenberg, 1981; Gybson et al, 1986). Se ha visto que los derivados del azúcar difieren mucho en el cactus y no muestran ningún orden sistemático de composición. También se encontró en el nopal la presencia de fructosa, sacáridos y maltosa. Así de esta manera el gel del cactus contiene polisacáridos de varios tipos y composición, así como proteínas (Chandra, 1998). El mucílago de nopal es un polisacárido compuesto por 20% de D-galactosa, 44% de L-arabinosa, 7% de L-ramnosa, 22% de D-xilosa y 7% de ácido galacturónico.

En la tabla 3, se presentan los resultados de diferentes investigadores sobre los componentes químicos del mucílago de nopal *Opuntia*. Estos autores mencionan que las diferencias encontradas se pueden deber a los métodos utilizados para la purificación y determinación de estos componentes.

Tabla 3. Componentes del mucílago de nopal (diversos autores)

Autor	Peso Molecular	Galactosa	Ramnosa	Arabinosa	Xylosa	Acido Uronico
Goycolea et al (2000)		+	+	+	+	
Cárdenas et al (1997)	3 x 10 ⁶	+	+	+		+
Sáenz et al (1993)		+	+	+		+
Trachtenberg et al (1982)	1.56 x 10 ⁶	+	+	+		+
McGarvie et al (1981a)		+	+	+	+	+
McGarvie et al (1981b)		+		+	+	

Trachtenberg et al (1981)	4.3 x 10 ⁶	+	+	+	+	+
McGarvie et al (1979)		+	+	+	+	+
Paulsen et al (1979)		+	+	+	+	+
Saag et al (1975)		+	+	+	+	+
Srivastava et al (1974)		+		+		

Por otro parte Rodríguez *et al* (2007), estudiaron el nopal *Opuntia Ficus Indica* deshidratado para conocer sus propiedades fisicoquímicas, para ello evaluaron cuatro proporciones de nopal de 60, 100, 150 y 200 grs, obteniendo como resultado las siguientes características:

Tabla 4. Características fisicoquímicas del mucílago de nopal *Opuntia Ficus Indica*

Características	Nopal 60	Nopal 100	Nopal 150	Nopal 200
Humedad	4.06±0.02	5.02±0.14	6.21±0.16	7.31±0.03
Proteína	14.22±1.23	13.10±1.11	12.87±1.10	11.39±1.24
Grasa	3.00±0.03	2.87±0.03	2.53±0.02	1.96±0.02
Fibra soluble	25.22±1.26	18.21±1.11	15.87±1.12	14.91±1.09
Fibra insoluble	29.87±1.35	33.21±1.24	37.15±1.23	41.65±1.32
Ceniza	18.41±1.64	19.61±1.34	22.40±1.23	23.24±1.17
calcio	1.35±0.04	1.76±0.05	2.71±0.06	3.30±0.08
Fosforo	0.38±0.01	0.34±0.01	0.33±0.01	0.29±0.01
Sodio	0.21±0.004	0.17±0.004	0.12±0.003	0.12±0.003
Oxalato de calcio	7.95±0.82	3.47±0.37	5.73±0.64	3.94±0.26
Potasio	5.52±0.14	6.84±0.15	6.46±0.14	6.02±0.13
Relación Ca/P	3.60	6.39	8.24	11.33
Ph nopal fresco	4.41±0.30	4.14±0.15	4.35±0.26	4.28±0.50
Ph nopal deshi.	4.26±0.14	4.07±0.30	4.31±0.35	4.35±0.20

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.

III.1. Materiales.

III.1.1 Cemento

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó cemento Portland, que cumple las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 y la norma ASTM C-150, se determinó el empleo del cemento blanco con base a las necesidades de conocer sus propiedades en la absorción de agua por capilaridad y penetración de cloruros, debido a que en las investigaciones que se tienen del uso del muelo solo se ha trabajado con cemento gris ordinario y compuesto. Al cemento blanco utilizado se le realizó un análisis químico cuantitativo de óxidos mayores para conocer su composición y se buscó en la literatura la composición química del Cemento Portland Ordinario con la finalidad de hacer una comparación entre ambos tipos de cemento, los resultados se muestran en la tabla 5

Tabla 5. Composición Química cemento blanco y CPO.

Cemento	Elemento / Compuesto												
	Fe	FeO	PXC	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Cemento Blanco	0.1120	N.D	2.27	2.91	71.43	0.60	0.54	0.01	0.06	0.04	0.08	19.30	0.17
CPO (Roman, 2008)	-	-	1.1	5.0	64.6	0.41	0.07	0.07	0.1	0.09	0.34	21.0	3.18

Se observa el bajo contenido de Fe₂O₃ en el cemento blanco el cual forma el ferroaluminato tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃), compuesto responsable de darle el color gris al cemento, otro aspecto importante es la disminución en el cemento blanco del Al₂O₃ el cual forma el aluminato tricálcico (C₃A) disminuyendo así la capacidad del cemento blanco para ligar cloruros sin llegar a nulificar esta característica.

III.1.2 Agregado grueso y fino

Se utilizó arena y grava proveniente del Río Atoyac, cuya caracterización se realizó basada en las normas ASTM C 33 (análisis granulométrico), ASTM C 125 (módulo de finura de la arena), ASTM C 70, C 127 Y C 566 (Absorción y contenido de humedad), ASTM C 29 (Peso volumétrico seco suelto y compacto). El tamaño máximo del agregado grueso fue de $\frac{3}{4}$ ". En la Tabla 6, se presentan las características de los materiales pétreos.

Tabla 6. Caracterización de los agregados pétreos.

Agregado	P.V.S.S (kg/m ³)	P.V.S.C (kg/m ³).	Absorción de agua (%)	Absorción de solución de mucilago (%)	Densidad relativa	Modulo de Finura
Arena	1538	1609	1.29	-	2.57	2.88
Grava	1497	1601	0.68	0.31	2.66	-

III.1.3 Agua.

Para la elaboración de las mezclas se utilizó agua bidestilada embotellada de la marca Hycel con temperatura promedio de 15°C, cumpliendo con la norma ASTM C94. Para las pruebas de penetración de cloruros se utilizó esta misma agua para cumpliendo así con lo establecido por el Método NORDTEST NT BUILD 443.

III.1.4. Superplastificante

Para lograr una trabajabilidad adecuada de las mezclas de concreto se utilizó el superplastificante PLASTOL 4000 de la Marca EUCOMEX basado en policarboxilatos, el cual cumple con la Norma ASTM C494/ C494M – 08a.

III.1.5. Mucílago de nopal

Se utilizó una solución de mucílago de nopal al 3% del género *Opuntia ficus*, disponible en la región para sustituir el agua de mezclado en las mezclas de concreto. Su forma de extracción se menciona más adelante.

III.2. Métodos

III.2.1. Obtención del mucílago de nopal

La obtención del mucílago de nopal que se utilizó para la realización de la investigación se realizó de la siguiente manera.

III.2.1.1. Proceso de Escaldado

Los dos métodos de escaldado comercialmente más empleados son, o bien mantener durante un tiempo el alimento en una atmósfera de vapor saturado, o bien sumergirlo en un baño de agua caliente. Ambos tipos de instalaciones son económicas y sencillas. Para la investigación se empleó el método de vapor dejando el nopal por un lapso de 8 minutos hasta que este se pusiera de un color amarillento, el escaldado al vapor es normalmente el método de elección para alimentos de gran superficie relativa, ya que las pérdidas por lavado son en ellos menores (pérdida de componentes hidrosolubles), que por escaldado en agua caliente (Helen 2000).

III.2.1.2. Proceso de maceración

La maceración es un proceso de extracción sólido-líquido. Consiste en colocar un elemento sólido a temperatura ambiente en un líquido manteniendo en reposo durante 12 a 24 horas. Muchas veces conviene que el material sólido esté triturado para facilitar la extracción de principios activos, es por ello que se procedió a cortar el nopal en pequeños pedazos (Fig 8). Una vez pasado este lapso de tiempo, se procedió a licuarlo.



Figura 8. Macerado del nopal y proceso de molido.

III.2.1.3. Proceso de filtración

En la filtración las partículas suspendidas en un fluido, ya sea líquido o gas, se separan mecánica o físicamente usando un medio poroso que retiene partículas en forma de fase separada que permite el paso del filtrado sin sólidos. Para la filtración del mucílago de nopal se utilizó una manta, la cual impidió el paso de partículas sólidas (Fig. 9)



Figura 9 Filtración del mucílago de nopal

Se obtuvo una cantidad aproximada de 150 litros de mucílago, que se consideró conveniente para la elaboración de los especímenes que se utilizaron en la investigación. Cabe mencionar que al mucílago se le añadió el 1% de benzoato de sodio por cada litro de mucílago, con el fin de preservar durante un tiempo más largo al mucílago, ya que se descomponía a los 6 días y por otro lado el benzoato no perjudica a la viscosidad.

III.2.3. Mezclas de concreto

Se diseñaron tres mezclas de concreto con relaciones agua/cemento (a/c) igual a 0.30, 0.45 y 0.60. La primera se diseñó por el método HPC (Aitcin, 1990) y las otras dos por medio del método de volúmenes absolutos del ACI (Kosmatka, 1992). Por cada relación a/c se elaboraron dos mezclas similares, de las cuales una fue la mezcla control o de referencia elaborada con agua y la otra mezcla se elaboró con la solución de mucílago de nopal como sustituto del agua de mezclado. La tabla 7 presenta los proporcionamientos para cada mezcla.

Tabla 7. Proporcionamientos de las distintas mezclas utilizadas y propiedades en estado fresco.

Relación Material	0.30		0.45		0.60	
	a/c	m/c	a/c	m/c	a/c	m/c
Agregado grueso (kg)	1007.52	1007.52	997.06	997.06	993.63	993.63
Agregado fino(kg)	660.72	660.72	712.61	712.61	785.99	785.99
Cemento(kg)	513.30	513.30	448.89	448.89	336.67	336.67
Agua(kg)	166.96	166.96	172.45	172.45	203.24	203.24
Superplastificante (ml)	400	500	175	202	150	156
Revenimiento (cm)	5.5	15	8.8	5.7	8.2	10.50
Peso Volumétrico (kg/m ³)	2880	2650	2079	2620	2820	2530
Contenido de aire (%)	2	1.9	1.8	5.5	1.9	6
Temperatura (°C)	23	23	26	27	24	24

III.2.4. Elaboración, curado y acondicionamiento de los especímenes

Las mezclas se elaboraron siguiendo el procedimiento que establece la norma ASTM C 192/C 192M – 05. Se utilizó una mezcladora eléctrica con capacidad de un saco de cemento de 50 kg, y para el vibrado se utilizó una mesa vibratoria con la cual se vibró a cada cilindro 10 segundos aproximadamente por cada capa.

Tomando en cuenta los factores y niveles utilizados en la investigación se hizo el diseño de experimento, que se presenta en la tabla 8.

Tabla 8. Determinación del número de especímenes de concreto.

Variables	Niveles	Variable respuesta
a/c y m/c	0.3, 0.45 y 0.6	-Cloruros -Absorción de agua
Curado (días)	0, 7	
Edades (días)	28, 56 y 120	

2*3*2*3*6 especímenes = 216 especímenes

En resumen, se elaboraron un total de 216 cilindros de concreto, de los cuales 108 fueron de referencia (36 por cada relación a/c) y 108 conteniendo solución de nopal (36 por cada relación m/c).

Las dimensiones de los cilindros de concreto fueron de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura para las pruebas de penetración de cloruros y de 75 mm de diámetro x 150 mm de altura para las pruebas de absorción capilar. Los cilindros se elaboraron por triplicado en función de la edad de los especímenes y a su tiempo de curado. A cada cilindro se le asignó un número de registro. Una vez que se elaboraron los cilindros se cubrieron con bolsas de plástico para evitar la pérdida de humedad y posteriormente se curaron en húmedo a cero y siete días a temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

En la siguiente figura se presenta un diagrama de flujo del diseño metodológico de la presente investigación.

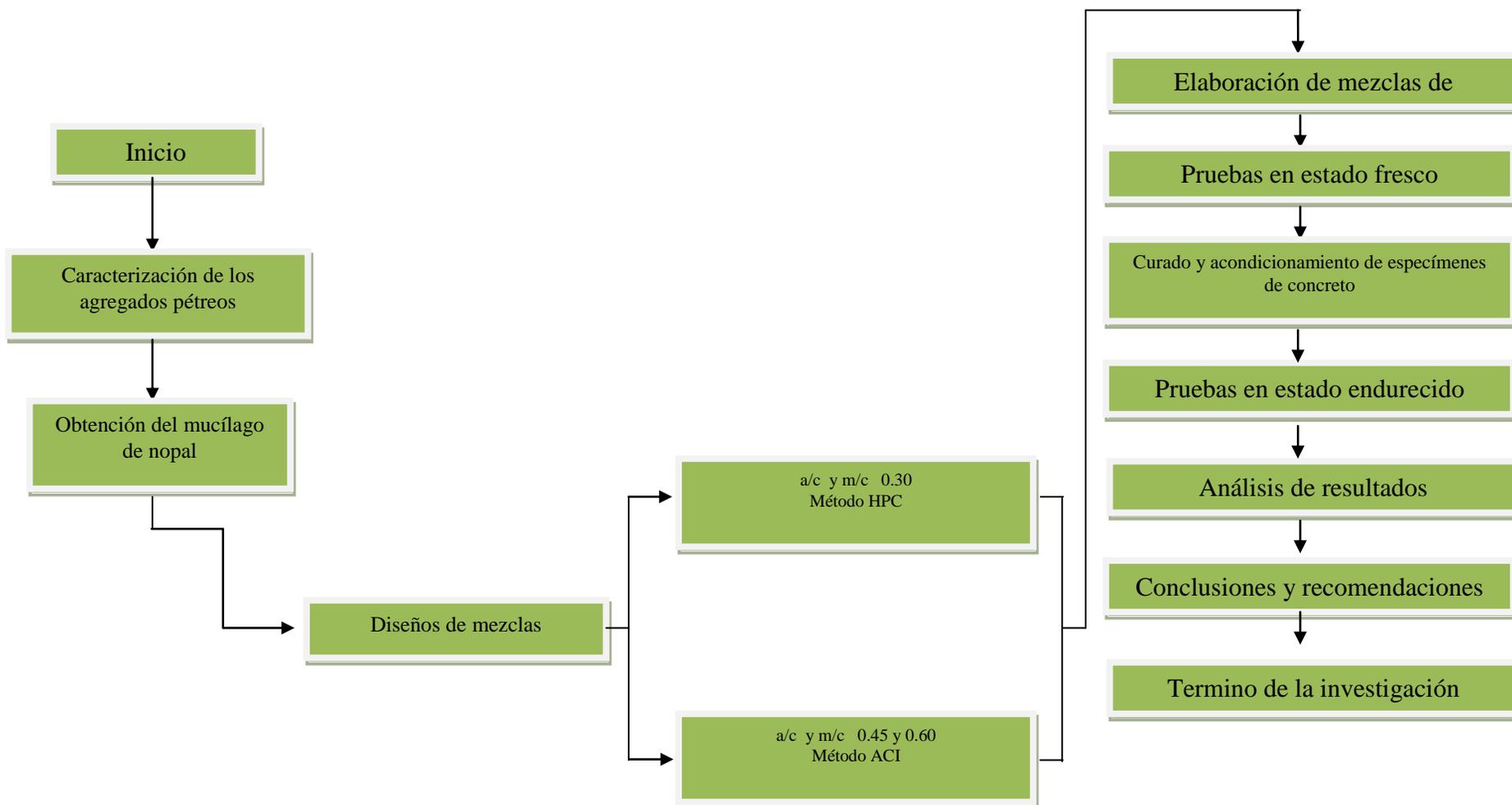


Figura 10. Diagrama de flujo del diseño metodológico

III.3. Caracterización del concreto en estado endurecido

III.3.1. Secado de concreto

Una vez elaborados los especímenes, se colocaron en un cuarto de temperatura controlada donde tuvieron un curado en húmedo a $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Al término del cual, los especímenes se colocaron en ambiente natural donde periódicamente se pesaron para monitorear la pérdida de humedad. Este proceso se realizó tanto para los especímenes de referencia como para los que contenían mucílago de nopal a edades de 28, 56, y 120 días.

