



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

**Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chetumal**

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

**Estudio de la durabilidad de concretos con propiedades de auto
reparación a base de silicato de sodio y alcohol de
polivinilo.**

**Tesis que para obtener el Grado de:
Maestro en Construcción**

Presenta:

Arq. Mario David Sánchez Ruíz

Director:

Dr. Luis Felipe Jiménez Torrez.

Chetumal, Quintana Roo, México, marzo de 2021



Chetumal, Quintana Roo, a 26/enero/2021
Asunto: Aprobación de Tesis

M. EN C. ALBERTO YELADAQUI TELLO
COORDINADOR
MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por este medio tenemos a bien comunicarle que el trabajo de tesis "ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS CON PROPIEDADES DE AUTO REPARACIÓN A BASE DE SILICATO DE SODIO Y ALCOHOL DE POLIVINILO", del alumno **Mario David Sánchez Ruiz (No.M11106042)**, ha sido revisado y aprobado por el Comité Tutorial, por lo que puede continuar con los trámites para la obtención del grado de Maestro en Construcción.

Sin otro particular quedamos de Usted.

A T E N T A M E N T E

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Luis Felipe Jiménez Torrez.
DIRECTOR DE TESIS

DR. Julio César Cruz Argüello.
ASESOR DE TESIS

DR. Danna Lizeth Trejo Arroyo.
ASESORA DE TESIS

Dra. Mayra Polett Gurrola.
ASESORA DE TESIS





DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y AUTENTICIDAD

Por medio de la presente, **Mario David Sánchez Ruiz** declaro que el trabajo de investigación titulado **"ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS CON PROPIEDADES DE AUTO REPARACIÓN A BASE DE SILICATO DE SODIO Y ALCOHOL DE POLIVINILO"** y dirigido por el **Dr. Luis Felipe Jiménez Torrez** como tema de tesis para la obtención del Título de **Maestro en Construcción**, es original. El presente trabajo de investigación es el resultado de mi trabajo personal, el cual no ha sido copiado de investigaciones previas publicadas en medios digitales y/o impresos. Las ideas, definiciones y/o ilustraciones tomadas de trabajos previos han sido citadas de la manera correcta para dar crédito a los autores originales. Declaro que el presente trabajo de investigación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, y tampoco ha sido publicado en sitio alguno. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y cometer plagio es objeto de sanciones legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el presente documento, así como de los derechos sobre la obra presentada. Asimismo, me hago responsable ante el Instituto Tecnológico de Chetumal o terceros de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello y sometiéndome a las normas vigentes del Instituto Tecnológico de Chetumal y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

A T E N T A M E N T E

Mario David Sánchez Ruiz

Chetumal, Quintana Roo, a 27 de enero de 2021.



Av. Insurgentes no. 330, esq. Andrés Quintana Roo, Col. David Gustavo Gutiérrez, Apdo. Postal 267, C.P. 77013, Chetumal, Quintana Roo, México.
Tel. (983) 8322330 y 8321019 ext. 101
itchetumal.edu.mx





DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en este documento titulado **"ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS CON PROPIEDADES DE AUTO REPARACIÓN A BASE DE SILICATO DE SODIO Y ALCOHOL DE POLIVINILO"** proviene de las actividades de investigación durante el periodo que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis dentro del programa de **MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN** en el Instituto Tecnológico de Chetumal del Tecnológico Nacional de México y que dicha información le pertenece en términos de la Ley de Propiedad Industrial, por lo que no me reservo ningún derecho sobre ello.

A T E N T A M E N T E

Mario David Sánchez Ruiz

Chetumal, Quintana Roo, a 27 de febrero de 2021.





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Chetumal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Chetumal, Quintana Roo, 09 febrero/2021

OFICIO: W-014/2021
Asunto: Autorización de impresión

C. SÁNCHEZ RUIZ MARIO DAVID
MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Habiendo cumplido con los requisitos para la obtención del grado de MAESTRO EN CONSTRUCCIÓN, establecidos en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México y que competen a la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunico que:

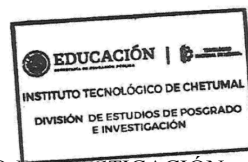
SE LE CONCEDE LA AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE LA TESIS

“ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS CON PROPIEDADES DE AUTO REPARACIÓN A BASE DE SILICATO DE SODIO Y ALCOHOL DE POLIVINILO”

Sin otro particular quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica ®
Cultura, Ciencia y Tecnología para la Superación de México ®

DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



C.c.p. Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Minutario.
ACB/Gaby



Av. Insurgentes no. 330, esq. Andrés Quintana Roo,
Col. David Gustavo Gutiérrez, Apdo. Postal 267, C.P.
77013, Chetumal, Quintana Roo, México.
Tel. (983) 8322330 y 8321019 ext. 101
itchetumal.edu.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Chetumal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Chetumal, Quintana Roo, 03/marzo/2021

OFICIO: W-033/2021

ASUNTO: Nombramiento de Jurado

C.C. INTREGRANTES DEL JURADO:

PRESIDENTE:	Luís Felipe Jiménez Tórrez Doctorado en Ingeniería Opción Construcción, Cédula de grado 9412480
SECRETARIO	Julio César Cruz Arguello Doctorado en Electroquímica, Cédula de grado 10145329
VOCAL:	Danna Lizeth Trejo Arroyo Doctorado en Ciencias en Metalurgia Ciencias de los Materiales, Cédula de grado 10145328
VOCAL SUPLENTE:	Mayra Polett Gurrola Maestría en Electroquímica, Cédula de grado 11733764

Por este medio les informo que el Examen de Grado del Arquitecto Mario David Sánchez Ruíz con número de control M11106042, estudiante del Instituto Tecnológico de Chetumal del programa de Maestría en Construcción, se realizará el día 08 de Marzo de 2021 a las 12:00 h., vía remota, defendiendo la tesis "ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS CON PROPIEDADES DE AUTO REPARACIÓN A BASE DE SILICATO DE SODIO Y ALCOHOL DE POLIVINILO", por lo que se les pide su puntual asistencia.

Sin otro particular reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica ®
Cultura, Ciencia y Tecnología para la Superación de México ®

DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Insurgentes no. 330, esq. Andrés Quintana Roo,
Col. David Gustavo Gutiérrez, Apdo. Postal 267, C.P.
77013, Chetumal, Quintana Roo, México.
Tel. (983) 8322330 y 8321019 ext. 101
itchetumal.edu.mx



A mis hijos

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

A todos los profesores que me brindaron su valioso conocimiento durante mi estancia en el posgrado, les agradezco infinitamente por su dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Al Instituto Tecnológico de Chetumal, por permitirme cursar la Maestría en Construcción dentro de sus instalaciones, lo cual me permitió superarme tanto personal como profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante el desarrollo de la maestría.

En estas últimas líneas me gustaría agradecer infinitamente la ayuda de varias personas que me apoyaron durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo, en especial a la Dra. Danna Lizeth Trejo Arroyo, a la Dra. Mayra Polett Gurrola, a la Arq. Susana Maritza Hernández Ramos, al Dr. Julio César Cruz Argüello, y por último pero no por ello menos importante, a mi mentor el Dr. Luis Felipe Jiménez Torrez, que sin su apoyo y paciencia esta tesis no se hubiera realizado.

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de grado y hubiere sido aprobado por el sínodo, sólo su autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

RESUMEN

La mayoría de los procesos de deterioro en el concreto se desencadenan y potencian cuando las estructuras sufren algún tipo de agrietamiento. Mediante el agrietamiento se genera el medio para que agentes externos nocivos penetren con mayor velocidad y causen alteraciones desde el interior de la matriz, mermando así el desempeño de los elementos estructurales. Por lo anterior, se ha vuelto imprescindible para la tecnología del concreto, diseñar materiales menos propensos a los diferentes tipos de agrietamiento, garantizando con ello su durabilidad para el tiempo de vida previsto.

En tiempos recientes se ha desarrollado una línea de investigación que se enfoca en el proceso denominado auto reparación del concreto. La auto reparación permite a los concretos recuperar su estructura y prestaciones originales aún después de que éstas fueran modificadas por esfuerzos externos o internos. Un gran número de investigaciones que evalúan la efectividad de la técnica de auto reparación, se basan principalmente en el estudio de las características físicas y mecánicas, sin embargo, escasa literatura se ha enfocado en pruebas de durabilidad, las cuales resultan fundamentales para la aplicación tecnológica de esta técnica, pues garantizan que las estructuras tengan un buen desempeño a lo largo del tiempo, especialmente cuando se localizan en ambientes agresivos.

Por lo anterior, éste trabajo da continuidad a un estudio sobre concreto auto reparable, realizado en el Instituto Tecnológico de Chetumal, el cual obtuvo resultados satisfactorios en pruebas físicas de densidad, porosidad y absorción, en pruebas mecánicas de resistencia a la compresión y en la reducción del micro agrietamiento. Sin embargo, para validar su aplicación, además de analizar entre otros aspectos el costo-beneficio de su implementación, es necesario evaluar las propiedades de durabilidad de dichos concretos ante las principales cargas ambientales de la región y con ello poder determinar la viabilidad de su aplicación, por consiguiente, en el presente trabajo se evaluó el desempeño de dichos concretos ante pruebas de: a) densidad total, porosidad y absorción, b) avance del frente de carbonatación natural y c) penetración de cloruros por difusión.

Palabras clave: auto reparación, impregnación al vacío, durabilidad, penetración de cloruros, carbonatación.

ABSTRACT

Most deterioration processes in concrete are triggered and enhanced when concrete structures undergo some type of cracking. Through cracking, the means is generated for external agents to penetrate with greater speed and cause alterations from the interior of the matrix, thus reducing the performance of the structural elements, therefore, it has become essential for concrete technology, to design materials less vulnerable to different types of cracking, which guarantee its durability for the expected service life time.

In recent times, a line of research has been developed that focuses on the process called self-healing concrete. Self-healing allows concretes to recover their original structure and performance even after they have been modified by external or internal forces. A large number of investigations that evaluate the effectiveness of the automatic repair technique are based mainly on the physical and mechanical characteristics, however, a few literatures has focused on durability tests, which are fundamental for the technological application of this technique, as they reveal that the structures have a good performance over time, especially when they are placed in aggressive environments.

Therefore, this work gives continuity to a study on self-healing concrete, carried out at the Instituto Tecnológico de Chetumal, which obtained satisfactory results in physical tests of density, porosity and absorption, in mechanical tests of compressive strength and in the reduction of micro-cracking, improving the quality of concrete. However, to validate its application, in addition to analyzing, among other aspects, the cost-benefit of its application, it is necessary to evaluate the durability properties of said concretes in the face of the main environmental loads in the region and thus be able to determine the viability of its application. Therefore, in the present work the performance of these concretes was evaluated in the face of tests of: a) total density, porosity and absorption, b) advance of the natural carbonation front and c) penetration of chlorides by diffusion.

Keywords: self-healing, vacuum impregnation, durability, chloride penetration, carbonation.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	4
Planteamiento del Problema	4
1.1 Antecedentes.	5
1.2 Marco Teórico.	9
1.2.1 El concreto.	9
1.2.1.1 Aspectos generales.	9
1.2.1.2 Propiedades del concreto.....	12
1.3 Preguntas de investigación.	13
1.4 Hipótesis.	14
1.5 Objetivos.	14
1.5.1 Objetivo General.	14
1.5.2 Objetivos Específicos.....	14
1.6 Justificación.	14
1.7 Marco Conceptual.	16
CAPÍTULO 2	18
Estado del arte	18
2.1 Durabilidad en el concreto.	19
2. 1. 1. Aspectos generales.	19
2. 1. 2. Requisitos de durabilidad.	23
2. 1. 3. Factores que afectan la durabilidad del concreto.....	23
2.1.3.1 Permeabilidad.....	24
2.1.3.2 Porosidad.....	24
2.1.2.3 Capilaridad.....	26
2.1.2.4 Difusión.....	26

2. 1. 4. Corrosión del acero de refuerzo.	27
2.1.4.1 Aspectos generales.	27
2. 1. 4. Penetración de iones cloruro.	30
2.1.4.1 Generalidades.	30
2.1.4.2 Mecanismo de reacción y condiciones que lo favorecen.	32
2. 1. 4. Carbonatación.	33
2.1.4.1 Generalidades.	33
2.1.4.2 Mecanismo de reacción.	34
2.1.4.2 Factores que favorecen la carbonatación.	35
2.2 Auto reparación en el concreto.	36
2.2.1 La auto reparación mediante el uso de silicato de sodio.	37
2.2.1 Durabilidad en concretos auto reparables.	39
CAPÍTULO 3.	42
Metodología.	42
3.1 Marco metodológico.	42
<i>Nivel de la investigación.</i>	<i>42</i>
<i>Diseño de investigación.</i>	<i>42</i>
3.2 Delimitación del área de estudio.	43
3.3 Variables.	44
Variables Dependientes.	44
Variables Independientes.	44
Variables a Controlar.	44
3. 4 Método de trabajo y diseño experimental.	44
3.4.1 Resumen del programa experimental.	45
3.4.2 Diagrama de flujo del procedimiento experimental.	45
3.5 Etapas del diseño experimental.	46
3.6 Experimentación.	47
3.6.1 Etapa uno.	47
3.6.2 Etapa dos.	48
3.6.3 Etapa tres.	52
3.6.4 Etapa cuatro.	57
CAPÍTULO 4.	71