Los especímenes que se utilizaron para el monitoreo del proceso de secado por pérdida de humedad, fueron los mismos que se utilizaron para las pruebas de penetración de cloruros.

III.3.2. Absorción capilar

Esta prueba se realizó siguiendo el procedimiento que establece la norma ASTM C 642-97. Una vez que los especímenes cumplieron las edades de prueba a las cuales se iban a ensayar 28, 56 y 120 días, se colocaron en el horno a una temperatura de 105°C (temperatura a la cual el agua evaporable es eliminada) hasta que la masa del espécimen fuera constante (diferencia en masa menor que 0.5% en intervalos de 24 horas). Después, los especímenes se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se cortaron en tres rodajas (Fig. 11), utilizando una sierra con disco de diamante. Los primeros uno o dos milímetros en cada extremo del espécimen completo fueron eliminados para dejar una superficie uniforme y libre de concentración de pasta.

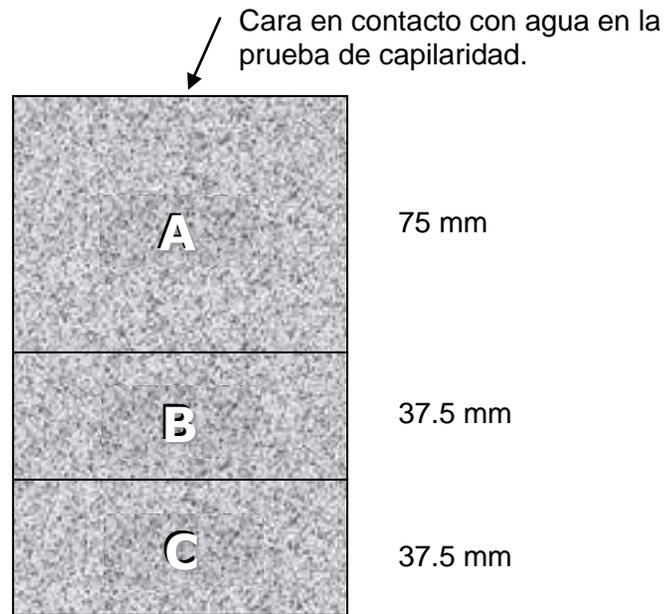


Figura 11. Seccionado de los especímenes de concreto de acuerdo a la posición de colado.

Las rodajas A fueron utilizadas para la prueba de absorción capilar, mientras que las piezas B y C se utilizaron para las pruebas de porosidad.

A las piezas A se les aplicó una capa de resina epóxica en la superficie curva para hacer la absorción capilar unidireccional de acuerdo a la norma ASTM C 1403, como se indica en la figura 12. La resina se dejó endurecer por un tiempo de 24 horas, al término del cual se procedió a realizar dicha prueba

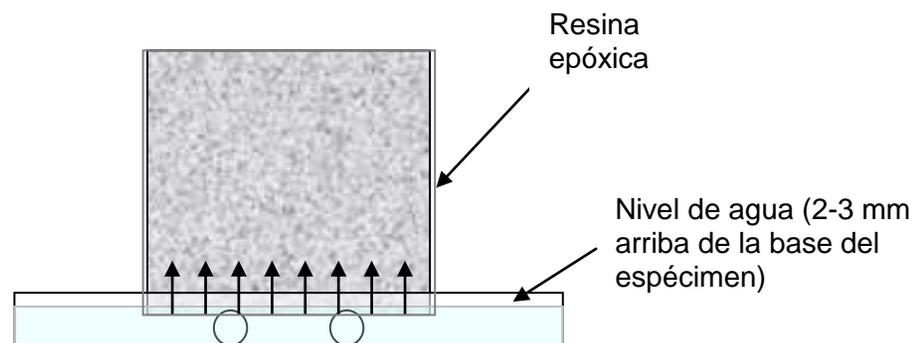


Figura 12. Prueba de absorción de agua por capilaridad.

En esta prueba se colocaron los especímenes en un recipiente con agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. El nivel del agua se mantuvo constante durante toda la prueba (aproximadamente dos o tres milímetros arriba de la parte inferior del espécimen) como se observa en la figura 11.

La cantidad de agua absorbida con respecto al tiempo se determinó a diferentes intervalos de tiempo (5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 240, 480, 1440, 2280, 4320 y 8640 minutos), en cada uno de los cuales el espécimen era retirado del recipiente, se eliminaba el exceso de agua con un trapo húmedo y se pesaba en una báscula digital que tenía una precisión de 0.1 g. Inmediatamente el espécimen se colocaba en el contenedor para continuar el proceso de absorción. Toda esta operación tomaba aproximadamente 10 segundos. Debe mencionarse que el cronómetro no se detenía durante el pesado del espécimen, lo cual no afecta el experimento (Hall, 1989)

Para la determinación de la porosidad se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 642-97. En esta prueba se determinó la masa de los especímenes secos, la masa después de saturar los especímenes en agua a temperatura ambiente ($23 \pm 1^{\circ}\text{C}$) por 48 horas, la masa de especímenes saturados después de hervirlos durante cinco horas y la masa aparente de los especímenes sumergidos en agua.

III.3.3. Difusión de cloruros

La determinación del coeficiente de difusión de cloruros, se realizó de acuerdo al procedimiento de prueba establecido el por Método NORDTEST NT BUILD 443, el cual es un método de penetración acelerada de cloruros. Dicho método establece que los especímenes a ensayar deberán tener como mínimo 28 días de madurez.

Los especímenes se dividieron en mitades cortadas perpendicularmente al eje del cilindro utilizando una sierra con disco de punta de diamante y se etiquetaron con las letras A y B. Esto debido a que una mitad se utilizó como espécimen de control (contenido inicial

de cloruros) y la otra mitad con la superficie aserrada expuesta a la solución de cloruro de sodio (NaCl) 16.5%.

Los especímenes productos del corte fueron sumergidos en recipientes con una solución saturada de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) aproximadamente a una temperatura de 23°C . Diariamente se pesaban en condición de superficie seca, hasta que su masa no cambiará por más de 0.1% de su peso en masa por 24 horas. Posteriormente, todas las caras del espécimen excepto la que iba a ser expuesta a cloruros se secaron a temperatura ambiente en un periodo corto de tiempo que no sobrepasaba una hora. Posteriormente se aplicó una capa de resina epóxica. Se esperó un lapso de 24 horas (indicaciones del proveedor) para que la pintura endureciera y posteriormente los especímenes de prueba se sumergieron nuevamente en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hasta que su peso se estabilizará como ya se describió anteriormente.

Posterior a esta exposición, la mitad A de cada cilindro fue expuesta a la solución de cloruro al 16.5% (2.8 M) de concentración durante 35 días (figura 13) y la otra sirvió como control para obtener la concentración inicial de cloruros en la mezcla. La solución era renovada a la mitad del tiempo de exposición para evitar cambios en la concentración. Se tuvo el cuidado necesario para que el recipiente siempre estuviera cerrado herméticamente.



Figura 13 Almacenamiento de especímenes expuestos a solución de cloruro de sodio

Al término del tiempo de exposición, de cada cilindro se extrajeron muestras de polvo de 8 capas de 2 mm de espesor, cada una paralelas a la superficie expuesta. La obtención de polvos se hizo por medio de un extractor que se muestra en la figura 14. Se tuvo especial cuidado de obtener un mínimo de 5 g de polvo por cada capa, como lo establece la norma y que no hubiera contaminación por mezcla de polvos de diferentes capas a la hora de la extracción.



Figura 14. Herramienta extractora de polvos de concreto.

Posteriormente se determinó el contenido de cloruros en especímenes expuestos y controles de cada mezcla se llevó a cabo utilizando el método de titulación de Volhard de acuerdo a la norma NT BUILD 208 (1995).

La teoría de este método se basa en que a una solución que contiene iones cloruros se le agrega un exceso de nitrato de plata, logrando con esto que los cloruros precipiten como cloruro de plata y el exceso de iones de plata se titula químicamente con solución de tiocianato de amonio.

El contenido de cloruros en cada capa se calculó mediante la expresión 11

$$\text{Peso\%Cl}^- = 3.545 \frac{V1N1 - V2N2}{m} \quad \text{Ec. 11}$$

donde

V1 = Cantidad agregada de solución de nitrato de plata,

N1= Normalidad de la solución de nitrato de plata,

V2 = Cantidad agregada de la solución de tiocianato del amonio durante la titulación,

N2 = Normalidad de la solución del tiocianato del amonio,

m = Peso de la muestra (g).

Una vez obtenidos los perfiles de concentración de cloruros para cada espécimen, se realizó el ajuste de los datos a la solución de la ecuación 5, determinando la concentración de cloruros en la superficie, así como el coeficiente de difusión.

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4De \cdot t}}\right) \quad \text{Ec. 5}$$

Una vez obtenidos los coeficientes de difusión para cada mezcla a diferentes edades y calculando los valores m, se utilizó el software *Life 365*, el cual está basado en la teoría expuesta en la sección II.2.3.1, para predecir el tiempo de inicio de la corrosión del acero de refuerzo y el costo del ciclo de vida de una estructura hipotética utilizando las mezclas de concreto estudiadas en la presente investigación.

Las condiciones de exposición de la estructura empleada para la simulación fueron las siguientes:

1. Tipo de estructura: Losa de 200 mm de espesor.
2. Recubrimiento del acero: 50 mm.

3. Concentración en la superficie por peso de concreto de 1% a partir de los 10 años. De 0-10 varia linealmente desde 0% hasta 1%.
4. Exposición de la estructura: zona con brisa marina.
5. Umbral de cloruros para inicio de la corrosión del acero: 0.05% por peso de concreto.
6. Tiempo de propagación: 6 años.
7. Ciclo de temperatura anual que se muestra en la figura 15.

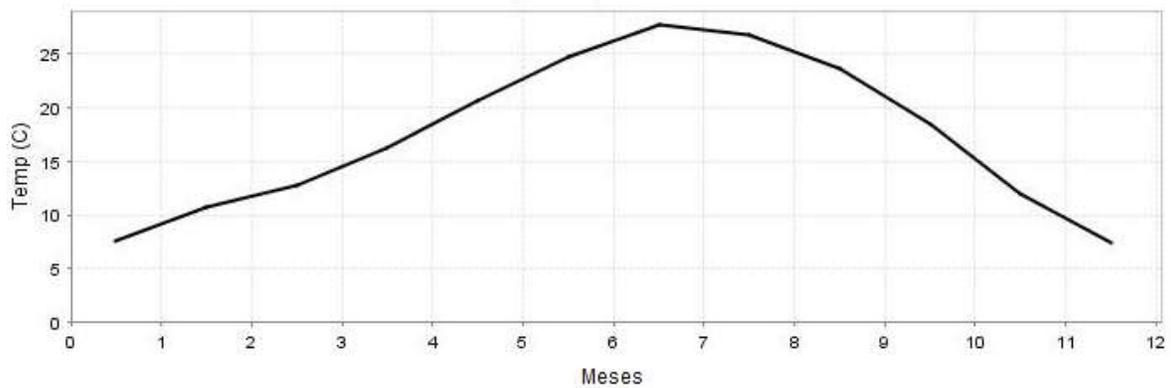


Figura 15. Temperatura anual utilizada para determinar el inicio de la corrosión del acero de refuerzo.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

IV.1 Secado de concreto

Como se mencionó inicialmente, los especímenes que se utilizaron para monitorear la pérdida de humedad fueron los mismos que se utilizaron para las pruebas de penetración a cloruros. A continuación, se presentan las gráficas de pérdida de humedad de los especímenes elaborados con solución de nopal comparados con los especímenes de referencia.

IV.1.1. Pérdida de humedad de especímenes relación a/c y m/c 0.30

En la figura 16 se presenta el comportamiento de la pérdida de humedad de especímenes de concreto elaborados con mucílago de nopal comparados con los especímenes elaborados con agua (promedio de 3 cilindros), en la relación a/c=0.30 y m/c=0.30, con cero días de curado a la edad de 120 días.

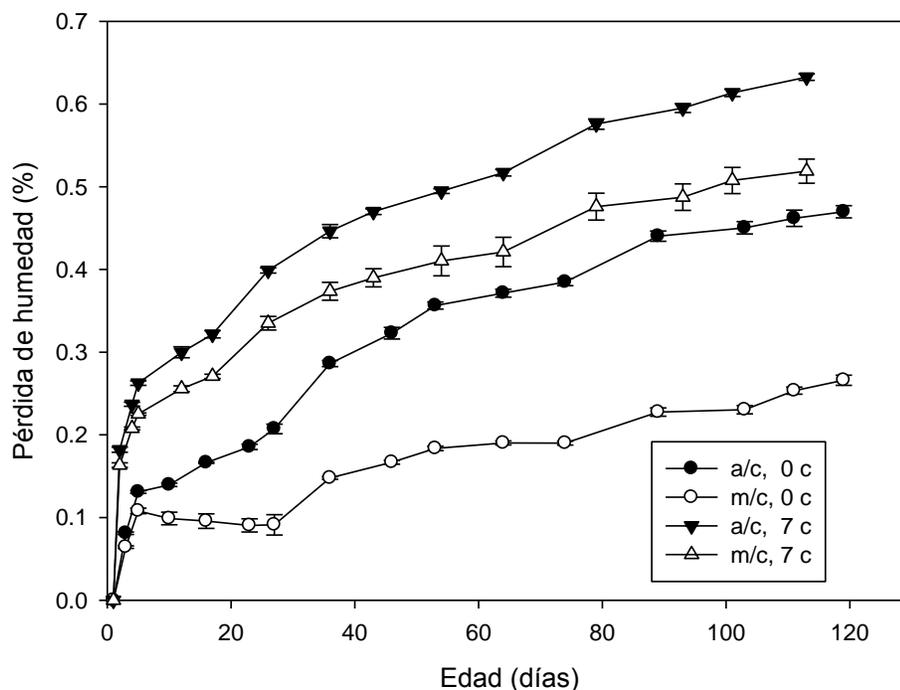


Figura 16. Pérdida de humedad a los 120 días de edad en especímenes de concreto de relación 0.30

Se observa el efecto benéfico del mucílago de nopal en la menor pérdida de humedad comparada con los especímenes que fueron elaborados con agua, lo que contribuye a una mayor hidratación y por lo tanto una reducción de la permeabilidad del concreto. Debe mencionarse que en los especímenes elaborados con solución de mucílago, la porosidad capilar es menor que en los que contienen solo agua, lo que indica una menor permeabilidad y por lo tanto una menor pérdida de agua al ambiente. Otro aspecto importante es que debido a la lenta reacción de hidratación del concreto conteniendo mucílago, durante los siete días de curado en húmedo el agua penetra el concreto, lo que explica la mayor cantidad de agua perdida comparada con los que tuvieron cero días de curado.

IV.1.2. Pérdida de humedad de especímenes relación a/c y m/c 0.45

En la figura 17, se presenta el comportamiento de la pérdida de humedad de especímenes de concreto elaborados con mucílago de nopal comparados con los especímenes elaborados con agua, en la relación a/c y m/c 0.45, con cero y siete días de curado a la edad de 120 días.