Análisis y resultados.....	71
4.1 Descripción del estado inicial de los cilindros.	68
4.2 Densidad, absorción y porosidad.	69
4.2.1 Densidad aparente.	71
4.2.2 Porcentaje de absorción.....	73
4.2.3 Porcentaje de porosidad.....	75
4.3 Carbonatación.....	77
4.4 Penetración de cloruros.	81
CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES.....	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXOS.....	96

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	(a) Efecto de la corrosión en el acero de refuerzo en ambiente marino y (b) Descascaramiento del concreto de recubrimiento de una estructura en ambiente agresivo.	20
Figura 2.2	Agrietamiento en estructuras de concreto (a) Agrietamiento por servicio en elemento estructural y (b) Agrietamiento inducido en elemento de concreto.	22
Figura 2.3	Mecanismos de transporte de líquidos y gases en el concreto. (a) Permeabilidad y (b) Porosidad	25
Figura 2.4	Mecanismos de transporte de líquidos y gases en el concreto. (a) Absorción capilar y (b) Difusión.	27
Figura 3.1	Diagrama de flujo del procedimiento experimental.	45
Figura 3.2	Etapas del diseño experimental.	46
Figura 3.3	Resguardo de cilindros en el laboratorio de construcción del ITCH.	47
Figura 3.4	(a) Recopilación de los cilindros, (b) Pesaje de cilindros, (c) Medición de altura y (d) Medición de diámetro.	48
Figura 3.5	Secado de los cilindros en horno.	49
Figura 3.6	(a) Inmersión de las probetas en agua y (b) Determinación de la masa.	50
Figura 3.7	(a) Inmersión de las probetas en agua en ebullición y (b) Pesaje en inmersión.	50
Figura 3.8	(a) Pesaje de fenolftaleína (b) Medición de alcohol etílico y (c) Agitación de solución.	53
Figura 3.9	(a) Marcas intermedias en las probetas y (b) Medición del frente de carbonatación.	53
Figura 3.10	(a y b) Cuantificación de carbonatación (c) Probetas de control (arriba) y experimentales (abajo) inferiores (d) Coloración de la fenolftaleína en función del pH.	54
Figura 3.11	Gráfica de predicción del tiempo de vida útil del acero de refuerzo en función del avance del frente de carbonatación.	57
Figura 3.12	Corte de rodajas previo a la inmersión.	58
Figura 3.13	Pulverización de rodajas.	59
Figura 3.14	(a) Sal para acuario empleada y (b) Disolución en el agitador magnético.	60

Figura 3.15	(a) Cilindros inmersos en solución salina (b) Cilindros después de inmersión.	61
Figura 3.16	(a) Marcado de cilindros (b) Corte de cilindros.	61
Figura 3.17	(a) Marcado de circunferencias y (b) Barrenado en cada circunferencia.	62
Figura 3.18	(a) Polvos y rodajas barrenadas y (b) Polvos de concreto cribado en tamiz No. 50.	63
Figura 4.1	Gráfica de la densidad total promedio de cilindros experimentales y de control.	72
Figura 4.2	Gráfica de porcentaje de absorción promedio de los cilindros experimentales y de control.	73
Figura 4.3	Gráfica de porcentaje de porosidad promedio de los cilindros experimentales y de control.	75
Figura 4.4	Gráfica del frente de carbonatación corregido para una superficie plana infinita.	80
Figura 4.5	Gráfica de los resultados del coeficiente de carbonatación.	80
Figura 4.6	Perfiles de cloruros en especímenes sumergidos en solución salina.	83
Figura 4.7	Difusión de cloruros en especímenes sumergidos en solución salina.	84

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 3.1	Delimitación de los trabajos de investigación.	43
Tabla 3.2	Composición química promedio del agua sintética de mar.	60
Tabla 4.1	Datos de los cilindros de control.	68
Tabla 4.2	Datos de los cilindros experimentales.	69
Tabla 4.3	Datos de los pesos obtenidos en los cilindros de control.	70
Tabla 4.4	Datos de los pesos obtenidos en los cilindros experimentales.	70
Tabla 4.5	Resultados obtenidos en las pruebas físicas de concretos de control.	70
Tabla 4.6	Resultados obtenidos en las pruebas físicas de concretos experimentales.	71
Tabla 4.7	Medidas de carbonatación obtenidas de los cilindros de control.	77
Tabla 4.8	Medidas de carbonatación obtenidas de los cilindros experimentales.	78
Tabla 4.9	Valores obtenidos al ajustar la profundidad de carbonatación a superficie plana infinita.	78
Tabla 4.10	Periodos de inmersión y de corte de rodajas en cilindros.	82
Tabla 4.11	Valores obtenidos en el análisis químico de los polvos de concreto.	82

LISTA DE ABREVIATURAS

ACI – **American Concrete Institute** – Instituto Americano del Concreto.

ASTM - **American Society for Testing and Materials** – Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

CAPUFE - Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos.

CEB - **Euro-International Committee for Concrete** – Comité Euro-Internacional del Concreto.

CP - Cemento Portland.

CPC - Cemento Compuesto.

CPO – Cemento Portland Ordinario.

CPEG - Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno.

CPS - Cemento Portland con Humo de Sílice.

DCPD - Diciclopentadieno

ECC – **Engineering Cementitious Composite** - Compuestos de cemento de ingeniería.

ITZ – **Interfacial Transition Zone** – Zona Interfacial de Transición.

LWA – **Lightweight aggregate** – Agregado ligero.

Mt – Millones de toneladas.

MPa – Megapascales.

RILEM - **The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures** - La Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción.

SCM - **Supplementary Cementitious Material** – Material Cementante Suplementario.

PVA - Polyvinyl Alcohol – Alcohol de polivinilo.

UNE – Asociación Española de Normalización.

C-S-H - Gel de sílice hidratado.

3CaO·SiO₂ – C₃S Silicato tricálcico.

2CaO·SiO₂ – C₂S Silicato dicálcico.

3CaO·Al₂O₃ – C₃A Aluminato tricálcico.

4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ – C₃AF Ferroaluminato tetracálcico.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el cemento y el concreto de Cemento Portland (CP) se utilizan ampliamente y constituyen el material estructural preponderante en el mundo (Basheer et al., 2001). El cemento es el segundo material más utilizado, tan sólo por debajo del agua. Durante mucho tiempo se asumió que el concreto era un material resistente a los embates del medio ambiente y que tenía un tiempo de vida prolongado, lamentablemente se ha demostrado que no siempre es así (Hernández-Castañeda et al., 2006). A pesar de que con los años se han ido mejorando las propiedades de los concretos y cementos (Bildirici, 2019), el alto y creciente costo de construcción, así como el valor económico e interrupción asociados con la rehabilitación, renovación o reemplazo total o parcial de instalaciones de infraestructura dañadas, continúan generando un gran impacto en el medio ambiente, en el consumo de recursos naturales y económicos, en la disposición de residuos y no menos importante, en la seguridad humana (Glasser et al., 2008). Por lo tanto, alcanzar concretos durables, no es solo una cuestión de rendimiento técnico y económico, sino también una cuestión de mitigación del impacto negativo en el medio ambiente (Alexander et al., 2008).

Generar estructuras de alto rendimiento, que satisfagan los requisitos de diseño para el cual fueron planteadas, conlleva además, la inclusión de nuevas tecnologías que potencien el desempeño del concreto y garanticen su tiempo de vida útil. La auto reparación es una línea de investigación con amplio potencial para satisfacer dichos requerimientos. De acuerdo a la RILEM 221-SHC la auto-reparación es referida a *cualquier proceso propio de un material que implica una recuperación y mejoramiento de su desempeño después de una acción previa que disminuyó el desempeño inicial*. Es por esto, que la tecnología de la auto reparación ha estudiado y evaluado en una cantidad importante de trabajos, las técnicas y adiciones que permitan desarrollar principalmente, concretos más durables (Van Tittelboom & De Belie, 2013), (Talaiekhosani et al., 2014), (Tang et al., 2015), (Muhammad et al., 2016).

Diversas técnicas de auto reparación se han diseñado (Talaiekhosani et al., 2014), teniendo resultados prometedores: las adiciones minerales (Ahn & Kishi, 2010), la micro encapsulación (Ullah et al., 2016), (Neon Gan & Shahabudin, 2019), e incluso a nivel biológico la adición de

bacterias que desencadenan dicho proceso (Jonkers, 2011), (Vijay et al., 2017). A pesar de que las investigaciones se acrecentan, la auto reparación del concreto estructural aún es un campo que tiene mucho que desarrollar y grandes huecos que cubrir, porque además de evaluar la calidad de la reparación y las condiciones físicas y mecánicas que recuperan las estructuras, es necesario determinar su desempeño en cuestiones de durabilidad (De Belie et al., 2019). Lo anterior es debido a que, a pesar de que un concreto manifieste reducción del agrietamiento por efecto de la auto reparación, no existe una garantía de que su durabilidad se vea favorecida (Ahirkar & Bhatkar, 2019).

Consecuentemente, se vuelve relevante para un estudio con aplicación tecnológica, evaluar el desempeño de los nuevos materiales en función de las condiciones particulares de cada región, con lo cual se asegurará la viabilidad del trabajo desarrollado.

El proceso de auto reparación se ha propuesto como medida para generar concretos más durables en la región sur del estado de Quintana Roo, México. La técnica empleada se basa en la impregnación y encapsulación del agregado grueso como medida para reparar el agrietamiento desde la matriz cementante, ocasionado por la falla del agregado o en la zona de interface pasta-agregado (*Interfacial Transition Zone*, ITZ).

Como se ha estipulado en innumerables trabajos, la calidad del concreto dependerá en gran medida de la calidad de la materia prima (Mačiulaitis et al., 2009). Los agregados pétreos, al participar en más del 60% del volumen del concreto (NMX-C-111-ONNCCE-2018), se convierten en punto crucial para el diseño de concretos (NMX-C-155-ONNCCE-2014). Sin embargo, la composición y características de los agregados varía dependiendo la región (Yam et al., 2003). En el caso de los agregados distribuidos en la Península de Yucatán, se ha estudiado que están compuestos principalmente por piedra caliza y dolomita (Rivero et al., 2019). Su resistencia mecánica es baja, por lo que, a pesar de que se controlen los demás factores en la elaboración de concretos, la calidad del agregado no permitirá obtener concretos con resistencias superiores a 28 MPa (Solís et al., 2012), aún para relaciones a/c de hasta 0.5, debido a que la resistencia del concreto está en función de la resistencia máxima de los agregados. Así mismo, el agregado se ha caracterizado como un material altamente poroso, con porcentajes de absorción de agua de hasta el 9.8% y con contenidos de humedad en un rango que puede variar

del 5 al 10% (Yam et al., 2003). Como resultado de éstas características, así como de las condiciones climatológicas de la región, la calidad del concreto merma en las estructuras, propiciando con ello, un decremento significativo de la durabilidad (Rivero et al., 2019). Así pues, las propiedades físicas mencionadas con anterioridad, cobran importancia y se vuelven atractivas en el proceso de impregnación y encapsulación del agregado, pues favorecen el ingreso de agentes con propiedades de reparación al interior del concreto, a través de su mayor componente (agregado grueso), asegurado con esto, la distribución homogénea del agente reparador.

Un objetivo primordial de los materiales con propiedades de auto reparación consiste en mejorar la durabilidad del concreto estructural ante cargas ambientales agresivas, dado que la durabilidad repercute en la sustentabilidad de los recursos naturales, económicos y de funcionalidad.

CAPÍTULO 1

Planteamiento del Problema

1.1 Antecedentes.

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción, con el se edifica una enorme cantidad de infraestructura alrededor del mundo (Alexander et al., 2008). Se estimó que su producción del 2006 al 2018 creció más del 60%, llegando al 2018 a un consumo de más de 5 mil millones de toneladas (Mt). En 2018, América del norte ocupó el 5to. lugar en consumo, siendo este de 150 Mt (Asociación de Productores de cemento, 2019), (Vásquez, 2016). A pesar de la alta demanda en su consumo y producción, el concreto sigue siendo susceptible a muchas fuentes de daño que reducen su durabilidad (Gjørsv, 2011).

Los problemas de durabilidad restan eficiencia a las estructuras y en la mayoría de los casos están destinadas a no cumplir con su vida de servicio útil estimada (periodo en el que una estructura conserva su seguridad, funcionalidad y estética) (Clifton, 2000). Las cuestiones de durabilidad tienen una importante repercusión económica a escala mundial (Kusuma et al., 2015), implicando aspectos como: costos de operación y construcción, costos y pérdidas por mantenimientos, remodelaciones o reparaciones periódicas de estructuras afectadas o incluso por la sustitución parcial o total de elementos que se han deteriorado a un punto crítico (Hernández-Castañeda et al., 2006). Es importante destacar que todos los países sufren, en mayor o menor grado, un deterioro de sus estructuras, sobre todo los países desarrollados, los cuales según estadísticas, invierten más del 40% de los recursos destinados a la construcción en el mantenimiento, reparación correctiva y rehabilitación de estructuras existentes (Neville, 2001).

En México, el deterioro de la infraestructura se presenta sobremanera en elementos de concreto reforzado (Del Valle, Pérez, et al., 2001), que incluyen: puentes, tanques, edificios, canales, puertos, plantas de almacenamiento, aeropuertos, etc. (SCT, 2016), siendo un problema serio que afecta no sólo a las dependencias responsables de ellas, sino que repercute indirectamente a la sociedad, debido a que estas estructuras quedan inservibles mucho tiempo

antes de alcanzar el final de su vida útil (Celis et al., 2006), (Vásquez, 2016), disminuyendo con ello la calidad de vida de quien requiere dichos servicios.