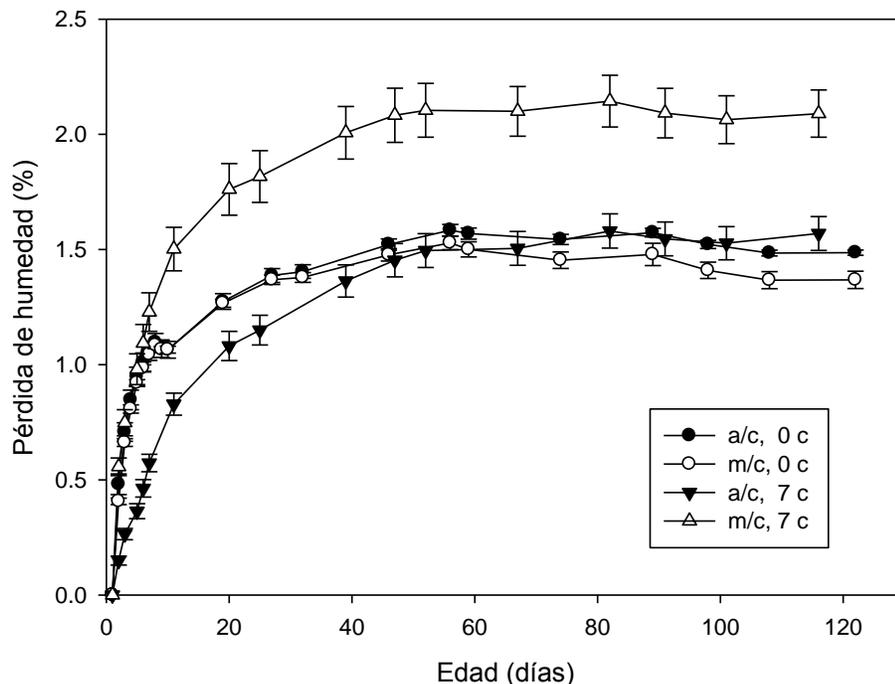


Figura 17. Pérdida de humedad a los 120 días de edad en especímenes de concreto de relación 0.45

Como se puede observar en los especímenes de relación 0.45 con cero días de curado, tanto los cilindros elaborados con mucílago de nopal como los elaborados con agua (especímenes de referencia), tienen un comportamiento muy similar durante el secado, siendo ligeramente menor para los especímenes elaborados con mucílago de nopal a partir de los 28 días hasta los 120 días de edad. Con lo que respecta a los especímenes que tuvieron un curado en húmedo de 7 días, se puede observar que la pérdida de humedad fue mayor para los especímenes elaborados con mucílago de nopal, esto es un comportamiento inesperado, sin embargo es importante mencionar que en el proceso de curado los especímenes elaborados con mucílago de nopal absorbieron aproximadamente el doble de cantidad de agua en peso que los especímenes elaborados con agua (los especímenes elaborados con mucílago ganaron en peso promedio $59.98 \text{ gr} \pm 5.69$ mientras que los que contenían agua ganaron $25.54 \text{ gr} \pm 2.51$), la cual puede ser una razón importante por la que estos especímenes tuvieron mayor disponibilidad de agua para ser evaporada por el ambiente. Con respecto a este mismo comportamiento, se realizó la prueba de absorción del agregado grueso con mucílago de nopal y con agua, teniendo una menor absorción el agregado expuesto a mucílago, la absorción fue de 0.31 % mientras que para el agregado con agua absorbió un 0.68%, esto es debido a que la alta viscosidad del mucílago del nopal reduce la absorción capilar de agua, dejando así una mayor cantidad de agua para ser evaporada. Los especímenes elaborados con agua en ambos tiempos de curado presentaron un comportamiento de secado similar, esto puede ser debido a que en el proceso de curado estos especímenes no absorbieron gran cantidad de agua y que los procesos de hidratación del cemento son más rápidos que en las mezclas de mucílago/cemento. Otro aspecto muy importante a tomar en cuenta con respecto a este comportamiento, es el efecto que tiene el mucílago de nopal al actuar como retardante de la hidratación de la pasta de cemento, por lo cual el agua no se combina químicamente con el cemento a edades tempranas, dejando así una mayor cantidad de agua libre para ser evaporada con el ambiente.

IV.1.3. Pérdida de humedad de especímenes relación a/c y m/c 0.60

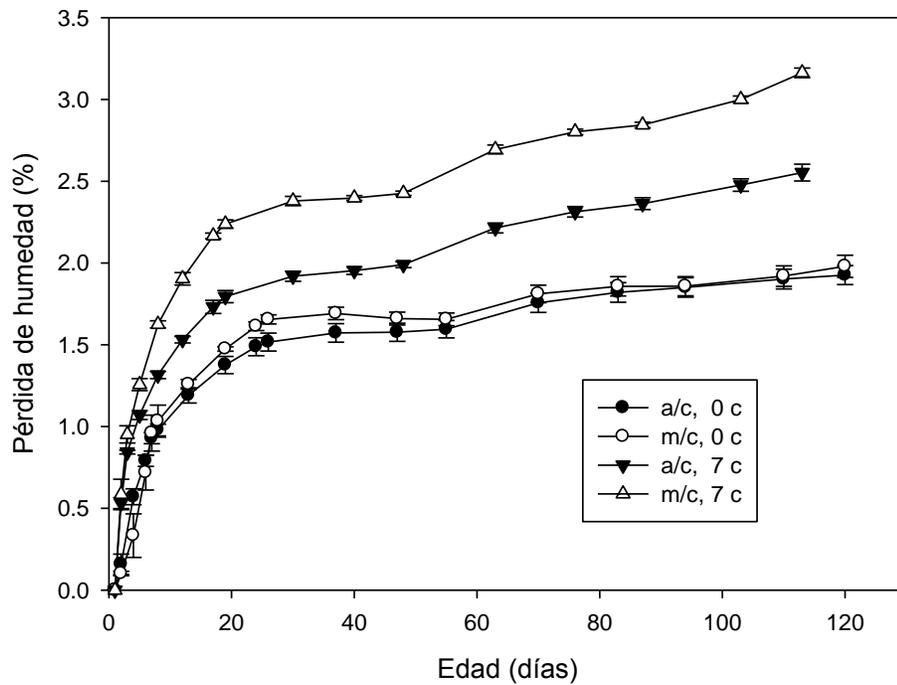


Figura 18. Pérdida de humedad a los 120 días de edad en especímenes de concreto de relación 0.60

Se puede observar que en los especímenes que no tuvieron curado en húmedo, el comportamiento es muy parecido al encontrado en la relación 0.45, ya que la pérdida de humedad fue similar para ambos especímenes, siendo ligeramente menor para los especímenes elaborados con agua.

Para los especímenes de esta misma relación que tuvieron un curado de 7 días, se observa que los especímenes que perdieron mayor humedad fueron los que se elaboraron con mucílago de nopal, siendo éste un comportamiento inesperado, sin embargo, al igual que en la relación a/c y m/c 0.45, en el proceso de curado los especímenes elaborados con mucílago tuvieron una mayor absorción de agua, teniendo así una mayor cantidad de agua para ser evaporada por el ambiente.

IV.2 Absorción Capilar y porosidad

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de absorción capilar que se les practicó a los especímenes de 7.5 cm * 15 cm a los 28, 56 y 120 días de edad, tanto de las mezclas elaboradas con solución de extracto de nopal como las que se hicieron con agua.

IV.2.1. Absorción Capilar y porosidad relación a/c y m/c 0.30

En la figura 19 se observa el efecto que tiene el tiempo de curado que tiende a reducir absorción capilar, en medida que este se incrementa, esto a excepción de los especímenes con mucílago de nopal con curado de 7 días a una edad de 28 días.

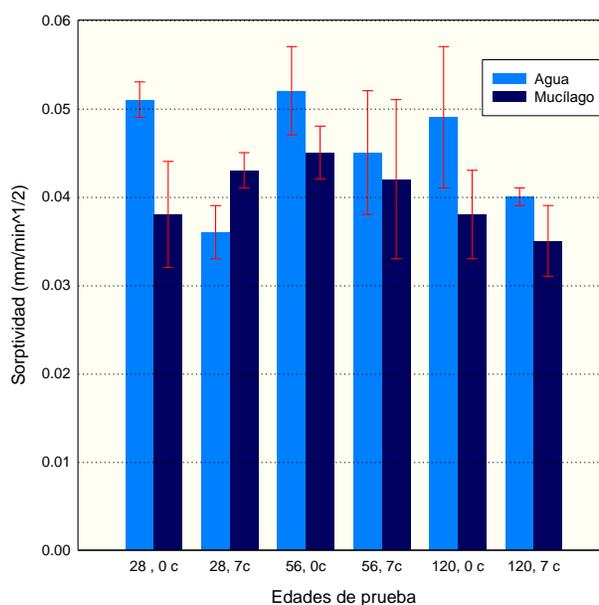


Figura 19 . Absorción capilar de agua en cilindros de concreto relación 0.30. Con una desviación estándar máxima de 0.009

Por otra parte comparando los resultados de los especímenes elaborados con mucílago de nopal con los elaborados con agua, se observa consistentemente que los de mucílago de nopal tienden a hacer al concreto más impermeable, principalmente en el concreto que no tuvo curado en húmedo, esto nos puede indicar la capacidad que tiene el extracto para retener agua lo cual contribuye a lograr un mayor grado de hidratación aun sin

haber tenido algún periodo de curado en húmedo, sin embargo, cuando existe un periodo de curado de siete días, los especímenes elaborados con nopal mantienen prácticamente la misma capacidad de absorción a los 28 y 56 días de edad y estas son muy similares a la dada por los especímenes de referencia, esto es muy similar a lo encontrado por Torres et al (2007).

Con respecto al porcentaje de volumen de poros permeables en ambas mezclas (agua y mucílago) de esta misma relación 0.30, los resultados obtenidos se tienen en la figura 20, donde se observa que el porcentaje de poros en las mezclas que no tuvieron curado es menor ligeramente en un rango del 5 al 10% para los especímenes que contienen mucílago de nopal tanto a los 28, 56 y 120 días de edad. Para los especímenes que tuvieron un curado de siete días, el comportamiento fue diferente en cada una de las edades de prueba, a los 28 días el porcentaje de poros fue mayor para los especímenes elaborados con mucílago de nopal, para la edad de 56 días los que presentaron un porcentaje mayor de porosidad fueron especímenes de referencia, y para la edad de 120 días la porosidad en ambas mezclas fue la misma.

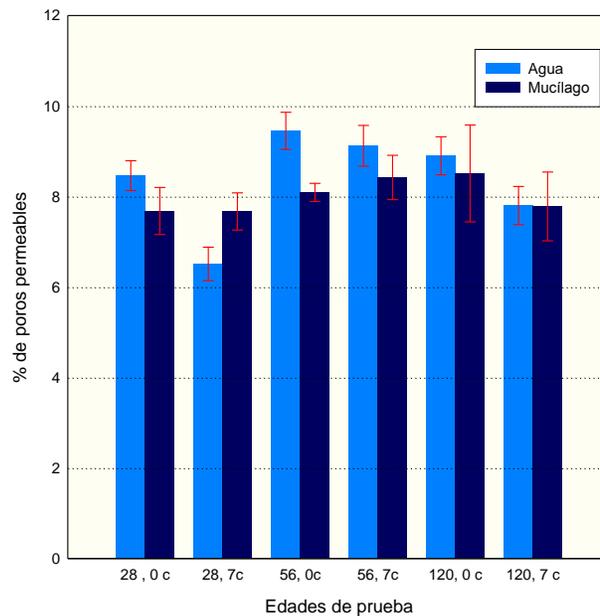


Figura 20 Volumen de poros permeables en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.30. Con una desviación estándar máxima de 1.07.

IV.2.2. Absorción Capilar y porosidad relación a/c y m/c 0.45

En la absorción capilar para la relación a/c y m/c 0.45, los resultados obtenidos se presentan en las tablas 4, 5 y 6 del anexo 1, los cuales se muestran en la figura 21.

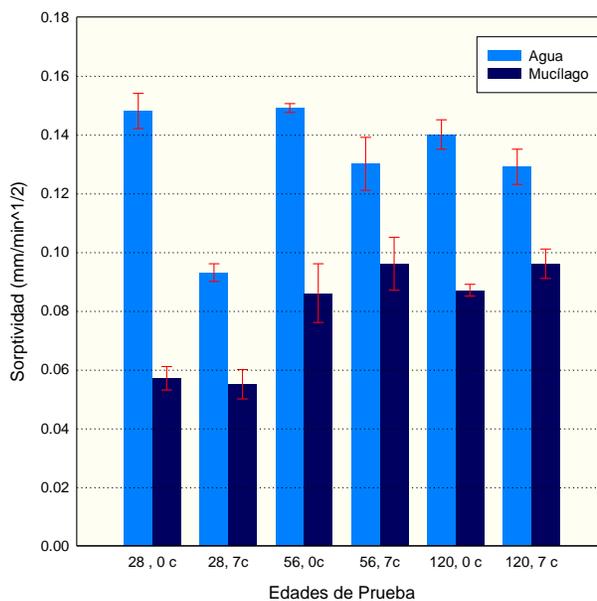


Figura 21. Absorción de agua en cilindros de concreto relación 0.45. Con una desviación estándar máxima de 0.010

Se observa el efecto benéfico de la utilización de mucílago de nopal al hacer al concreto menos permeable en comparación a los especímenes de referencia en todas las edades de prueba, este efecto es más notorio en los especímenes que no tuvieron curado, esto es congruente con lo observado por Chandra et al (1998), quienes encontraron que el mucílago de nopal reduce la absorción de agua en especímenes de relación 0.50 con cinco días de curado en húmedo. Esto también concuerda con lo observado por Cano et al (2005), quienes encontraron que el mucílago de nopal contribuye a disminuir la absorción capilar en pastas de cemento con periodos de curados cortos lo cual lo atribuyen a que el mucílago favorece a lograr un mayor grado de hidratación del mortero, sin embargo, si el periodo de curado se incrementa a siete días, la absorción es similar para los especímenes preparados con ambas mezclas (mucílago y agua), debido a que en ambos casos existe humedad suficiente para hidratar el cemento y el extracto no produce una diferencia apreciable, aunque el caso de esta investigación, los especímenes elaborados con mucílago y con un tiempo de curado de siete días presentaron una absorción de agua menor

comparada con los especímenes de referencia que tuvieron las mismas condiciones de curado. En lo que respecta a los especímenes elaborados con mucílago de nopal la absorción de agua tuvo un comportamiento muy similar tanto en los que tuvieron un curado de siete días, como en los que no tuvieron curado, inclusive siendo menor la absorción para estos últimos en las edades de 56 y 120 días.

Para lo que fue la determinación del porcentaje de poros permeables en estas mezclas de relación 0.45 los resultados se presentan en la figura 22, donde se observa que los especímenes elaborados con mucilago de nopal presentan una mayor cantidad de poros en un rango del 10 al 15% en comparación con lo especimenes elaborados con agua o de referencia. Este comportamiento se presento tanto para los especimenes que tuvieron siete días de curado como para los que no tuvieron curado alguno.

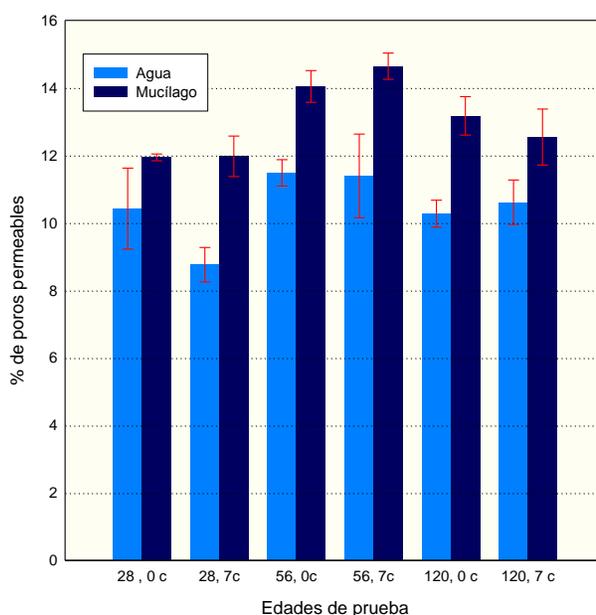


Figura 22. Volumen de poros permeables en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.45

Los resultados obtenidos en esta relación agua/cemento y mucílago/cemento 0.45, en donde, los especímenes que contenían mucílago de nopal a pesar de que presentaron alta porosidad tuvieron una absorción de agua menor a los especimenes de referencia, este comportamiento es similar a lo encontrado por Chandra et al (1987), donde atribuyen este comportamiento del mortero a la presencia de proteínas, debido a que introducen una característica hidrofóbica a los especimenes de mortero. Chandra et al en otro artículo (1987) menciona con respecto a este comportamiento dos teorías, la primera que la parte

hidrofóbica del polímero se dirige hacia los poros capilares no saturados de agua, posteriormente en el secado se elimina el agua y las partículas hidrofóbicas se unen para formar una película. La otra teoría es que el polímero interactúa con los productos de hidratación del cemento portland y forma complejos, esto crea un tipo de refuerzo en el concreto y produce membranas semipermeables, obteniendo así concretos menos permeables.

IV.2.3. Absorción Capilar y porosidad relación a/c y m/c 0.60

De acuerdo a la información proporcionada en las tablas 7, 8 y 9 del anexo 1 y graficando estos resultados (figura 23), se tiene que los resultados obtenidos para la relación a/c y m/c 0.60 al igual que en la relación anterior de 0.45, los especímenes elaborados con mucílago de nopal presentan una menor absorción de agua con respecto a los elaborados con agua en todas las edades de prueba, tanto en los que tuvieron siete días de curado, como los que no tuvieron tiempo de curado.

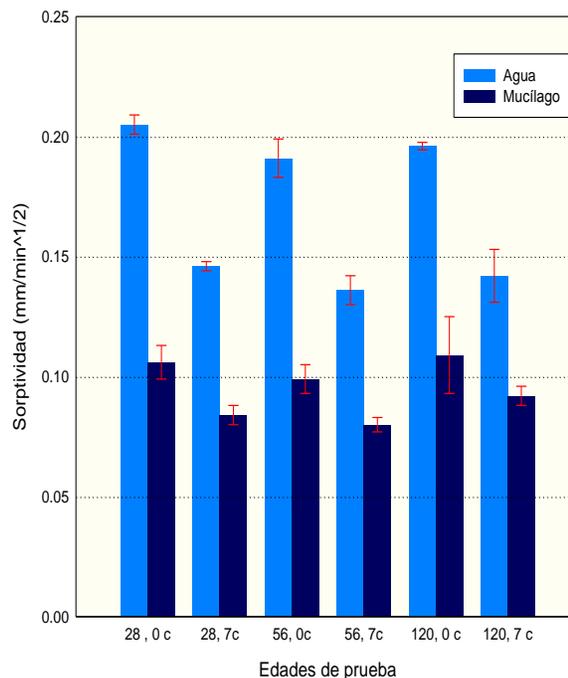


Figura 23. Absorción de agua en cilindros de concreto relación 0.60. Con una desviación estándar máxima de 0.016

En este caso la diferencia es más significativa para los especímenes elaborados con mucílago y con un tiempo de curado de siete días, esto es muy similar a lo encontrado por Chandra et al (1998) como ya se mencionó con anterioridad.

Con lo referente al porcentaje de porosidad en la relación a/c y m/c 0.60, los resultados se presentan en la figura 24, donde se observa que los especímenes elaborados con mucílago de nopal presentaron una mayor porosidad principalmente los que tuvieron un curado de siete días, sin embargo, esta mayor porosidad no es muy significativa comparada con los especímenes de referencia ya que está en un rango de 5 – 8% de diferencia entre ambas mezclas. Para los especímenes que no tuvieron tiempo de curado los resultados tuvieron una paridad para ambas mezclas principalmente a la edad de 56 y 120 días.

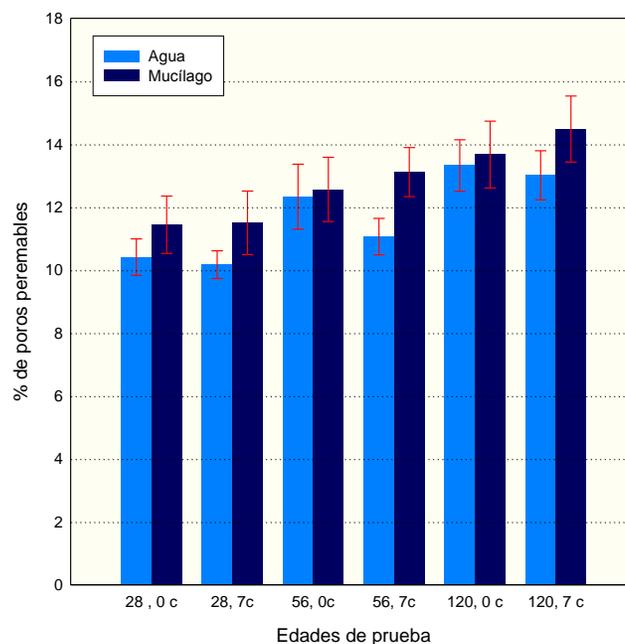


Figura 24. Volumen de poros permeables en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.60

Este comportamiento obtenido en la relación 0.60 en los especímenes elaborados con mucílago de nopal que, a pesar de haber tenido una mayor porosidad, la absorción capilar de agua es menor, este comportamiento es similar al ya explicado en la relación 0.45

IV.2.4. Porosidad y resistencia a la compresión

Ramírez (2008), evaluó la resistencia a la compresión en especímenes que fueron elaborados con las mismas mezclas que se utilizaron en esta investigación y bajo las mismas condiciones de curado. Los resultados mostraron que para la relación a/c 0.30 el mucílago de nopal a la edad de 120 mostró un incremento en la resistencia en un rango de 1.5 – 5% en ambos tiempos de curado con respecto a los especímenes que solo contenían agua. Para los especímenes de relación 0.45 y 0.60, el mucílago de no mostró ningún efecto benéfico en el incremento de la resistencia a la compresión con respecto a los especímenes elaborados con agua, en ninguna de las edades de prueba ensayadas.

Aitcin (2007), concluyó que por cada 1% de aumento de contenido de aire en el concreto la resistencia se reduce hasta 10%. Debido a esto se gráfico las porosidades obtenidas en cada una de las mezclas con respecto a las resistencias obtenidas en las mismas en base a la ecuación 8. Los resultados se presentan en la figura 25.

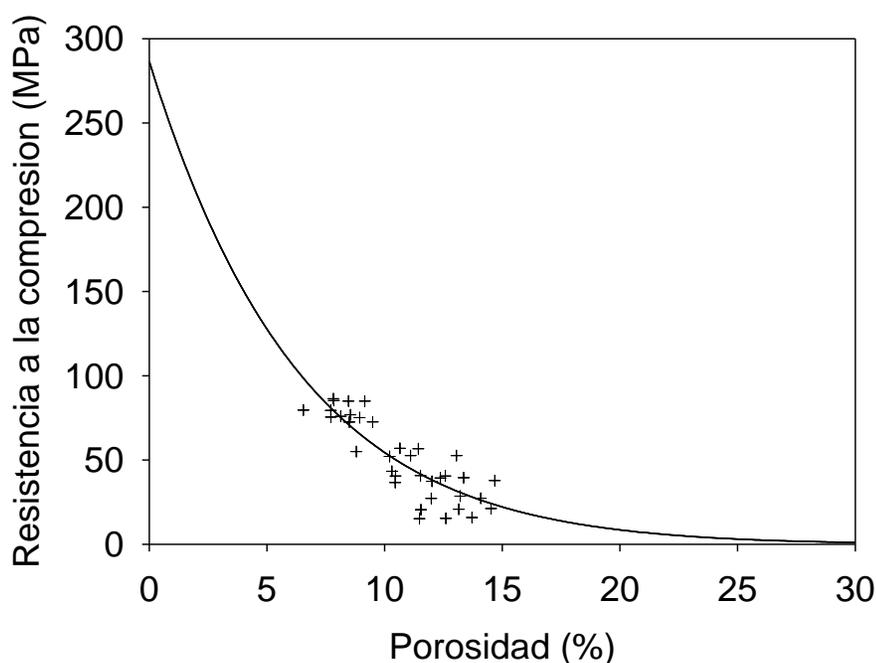


Figura 25. Relación entre resistencia a la compresión y porosidad.

Se observa en la gráfica que existe una relación estable entre la porosidad y la resistencia, esto es que, conforme la relación a/c y m/c se reduce se tiene una resistencia a la compresión mayor y un volumen de poros permeables menor. Se observa también que para las mezclas que contienen mucílago en las relaciones 0.45 y 0.60, que como ya mencionó estas tuvieron un mayor volumen de poros, lo cual se ve reflejado en una disminución en resistencia a la compresión.

IV.2.5. Absorción capilar y secado

Obtenidos los resultados de absorción capilar y pérdida de humedad por secado, se hizo una gráfica relacionando éstos dos parámetros para determinar si existía una relación directa entre ambos. Se tomó el porcentaje más alto de pérdida de humedad de los especímenes a la edad de 120 días y se graficó contra la sorptividad de los mismos especímenes a la edad de prueba de 120 días (figura 26).

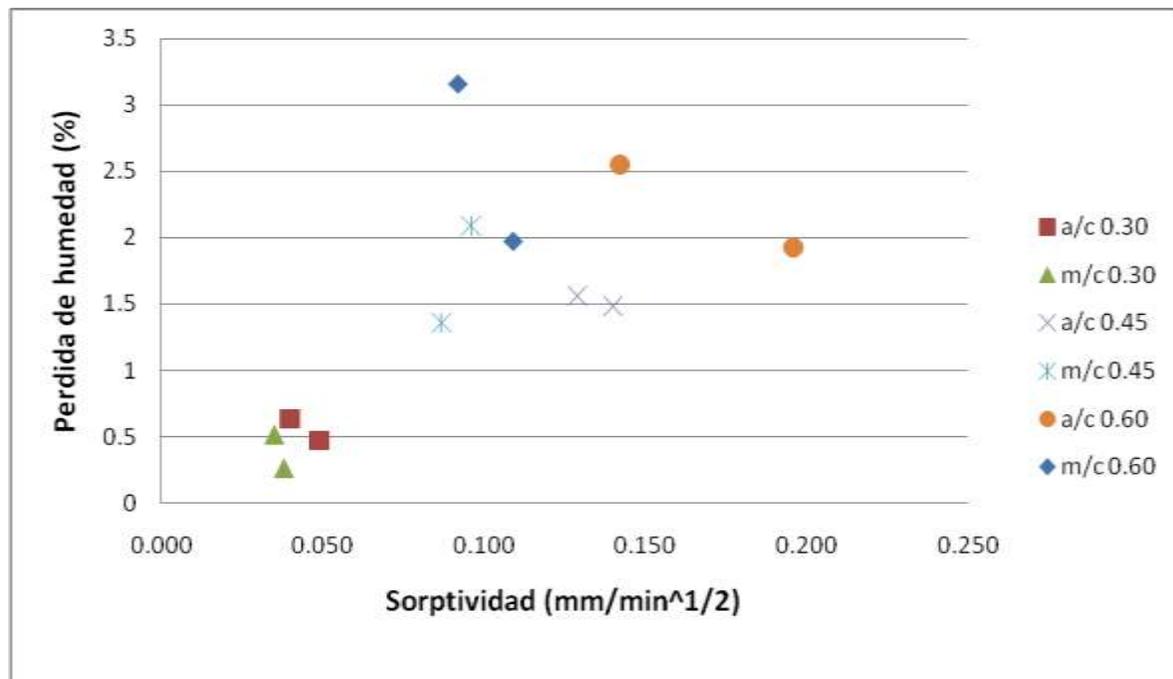


Figura 26. Relación entre sorptividad y pérdida de humedad, a la edad de 120 días.

Se observa de forma general una correlación importante, que conforme la relación agua/cemento y mucílago/cemento se reduce, la pérdida de humedad por secado es menor,

esto debido a que la poca cantidad de agua de mezclado se consume rápidamente en las reacciones de hidratación del cemento sin quedar agua libre que permanezca en los poros como sucede en las relaciones a/c altas, como consecuencia de esto la porosidad capilar es menor y discontinua, por lo tanto la absorción capilar es menor, logrando así un concreto con baja permeabilidad. Todo lo contrario sucede en las relaciones a/c y m/c altas, donde el de agua de mezclado, es mayor que la necesaria para hidratar todo el cemento, quedando agua libre que se acumula en los poros capilares y está disponible para ser eliminada por el ambiente, como consecuencia de esto la porosidad capilar es mayor, teniendo así un concreto con mayor permeabilidad y menor resistencia a la compresión. En esta investigación como ya se mencionó, se observó en las relaciones m/c y a/c altas de 0.45 y 0.60, que los especímenes elaborados con mucílago de nopal perdieron una mayor cantidad de agua, sin embargo absorbieron una menor cantidad de agua por capilaridad comparado con los especímenes de las mezclas que contenían solamente agua, lo cual se observa en la figura anterior, este comportamiento como ya se mencionó se puede atribuir a las propiedades retardantes que tiene el mucílago de nopal que hace que el agua no se combine químicamente con el cemento a edades tempranas, dejando así una mayor cantidad de agua libre para ser evaporada con el ambiente, conforme el concreto incrementa su edad las reacciones de hidratación se completan formándose una capa debido a los complejos de calcio formados durante la interacción del mucílago de nopal con los iones divalentes de calcio del cemento, logrando así un concreto menos permeable (Chandra, 1998).

IV.3. Coeficientes de difusión de cloruros

IV.3.1. Coeficientes de difusión de cloruros relación 0.30

Los coeficientes de difusión para las mezclas a/c y m/c 0.30 a las edades de prueba de 28, 56 y 120 días se presentan en la tabla 10 del anexo 1 y se presentan gráficamente en la figura 27.

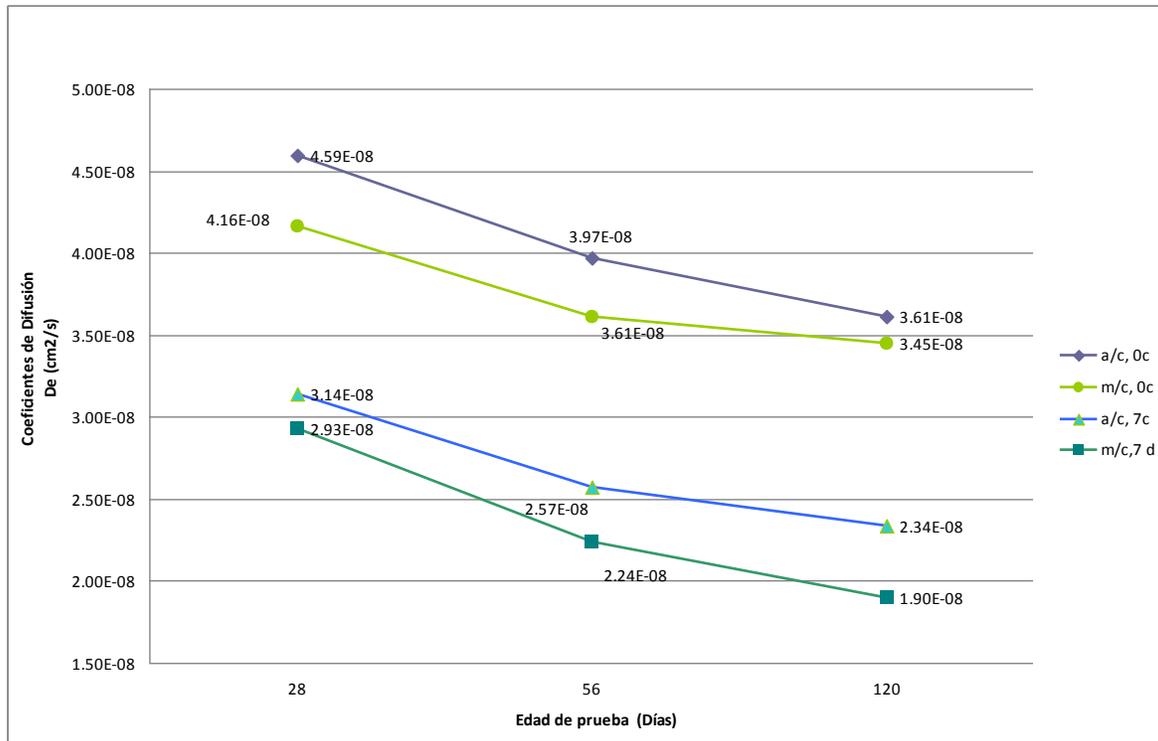


Figura 27. Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.30, a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.

En esta relación de agua/cemento y mucílago/cemento, se puede observar primeramente que en ambas mezclas, a medida de que se incrementa la edad de los especímenes los coeficientes de difusión son menores, esto debido a una mayor hidratación con respecto a la edad del concreto, asimismo se observa el efecto que tiene el curado al contribuir a una mayor hidratación logrando así un concreto de mejor calidad.