Debido a la gran cantidad de consecuencias que surgen del deficiente tiempo de vida útil de las estructuras, resulta imperante considerar la durabilidad de los diversos tipos de obras de concreto en todo el proceso de diseño, realizando un correcto diagnóstico de las condiciones medio ambientales que afectarán a las estructuras a lo largo de su vida, ya que de ellas dependerá en gran medida el grado de deterioro que alcancen (Clifton, 2000). Las diferentes aplicaciones que tiene el concreto requieren distintas concepciones de durabilidad, de acuerdo con la naturaleza del uso y agresividad del medio ambiente (Glasser et al., 2008).

El problema más común de durabilidad en estructuras de concreto reforzado es, sin lugar a dudas, la aparición de corrosión en el acero de refuerzo (Huet et al., 2003), la cual ha sido ampliamente reportada en la literatura de las últimas tres décadas (Goyal et al., 2018), dentro de estos casos reportados se mencionan dos principales mecanismos que propician este ataque, el primero es el inducido por el ion cloruro y el segundo por la presencia de CO₂ en el medio (Stefanoni et al., 2018) en ambos casos el agrietamiento es una de las causas que propicia y acelera el proceso de deterioro del concreto reforzado (Kayondo et al., 2019), debido a que lo hace susceptible al ataque de dichos agentes agresivos, los cuales, en determinadas condiciones de concentración, temperatura y humedad, aumentan la velocidad de daño drásticamente (Belleghem, 2017).

Las grietas pueden formarse en cualquier etapa de la vida útil del concreto y la mayoría de ellas comienzan internamente donde no son observables por años hasta que ya son necesarias reparaciones, las cuales no garantizan que las estructuras recuperen su condición inicial (Clifton, 2000), (Kayondo et al., 2019). Partiendo de lo anterior el desarrollo de concretos auto reparables se ha convertido en punto crucial de los investigadores. En la última década se han estudiado un gran número de técnicas para promover la auto reparación (Muhammad et al., 2016), estas técnicas incluyen en su mayoría, la incorporación de agentes ajenos a la mezcla de concreto, que desencadenan dicho proceso de auto reparación en elementos de concreto que han sufrido agrietamiento, reparando grietas incluso en horas (Van Tittelboom & De Belie, 2013). Estudios recientemente publicados, emplean agregado ligero (Alghamri et al., 2016) y agregado

calizo (Hernández Susana, 2018) como medio para transportar agentes que propician la auto reparación en estructuras dañadas por agrietamiento desde la matriz del concreto. En éstas investigaciones se aprovecharon las condiciones de porosidad y absorción de los agregados para ser impregnados con soluciones, que una vez incorporados en la pasta de cemento y avanzado el proceso de fraguado, permitieron la formación adicional de productos de hidratación, mejoraron la ITZ y redujeron el micro agrietamiento (Alghamri et al., 2016). El proceso de impregnación y encapsulación del agregado posee una ventaja significativa por sobre otras técnicas, esta es que, el agregado como materia prima, representa un volumen importante del concreto y tiene la posibilidad de distribuirse homogéneamente en la mezcla, sin afectar las propiedades resistentes del concreto (como ha ocurrido con adición de microcápsulas o incorporación de tubos cristalinos) (Gilford et al., 2014), (Helene et al., 2018)), además de que ataca uno de los principales puntos de falla en el concreto, que es la interfase entre la pasta de cemento y el agregado, pues ésta zona es el primer contacto entre el agente reparador y el concreto (Scrivener et al., 2004).

El empleo del silicato de sodio y alcohol de polivinilo (PVA, Polyvinyl Alcohol) como agentes de reparación tiene su fundamento en la literatura revisada, de la cual se identificaron las siguientes particularidades: el silicato de sodio es un material ampliamente utilizado en diferentes industrias, incluyendo la de la construcción. Se utiliza en el tratamiento de aguas como medio alcalinizante, principalmente para evitar la corrosión y sedimentos en las tuberías de agua potable y drenajes. Su uso se extiende además a la estabilización y consolidación de suelos blandos, brindándoles mayor resistencia (Garnicas et al., 2002). Del mismo modo, el silicato de sodio se emplea de manera extensa como adhesivo, favoreciendo las propiedades de resistencia a la compresión longitudinal y disminuyendo la absorción de la humedad en los elementos aplicados. Específicamente, en materiales cementantes actúa como agente ligante, mejorando las propiedades de dureza, resistencia mecánica y química de los cementos que lo contienen (Giannaros et al., 2016), (Mao et al., 2020). También se ha reportado su utilización para mejorar la durabilidad de concretos a través de su aplicación como impermeabilizante o mediante la técnica de impregnación directa (Park et al., 2014). Como resultado del análisis y valoración de las propiedades del silicato de sodio, se propuso como agente reparador en

concretos, en los cuales ha demostrado que la cristalización del mismo y su aportación de sílice para generar mayor cantidad de gel de sílice hidratado (C-S-H) propicia concretos menos porosos y con menor posibilidad de transportar agentes externos dañinos (Giannaros et al., 2016).

Por otro lado, el PVA es un polímero con excelentes propiedades físicas y químicas (Liu et al., 2020),(Kang et al., 2018). Es ampliamente utilizado como agente impermeabilizante, adhesivo y sellador en cementos, morteros y concretos, confiriéndoles estabilidad química, minimizando el agrietamiento y la absorción de humedad. En los métodos de auto reparación ha cumplido principalmente la función de sellador o protector en sistemas de encapsulación, teniendo como objetivo fundamental proteger al agente reparador en el proceso de mezclado, así como del ambiente en la matriz cementante en la que están incrustados los sistemas (Alghamri & Al-Tabbaa, 2020). Una de las características que le confiere esta propiedad es su estabilidad a un pH alcalino. En este estudio su uso permitió encapsular al agregado con el fin de retener el silicato de sodio impregnado, evitando posibles fugas prematuras en la mezcla de concreto (Alghamri et al., 2016). Debido a las características mencionadas con anterioridad, ambos compuestos tienen un potencial significativo para mejorar la durabilidad de los concretos.

Como resultado de lo anterior, es importante evaluar y analizar detalladamente el comportamiento del material en condiciones de exposición y servicio, lo cual puede ayudar a diagnosticar, predecir y prevenir los posibles problemas que enfrentará, ya que después de todo, resulta mucho menos costoso generar estudios que prevengan y establezcan los niveles de agresividad corrosiva para el acero de refuerzo que combatir los daños una vez manifiestos en la infraestructura.

1.2 Marco Teórico.

1.2.1 El concreto.

1.2.1.1 Aspectos generales.

El concreto es un material compuesto. Los elementos que lo conforman son: el cemento (15%), agregados grueso y fino (60 a 75%), agua (22%) y en ocasiones aditivos (3%) (ACI 211.3R-97, 1997) (NMX-C-155-ONNCCE-2014).

1.2.1.1.1 El cemento.

El cemento se obtiene de la pulverización del clínker, el cual es producido por la calcinación de materiales calcáreos y arcillosos a una temperatura promedio de 1450°C, seguido de un enfriamiento súbito y la adición del 5% de sulfato de calcio (yeso) (Taylor, 1997a).

El clínker está compuesto principalmente de 4 minerales cristalinos (MacLaren & White, 2003) que son:

- El silicato tricálcico (alita del 50 al 60%) ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) el cual desarrolla la resistencia inicial y calor de hidratación.
- El silicato bicálcico (belita del 20 al 30%) ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) es el que desarrolla la resistencia a largo plazo.
- El aluminato tricálcico (celita del 6 al 10%) ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) que regula el proceso de fraguado y las resistencias a corto plazo. Su estabilidad química es buena frente al agua de mar, pero muy débil a los sulfatos.
- El ferroaluminato tetracálcico (felita del 6 al 10%) ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) no aporta resistencia mecánica pero su presencia es necesaria por el aporte de fundentes de hierro en la fabricación de cemento.

Estos minerales reaccionan con el agua para crear fuertes enlaces mecánicos (Taylor, 1997a). En una reacción de hidratación del cemento Portland, los principales óxidos (C_3S y C_2S) reaccionan con el hidrógeno (H^+ del agua) para formar geles de silicato de calcio hidratado (gel C-S-H) (Aïtcin & J Flat, 2016). Estos geles, que ocupan la mayoría de volumen (hasta 70%) de los productos de hidratación, son los aglutinantes y los principales responsables de las características físicas y mecánicas de morteros y concretos (Dunuweera & Rajapakse, 2018). Además del gel C-S-H, un producto de la hidratación de estos óxidos es el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) o portlandita; el cual, puede continuar reaccionando con la sílice para formar más gel C-S-H, lo que puede implicar el aumento de la resistencia tardía en el concreto (Bullard et al., 2011).

Tipos de cemento.

En la actualidad los materiales cementantes más aplicados e importantes son: el cemento Portland y los cementos puzolánicos (Bildirici, 2019). Dependiendo de la proporción en que se encuentren los compuestos principales, se tendrá un tipo de cemento con características y propiedades específicas. De acuerdo a la composición de los cementos, la normativa mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014 los clasifica de la siguiente manera:

CPO - Cemento Portland Ordinario.

CPP - Cemento Portland Puzolanico.

CPEG - Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno.

CPC - Cemento Compuesto.

CPS - Cemento Portland con Humo de Sílice.

La composición entre uno y otro cemento favorecen o limitan las propiedades de durabilidad en los concretos.

1.2.1.1.2 Los agregados pétreos.

Los agregados son materiales pétreos naturales seleccionados; materiales sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, o materiales producidos por expansión o calcinación. De acuerdo a la normativa mexicana (N·CMT·2·02·002/02), (NMX-C-111-ONNCCE-2018) los agregados para concreto hidráulico se clasifican en:

a. Agregado fino:

Es arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 75 μm (malla N°200) y 4.75 mm (malla N°4), pudiendo contener finos de menor tamaño.

b. Agregado grueso:

Puede ser grava natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, escorias de altos hornos enfriadas en aire o una combinación de dichos materiales, con partículas de tamaño máximo, generalmente comprendido entre 19 mm (3/4") y 75 mm (3").

c. Fragmentos de roca:

Son los agregados con tamaño mayor de 75 mm (3") y una masa máxima de 30 kg, como los boleos y la piedra braza, entre otros, que se utilizan comúnmente para fabricar concreto ciclópeo.

d. Agregado ligero:

Son los agregados finos o gruesos que, por su baja densidad, se utilizan en la fabricación de concreto estructural ligero, de baja masa volumétrica y resistencia limitada a la compresión, constituidos predominantemente por materiales inorgánicos de estructura celular, preparados por expansión, calcinación o fusión incipiente de productos tales como escorias de altos hornos, arcillas comunes, diatomitas, cenizas volantes, lutitas y pizarras, o bien, mediante otros tratamientos de materiales naturales tales como piedra pómez, perlitas, tezontles, escorias y tobas.

1.2.1.1.3 El agua.

El agua es el componente que se utiliza para generar las reacciones químicas en los cementantes del concreto hidráulico o del mortero de CP. Puede ser agua potable, es decir, aquella que por sus características químicas y físicas es útil para el consumo humano o que cumpla con los requisitos de calidad establecidos en la normatividad mexicana (NMX-C-122-ONNCCE-2019).

1.2.1.2 Propiedades del concreto.

De manera general se han establecido (de acuerdo a la normatividad ONNCCE, reglamento del IMCyC, ASTM, ACI, UNE, etc.) algunos de los parámetros que debe satisfacer el concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido, estas propiedades son:

1. Trabajabilidad. Se define como la facilidad con la cual pueden mezclarse los componentes, resultando en una mezcla que puede ser manejada, transportada, colocada, consolidada y acabada con poca pérdida de homogeneidad. El concreto debe ser trabajable pero no debe segregarse ni sangrar excesivamente.

2. Estabilidad volumétrica. Un concreto de calidad, debe mantener un volumen constante a lo largo del proceso de fraguado con un máximo de expansión normado. La expansión debida a las reacciones químicas entre los ingredientes del concreto puede ocasionar pandeo y la contracción al secarse puede ocasionar grietas.

3. Resistencia. Generalmente se determina por la resistencia final de una probeta en compresión; pero, en ocasiones se mide también en función de la capacidad de flexión o de tensión. Como el concreto suele aumentar su resistencia en un periodo largo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad. La resistencia a la compresión se define como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en mega pascales (MPa), libras por pulgada cuadrada (psi) o en kg/cm^2 a una edad de 28 días y se le designa con el símbolo f'_c .

4. Escurrimiento plástico. Es una deformación que ocurre con carga constante durante largo tiempo. La deformación del concreto continúa, pero con una rapidez que disminuye con el tiempo. Es aproximadamente proporcional al esfuerzo con cargas de trabajo y aumenta cuando se incrementa la proporción agua-cemento; disminuye cuando aumenta la humedad relativa.

5. Hermeticidad. Se refiere a la capacidad del concreto de refrenar o retener el agua sin escapes visibles.

6. Durabilidad. El concreto debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a los cuales estará sometido en el servicio.

El concreto de cemento Portland está bien caracterizado en la literatura y ampliamente normado (tanto la materia prima, como el material en estado plástico y endurecido) a nivel mundial, sin embargo, la incorporación de nuevas técnicas o procedimientos generan la necesidad de evaluar la viabilidad que tienen dichos concretos ante factores que afectan la durabilidad de las estructuras. El concreto auto reparable, evaluado con anterioridad por (Hernández Susana, 2018) mostró resultados satisfactorios en el proceso de auto reparación en micro agrietamiento, a pesar de ello, no es garantía que cumpla la condición de un concreto durable sometido a ambiente marino (ambiente agresivo). A raíz de este planteamiento se formularon las siguientes preguntas de investigación.

1.3 Preguntas de investigación.

El concreto con propiedades de auto reparación elaborado con agregado impregnado en contraste con un concreto normal;

- ¿Tiene diferencias en densidad, absorción y porosidad?
- ¿Disminuye el proceso de carbonatación?
- ¿Reduce la difusión de cloruros?

1.4 Hipótesis.

Los concretos elaborados con agregado calizo impregnado con Na_2SiO_3 y encapsulado con PVA tendrán mejores propiedades de durabilidad que los concretos normales.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo General.

Evaluar la durabilidad de concretos con propiedades de auto reparación, que emplearon agregado calizo impregnado con Na_2SiO_3 y encapsulado con PVA.

1.5.2 Objetivos Específicos.

1. Determinar las propiedades físicas de absorción, densidad y porosidad en concretos con agregado impregnado y encapsulado.
2. Evaluar la resistencia a la carbonatación en especímenes de concreto con agregado calizo impregnado y encapsulado.
3. Determinar la resistencia a la penetración del ion cloruro mediante un proceso de difusión, en especímenes de concreto con agregado calizo impregnado y encapsulado.

1.6 Justificación.

La industria de la construcción es el mayor consumidor de materiales de nuestra sociedad. Dicho consumo alcanza el 40% del total de los recursos y está asociado al peso, volumen y dinero involucrados en dicha industria (Meyer, 2009). Desde el punto de vista de la producción, los materiales empleados en la construcción generan un gran impacto tanto en el entorno local como global, como es el caso de la producción del cemento. Por lo anterior, una mayor conciencia ambiental, traducida a una optimización en el uso del concreto como material de

construcción en equilibrio con el entorno natural, representa un desafío primordial para la industria de la construcción.

A escala internacional, el deterioro de la infraestructura de concreto se ha convertido en uno de los retos más graves y exigentes que enfrenta la industria de la construcción. Dado que las estructuras de concreto constituyen una parte enorme e importante de la infraestructura nacional en muchos países, la condición y el rendimiento de estas estructuras son imprescindibles para la productividad de la sociedad.

Actualmente, la industria de la construcción está experimentando numerosos problemas en cuanto al tiempo de vida útil del concreto. Este daño prematuro, tiene su origen en una mala comprensión de los requisitos particulares: un diseño inicial inadecuado, una instalación defectuosa o una falta de atención a la necesidad de proporcionar un mantenimiento continuo y regular (Hernández-Castañeda et al., 2006). Una falla o un nivel de servicio inferior al previsto pueden tener consecuencias adversas graves para el valor del edificio, los costos operativos, la comodidad y seguridad de los ocupantes, así como un impacto en los recursos y medio natural. La operación, el mantenimiento y la reparación de estructuras de concreto consumen mucha energía y recursos, generan una gran carga medioambiental y grandes cantidades de residuos. Por lo tanto, la poca durabilidad y la vida útil prematura de muchas estructuras de concreto representan no solo problemas técnicos y económicos, si no también, problemas ecológicos y de sostenibilidad.

La implementación de materiales auto reparables es un campo con amplio potencial para asegurar e incrementar la vida útil de las estructuras de concreto. En un estudio anterior se evaluó el efecto de la impregnación de silicato de sodio en las partículas de los agregados gruesos y su posterior recubrimiento con PVA en un concreto con el fin de desencadenar la auto reparación. En dicho trabajo se caracterizó el desempeño físico y mecánico del concreto, así mismo el efecto de la auto reparación en un micro agrietamiento inducido. Éste y otros estudios en los que se propone la adición de silicato de sodio demuestran que este compuesto tiene potencial uso como agente reparador, en primer lugar por la cristalización del silicato y en segundo lugar por el aporte de sílice, la cual contribuye a la formación de gel C-S-H, mecanismo

que incrementa las propiedades mecánicas y disminuye la absorción capilar de agua de los elementos de concreto (Sivasubramanian & Gino, 2019).

1.7 Marco Conceptual.

1. Agente agresivo.

Componente del medio ambiente al que es atribuible la acción corrosiva sobre el acero.

2. Agrietamiento.

Roturas que se manifiestan en el concreto siguiendo una trayectoria única o ramificada.

3. Corrosión.

Oxidación destructiva de un metal/aleación por el medio que lo rodea.

4. Corrosividad.

Corrosividad o potencial corrosivo de un medio.

5. Electrodo.

Metal en contacto con un medio electrolítico.

6. Espesor de recubrimiento.

Mínima distancia libre entre cualquier punto de la superficie lateral de una barra y el paramento más próximo de la pieza.

7. Degradación del concreto.

Pérdida o reducción de las propiedades físico-químicas del concreto.

8. Ion cloruro.

Los cloruros son sales que resultan de la combinación del gas cloro (ion negativo) con un metal (ion positivo).

9. Impregnación del agregado.

Incorporación de las moléculas de un líquido a los poros e intersticios de los agregados de piedra caliza triturada, por acción del vacío.

10. Medio ambiente.

Entorno o condiciones físicas y químicas de un material o sistema.

11. Medio marino.

Entorno en el cual los principales factores corrosivos son las partículas de NaCl que el viento dispersa.

12. Porosidad.

Representa el total de huecos existentes en el material, es decir, tanto en la pasta de cemento como en los agregados. De acuerdo con el CEB (1998) la calidad del concreto en cuanto a porosidad puede clasificarse en:

- Buena, si es menor al 15%.
- Media, si se encuentra entre el 15 y el 17%.
- Pobre, si es mayor al 17%.

13. Poros capilares.

Intersticios entre los granos o partículas constituyentes de medio sólido discontinuo, como el concreto.

14. Proceso acelerado.

Conjunto de fases con las cuales se efectúa una situación o proceso en menor tiempo que el requerido, pero con los mismos resultados.

15. Vida útil.

Periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento.

CAPÍTULO 2

Estado del arte

2.1 Durabilidad en el concreto.

2. 1. 1. Aspectos generales.

Un concreto se considera durable cuando tiene la capacidad de resistir de manera satisfactoria las condiciones de servicio a las que estará sujeto, como pueden ser: la meteorización, el desgaste o las acciones químicas.

El Instituto Americano del Concreto (*ACI American Concrete Institute*) otorga la siguiente definición:

“La durabilidad del concreto está determinada por su capacidad para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, y conservará su forma, calidad y capacidad de servicio originales cuando se exponga a su entorno. El concreto duradero es el resultado de un diseño, dosificación, colocación, acabado, pruebas, inspección y curado adecuados”.

Por tanto, la durabilidad de los concretos dependerá en primera instancia del medio al que estará expuesto, también conocido como cargas ambientales.

1. Las causas externas pueden ser de tipo físico, mecánico o químico (Neville, 2001); suelen desencadenarse por condiciones atmosféricas, cambios o condiciones extremas de temperatura (congelación o contacto con fuego), desgaste de la superficie manifestado como abrasión o erosión (ocasionado por exceso de tránsito), acción electrolítica, la concentración superficial de agentes agresivos en forma líquida o gaseosa (Figura. 2.1(a)) , el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de sales contenidas en los poros del material (asociadas con el contacto con soluciones salinas, en cimientos o muros, por ejemplo (Årskog et al., 2004) (Sanjuan Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

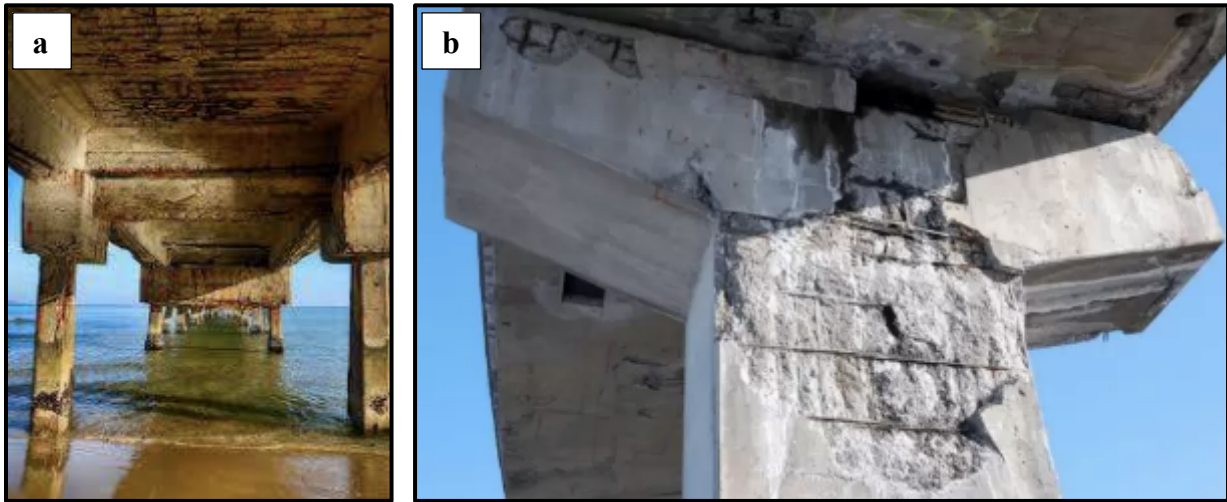


Figura 2.1 (a) Efecto de la corrosión en el acero de refuerzo en ambiente marino (Brave, G. 2019. *Diminishing perspective of wooden pillars underneath long old pier standing in ocean water at sunset* [Figura] Recuperado de [http:// www.bigstockphoto.com](http://www.bigstockphoto.com)) y (b) Descascaramiento del concreto de recubrimiento de una estructura en ambiente agresivo (Vexcon chemicals, 2017. *Corrosion managment* [Figura] Recuperado de <http://vexcon.com>)

Causas internas del concreto por sí mismas o en combinación con las anteriores afectan el desempeño del concreto y son:

2. Las condiciones internas (Figura 2.1(b)) (Basheer et al., 2001): están asociadas a las características de la materia prima, a la calidad del producto plástico y endurecido y a los mecanismos de transporte en el concreto, algunas de ellas son: la hidrólisis o disolución del hidróxido de calcio de la pasta de cemento, que dan como resultado efectos de retracción o hinchamiento si se presentan cuando el concreto ya ha fraguado (Tobón, 2006); reacciones deletéreas, manifiestas cuando los agregados contienen elementos reactivos con los productos de hidratación del cemento, que incluyen las reacciones expansivas álcali-agregado (Reacción Álcali-Sílice RAS o Reacción Álcali-Carbonato RAC), ataque por sulfatos, penetración de iones cloruro, carbonatación o ataque por ácidos en grandes concentraciones que son generados por diferentes actividades humanas. Además, la presencia de cantidades importantes de impurezas de MgO y Fe₂O₃ en el cemento provocan un efecto expansivo al hidratarse (Taylor, 1997). Finalmente, la corrosión de metales embebidos en el concreto, principalmente acero de refuerzo, generan diversas patologías como descascaramientos, delaminaciones, agrietamiento, etc. (Helene et al., 2018).

3. Las grietas en el concreto.

Las grietas en el concreto se pueden presentar en distintos rangos de tiempo y pueden ser generadas por diversas causas (Kayondo et al., 2019), por ejemplo: condiciones de servicio, cargas de servicio, deficiencias de diseño, deficiencias de la construcción, interacción de los materiales y condiciones de exposición (Crespo Sánchez, S., 2016).

Estas se clasifican en dos grupos:

- Activas: que varían de acuerdo a la temperatura ambiental.
- Inactivas: la causa que las originó ya no le afecta, por lo que ya no hay movimiento en ellas.

Y se pueden sub dividir por:

- Origen: Fuerzas externas (mecánico-dinámico); variaciones internas (origen químico, físico externo o interno).
- Geometría: Dirección, anchura, profundidad, movimiento.
- Trazado: Intergranular, transgranular, mixta, sucia, limpia.
- Ubicación: Tipo de elemento, orientación solar.
- Aparición: Antes, después del fraguado, días, años; después de puesta en servicio en la obra.
- Evolución: Activa, pasiva, variaciones en longitud y ancho.

Una gran parte de las grietas (Figura 2.2 (a) y (b)) comienzan internamente donde no se les puede observar, causando graves problemas de durabilidad debido a que permiten el ingreso acelerado de sustancias agresivas (Alexander et al., 2008).

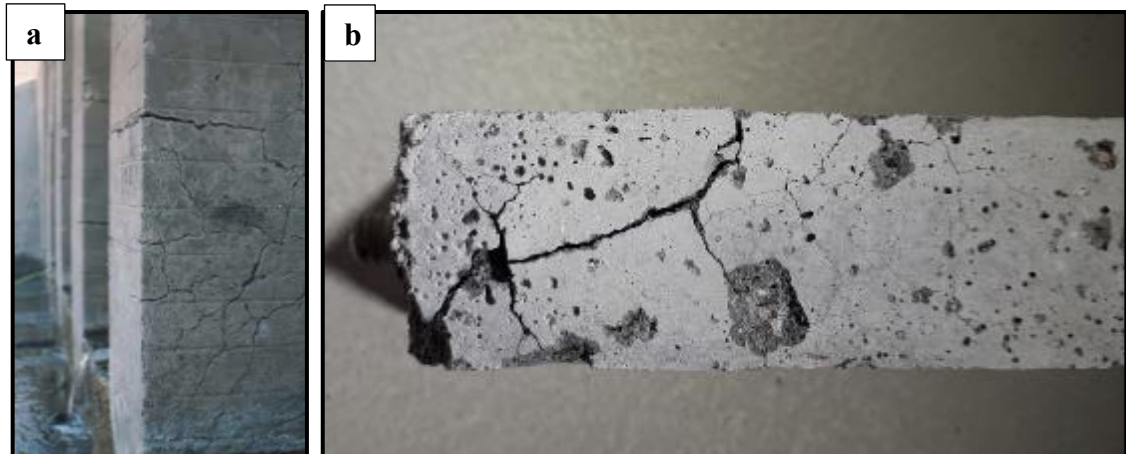


Figura 2.2 Agrietamiento en estructuras de concreto (a) Agrietamiento por servicio en elemento estructural (CSP. *Fragmento, patrones, grietas, en concreto, losas. 2018 [Figura] Recuperado de <https://www.fotosearch.es>*) y (b) Agrietamiento inducido en elemento de concreto (Navas, A. 2018 *Patrón de grietas en viga de concreto. [Figura] Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr>*).