En esta relación se puede observar que el mucílago de nopal contribuyó a disminuir el coeficiente de difusión de cloruros tanto en ambos tiempos de curado de los especímenes y en todas las edades de prueba. A la edad de 120 días en los especímenes que tuvieron un

curado de siete días, el coeficiente fue menor en aproximadamente un 20% en la mezcla elaborada con mucílago de nopal.

Este comportamiento de que, el mucílago contribuye a disminuir el coeficiente de difusión de cloruros se puede relacionar con lo encontrado por Bentz et al (2008), donde mencionan que se puede disminuir la difusión aumentando la viscosidad de la solución, debido a que aumenta substancialmente la viscosidad de la solución en el poro, esto a que las mismas moléculas que trabajan recíprocamente con el agua para aumentar la viscosidad de la solución, son también efectivas como barreras físicas que reducen la difusión de los iones. Según lo precisado por Shimizu y Kenndler citado por Bentz, menciona que el funcionamiento como barreras de difusión está en función del tamaño de las moléculas. Las moléculas de alto peso molecular que aumentan drásticamente la viscosidad de la solución, en concentraciones bajas no tienen ningún efecto medible en la difusión. Inversamente, en las moléculas de bajo peso molecular la reducción es proporcional al aumento medido en viscosidad, es decir, duplicar la viscosidad de la solución produce un coeficiente de difusión a la mitad del obtenido en la solución original.

Con base en la ecuación de Stokes Einstein (Ecuación 8), se calculó el coeficiente de difusión del ion cloruro en solución de mucílago y agua, esto para determinar la variación en la difusión del ión cloruro en ambas soluciones. Para el mucílago se tomó una viscosidad de 11 centipoise (Ramirez, 2008) y para el agua una viscosidad de 1 centipoise a temperatura de 23°C, el radio de la partícula del ion cloruro de 1.81×10^{-8} cm.

Los resultados obtenidos fueron para la solución de mucílago de nopal se tuvo un coeficiente de difusión de 1.0889×10^{-6} cm²/s, mientras que para el agua se tuvo un coeficiente 1.197×10^{-5} cm²/s. Estos resultados indican que la difusión en la solución de mucílago es 11 veces menor que en agua, aunque esto no se ve reflejado en ambas mezclas de concreto, donde el coeficiente de difusión solo fue menor en un 20% a la edad de 120 días con cero días de curado, esto se puede explicar por que se desconoce que cambios tiene la solución de mucílago al interactuar con el cemento, además que las edades de

prueba fueron a tiempos considerables donde ya hubo hidratación del cemento y secado por pérdida de humedad de la solución del mucílago.

IV.3.2. Coeficientes de difusión de cloruros relación 0.45

Los resultados obtenidos para los coeficientes de difusión en ambas mezclas (agua y mucílago) de la relación 0.45, se tienen en la tabla 11 del anexo 1, y se muestran en la figura 28.

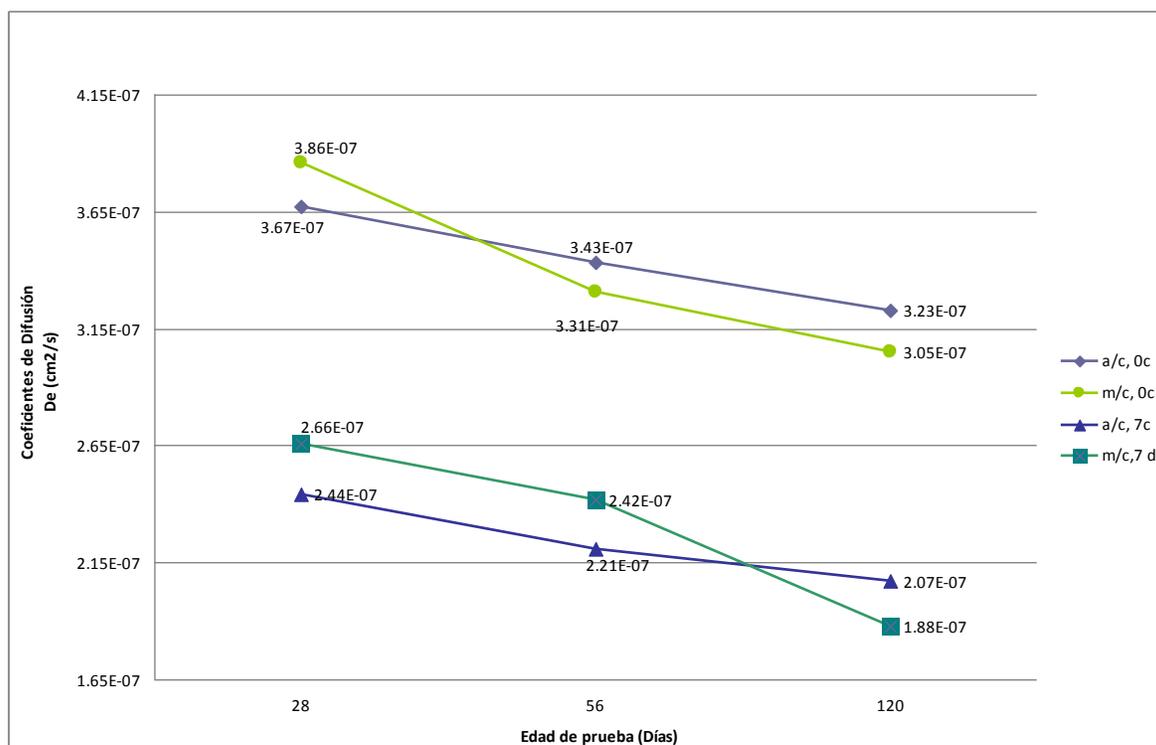


Figura 28. Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.45, a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.

En esta relación a/c y m/c se observa también el efecto que tiene el tiempo de curado al disminuir la penetración de cloruros debido a una mayor hidratación de la pasta de cemento. En lo que respecta al efecto que tiene el mucílago de nopal en el coeficiente de difusión de cloruros con respecto a la mezcla de referencia, en la gráfica anterior se observa que en ambos tiempos de curado, los especímenes elaborados con mucilago de nopal presentan una tendencia a disminuir la penetración de cloruros conforme la edad del espécimen es mayor, esto debido a que el mucílago de nopal retarda las reacciones de hidratación del cemento, presentando así una menor penetración de cloruros hasta la edad

de 120 días. La diferencia en esta edad es del 10% para los especímenes que tuvieron siete días de curado y de apenas el 6% para los que no tuvieron curado.

IV.3.2. Coeficientes de difusión de cloruros relación 0.60

Los resultados obtenidos en los especímenes de relación 0.60 en ambas mezclas de mucílago de nopal y agua se presentan en la tabla 12 del anexo 1, los cuales se muestran en la figura 29.

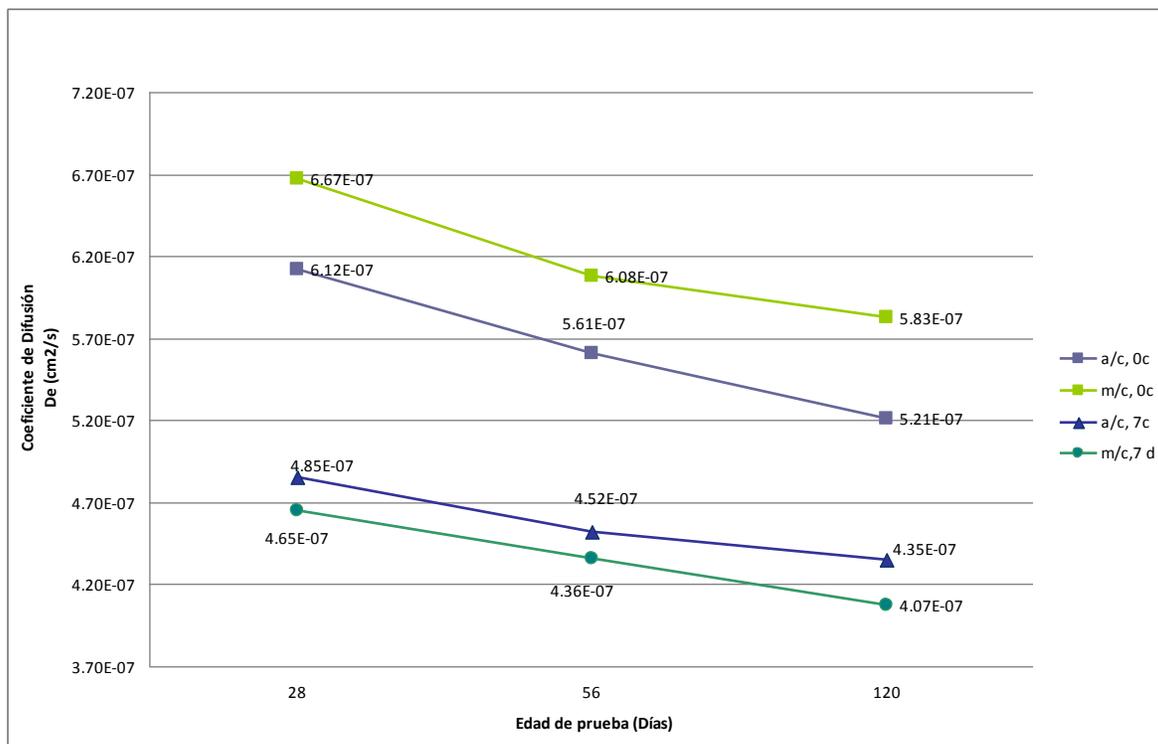


Figura 29. Coeficientes de difusión de cloruros en mezclas de concreto (agua y mucílago) relación 0.60, a edades de prueba de 28, 56 y 120 días.

Se observa en la gráfica, que para los especímenes que no tuvieron tiempo de curado, el mucílago de nopal no tuvo un efecto benéfico comparado con los especímenes elaborados con agua ya que estos últimos presentaron un coeficiente de difusión mucho menor en todas las edades de prueba, sin embargo cuando los especímenes fueron curados por siete días en húmedo, los que contenían mucílago de nopal mostraron una disminución en el coeficiente de difusión de cloruros en comparación con los que contenían sólo agua.

IV.4. Determinación del periodo de iniciación de la corrosión del acero de refuerzo.

El cálculo de la constante m se hizo usando los coeficientes de difusión obtenidos en las tres edades de prueba contra el tiempo (t) en una escala log-log y por medio de un análisis de regresión lineal se obtuvieron los valores de m presentados en la tabla 9.

Tabla 9. Valores de la constante m .

	m					
	0.30		0.45		0.60	
Tiempo de curado (días)	a/c	m/c	a/c	m/c	a/c	m/c
0	0.25	0.19	0.11	0.21	0.14	0.12
7	0.30	0.39	0.14	0.32	0.10	0.12

Los resultados obtenidos con el programa *Life 365* para una estructura de concreto con relación a/c 0.30 y m/c 0.30 se muestran en las figuras 30 y 31.

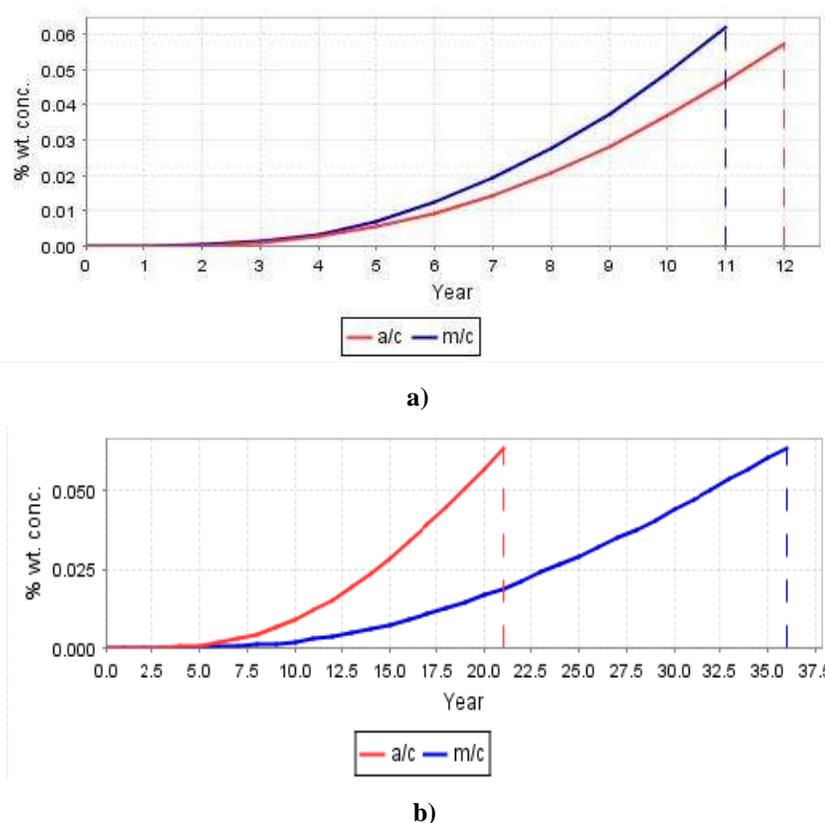


Figura 30. Iniciación de la corrosión del acero de refuerzo en la relación a/c=0.30 y m/c 0.30. a) cero días de curado, b) siete días de curado.

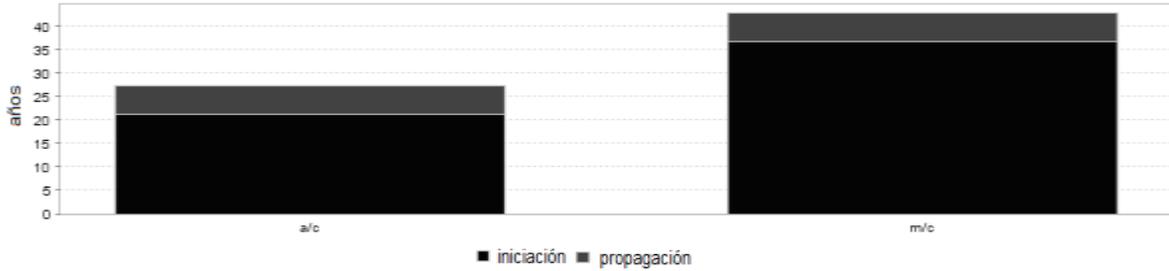


Figura 31. Vida de servicio y tiempo de propagación para las mezclas a/c 0.30 y m/c 0.30, con siete días de curado. (*Life 365*)

Para efectos de comparación y análisis los resultados se presentan en una sola gráfica por mezcla. La figura 32 ilustra el tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo para la mezclas a/c 0.30 y m/c 0.30.

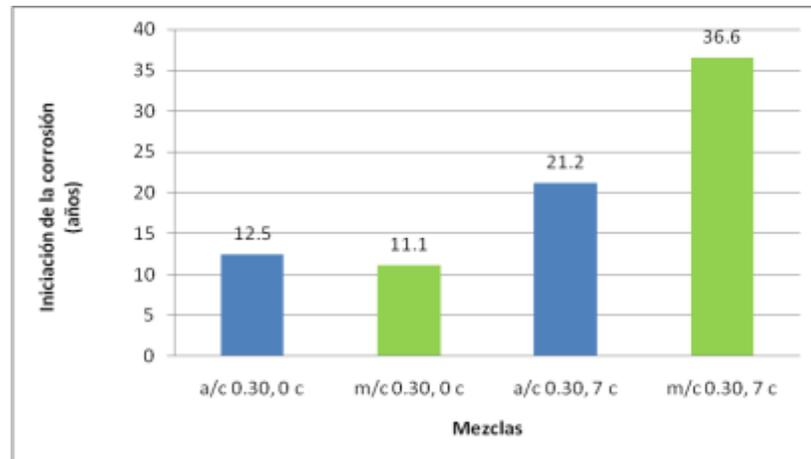


Figura 32. Predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo para las mezclas a/c 0.30 y m/c 0.30.

En la predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo, se observa en ambas mezclas, que a medida que se incrementa el tiempo de curado el tiempo de inicio de la corrosión aumenta, esto debido a una mayor hidratación del cemento logrando un concreto de mayor calidad, lo cual disminuye la penetración de los iones cloruros y por lo tanto el coeficiente de difusión de cloruros es menor, lo cual fue observado en el apartado IV.3.1 de este trabajo. Comparando ambas mezclas a/c y m/c, se observa que mucílago de nopal tiene un efecto notable cuando se tiene un curado de siete días, ya que retrasa el inicio de la corrosión en un tiempo aproximado de 15 años comparado con el concreto elaborado solamente con agua. Para la misma mezcla pero sin

tiempo de curado, el mucílago de nopal no muestra ningún efecto con respecto al tiempo de inicio de la corrosión.

Otros investigadores han descubierto que el mucílago de nopal posee propiedades de inhibidor de corrosión del acero (Acosta, 2005), lo cual incrementaría aun más el periodo de inicio de la corrosión.

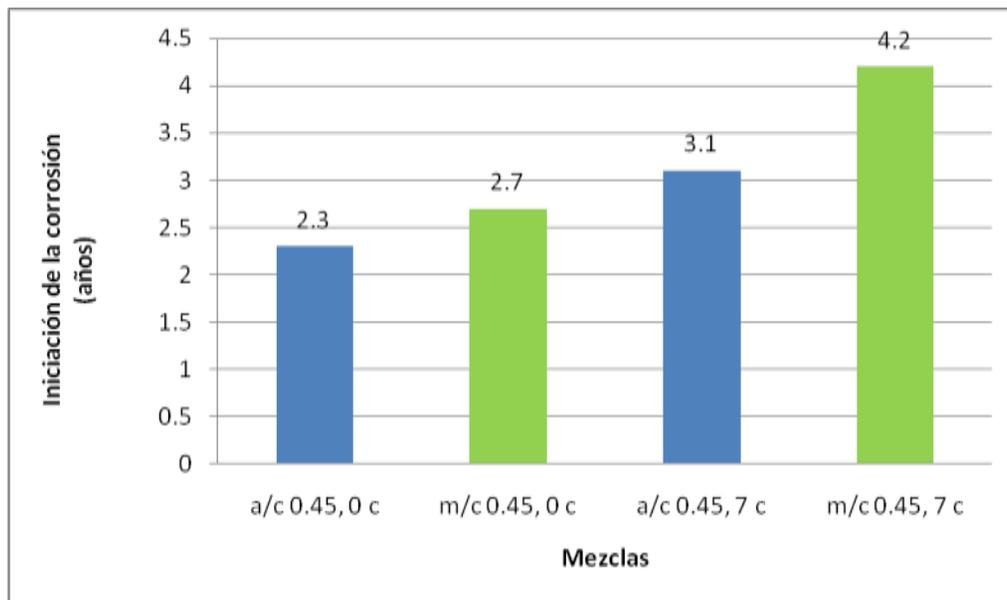


Figura 33. Predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo para las mezclas a/c 0.45 y m/c 0.45

En la figura 33 se tiene la predicción del tiempo de inicio de la corrosión en las mezclas a/c 0.45 y m/c 0.45, comparando ambas mezclas m/c y a/c, se observa que a pesar de que el mucílago de nopal incrementa el periodo de inicio de la corrosión en aproximadamente un año cuando se tiene un curado de siete días, no se puede considerar como un efecto significativo.

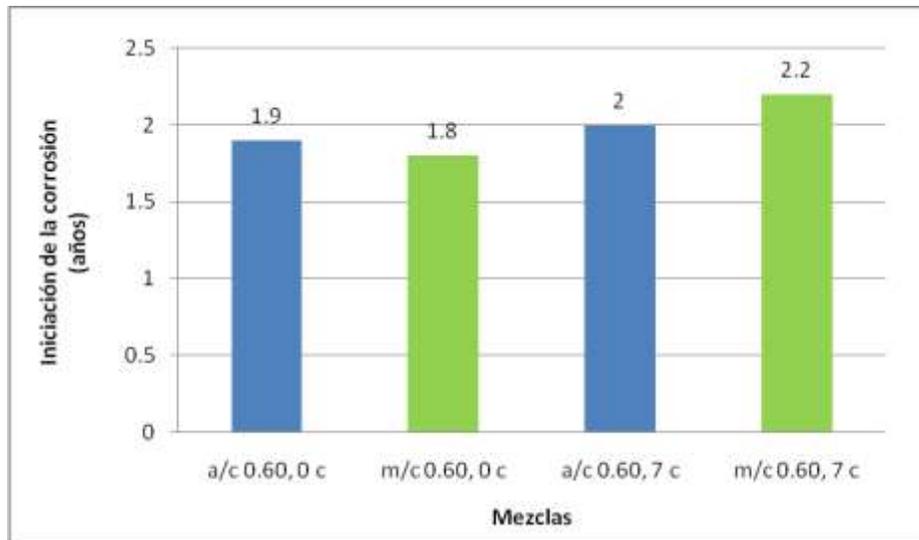


Figura 34. Predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo para las mezclas a/c 0.60 y m/c 0.60

Para las mezclas de relación a/c 0.60 y m/c 0.60, los resultados de la predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo se tienen en la figura 34, donde se observa que en ambos tiempos de curado de cero y siete días el mucílago de nopal no contribuye significativamente a retrasar el tiempo de inicio de la corrosión.

En el programa *Life 365*, también se determinó el costo del ciclo de vida para la mezcla relación a/c y m/c= 0.30 con siete días de curado, se seleccionó esta mezcla, debido a que fue en la que el mucílago de nopal contribuyó en mayor medida a incrementar el periodo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo.

Se utilizaron los datos hipotéticos mencionados en la sección III.3.3. Los datos adicionales requeridos para el análisis de costo del ciclo de vida son los siguientes: Área total de la estructura: 10,000 m², costo de 1 m³ de concreto: \$1315.00, costo de 1 kilogramo de varilla: \$16.00, costo de reparación por m² de concreto de \$5260.000, área a reparar del 10% del total por periodo de reparación, los cuales se requieren cada 10 años. La tasa de inflación considerada del 5.60% y un periodo de análisis de la estructura de 75 años. Las figuras 35 y 36 muestran las condiciones con las cuales se realizó el análisis del costo del ciclo de vida.

Costos de construcción y reparación para a/c							
Costo	Inicio (año)	Fin (año)	Intervalo	Cantidad	Unidades	\$/m2	Total
Costo de construcción	0	0	0	10,000	m2	\$561.37	\$5,613,680
Costo de reparación	27.2	75	10	1,000	m2	\$5,260.00	\$5,260,000



Figura 35. Línea del tiempo y costos para una estructura hipotética relación a/c 0.30, siete días de curado

Costos de construcción y reparación para a/c							
Costo	Inicio (año)	Fin (año)	Intervalo	Cantidad	Unidades	\$/m2	Total
Costo de construcción	0	0	0	10,000	m2	\$561.37	\$5,613,680
Costo de reparación	42.6	75	10	1,000	m2	\$5,260.00	\$5,260,000

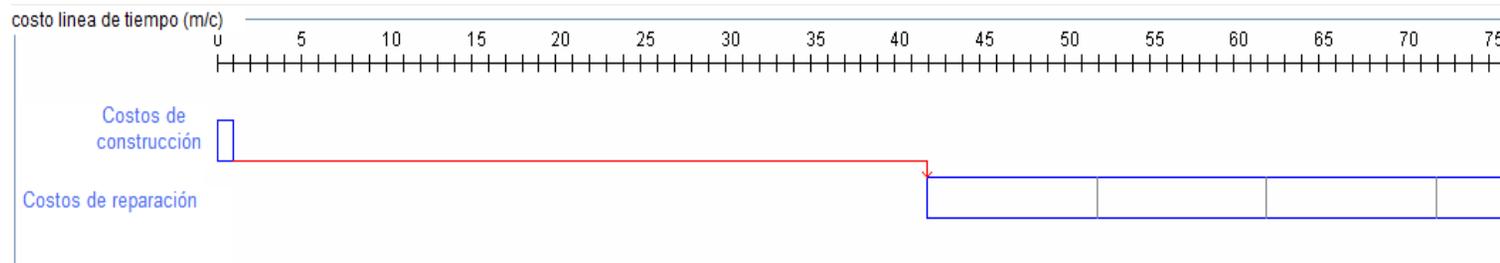


Figura 36. Línea del tiempo y costos para una estructura hipotética relación m/c 0.30, siete días de curado

Se observa en las figuras anteriores, que los costos de construcción y reparación para ambas estructuras son los mismos, la diferencia radica que el concreto conteniendo mucílago de nopal requiere menos periodos de reparación, ya que la estructura elaborada con agua necesitaría su primera reparación a los 27.2 años, mientras que la estructura de mucílago su primer periodo de reparación sería hasta el año 42.6 de vida.

Los resultados del costo de ciclo de vida a valor presente para las estructuras analizadas, se muestran en la figura 37.

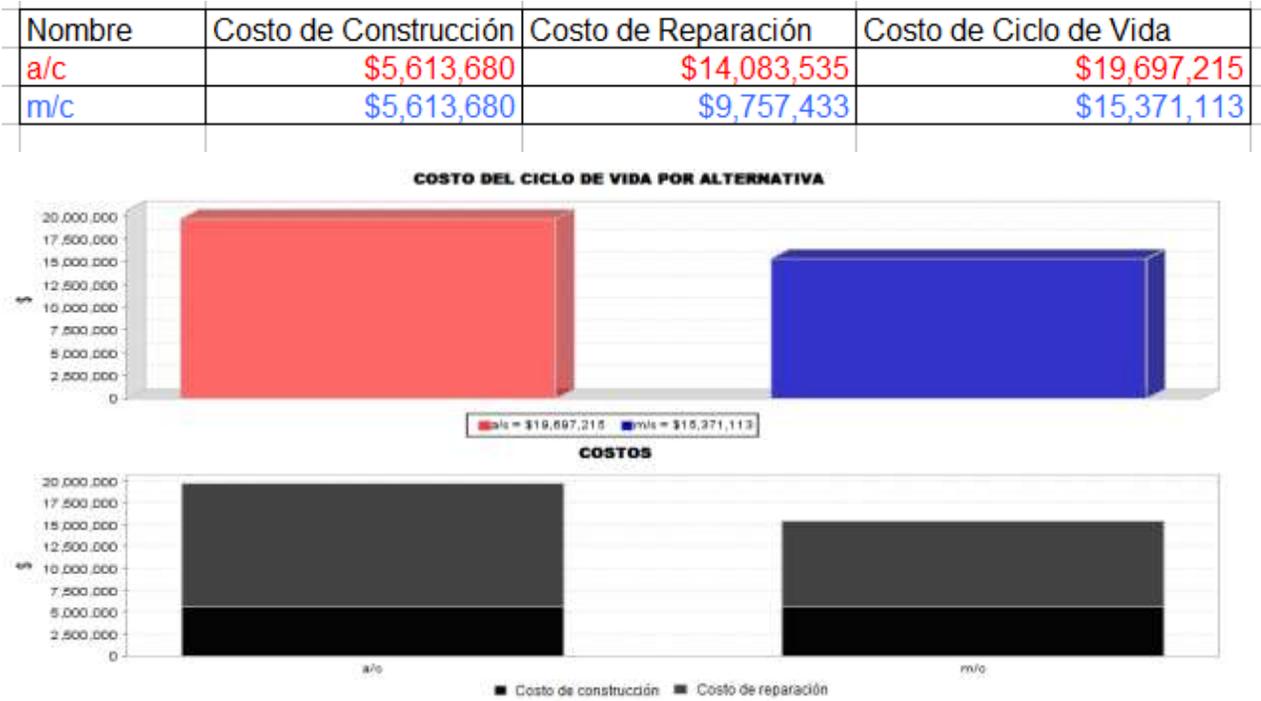


Figura 37. Costo del ciclo de vida en valor presente. Estructura hipotética a/c y m/c 0.30 con curado de siete días.

Se observa que el costo del ciclo de vida es mayor para la estructurada de concreto que contiene solo agua, siendo de \$19,697,217 mientras que la estructurada elaborada con mucílago de cemento tendría un costos de \$15,371,113, teniéndose un ahorro del 21.96% del costo (\$4,326,099).

CONCLUSIONES

- 1.- El mucílago de nopal contribuye a reducir la pérdida por humedad a una edad de 120 días, en concreto curado en húmedo por cero y siete días en las relaciones m/c 0.30, con respecto al concreto de referencia.
- 2.-En las relaciones 0.45 y 0.60, los especímenes elaborados con mucílago de nopal pierden mayor humedad por secado, lo cual se explica por la mayor cantidad de agua absorbida durante el curado por siete días con respecto a los especímenes de referencia, teniendo así mayor disponibilidad de agua para ser evaporada al ambiente.
- 3.-El mucílago de nopal contribuye a reducir la absorción capilar de agua en todas las relaciones estudiadas (m/c 0.30, m/c 0.45 y m/c 0.46), con tiempos de curado en húmedo de cero días y siete días, con respecto a mezclas elaboradas con agua en las mismas relaciones a/c.
- 4.-La porosidad capilar es menor en los especímenes que contienen mucílago en los concretos con relaciones m/c 0.30 y a/c 0.30, contrario a lo que ocurre en las relaciones a/c 0.45, 0.60 y m/c 0.45, 0.60, en las cuales la porosidad es mayor en los especímenes elaborados con mucílago de nopal.
5. El coeficiente de difusión de cloruros en las relaciones a/c 0.30 y m/c 0.30 fue menor para los especímenes que contienen mucílago de nopal a edades de prueba de 28, 56 y 120 días y con tiempos de curado en húmedo de cero y siete días. En las relaciones a/c y m/c 0.45 el mucílago de nopal contribuye a disminuir el coeficiente de difusión hasta la edad de 120 días en ambos tiempos de curado. En lo que respecta a la relación a/c y m/c 0.60 el mucílago contribuye a disminuir el coeficiente de difusión en especímenes que tuvieron un tiempo de siete días de curado en húmedo.
6. En la predicción del tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo, el mucílago de nopal tiene su mayor efecto benéfico en la relación m/c 0.30 con siete días de curado, al retardar el inicio de la corrosión aproximadamente 15 años con respecto a la mezcla de

referencia. Para las mezclas de relación m/c 0.45 y m/c 0.60, el mucílago de nopal no presenta un efecto benéfico significativo con respecto a las mezclas de referencia.

RECOMENDACIONES

1. Extraer fluido de los poros en pastas de cemento conteniendo mucílago de nopal para analizar sus características de viscosidad y su efecto real en la disminución del coeficiente de difusión de cloruros.
2. Analizar las características fisicoquímicas del nopal *Opuntia Ficus Indica* para conocer sus propiedades.
3. Probar otras formas de extracción de nopal para su uso en materiales basados en cemento.
4. Estudiar y analizar la adición de mucílago de nopal en cemento portland ordinario y compuesto para determinar el efecto de este polímero en pruebas de durabilidad como son absorción capilar de agua y penetración de cloruros.
5. Estudiar el secado de concreto conteniendo mucílago de nopal bajo condiciones de temperatura y humedad relativa controladas.

REFERENCIAS

ACI 232, IR American Concrete Institute, Farmington Hills, MI (Use of natural pozzolans in concrete)

ACI 232, 2R American Concrete Institute Farmington Hills, MI. Use of fly ash in concrete,

Acosta, T., Martínez M. (2001). *Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Sanfandilia Queretaro, México. Publicación técnica No. 181.*

Acosta, A., Martínez, M. (2005). *Nopal and aloe vera additions in concrete: electrochemical behavior of the reinforcing steel. Paper No. 05269. Corrosion 2005.*

Acosta, A. (2007). *Opuntia-Ficus-Indica (Nopal) mucilage as a steel corrosion inhibitor in alkaline media. Springer Science Business Media.*

Adnan, C. (2003). *Characteristic of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 585-593.*

Amahjour, F. (2002). *Propiedades de lechadas de cement fabricadas con cement tipo I y mezclas con cenizas volantes y humo de sílice. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandia 2002. Pp 729-737.*

Anoop, M., Balaji ., Appa, R. (2003). *A methodology for durability-based service life design of reinforced concrete flexural members. Magazine of Concrete Research, No. 3, June, pp 289-303.*

Arvind, K., Suryavanshi, R., Narayan, And George, E. Cardew. *Estimation of Diffusion Coefficients for Chloride ion penetration into structural concrete. ACI Materials Journal. September-October 2002. pp. 441-449*

ASTM, ASTM designation: C 642-97, (2000) *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.*

ASTM, ASTM, designation: C 1403-97, *Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. (2000)*

ASTM, ASTM designation: C 192 / C 192 M -05. *Standard Practice for Making and Curing Laboratory (2000)*

ASTM C94. *Standard Specification for Ready Mixed Concrete. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. (2000)*

ASTM C494 / C494M - 08a *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA*

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

Amin, E., Awad, O., El-Sayed, M., (1970). *The mucilage of Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Research* 15, 159–16

Anderson, L. (1998). *Ciencia de los materiales serie colección de los materiales colección textos politecnicos*. México, Limusa.