Finalmente, muchos problemas de durabilidad también están asociados con un control de calidad deficiente tanto en la inspección de la materia prima como en los procesos constructivos, así como a problemas especiales durante la construcción, que en ocasiones no pueden ser controlados, como pueden ser las condiciones climáticas.

A pesar de que los daños causados al concreto por dichos factores originan un sin número de patologías, una extensa literatura ha demostrado que, incluso en los entornos más severos, no es la desintegración del concreto en sí lo que representa una amenaza para la durabilidad, más bien es la corrosión electroquímica del acero incrustado lo que representa la mayor amenaza tanto para la durabilidad así como para el desempeño de las estructuras de concreto en ambientes agresivos a corto y largo plazo (Díaz, 2014). Por lo anterior, para las estructuras de concreto en entornos severos, el mayor reto puede ser evitar la corrosión del acero dentro de períodos de servicio típicos de 15 a 20 años, aunque idealmente sería hasta los 50 años (RDCCDMX, 2017).

2. 1. 2. Requisitos de durabilidad.

La selección de las materias primas y el diseño de la mezcla de concreto con criterios de durabilidad ya establecidos (NMX-C-520-ONNCCE-2018), (NMX-C-530-ONNCCE-2018) deben hacerse siempre a partir de las características ambientales de exposición o de servicio de la estructura.

Para conseguir una durabilidad adecuada del concreto, es de suma importancia cubrir los requisitos siguientes:

- 1) Requisitos generales:
 - a) Relación a/c máxima.
 - b) Contenido mínimo de cemento tipo Portland (CP) (con un 95% de Clinker).
- 2) Requisitos adicionales:
 - a) Contenido mínimo de aire incluido.
 - b) Uso de cemento resistente a los sulfatos, en su caso (RS según designación de normativa mexicana de cementos).
 - c) Resistencia a la erosión, en su caso.
 - d) Resistencia a las reacciones deletéreas álcali-agregado, en su caso.

2. 1. 3. Factores que afectan la durabilidad del concreto.

Como resultado de las características de los materiales que componen el concreto que incluyen: su constitución heterogénea, su forma y dimensiones así como su ubicación aleatoria dentro del elemento, existe una enorme posibilidad de que las fallas y daños existan en el material incluso antes de experimentar un esfuerzo de carga (Crespo Sánchez, S., 2016).

El agrietamiento del concreto (que puede ser originado por variados mecanismos, como la retracción o contracción plástica, variaciones térmicas durante el fraguado y los esfuerzos aplicados de tensión o compresión), tiene un rol importante en el deterioro de las estructuras de concreto armado, porque proporciona vías adicionales para que gases o líquidos con compuestos

agresivos penetren el concreto. Comprender a detalle las propiedades de transporte del concreto en su condición inicial, así como del concreto agrietado o dañado, es esencial para predecir su durabilidad a corto y largo plazo (Huet et al., 2003). En general, el agua actúa como medio para que los agentes dañinos ingresen al concreto, aunque también el aire participa de manera considerable. A continuación, se describen los mecanismos por los cuales el agua puede ingresar al concreto (Basheer et al., 2001).

2.1.3.1 Permeabilidad.

De acuerdo con la RAE, la permeabilidad se define como la capacidad de un material o sustancia para permitir que un fluido lo penetre o traspase sin alterar su estructura interna. Un material será permeable si permite pasar a través de él una cantidad significativa de fluido en un lapso de tiempo dado, e impermeable si dicha cantidad de fluido es despreciable. (Figura 2.3 (a)) La permeabilidad del concreto y las velocidades a las que los iones y gases se difunden en él son de gran importancia para la durabilidad, debido a que la permeabilidad del concreto depende del tamaño, distribución y continuidad de los poros y está relacionada directamente con la estructura de poros de la matriz de la pasta de cemento (S. P. Zhang & Zong, 2014), siendo por tanto función de la porosidad.

2.1.3.2 Porosidad

La porosidad del concreto (Figura 2.3 (b)) se define como la suma de los poros de gel, los vacíos originados por el aire atrapado y los poros capilares, que se forman al evaporarse el agua en exceso (Solis Carcaño & I. Moreno, 2006), que es aquella que excede al agua necesaria para la hidratación del cemento (Taus, 2003) Así mismo, la porosidad o la también conocida estructura de poros del concreto, se ve afectada por factores como la materia prima, el contenido de cemento, el grado de compactación y un correcto curado, que podría resumirse a unas adecuadas prácticas de construcción, así como a la edad misma del elemento (Aïtcin & J Flat, 2016). La calidad de la pasta cementante, depende a su vez de factores como: la relación a/c, la inclusión de materiales cementantes suplementarios, el grado de hidratación del concreto, etc. Cuanto más antiguo sea el concreto, mayor cantidad de productos de hidratación tendrá y, por tanto, más desarrollada y compacta será la estructura de los poros (Glasser et al., 2008).

Otro factor que interviene en la calidad de la estructura de los poros es la temperatura que se experimenta en el momento del fraguado. El curado a alta temperatura acelera el proceso de endurecimiento, de modo que, en las edades del concreto joven, un concreto curado a alta temperatura estará más maduro y, por lo tanto, tendrá una mejor resistencia a la penetración de iones de cloruro que un concreto curado en temperatura ambiente, de la misma edad. Sin embargo, en edades posteriores, el concreto que fue curado en condiciones normales, tendrá la posibilidad de continuar hidratándose, tendiendo por tanto un coeficiente de difusión de iones más bajo que el concreto que fue curado inicialmente a alta temperatura (Soroka, 2017).

Otro aspecto importante a considerar en la durabilidad y que está relacionado con la estructura de poros, son las microestructuras de las regiones superficiales de un concreto. Éstas difieren de las de la matriz cementante y son importantes porque tienen un efecto significativo sobre la durabilidad (Solís Carcaño & Alcocer Fraga, 2019). Las diferencias entre ambas regiones tienen varios orígenes: el asentamiento y las restricciones impuestas por el efecto de la cimbra pueden afectar la distribución agregada, se pueden crear gradientes de humedad si una superficie se expone a una atmósfera secante, retardando o incluso deteniendo la hidratación en las capas superficiales, alterando con ello la estructura de los poros y facilitando la carbonatación y finalmente, el agua se puede perder por absorción o fuga a través del cimbrado (Basheer et al., 2001).

Los huecos se encuentran interconectados

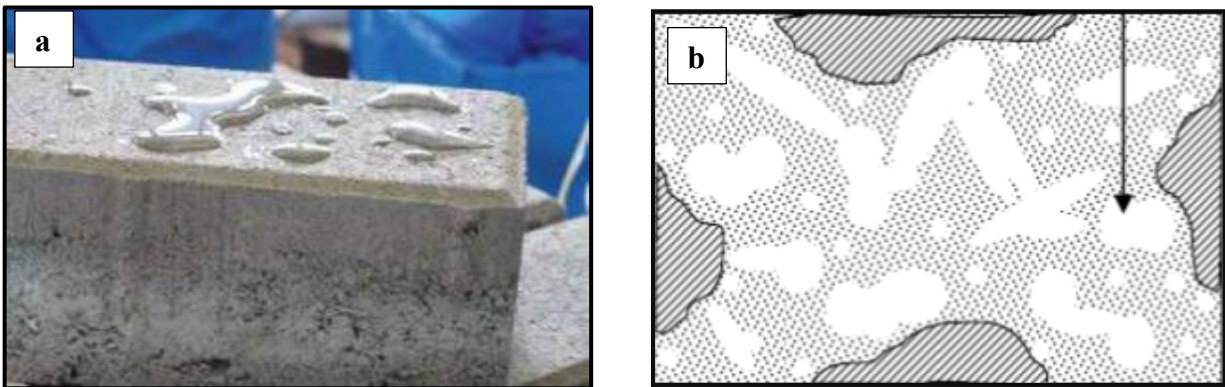


Figura 2.3 Mecanismos de transporte de líquidos y gases en el concreto. (a) Permeabilidad (Sika, 2018. *Concreto Permeble* [Figura] Recuperado de <https://per.sika.com>) y (b) Porosidad (High Performance Concrete: *Fundamentals and Application*, 2009. [Figura] Recuperado de <https://www.researchgate.net>).

2.1.2.3 Capilaridad

La propiedad que mejor refleja la capacidad de un material para absorber y transportar agua por capilaridad es la absorción capilar y el parámetro que la caracteriza es la tasa de absorción capilar, velocidad de ascensión capilar o sorptivity (Figura 2.4 (a)). Este parámetro representa el mecanismo de transporte que recurrentemente se observa en aquellas estructuras en las que el concreto se encuentra sujeto a ciclos de humedad y secado (Medeiros et al., 2013).

La tasa de absorción, sorptivity o velocidad de ascensión capilar es una propiedad hidráulica fácilmente medible, que caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar (Kubissa & Jaskulski, 2013). Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por lo tanto a los agentes agresivos ambientales. La absorción capilar es un caso particular de conducción inducida por la energía (tensión superficial) del agua actuando sobre los capilares del concreto. El concreto ejerce acciones atractivas (por la diferencia de polaridad) sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido provocando con las mismas el llenado de los espacios libres. Además del contenido inicial de humedad y de su uniformidad, el transporte de líquidos en sólidos porosos está influenciado por las características del líquido (viscosidad, densidad, tensión superficial) (S. P. Zhang & Zong, 2014).

2.1.2.4 Difusión.

La difusión se interpreta como un proceso por el cual la materia es transportada de una parte de un sistema a otro como consecuencia de la existencia de un gradiente de concentración, entre éstos (Tovar et al., 2013) (Figura 2.4 (b)).

La segunda Ley de Fick explica este proceso de difusión dinámica, o en estado no estacionario de los átomos. En otras palabras, es la difusión de átomos en la superficie de un material (D. Callister, 2016).

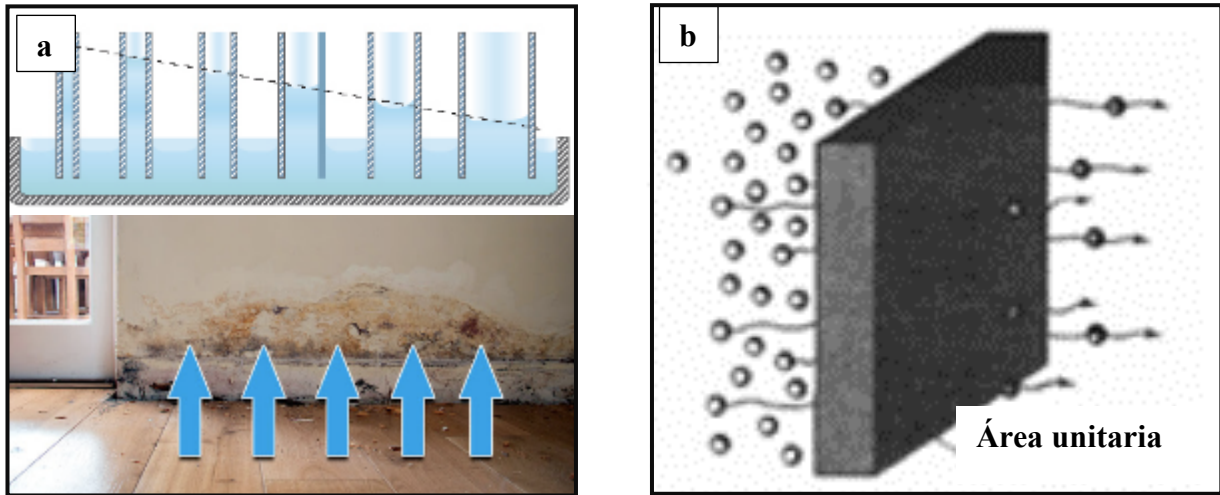


Figura 2.4 Mecanismos de transporte de líquidos y gases en el concreto. (a) Absorción capilar (*Humedad por capilaridad, 2018 [Figura] Recuperado de <http://humedad-por-capilaridad.com>*) y (b) Difusión.

2. 1. 4. Corrosión del acero de refuerzo.

2.1.4.1 Aspectos generales.

Las características de los primeros centímetros exteriores de las estructuras de concreto armado (conocido como “cover concrete” o concreto de recubrimiento) juegan un papel fundamental en la durabilidad del acero (Gjørøv, 2011). El concreto de recubrimiento es el que se encuentra en contacto con el ambiente y, por lo tanto, el que constituye la barrera de protección de la matriz, condicionando el ingreso de sustancias agresivas que pueden degradar tanto al concreto como al mismo acero.

La corrosión del acero de refuerzo es posiblemente la causa más extendida de deterioro del concreto (Clifton, 2000). En un concreto en condiciones normales, el alto pH de la pasta cementante evita la oxidación del acero, estabilizando la película de óxido (Capa pasiva)

protectora, inhibiendo cualquier ataque posterior (Goyal et al., 2018). Sin embargo, esta capa puede activarse o “despasivarse” principalmente por dos causas: (1) que exista una cantidad suficiente de sustancias ácidas o iones despasivantes en la matriz y (2) que disminuya la alcalinidad del concreto al interactuar con agentes dañinos del medio ambiente (Moreno et al., 2004). El proceso de penetración se vuelve perjudicial a medida que el concreto que recubre al acero pierde su alcalinidad, despasivando la capa de acero de refuerzo y favoreciendo la corrosión (Huet et al., 2003). El proceso de pasivación se basa en una protección catódica, en la cual se aplica un metal anódico respecto del acero, de tal modo que proteja a este último mediante el establecimiento de una celda galvánica intencional, en donde el acero pasa a ser el cátodo, es decir, el metal que estará protegido. Este mecanismo de protección implica por lo tanto el aporte de un metal de sacrificio que se corroerá preferencialmente, denominado capa pasiva. La corrosión del acero es un proceso electroquímico en el cual se formarán celdas de corrosión en la superficie del acero, debido a la variación en las concentraciones de iones disueltos, como pueden ser los iones Cl^- . (Tejada et al., 2016). Generalmente, cuando el acero de refuerzo se corroe, se presenta un efecto de expansión relacionado directamente con un incremento de volumen, el cual puede ser hasta un 600% mayor que el volumen original (Acosta et al., 2006). Consecuentemente del aumento de volumen del acero, el concreto se expande y se agrieta, generando patologías como el descascaramiento y delaminaciones, las cuales provocan inevitablemente la pérdida de capacidad de carga de diseño.

Para que se produzca la corrosión del acero de refuerzo es estrictamente necesaria la presencia tanto de aire como de agua en la superficie del metal (Del Valle, Pérez, et al., 2001); además, es necesario que la película superficial de óxido de hierro que cubre el acero, sea eliminada del área anódica. Se ha analizado que la capa pasiva del acero permanece estable cuando el pH del concreto se mantiene por encima de 10 (Moreno, E., 2006), dicho pH es obtenido de los álcalis (sodio y potasio) que se encuentran en cantidades minoritarias en el cemento, los cuales mantienen la reserva alcalina para mantener el pH superior a este valor (Moreno, E., 2006). Cuando el acero pasa de un estado pasivo a un estado activo, el cambio va acompañado por un marcado incremento del proceso de corrosión. Los mecanismos de transporte del cemento favorecen o limitan la concentración de agentes externos que pueden

penetrar el concreto (Stefanoni et al., 2018). En función de las dimensiones e interconexión de la estructura de poros en la pasta de cemento, este tendrá cierta permeabilidad al ingreso de agentes como el CO_2 o los iones cloruros. Los fenómenos de carbonatación o penetración de cloruros decrementan el valor del pH, ocasionando con ello la destrucción de la capa pasiva del metal. A pesar de que es estable en un pH crítico de 10, para eliminar la pasividad, se ha estudiado que la presencia de iones cloruro esta película protectora puede ser destruida en pH arriba de 11.5. Aunado a que la presencia de iones cloruro favorece la retención de humedad en el concreto, acelerando consecuentemente el proceso de corrosión. El intervalo del nivel de cloruros iniciadores de la corrosión se puede considerar entre 0.2 y 2.0 kg/m^3 de concreto, de acuerdo a investigaciones realizadas en diversos lugares del mundo en los últimos 30 años (Carcaño et al., 2005). En zonas costeras o ambientes marinos, el ataque que con más frecuencia desencadena y acelera la corrosión, es el ocasionado por los iones cloruros. Los iones cloruro pueden ingresar al concreto principalmente por: el uso de aditivos con cantidades apreciables de iones, por agua o agregados contaminados previo a la elaboración del concreto o por el mismo aerosol marino. Los cloruros del exterior suelen penetrar por los mecanismos de capilaridad o difusión, los cuales están fuertemente asociados a los ciclos de humedad y secado comunes en regiones húmedas (Maldonado-Bandala et al., 2017).

Debido a que el agua, el oxígeno y los iones de cloro favorecen el mecanismo de corrosión del acero, es evidente que los mecanismos de transporte desempeñan un papel crítico para prevenir las patologías del concreto, asociadas a la corrosión. Para que un concreto cumpla con una buena permeabilidad es necesario que la mezcla satisfaga ciertas especificaciones (ACI 211), (NMX-C-515-ONNCCE-2016): una relación a/c máxima de 0.4, un contenido adecuado de cemento, compactación y curado adecuados, así como el uso de aditivos minerales.

La edad a la que puede comenzar la corrosión depende, por tanto, del espesor mínimo del concreto que recubre el acero, de la resistencia a la penetración y de las condiciones a las que está sometido el concreto (Goyal et al., 2018). Se puede y se debería calcular la profundidad de recubrimiento necesaria para proporcionar protección durante un período determinado.

Otro aspecto relevante en la corrosión del acero es la falta de adherencia entre el acero y el concreto, lo cual disminuye de manera considerable la resistencia y también destruye la

protección proporcionada por la solución alcalina de poros. En algunas circunstancias, las microfisuras se cierran por los productos de la carbonatación o por la entrada de polvo (IMCyC, 2015), pero esto no siempre ocurre, especialmente bajo cargas fluctuantes, lo que puede acelerar el inicio de la corrosión. Con un concreto denso y bien elaborado, 15 mm de recubrimiento (IMCyC), (NMX-C-530-ONNCCE-2018) pueden ser suficientes para brindar una protección prácticamente indefinida, sin embargo, un concreto de baja calidad, puede permitir que la corrosión comience prematuramente.

2. 1. 4. Penetración de iones cloruro.

2.1.4.1 Generalidades.

Los iones cloruro son abundantes en la naturaleza, siendo el mar una gran fuente de ellos, donde pueden ser hallados como cloruro de sodio (aprox. 25 g/l), cloruro de magnesio (aprox. 5g/l) o cloruro de potasio (aprox. 5 g/l) (Barneyback & Diamond, 1981). Los cloruros son aquellos compuestos que llevan un átomo de cloro en estado de oxidación -1 (Ardila, 2006). Las fuentes de este ión incluyen agua de mar o niebla salina, sales de deshielo que se usan en las carreteras y ciertos agregados, especialmente los disponibles en climas desérticos (Mackechnie, 2001).

La penetración del ión cloruro en una estructura de concreto armado expuesta al ambiente marino, depende principalmente del tipo de exposición que reciba. La exposición al ambiente marino puede ser de tres tipos de acuerdo a la permanencia de contacto de los elementos que forman la estructura con el agua de mar (Valdés et al., 2005):

- a. Exposición en una sección totalmente sumergida.
- b. Exposición en una sección en contacto con la marea (expuesta a ciclos de humedad y secado).
- c. Exposición únicamente con el aerosol marino, que es aquella que salvo raras excepciones está en contacto con el agua, pero permanentemente recibe brisa marina.

El aerosol marino es considerado el causante primordial de la penetración de iones cloruros. Este efecto es generado una vez que las burbujas en la interfase entre la atmósfera y la superficie del mar revientan. Cuando el viento alcanza velocidades de hasta 7 m/s el fenómeno de niebla salina comienza a tener efectos reveladores, incrementando además, la concentración de sales de cloruro a medida que la velocidad del viento incrementa (Carrillo et al., 2015). La velocidad del viento además de influir en la formación de la niebla salina, propicia su transporte hacia el interior de las estructuras, principalmente por los ciclos de humedad y secado (Carcaño et al., 2005).

En las estructuras de concreto armado que se encuentran en ambiente marino, los iones cloruros penetran por difusión en el interior del concreto hasta una determinada profundidad, con este ingreso se mantiene un ambiente saturado a dicha profundidad. Mientras tanto, en la superficie, debido a los ciclos de humedad y secado, la penetración de cloruros se da por difusión lo cual, puede generar un deterioro acelerado en el concreto (Rodríguez et al., 2013). Por otro lado, los cloruros también pueden penetrar al concreto armado a través de succión capilar a través de la red de poros de la propia estructura (Ferreira et al., 2018). Por medio de este proceso, el agua salada puede penetrar con mayor rapidez, produciendo daños prematuros graves por corrosión en un periodo corto de tiempo.

En el caso de las estructuras totalmente sumergidas en el mar, los iones cloruros también pueden difundir debido al gradiente de concentraciones, dependiendo grandemente de la concentración de iones cloruros en la superficie hasta una profundidad determinada de la solución de los poros (Tovar et al., 2013). Los mecanismos de penetración se discutirán más adelante a detalle.

Una vez que los iones cloruros penetran en el concreto se pueden clasificar de acuerdo al grado de afectación que ocasionan al acero de refuerzo (Costa & Appleton, 1999):

a. Cloruros solubles o libres: De principal importancia en cuestión de durabilidad, pues son los que representan un riesgo para el acero de refuerzo del concreto armado. Si alcanzan niveles críticos son capaces de inducir la corrosión.

b. Cloruros enlazados: son los combinados con las diferentes fases iónicas o compuestos de la pasta de cemento, y que no participan en el mecanismo de corrosión de armaduras.

c. Cloruros totales: están representados por la suma de los cloruros enlazados y los solubles.

En general, se acepta que la penetración de cloruros en materiales cementantes no conduce fácilmente a la formación de fases sólidas perjudiciales que pueden causar expansión y agrietamiento (Schutter & Audenaert, 2004). Por el contrario, la interacción entre el cloruro en solución y la pasta, debido a que se une a los iones penetrantes, a menudo se considera que tiene una influencia benéfica sobre la durabilidad del concreto armado, ya que reduce la velocidad de entrada hacia el acero de refuerzo (Glasser et al., 2008), en tanto no alcance al concreto que protege al acero.

2.1.4.2 Mecanismo de reacción y condiciones que lo favorecen.

El riesgo de corrosión inducida por cloruros aumenta con la facilidad de migración de iones Cl^- libres a través de la pasta de cemento y con la proporción de Cl^- a OH^- en la solución de poros (Arya, C, 1990). En el concreto, el transporte también puede ocurrir a través de regiones de mayor permeabilidad o microfisuras y la difusión se complementa mediante absorción capilar, a excepción de que el material se encuentre completamente saturado (Costa & Appleton, 1999). Los factores que afectan la relación Cl^-/OH^- incluyen la concentración de OH^- y el grado en que el ión Cl^- es absorbido por fases sólidas (Taylor, 1997a). La concentración de OH^- depende del contenido de álcalis del cemento (NaOH o KOH) y, a menudo, será menor para un CPC que para un CPO (Schutter & Audenaert, 2004). El cloruro se encuentra parcialmente unido en $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ pero queda gran cantidad en la solución de los poros. Con soluciones de cloruro muy concentradas, se pueden formar otras fases sólidas.

La formación de $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Sal de Friedel) puede disminuir en presencia de sulfatos, debido a la formación preferencial de monosulfato o etringita

($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), o por carbonatación, y posiblemente depende de la fuente del Cl^- (Gjørsv, 2011).

Algunos de los mecanismos por los cuales los iones cloruro pueden penetrar el concreto son: a) difusión, b) la absorción capilar y c) la presión hidrostática (T. Zhang & Gjørsv, 1996), (Gehlot et al., 2019).

El mecanismo de difusión, consiste en el transporte de iones cloruro, estimulados por una diferencia en la concentración de las especies involucradas. Para que la difusión se desencadene, el concreto debe tener una fase líquida continua (esta fase la mayoría de las veces es más bien una fase en gel) y debe haber un gradiente de concentración de iones cloruro (Tejada et al., 2016) presentes en el medio circundante.

El siguiente método de transporte es la absorción. En la medida en que una superficie de concreto está expuesta al medio ambiente, se ve sometida a ciclos de humedad y secado (S. P. Zhang & Zong, 2014). Cuando el agua (que posiblemente contenga cloruros) tiene contacto con una superficie seca, se introducirá en la estructura de los poros mediante succión capilar. La absorción es impulsada por gradientes de humedad (Schutter & Audenaert, 2004). Normalmente, la profundidad de secado es pequeña, sin embargo, este mecanismo de transporte no llevará por sí solo a los cloruros al nivel del acero de refuerzo, a menos que el concreto tenga una calidad deficiente y el recubrimiento del acero sea demasiado pequeño (Arya, C, 1990). A pesar de esto, la difusión sirve para llevar rápidamente los cloruros a cierta profundidad en el concreto y con ello reducir la distancia que deben difundir para alcanzar el acero de refuerzo.

2. 1. 4. Carbonatación.

2.1.4.1 Generalidades.

La carbonatación es una patología que se presenta de manera natural en una cantidad incontable de estructuras de concreto (A. R. C. Silva et al., 2016). El mecanismo básico involucrado en este proceso es que el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, reacciona con

el cemento hidratado, principalmente con la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), lo que ocasiona la disminución paulatina de su alcalinidad (Moreno, E., 2006). Para un concreto sin acero, este fenómeno ocasiona daños poco significativos. Sin embargo, para un concreto reforzado el avance progresivo hacia el concreto que recubre el acero generará eventualmente la despasivación de su capa protectora e inevitablemente la corrosión del acero (Gopinath et al., 2017).

Para que el CO_2 pueda ingresar a la matriz del concreto, es necesario que tenga los medios para hacerlo, es ahí donde los mecanismos de transporte del concreto como porosidad, permeabilidad, difusión y capilaridad se vuelven de vital importancia (Venkat Rao & Meena, 2017).