Bamforth, P. (1998). *Spreadsheet model for reinforcement corrosion in structures exposed to chlorides*. In *Concrete Under Severe Conditions 2* (Ed. O.E. GjØrv, K. Sakai and N. Banthia), E&FN Spon, London, pp. 64-75.

Bentz, P., Peltz, M., Kenneth, A., Jeffrey, M. (2008). *VERDiCT: Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology*. To be submitted to *Concrete International* (2008)

Borges, P; Castillo, R; Carpio, J; Pazini, J; San Juan, M (2001). *Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

Bremner, T. (2001). *Environmental aspects of concrete: Problems and solutions*. Invited paper for the plenary session of the 1st All Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete.

Cardenas, A., Arguelles, W., and Goycoole, F. (1998). *On the Possible role of Opuntia Picus-indica Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings*, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.

Chandra, S., Berntsson, L. (1980). *Some effects of polymer addition on the fire resistance of concrete*. *Cement and concrete research*. Vol. 10, pp 367-375.

Chandra, S., Aavik, J. (1982). *Influence of Black Gram (Natural Organic Material) Addition as admixture in cement mortar and concrete*.

Chandra, S. (1987) *Interaction of polymers and organic admixtures on portland cement hydration*. *Cement and concrete research*. Vol. 17, pp 875-890.

Chandra, S., Aavik, J. (1987). *Influence of proteins on some properties of portland cement mortar*. *The international Journal Cement Composites and Lightweight Concrete*. Vol. 9, Number 2.

Chandra, S., Eklund, L., and VillareL., R.(1998). *Use of cactus in mortars and concrete*. *Cement and Concrete Research*, Vol 28. No.1

Cámara Nacional del Cemento CANACEM (2008).

<http://www.canacem.org.mx/canacem.htm>

Cano, B., Alcántara, R., Chávez, D., Ruiz, G., Álvarez, Soto. (2006). *Extracto de nopal como agente modificador de viscosidad para concreto autoconsolidable, enviado a la Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología de la UNAM.*

Cano, B., Torre, A (2007). *Las Bondades del nopal. Revista Construcción y Tecnología IMCYC.*

Castro, B., Moreno, I. (2005). *Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. Ingeniería Revista Académica, enero-abril vol 9. Universidad Autónoma de Yucatán. México,*

De Lago, P. (2002) *Estructuras de concreto. Proyectar para la durabilidad.*

Escalante G., Gorokhovskiy A., Fraire Luna P., Escobar R., Magallanes R., (2005). *Cementos alternativos a base de desechos de sulfato de Calcio. Asociación Latinoamericana para el Control Patología y Recuperación de las construcciones. VIII Congreso Latinoamericano de patología de la construcción. Trabajo MX06. Pp XVI.1-XVI.8*

Fernandez, C.(1994). *Patología y terapéutica del concreto armado, tercera edición, capítulo IV, pp 69-90. España*

Gardiner, D., Lark, R., Barr, B. (2005). *Effect of conditioning temperature on the strength and permeability of normal- and high-strength concrete. Cement and Concrete Research, pp 1400– 1406*

Gardiner, D., Felker, P., Carr, T. (1999). *Cactus extract increases water infiltration rates in two soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 30 (1&2), 1707–1712*

Geankoplis, G. (1999). *Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3ª. Edición. University of Minnesota. Pp 579-584*

Goycoolea, F.M., Cárdenas, A., Hernández, G., Lizardi, J., Álvarez, G., Soto, F.J., Valdez, M., Rinaudo, M., Milas, M., Hernández, J., (2000). *Polisacáridos Aislados del Mezquite y otras Plantas del Desierto. Memorias del II Simposium Internacional sobre la Utilización y Aprovechamiento de la Flora Silvestre de Zonas Áridas. Hermosillo, Sonora, México, pp. 245–260.*

Guía de diseño CEB sobre durabilidad de estructuras de concreto (1993). Madrid España, Boletín 12.

Hall, C.,(1989). *Water sorptivity of mortars and concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No. 147.*

-
- Hall, C., William, H. (2002). *Water transport in Brick, Stone and concrete*. Spon Press
- Hanzic, L., Ilić, R. (2003) *Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete*. *Cement and concrete Research*. pp 1385 -1388
- Hernández, C. (2006) *Durabilidad e infraestructura: Retos e impacto socioeconómico*. Universidad Nacional Autónoma de México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. pp. 57-70
- Jacott, M (2004). *El uso de la energía en la industria cementera de América del Norte. Emisiones, generación de residuos y control de la contaminación*.
- Kosmatka, H., Panarese, W., (1992) *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C. México
- Jiang, Z., Sun, Z., Wang, P. (2005). *Internal relative humidity distribution in high-performance cement paste due to moisture diffusion and self-desiccation*. *Cement and concrete Research* (2006)V 36 pp 320-325.
- Kim, J., Lee, C. (1999). *Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages*. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 1921–1927.
- Lachemi M., Hossain, K.M.A., Lambros, V., Nkinamubanzi, P.-C., and Bouzabaa, N. (2004). *Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 185-193.
- Lay, S., Liebl, S., Hilbig, H., Schiebl, P.(2003) *New method to measure rapid chloride migration coefficient of chloride – contaminated concrete*. *Cement and concrete Research* V 34. pp. 421 – 427
- Lea's (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Fourth Edition. Elsevier publication Date: 2004-01-29
- López, E., 2000. *Utilización de productos naturales en la clarificación de aguas para consumo humano*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Química, ISPJAE, Universidad de la Habana, Cuba.
- Love, A., Richardson, G., Brough, A. (2007). *Composition and structure of C-S-H in white Portland cement-20% metakaolin pastes hydrated at 25oC*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 109-117.
- Luciano, J., Miletberger, M., (1999). *Predicting Chloride Difusión Coefficients from Concrete Mixture proportions*. *ACI Materials Journal*. N 96. No. 6 pp 698-702.
- Forth, J., Brooks J., Tapsir H. (2000). *The effect of unit water absorption on long-term movements of masonry*. *Cement & Concrete Composites* 22. pp 273-280

Maage, M., Helland, S., Carlsen, J. (1995). *Practical non-steady state chloride transport as a part of a model for predicting the initiation period. Chloride Penetration into Concrete.* pp. 398-406.

McGravie, D., Parolis, H. (1981). *Methylation analysis of the mucilage of Opuntia ficus-indica. Carbohyd. Res.* 88:305.

McGravie, D., Parolis, H. (1981). *The acid-labile, peripheral chains of the mucilage of Opuntia ficus-indica. Carbohyd. Res.* 88:305.

Maher, A. (2003) *Performance of concrete in a coastal environment Cement & Concrete Composites* 25. pp 539–548.

Mangat, P., Molloy, B. (1994). *Prediction of long term chloride concentrations in concrete. Materials and Structures, Vol. 27, pp. 338-346.*

Manual service life 365 (2008). Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides.

Mattone, (2005). *Sisal fibre reinforced soil with cemento or cactus pulp in bahareque technique. Cement and concrete Composites* 27, pp 611-616

Mehta, K., Monteiro P., *Concreto. Estructura, propiedades y materiales, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, (1998).*

Mehta, K., (1997). *Durability – Critical Issues for the Future. Concrete Internatonal. Pp 27-33*

Mohr, B., Nanko, H., Kurtis, K. (2005) *Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling. Cement & Concrete Composites Vol. 27 pp 435–448.*

Mohammed, T., Hamada, H. (2003). *Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete. Cement and Concrete Research Vol 33, pp1487–1490*

Nehdí, M., Duquette, J., Damatty, A. (2003). *Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 1203-1212.*

Neville, A. (1999) *Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C., México.*

Neville, A. (2001) *Maintenance and durability of concrete structures. Concrete International.*

Nielse, E., Geiker, M., (2002) *Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. Cement and concrete research. V 33 pp 133-138.*

Nokken, M., Boddy, A., Hooton, R., Thomas, A., Time dependent diffusion in concrete "three laboratory studies-. *Cement and concrete research*. March 2004

Nokken, M., Hooton, R., (2002). *Dependence of rate of absorption on degree of saturation of concrete. Cement, concret, and aggregates*. V 24. pp 20-24

Nordtest Method NT-BUILD 208. (1996). *Concrete, Hardened: Chloride Content by Volhard Titration*

Nordtest Method NT-BUILD 44 (1995). *Accelerated Chloride Penetration; Approved 1995-11*

Paya J., Monzó, Serna P., (2002). *El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas, Cuba VII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandia*. Pp 591-600

Pawers, T., Brownyard, T (1948). *Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. Portland cement association, research Bulletin, No. 22.*

Ramirez, S. (2008) *Propiedades mecánicas y microestructura de concreto conteniendo mucílago de nopal como aditivo natural. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias. Instituto Politécnico Nacional.*

Ramsey, J (1999). *Evaluación del comportamiento del adobe estabilizado con cal y goma y tuna. Tesis para obtener el titulo de ingeniero agrícola. Universidad Nacional Agrariade Molina, Lima, Perú.*

Rixom, R; Mailvaganam, P (1999). *Chemical Admixtures for Concrete. Routledge.*

Rodríguez G, (2007). *Physicochemical Characterization of Nopal Pads (Opuntia ficus indica) and Dry Vacuum Nopal Powders as a Function of the Maturation. Plant Foods Hum Nutr Vol. 62, pp. 107–112.*

Saenz, E. (2004). *Opuntia ssp mucílage's: a funtional component with industrial perspectives; Journal of Arid enviroment 57.*

Saetta, A. (2005). *Deterioration of Reinforced Concrete Structures due to Chemical–Physical Phenomena: Model-Based. Journal of Materials in civil engineering.*

Sanjuán, M., Castro, B. (2001) *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Revista IMCYC. p1.*

Sanchez, D. (2003). *Durabilidad y patología del concreto. Instituto del Concreto. Asociación Colombiana de productores de Concreto (Asocreto)*

Saric-Coric, M., Khayat, K.H., Tagnit-Hamou, A. (2003). *Performance characteristics of cement grouts made with various combinations of high range water reducer and cellulose-based viscosity modifier. Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 185-193*

Srivastava, B., Pande, C (1974). *Arabinogalactan from pods of Opuntia dillenni. Planta Medica 25; pp 92-97.*

Stanish, K., Thomas, M. (2002) *The use of bula difusión test to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients. Cement and Concrete Research. V 33. pp 55-62.*

Skoczylas, F., Burlion, N., Yurtdas, E. (2005). *About drying effects and poro-mechanical behaviour of mortars. Cement and concrete research.*

Tang, L., Nilsson, L. (1992). *Chloride diffusivity in high strength concrete at different ages.. Nordic Concrete Research, pp. 162-171.*

Taylor, H (2001). *Cement Chemistry. 2nd Edition. Thomas Telford pp 4-28.*

Thomas, M., Bentz, E. (1999). *Modelling chloride ingress by the combined processes of diffusion and convection. Modelling Service Life and Life-Cycle Cost of Steel-Reinforced Concrete. Building and fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland 20899.*

Thomas, M., Bamforth, P. (1999). *Modelling chloride diffusion in concrete; effect of fly ash and slag. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 487-495.*

Thomas, M., Hooton, R., Zibara, H. (2000). *A study of the effect of chloride binding of service life prediction. Cement and Concrete Research (pp. 1215-1223)*

Tong, L., Gjørsv, O. (2001) *Chloride diffusivity based on migration testing Cement and Concrete Research 31, pp 973–982*

Trachtenberg, S., Mayer, A. (1981). *Composition and properties of Opuntia ficus indica mucilage. Phytochemistry 20; pp 2665-2668.*

Trachtenberg, S; Mayer, A (1982) *Biophysical Properties of Opuntia ficus-indica mucilage. Phytochemistry., 21:2835.*

Manual de prácticas de laboratorio de concreto. (2001)-Universidad Autónoma de Chihuahua., Facultad de Ingeniería.

Wang, A., Zhang, Ch., Sun, W. (2003). *Fly ash effects. The active effects of fly ash. Cement and Concrete Research, 34, pp. 2057-2060.*

Wietek, B., *A Corrosion Monitoring System for Steel Reinforced Concrete. Structures in Civil Ingeniering. Ed. CMS. Gmbh-A-6073, Austria. (1996)*

ANEXO 1

Tabla 1. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.30, edad 28 días.

	Edad : 28 días		Edad : 28 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.051 ± 0.002	0.038 ± 0.006	0.036 ± 0.003	0.043 ± 0.002
Absorción después de la inmersión	3.37 ± 0.17	2.96 ± 0.24	2.59 ± 0.16	3.01 ± 0.18
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	3.53 ± 0.016	3.18 ± 0.23	2.70 ± 0.17	3.21 ± 0.19
Volumen de poros permeables	8.46 ± 0.33	7.68 ± 0.52	6.51 ± 0.37	7.67 ± 0.41
Distancia de penetración del agua (mm)				
a:				
4 horas	12.52	12.10	12.29	12.45
8 horas	16.03	13.49	14.99	14.53
1 día	19.34	15.48	19.67	18.11
2 días	20.95	16.43	22.57	19.74
3 días	22.38	17.29	24.31	20.8
6 días	24.4	18.55	26.49	22.45

Tabla 2. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.30, edad 56 días.

	Edad : 56 días		Edad : 56 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.052 ± 0.005	0.045 ± 0.003	0.045 ± 0.007	0.042 ± 0.11
Absorción después de la inmersión	3.79 ± 0.18	3.39 ± 0.11	3.64 ± 0.18	4.17 ± 0.12
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	3.95 ± 0.19	3.54 ± 0.17	3.82 ± 0.21	4.25 ± 0.51
Volumen de poros permeables	9.45 ± 0.41	8.09 ± 0.20	9.12 ± 0.45	8.42 ± 0.49
Distancia de penetración del agua (mm)				
a:				
4 horas	12.13	12.79	11.1	8.09
8 horas	14.32	15.06	13.31	9.85
1 día	17.17	18.7	18.26	14.3
2 días	19.85	20.65	21.19	17.1
3 días	21.13	21.67	22.62	18.34
6 días	22.3	23.67	24.85	20.76

Tabla 3. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.30, edad 120 días.

	Edad : 120 días		Edad : 120 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.049 ± 0.008	0.038 ± 0.008	0.040 ± 0.001	0.035 ± 0.004
Absorción después de la inmersión	3.67 ± 0.19	3.51 ± 0.56	3.18 ± 0.18	3.20 ± 0.33
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	3.72 ± 0.19	3.55 ± 0.58	3.25 ± 0.19	3.23 ± 0.76
Volumen de poros permeables	8.90 ± 0.42	8.51 ± 1.07	7.80 ± 0.42	7.78 ± 0.76
Distancia de penetración del agua (mm)				
a:				
4 horas	12.22	10.88	11.24	10.04
8 horas	14.69	12.55	13.95	11.91
1 día	19.13	14.72	19.28	13.32
2 días	21.13	16.16	22.7	16.84
3 días	22.113	16.88	24.9	17.47
6 días	23.53	18.07	26.43	18.77

Tabla 4. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.45, edad 28 días.