2.1.4.2 Mecanismo de reacción

En el proceso de carbonatación, el dióxido de carbono se disuelve en la solución de poros de la pasta de cemento (iniciando en el concreto de recubrimiento), produciendo iones CO_3^{2+} , que reaccionan con los iones Ca^+ de la solución en gel del concreto, para así producir calcita (CaCO_3) (Ekolu, 2016), componente poco soluble, lo que ocasiona su precipitación en la matriz cementante. Los iones OH^- y Ca^+ requeridos para estas reacciones se obtienen de la disolución de la portlandita (Taylor, 1997b). En los concretos realizados con cemento Portland, resulta más importante la carbonatación que involucra el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sin embargo, cuando el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ llega a consumirse, la carbonatación del silicato cálcico hidratado C-S-H, también es posible (A. R. C. Silva et al., 2016).

La determinación más empleada para conocer la profundidad de carbonatación que ha alcanzado un concreto es la que utiliza un indicador ácido-base de color (solución de fenolftaleína) (IMCyC, 2012), (NMX-C-530-ONNCCE-2018). Dicha determinación consiste de manera general en rociar con la solución de fenolftaleína una superficie recién expuesta del concreto. La fenolftaleína, al entrar en contacto con el concreto hará un cambio de color de acuerdo al pH que tenga el elemento. El pH en un concreto sano o recién elaborado (hasta 28 días) oscila en los 12.5. La fenolftaleína presenta un cambio de coloración en un pH de 8.2 a

10.0, por debajo de este rango es incolora, mientras que por encima de 10.0 adquiere un color fucsia (Moreno, E., 2006). Se debe considerar entonces, que la coloración fucsia es un indicador de que el nivel del pH del concreto está por encima del valor estandarizado como límite, el cual es 9.5 (IMCyC, 2012) y que si es incolora es señal inequívoca del inicio del proceso de carbonatación.

2.1.4.2 Factores que favorecen la carbonatación.

Como en todas las reacciones deletéreas en el concreto, es importante conocer los factores o condiciones que las favorecen. Siempre existirán condiciones que propicien el desencadenamiento de las mismas y maximicen el daño potencial que pueden ocasionar.

Para el caso particular de la carbonatación, a continuación, se enlistan algunos de los factores que la ocasionan (Ekolu, 2016), (Venkat Rao & Meena, 2017):

1. Una mayor relación a/c contribuye a una mayor profundidad de carbonatación.
2. El aumento del período de curado reduce la profundidad de carbonatación. Periodos de curado suficientes y sustanciales incrementa la resistencia del concreto, generando una pasta más densa, y consecuentemente, menos propensa a la carbonatación. Curar un concreto adecuadamente por al menos 7 días, puede asegurar un concreto más durable.
3. La incorporación de aditivos modifica la estructura de poros del concreto y reduce la porosidad. Esto puede ser dado por su efecto de filler o al favorecer la producción de productos de hidratación, como el gel C-S-H.
4. Si la porosidad aumenta, la profundidad de carbonatación también aumenta, por lo que existe una relación lineal entre carbonatación y porosidad aceleradas.
5. La adición de materiales cementantes suplementarios (*Supplementary Cementitious Materials* - SCM) como escoria granulada de alto horno o cenizas volantes, reducen la porosidad del concreto y consecuentemente reducen la profundidad de carbonatación.
6. La aplicación de revestimientos superficiales y la provisión de una cobertura adecuada reduce considerablemente la tasa de carbonatación.

7. La resistencia a la compresión también depende de la relación *a/c* y de los aditivos minerales tanto superiores como una relación *a/c* más baja afecta las propiedades del concreto.

8. Existen otros factores que favorecen el proceso de carbonatación como lo son el tiempo de exposición de la estructura y la orientación con respecto a la fuente de agentes agresivos.

Como el presente trabajo se ha enfocado en estudiar el comportamiento durable de un concreto que ha mostrado propiedades de auto reparación, fue necesario revisar la literatura de los trabajos con concretos auto reparables que hayan evaluado su comportamiento ante los ataques de carbonatos o cloruros. A continuación, se presenta la información más relevante en estudios que han empleado diversas técnicas y métodos de auto reparación.

2.2 Auto reparación en el concreto.

A lo largo de los años, se han estudiado las propiedades *autocurativas* inherentes del concreto y algunas de las conclusiones a la que se han llegado es que este mecanismo de reparación autógeno solamente es eficaz para grietas pequeñas en concretos convencionales, alcanzando valores de entre 10 a 150 μm (De Belie et al., 2019). Es de considerarse, además, que esta reparación autógena es difícilmente predecible y poco confiable, aunado a que ocurre exclusivamente en presencia de humedad o agua (De Belie et al., 2019).

Por lo anterior, los investigadores se han enfocado en desarrollar el mecanismo más eficiente para desencadenar el proceso de auto reparación en materiales cementantes. La literatura es extensa y en ella se describen métodos para evaluar el efecto de la auto reparación. Sin embargo, existen huecos en cuanto a la evaluación de la durabilidad del concreto. A continuación, se resumen los alcances y conclusiones a las que se ha llegado al evaluar los diferentes métodos y técnicas propuestas para generar concretos auto reparables.

2.2.1 La auto reparación mediante el uso de silicato de sodio.

El silicato de sodio (Na_2SiO_3) ha sido propuesto como un potencial agente reparador en diferentes sistemas y métodos. Varios investigadores han evaluado diferentes aspectos de la capacidad de reparación del silicato de sodio. (Pelletier et al., 2011) agregaron a una mezcla de concreto micro cápsulas de poliuretano (2% en peso) con silicato de sodio en el interior. La adición de las micro cápsulas propició la recuperación de la resistencia a la flexión del 24% en comparación con el 12% de las muestras de control. Por otra parte, (Huang et al., 2013) incorporaron cápsulas de 5 mm de diámetro rellenas con solución de silicato de sodio en muestras de compuestos de cemento de ingeniería (ECC). De acuerdo a los resultados se concluyó que la cristalización del silicato de sodio, así como la reacción entre el calcio del cemento y el silicato de sodio fueron los mecanismos que promovieron la auto reparación. Sin embargo, los resultados mostraron también un efecto negativo de las cápsulas sobre las propiedades mecánicas de las muestras de concreto. En otro estudio, (Gilford et al., 2014) emplearon silicato de sodio y dicitlopentadieno (DCPD) como agentes de auto reparación encapsulados en una micro cápsulas. Los dos tipos de micro cápsulas se examinaron en muestras de cilindros de concreto. Los resultados indicaron que la adición de un 5% de micro cápsulas de silicato de sodio en peso de cemento aumentó el módulo de elasticidad de las muestras de concreto en un 11% después de la reparación. Para las micro cápsulas de DCPD, el agente de reparación fue capaz de aumentar el módulo de elasticidad del concreto después del agrietamiento hasta en un 30% para las micro cápsulas con un contenido de 0.25%. En un trabajo posterior, (Mostavi et al., 2015), también utilizaron micro cápsulas de poliuretano / urea-formaldehído (PU / UF) de doble pared para encapsular silicato de sodio. Estas micro cápsulas se incorporaron en vigas de concreto con dos proporciones diferentes (2.5% y 5% en peso de cemento) y el proceso de reparación se monitoreó midiendo la profundidad de la grieta dentro del tiempo de reparación utilizando un comprobador de indicación digital ultrasónico. Se encontró que la tasa de reparación con un 5% de micro cápsulas era mayor en comparación con las muestras que contenían un 2.5% de micro cápsulas. En un estudio reciente realizado por (Kanellopoulos A., 2016), el silicato de sodio líquido se almacenó en cápsulas de vidrio. Los resultados indicaron que el silicato de sodio tiene una capacidad potencial como agente de auto

reparación en la recuperación de la fuerza a la compresión y en la mejora de la durabilidad, principalmente, por la contribución del silicato de sodio para la formación de más productos de hidratación de la fase gel C-S-H, la cual contribuye al cierre de grietas en el concreto exterior.

Dado que los agregados son el componente principal de cualquier mezcla de concreto, se espera que sean ampliamente utilizados para contener agentes de auto reparación. Sin embargo, este potencial no se ha investigado bastante. En un estudio realizado por (Wiktor & Jonkers, 2011), se impregnaron al vacío partículas de arcilla porosa con un tamaño de 1 a 4 mm por un agente de auto reparación bioquímica de dos componentes que consiste en esporas bacterianas y lactato de calcio. Tras la formación de grietas, los dos componentes se liberan de las partículas por el agua que entra por las grietas y producen carbonato de calcio que llevó a bloquear grietas de hasta 0.46 mm de ancho. En otro estudio, (Sisomphon et al., 2011) usaron agregados ligeros de arcilla expandida como depósitos para la solución de monofluorofosfato de sodio (Na_2FPO_3) y finalmente los encapsularon en una capa de pasta de cemento. Las partículas encapsuladas desarrolladas se utilizaron como un sistema de auto reparación en morteros de cemento de escoria de alto horno. La caracterización de los productos reparadores indicó que el mecanismo de curación fue debido a la combinación del tratamiento con solución de Na_2FPO_3 e hidróxido de calcio suministrado desde la capa de recubrimiento de pasta de cemento. Sin embargo, estos estudios presentaron datos limitados con respecto a la técnica de impregnación y la influencia de reemplazar los agregados parcial o completamente por los impregnados en las propiedades mecánicas.

En una investigación anterior efectuada por (Alghamri et al., 2016) se llevó a cabo la técnica de impregnación al vacío como sistema para alojar un agente de auto reparación en agregados ligeros (*lightweight aggregate* LWA). El silicato de sodio se seleccionó como un potencial agente de auto recuperación impregnándolo en partículas de LWA (4-8 mm), que luego se encapsularon en un recubrimiento a base de polímero. Las técnicas de DRX y MEB proporcionaron información sobre las composiciones químicas de los materiales de reparación, que respaldan los resultados anteriores sobre la contribución del silicato de sodio en la producción de más gel C-S-H para reparar las grietas.

2.2.1 Durabilidad en concretos auto reparables.

Se ha informado que la auto reparación autógena en materiales cementantes solo puede tener lugar cuando hay agua presente en las grietas (Van Tittelboom & De Belie, 2013). Cuando las grietas en el concreto se llenan de agua, el CO₂ de la atmósfera se disuelve en el agua y se difunde en las grietas. Los iones CO₂ solo pueden difundirse en la grieta muy lentamente a través de la boca de la grieta. En este caso, los productos de reacción de una reacción adicional de materiales reactivos, es decir, cemento no hidratado, se pueden formar en las grietas en primer lugar (Venkat Rao & Meena, 2017). A medida que los iones CO₂ se difunden en la fisura gradualmente, o cuando las fisuras se secan y se exponen directamente a la atmósfera, los productos de reacción recién formados en las fisuras se carbonatarán. Sin embargo, el efecto del proceso de carbonatación sobre el efecto de la autocuración autógena de las grietas aún no está claro.

En un estudio de auto reparación base biológica (Tayebani & Mostofinejad, 2019), se evaluaron mediante las pruebas de compresión, absorción de agua, prueba rápida de penetración de cloruros y la prueba de resistencia eléctrica las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros elaborados con adiciones bacterianas (*Bacteria S. Pasteurii*) y curados en un ambiente húmedo (cloruro de calcio urea). Se concluyó que el uso de bacterias en el agua de mezclado en presencia de iones calcio mejoraron la durabilidad, disminuyendo la permeabilidad, esto debido a la formación de sedimentos de calcita como resultado del uso de bacterias.

En una revisión del empleo de bacterias en el concreto (Vijay et al., 2017), los autores concluyeron que, en general, las bacterias tienen un efecto positivo en la resistencia a la compresión del concreto y en los cubos de mortero de Cemento Portland. La ventaja de usar bacterias es que sus productos disminuyen la penetración de agua y la permeabilidad a los iones de cloruro. Dicha revisión recomienda su aplicación como un sellador alternativo de concreto que entre otras ventajas es rentable, de alta calidad, respetuoso con el medio ambiente y, finalmente, conduce a una mejora en la durabilidad de los materiales de construcción.

Incorporar bacterias en materiales cementantes ha resultado ser una técnica prometedora a escala laboratorio. Sin embargo, propiedades como: contracción, corrosión y carbonatación aún no se han estudiado a fondo. Una inspección minuciosa de las propiedades mencionadas arrojará luz sobre el comportamiento en tiempo real del concreto auto reparable base microbiana. Su eficiencia en la protección de elementos de concreto más grandes (es decir, a mayor escala) debe probarse exhaustivamente en condiciones menos favorables, como pueden ser: rangos de temperatura no ideales, altas concentraciones de sal y en edades posteriores del elemento de concreto.

En 2018, se llevó a cabo un estudio (Helene et al., 2018) con el objetivo de investigar la influencia del uso de catalizadores cristalinos (como agentes de reparación) en la penetración de iones cloruro y la predicción de la vida útil del concreto. Para la producción de las mezclas de concreto se utilizó cemento mezclado con escoria de alto horno, tres diferentes relaciones a/c con y sin catalizador cristalino (Compuesto principalmente de SiO_2 , MgO y CaO). Las muestras de concreto se curaron en una cámara húmeda y se ensayaron a los 28 y 91 días. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, permeabilidad rápida al cloruro (ASTM C1202: 12) e indicador colorimétrico de nitrato de plata. Los resultados demostraron que, en comparación con la mezcla de referencia, el uso de catalizador cristalino conservó la resistencia a la compresión y redujo hasta en un 30% la penetración de iones cloruro, aumentando la vida útil hasta en un 34%.