	Edad : 28 días		Edad : 28 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.148 ± 0.006	0.057 ± 0.004	0.093 ± 0.003	0.055 ± 0.005
Absorción después de la inmersión	4.23 ± 0.53	5.05 ± 0.04	3.55±0.22	5.07 ± 0.25
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	4.41± 0.51	5.63 ± 0.06	3.69 ± 0.24	5.65 ± 0.32
Volumen de poros permeables	10.42±1.20	11.94 ± 0.10	8.76 ± 0.51	11.97 ± 0.60
Distancia de penetración del agua (mm)				
a:				
4 horas	25.3	9.97	19.18	9.36
8 horas	32.73	12.02	25.43	11.47
1 día	46.67	16.04	39.58	15.79
2 días	54.08	18.66	49.37	18.66
3 días	57.62	20.13	55.44	20.48
6 días	62.41	22.21	63.74	23.56

Tabla 5 .Absorción capilar relación a/c y m/c 0.45, edad 56 días.

	Edad : 56 días		Edad : 56 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.149 ± 0.15	0.086 ± 0.010	0.130 ± 0.035	0.096 ± 0.009
Absorción después de la inmersión	4.65 ± 0.18	6.01 ± 0.28	4.64 ± 0.56	6.24 ± 0.26
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	4.88 ± 0.19	6.76 ± 0.37	4.85 ± 0.557	6.95 ± 0.25
Volumen de poros permeables	11.48 ± 0.39	14.04 ± 0.47	11.39 ± 1.24	14.64 ± 0.39
Distancia de penetración del agua (mm) a:				
4 horas	23	12.5	18.82	12.19
8 horas	29.95	15.28	26.57	16.14
1 día	43.43	20.3	42.87	24.82
2 días	51.22	23.09	53.78	30.52
3 días	54.94	24.74	58.69	34.02
6 días	59.7	27.29	63.28	39.06

Tabla 6. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.45, edad 120 días.

	Edad : 120 días		Edad : 120 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.140 ± 0.005	0.087±0.002	0.129 ± 0.006	0.096 ± 0.005
Absorción después de la inmersión	4.20 ± 0.18	5.95 ± 0.34	4.28 ± 0.36	5.68 ± 0.41
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	4.35 ± 0.18	6.30 ± 0.30	4.51 ± 0.28	5.89 ± 0.43
Volumen de poros permeables	10.27 ± 0.40	13.17 ± 0.57	10.61 ± 0.66	12.54 ± 0.83
Distancia de penetración del agua (mm) a:				
4 horas	23.78	12.91	20.61	14.73
8 horas	30.22	15.59	27.58	18.5
1 día	41.59	20.68	40.66	27.25
2 días	48.7	23.62	52.08	33.35
3 días	53.45	25.12	58.26	36.76
6 días	62.05	27.51	67.91	41.88

Tabla 7. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.60, edad 28 días.

	Edad : 28 días		Edad : 28 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.205 ± 0.004	0.106 ± 0.007	0.146 ± 0.019	0.084 ± 0.004
Absorción después de la inmersión	4.39 ± 0.30	5.02 ± 0.54	4.36 ± 0.21	5.19 ± 0.58
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	4.47 ± 0.28	5.35 ± 0.59	4.40 ± 0.22	5.47 ± 0.67
Volumen de poros permeables	10.41 ± 0.58	11.44 ± 0.91	10.17 ± 0.44	11.50 ± 1.01
Distancia de penetración del agua (mm)				
a:				
4 horas	33.8	17.97	25.36	14.39
8 horas	44.6	22.83	33.46	18.01
1 día	68.48	29.99	52	25.37
2 días	77.33	34.67	64.94	30.14
3 días	80.76	37.55	73.21	33.96
6 días	82.56	41.51	80.09	39.85

Tabla 8. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.60, edad 56 días.

	Edad : 56 días		Edad : 56 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.191 ± 0.008	0.099 ± 0.006	0.136 ± 0.006	0.080 ± 0.003
Absorción después de la inmersión	5.18 ± 0.34	5.50 ± 0.64	4.72 ± 0.27	5.98 ± 0.45
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	5.43 ± 0.57	6.08 ± 0.64	4.81 ± 0.27	6.41 ± .48
Volumen de poros permeables	12.33 ± 1.03	12.56 ± 1.02	11.06 ± 0.58	13.11 ± 0.78
Distancia de penetración del agua (mm)				
a:				
4 horas	25.91	14.93	21.28	11.46
8 horas	34.54	18.5	27.32	14.58
1 día	54.14	25.38	38.97	20.94
2 días	65.35	29.5	47.59	25.54
3 días	71.74	32.31	53.64	28.93
6 días	74.03	37.1	60.21	35.48

Tabla 9. Absorción capilar relación a/c y m/c 0.60, edad 120 días.

	Edad : 120 días		Edad : 120 días	
	Curado : 0 días		Curado : 7 días	
	a/c	m/c	a/c	m/c
Sorptividad (mm/min^{1/2})	0.196 ± 0.016	0.109 ± 0.016	0.142 ± 0.011	0.092 ± 0.004
Absorción después de la inmersión	5.66 ± 0.42	5.81 ± 0.77	5.62 ± 0.36	6.50 ± 0.60
Absorción después de la inmersión y hervido 5 hr	5.85 ± 0.43	6.52 ± 1.07	5.72 ± 0.40	6.83 ± 0.72
Volumen de poros permeables	13.32 ± 0.82	13.67 ± 1.06	13.01 ± 0.78	14.48 ± 1.35
Distancia de penetración del agua (mm)				
a:				
4 horas	24.15	14.98	17.94	11.87
8 horas	33.66	19.42	25.11	15.9
1 día	54.19	27.38	40.7	24.47
2 días	64.87	32.91	54.04	31.16
3 días	67.61	35.93	59.89	35.09
6 días	69.84	40.46	64.78	41.19

Tabla 10. Coeficientes de difusión relación 0.30

0.30	28 días		56 días		120 días	
	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)
	Cs	Coef. de variación (Cs)	Cs	Coef. de variación (Cs)	Cs	Coef. de variación (Cs)
a/c	4.59 E-08 ± 5.20E-07	11.34	3.97E-08 ± 2.81E-07	7.09	3.61E-08 ± 1.85E-07	5.12
0 curado	0.46	11.61	0.49	4.55	0.52	4.02
m/c	4.16E-08 ± 4.56E-08	10.96	3.61E-08 ± 3.71E-07	10.27	3.45E-08 ± 3.965E-07	9.83
0 curado	0.49	9.85	0.405	1.02	0.35	7.52
a/c	3.14E-08 ± 9.48E-07	3.01	2.57E-08 ± 2.46E-07	9.56	2.34E-08 ± 2.26E-07	9.68
7 curado	0.437	3.26	0.47	7.91	0.51	6.60
m/c	2.93E-08 ± 2.87E-07	9.79	2.24E-08 ± 3.04E-08	13.58	1.90E-08 ± 1.228E-07	6.452
7 curado	0.42	7.14	0.40	4.02	0.428	9.007

Tabla 11. Coeficientes de difusión relación 0.45

0.45	28 días		56 días		120 días	
	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)
	Cs	Coef. de variación (Cs)	Cs	Coef. de variación (Cs)	Cs	Coef. de variación (Cs)
a/c	3.67E-07 ± 2.63E-06	7.18	3.43E-07 ± 1.78E-06	5.20	3.23E-07 ± 1.049E-06	3.24
0 curado	0.44	3.07	0.471	3.70	0.468	1.96
m/c	3.86E-07 ± 4.16E-07	2.63	3.31E-07 ± 2.64E-06	8.006	3.05E-07 ± 1.65E-06	5.42
0 curado	0.46	5.44	0.443	5.998	0.4257	3.90
a/c	2.44E-07 ± 1.28E-06	5.24	2.21E-07 ± 1.90E-06	8.61	2.07E-07 ± 2.29E-06	11.10
7 curado	0.36	3.34	0.43	6.48	0.45	1.56
m/c	2.66E-07 ± 2.29E-06	8.636	2.42E-07 ± 1.82E-06	7.53	1.85E-07 ± 1.031E-07	5.43
7 curado	0.449	3.245	0.49	2.92	0.51	5.45

Tabla 12. Coeficientes de difusión relación 0.60

0.60	28 días		56 días		120 días	
	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)	De Coeficiente de difusión (cm ² /seg)	Coef. de variación (De)
	Cs	Coef. de variación (Cs)	Cs	Coef. de variación (Cs)	Cs	Coef. de variación (Cs)
a/c	6.12E-07 ± 7.04E-06	11.52	5.61E-07 ± 4.37E-06	7.78	5.21E-07 ± 8.14E-06	1.56
0 curado	0.44	4.19	0.42	9.53	0.44	1.13
m/c	6.67E-07 ± 7.11E-06	10.66	6.08E-07 ± 4.90E-06	8.05	5.83E-07 ± 7.02E-06	11.240
0 curado	0.45	1.56	0.46	10.12	0.46	4.53
a/c	4.85E-07 ± 3.83E-06	8.378	4.52E-07 ± 2.50E-06	5.54	4.35E-07 ± 2.58E-06	5.951
7 curado	0.40	0.44	0.42	2.11	0.440	0.776
m/c	4.65E-07 ± 2.96E-06	6.38	4.36E-07 ± 3.13E-06	7.203	4.07E-07 ± 5.82E-06	14.306
7 curado	0.42	3.06	0.455	2.123	0.4621	4.630

ANEXO 2

CÁLCULO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL ACI							
MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1497	1601.6	2.6	0.7	0.41		3/4"
ARENA	1583	1609	2.57	1.29	6.12	2.88	
CEMENTO			2.9				
DISEÑO DE MEZCLAS POR EL MÉTODO DEL ACI							
f'c =	375	kg/cm ²					
Rev =	75	mm	revenimiento deseado				
rel A/C =	0.46	Valor interpolado tabla 3					
REL A/C =	0.45	relación agua/cemento correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1					
Agua =	202	kg/m ³	Para agregado de 3/4" y rev de 75 mm sin aire incluido				
No es grava redondeada por lo tanto no se disminuye en un 10% el contenido de agua							
Cemento =	449	kg/m ³	> a 335 kg/m ³ de cemento necesario para una zona agresiva				
Grava =	0.620	993.0	kg/m ³				
superplastificante =		1.3	kg/m ³				
AGUA =	0.202						
CEMENTO =	0.155						
GRAVA =	0.382						
AIRE =	0.000	7% para una zona agresiva, sin embargo no se cuenta con aditivo inductor de aire, por lo tanto no se va incorporar aire					
TOTAL =	0.739						
Diferencia =	0.261						
ARENA =	671.52	kg/m ³					
corrección por humedad							
GRAVA =	997.1	kg					
ARENA =	712.6	kg					
Total de agua a adicionarse para 1 m ³ de concreto =				172.4	kg/m ³		
RESUMEN TOTAL DE MATERIALES PARA 1 m ³ DE CONCRETO							
Kg/m ³							
	agua	cemento	grava	arena	superplast.		
	172.45	448.89	997.06	712.61	1.35		
PARA 20 LITROS							
	agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)		
	3.45	8.98	19.94	14.25	26.9		
correccion de agua por adición de superplastificante PLASTOL 4000							
	agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)	70% Liquido	
	3.43	8.98	19.94	14.25	26.93	30% solido	

CÁLCULO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL ACI							
MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1497	1601.6	2.6	0.7	0.064		3/4"
ARENA	1583	1609	2.57	1.29	6.30	2.88	
CEMENTO			2.9				
DISEÑO DE MEZCLAS POR EL MÉTODO DEL ACI							
f'c =	265	kg/cm ²					
Rev =	75	mm	revenimiento deseado				
rel A/C =	0.59		Valor interpolado tabla 3				
REL A/C =	0.60	relación agua/cemento correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1					
Agua=	202	kg/m ³	Para agregado de 3/4" y rev de 75 mm sin aire incluido				
No es grava redondeada por lo tanto no se disminuye en un 10% el contenido de agua							
Cemento =	337	kg/m ³	> a 335 kg/m ³ de cemento necesario para una zona agresiva				
Grava =	0.620	993.0	kg/m ³				
superplastificante =		1.0	kg/m ³				
AGUA =	0.202						
CEMENTO =	0.116						
GRAVA =	0.382						
AIRE=	0.000 7% para una zona agresiva, sin embargo no se cuenta con aditivo inductor de aire, por lo tanto no se va incorporar aire						
TOTAL =	0.700						
Diferencia =	0.300						
ARENA =	770.97 kg/m ³						
corrección por humedad							
GRAVA =	993.6 kg						
ARENA =	819.5 kg						
Total de agua a adicionarse para 1 m ³ de concreto =			169.7	kg/m ³			
RESUMEN TOTAL DE MATERIALES PARA 1 m ³ DE CONCRETO							
Kg/m ³							
agua	cemento	grava	arena	superplast.			
169.69	336.67	993.63	819.54	1.01			
PARA 20 LITROS							
agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)			
3.39	6.73	19.87	16.39	20.2			
correccion de agua por adición de superplastificante PLASTOL 4000							
agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)	70% Liquido		
3.38	6.73	19.87	16.39	20.20	30% solido		

DISEÑO DE CONCRETO HPC									
PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO (AITCIN Y METHA, 1990)									
MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA		
GRAVA	1497	1601.6	2.6	0.7	4.151		3/4"		
ARENA	1583	1609	2.57	1.29	0.064	2.88			
CEMENTO			2.9						
CV			2.6						
PASO 1 DETERMINACION DE LA RESISTENCIA									
La resistencia que se quiere obtener se escoge de la tabla 1									
						65	Mpa		
El contenido de agua lo proporciona el método de diseño para diferentes resistencias:									
						153	kg/m3		
El contenido de aire también es proporcionada por el método, donde esta cantidad es la que se atrapa durante el mezclado del concreto									
Contenido de aire =						0.02	m3		
PASO 2 VOLUMEN TOTAL DE MATERIAL CEMENTANTE									
El valor recomendado y para tener una resistencia óptima es de									
						0.35	%		
y el valor recomendado para la porción de agregados es de									
						0.65	%		
total de material cementante es =						0.177			
PASO 3 PORCION DE AGREGADOS									
De acuerdo al método la porción de agregados varían de acuerdo a la resistencia del concreto a calcularse, y para la resistencia selecciona la proporción es de:									
arena		grava							
2		3							
PASO 4 PESO DE LOS AGREGADOS PARA 1 m3 DE CONCRETO									
Contenido de arena =						668.2	kg/m3		
contenido de grava =						1014	kg/m3		
PASO 5 CALCULO DE CONTENIDO DE CEMENTO									
Existen 2 opciones para adicionar cemento en el concreto:									
opción 1 concreto sin adiciones minerales =				100		% de cemento			
opción 2 reemplazo parcial de cemento por algún material cementante suplementario, en este caso por ceniza volante y la relación es de:									
cemento		C.V							
1		0							
RELACION OPTIMA POR EL MÉTODO=									
Para este caso se maneja la opción 2 que es de 60:40 (CP +CV)									
cemento		C.V							
1		0							
0.18		0							
contenido de cemento por 1m3 de concreto es =						513.3	513.3 kg/m3		
contenido de ceniza volante por 1m3 de concreto es =						0	0 kg/m3		
<i>relación real de C.V por peso de cemento</i>									
PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES									
Se toman en cuenta el porcentaje de absorción y humedad de los materiales									
		Arena		-8.192132 kg/m3					
		Grava		34.99314 kg/m3					
En donde la cantidad total de los materiales en estado SSS para 1m3 es:									
		ARENA		660.007868 kg/m3					
		GRAVA		1048.99314 kg/m3					
PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO									
				26.801008 Lts/m3					
cantidad total de agua por 1m3 de concreto es:						126.198992 lts/m3			
Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000									
Donde el fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:						2	ml/kg de cemento		
Así mismo la cantidad de sólido que contiene el superplastificante es de 30%						sólido			
y está compuesto por otro 70% de agua ==						0.7			
				% de liquido					
RESUMEN TOTAL DE MATERIALES									
para 1m³					para 20 lts				
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Ceniza volante	arena	grava	cemento	agua	ceniza volante
660.01	1048.99	513.30	126.20	0.00	13.20	20.98	10.27	2.52	0.00
superplastificante mínimo adicionada =				20.532		mililitros			
Agua aportada por el superplastificante =				0.0143724		litros			
RESUMEN TOTAL DE MATERIAL PARA 105 LTS									
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Ceniza volante	super (ml)				
13.20	20.98	10.27	2.51	0.00	20.53				
RELACION AGUA/CEMENTO=				0.30					