(Van Tittelboom et al., 2011) midieron la disminución de la permeabilidad al agua para las grietas provocadas con un ancho entre 200 y 300 μm en un concreto auto reparable. El sistema de auto reparación consistía de dos tubos de vidrio o cerámica colocados uno al lado del otro, uno que contenía prepolímero y otro que contenía acelerador y agua. Los resultados mostraron que cuando se usaron tubos de vidrio, el coeficiente de permeabilidad al agua disminuyó sustancialmente después de la reparación; para los tubos de cerámica, la disminución fue aún mayor. Esta diferencia se atribuyó a una mayor liberación de agente reparador de los tubos de cerámica, explicado por la tensión superficial entre el vidrio y la cerámica.

(Yang et al., 2011) midieron la reducción en el coeficiente de permeabilidad al gas en morteros auto reparables con microcápsulas de núcleo de aceite con cubierta de gel de sílice. En

la etapa inicial (3 días), se observó una reducción sustancial (aproximadamente 50.2%) para el mortero auto reparable en comparación con las muestras de control; en etapas posteriores, la reducción fue aún mayor. Junto con las microfibras de carbono y el humo de sílice (adiciones puzolánicas), el material de las microcápsulas jugó un papel importante en la reducción de la permeabilidad. Es decir, una capa de gel de sílice podría participar en la hidratación del cemento y mediante una reacción fisicoquímica, ayudaría en la dispersión de las microfibras de carbono. Las fibras más pequeñas en una matriz de concreto a menudo se asocian con reducciones en la permeabilidad, por lo tanto, la acción conjunta de los materiales y el agente reparador es eficaz para reducir la permeabilidad del mortero.

CAPÍTULO 3

Metodología

3.1 Marco metodológico.

Nivel de la investigación.

Investigación exploratoria.

Esta investigación pretende determinar si los concretos con propiedades de auto reparación, que emplean agregado grueso de roca caliza impregnado con silicato de sodio (Na_2SiO_3) y encapsulado con alcohol polivinilo (PVA) tienen un mejor desempeño en pruebas de durabilidad ante el proceso de carbonatación y de penetración de cloruros.

Diseño de investigación.

Investigación experimental.

Se llevará a cabo una serie de pruebas físicas y de durabilidad en los concretos experimentales con propiedades de auto reparación versus concretos de control.

Antes de describir las etapas del trabajo desarrollado para evaluar las propiedades físicas y de durabilidad se resumirá de manera general el proceso de impregnación y encapsulación efectuado con anterioridad.

Impregnación con silicato de sodio y encapsulación con PVA.

El agregado grueso empleado se caracterizó físicamente y fue sometido a cuarteo y homogenización previo a desecarlo en mufla durante 24 h a 110°C . Una vez desecado se impregnó con una solución de silicato de sodio al 15% en peso en una cámara al vacío (-3 Bar) durante 60 min hasta que alcanzó la condición de saturado. Una vez retirados de la cámara de impregnación se secaron superficialmente para tener una condición de saturado superficialmente seco y finalmente se sometieron a un revestimiento por inmersión en PVA, secados con una corriente de aire caliente para fijar la encapsulación. Dichos agregados fueron adicionados a las mezclas de concreto experimental, sustituyendo el 100% de los agregados en condición natural empleados para los cilindros de control. Los especímenes de concreto fueron elaborados siguiendo la norma NMX-C159-ONNCE-2004 usando una relación a/c de 0.5. Finalmente, los concretos fueron ensayados en estado plástico y sometidos a un proceso de

curado en tanque de agua durante 7, 14 y 28 días para, una vez transcurridos los lapsos de curado, evaluar sus propiedades físicas, mecánicas y de auto reparación (ver Anexos) (Hernández Susana, 2018). Los cilindros estudiados en pruebas físicas no destructivas se resguardaron durante un promedio de 20 meses en el laboratorio de construcción del ITCH y fueron empleados en la presente investigación para evaluar nuevamente sus propiedades físicas y de durabilidad.

3.2 Delimitación del área de estudio.

Para el desarrollo de los trabajos de investigación se emplearon 28 cilindros de concreto. Las características de los cilindros se enlistan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Delimitación de los trabajos de investigación.

Características	Cilindros experimentales	Cilindros de control
Cantidad		14
Edad		20 meses
Dimensiones (diámetro – altura)		75 mm x 150 mm
Condición del agregado (Agregado grueso Calizo de la Península de Yucatán)	Impregnados con solución de silicato de sodio (15%) y encapsulado con PVA	Agregado saturado con agua
Relación a/c		0.5
Cemento		Cemento Portland Compuesto
Normativa de elaboración		NMX-C159-ONNCE-2004

Los especímenes después de su fabricación y curado estuvieron en resguardo bajo las mismas condiciones atmosféricas (entorno, humedad relativa y temperatura).

El trabajo se limita al estudio de durabilidad ante carbonatación natural y penetración del ion cloruro ya que son dos de las afectaciones que propician el mayor deterioro en las estructuras de concreto armado en zonas costeras. De igual forma se hicieron pruebas físicas de densidad aparente y porcentajes de absorción y porosidad, variables que están correlacionadas de forma directa con la calidad de un concreto durable.

3.3 Variables.

Variables Dependientes.

- Resistencia a penetración del ion cloruro.
- Resistencia a carbonatación.
- Absorción.
- Densidad aparente.
- Porosidad total.

Variables Independientes.

- Agregado grueso impregnado con silicato de sodio y encapsulado con PVA.
- Agregado grueso en condiciones normales.
- Concentración salina de agua sintética de mar.

Variables a Controlar.

- Temperatura.
- Tiempo.
- Concentración de soluciones (porcentaje de reactivos).
- Tamaño y dimensiones de corte de los cilindros.

3.4 Método de trabajo y diseño experimental.

En el afán de extender el desempeño de concretos con propiedades de auto reparación ante dos de los factores más citados en la literatura que afectan la durabilidad de las estructuras de concreto: el proceso de carbonatación y la penetración de iones cloruro (Cl^-), se propone un trabajo experimental basado en ensayos de laboratorio con probetas de cilindros experimentales y de control para comparar los resultados arrojados en ambos casos.

3.4.1 Resumen del programa experimental.

- Seis especímenes (tres experimentales y tres de control), fueron ensayados de acuerdo a la norma ASTM C642 para obtener la densidad aparente, el porcentaje de porosidad y de absorción.
- Doce especímenes (seis experimentales y seis de control), fueron sometidos a pruebas de carbonatación siguiendo las recomendaciones de la RILEM CPC 18 y de la Red DURAR mediante un indicador ácido-base.
- Diez especímenes (cinco experimentales y cinco de control), fueron sometidos a un proceso de inmersión en agua sintética de mar para posteriormente determinar la presencia de cloruros totales siguiendo el método del Departamento de Transporte de Florida (FDOT *Florida Department Transportation*).

3.4.2 Diagrama de flujo del procedimiento experimental.

La Figura 3.1 muestra el diagrama general de flujo de trabajos, en las cuales se indica de manera general la normatividad de la ASTM, RED DURAR y RILEM para su correcta ejecución.

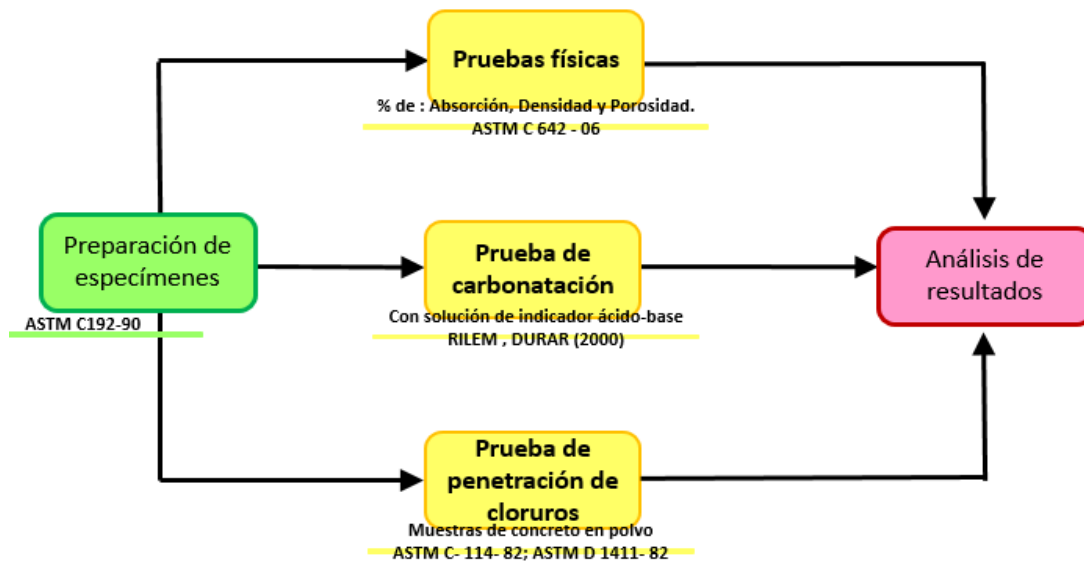


Figura 3.1 Diagrama de flujo del procedimiento experimental.

3.5 Etapas del diseño experimental.

Para un mejor desarrollo del método experimental, ésta investigación se ha dividido en cinco etapas las cuales se desglosan en la Figura 3.2.

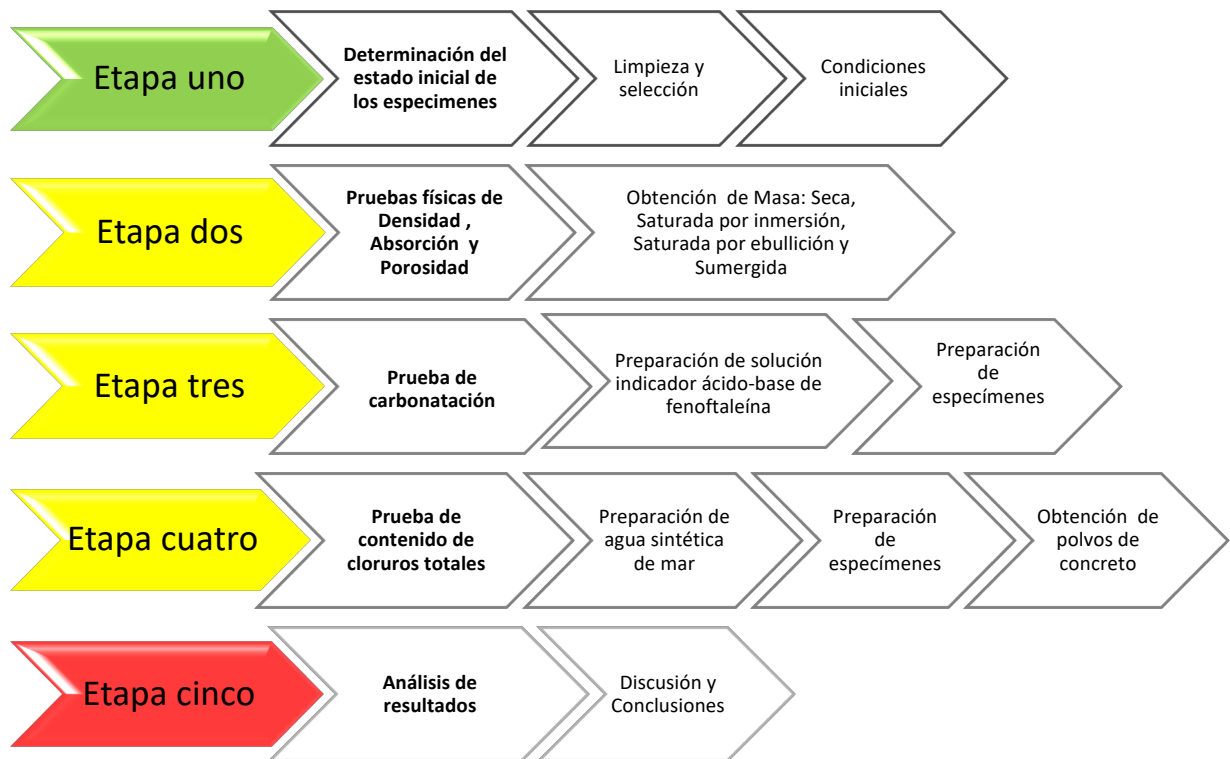


Figura 3.2 Etapas del proceso experimental.

3.6 Experimentación.

A continuación, se describen de manera general los procedimientos y ecuaciones empleadas en el programa experimental. Las determinaciones físicas realizadas al concreto se encuentran normadas por la ASTM, las pruebas de durabilidad son adaptaciones de varias determinaciones por lo que resultó necesario describirlas para su reproducibilidad en futuros trabajos.

3.6.1 Etapa uno.

Determinación del estado inicial de los cilindros.

Los cilindros después de su fabricación y curado estuvieron en resguardo bajo las mismas condiciones atmosféricas (humedad relativa, temperatura y ambiente) en el laboratorio de materiales del ITCH teniendo una edad promedio de 20 meses al momento de efectuar las pruebas. En la Figura 3.3 se observa el entorno del laboratorio donde se resguardaron los cilindros, el elemento contenedor tenía orificios que permitieron el libre flujo de aire.



Figura 3.3 Resguardo de cilindros en el laboratorio de construcción del ITCH.

Procedimiento.

El trabajo experimental inició con la limpieza y revisión general del estado de los especímenes. La limpieza consistió en remover polvo y suciedad acumulada. Posteriormente, fueron rotulados como se muestra en la Figura 3.4 (a), la nomenclatura empleada permitió identificar cada cilindro, el tipo de mezcla con el que fue elaborado y el tiempo de curado.

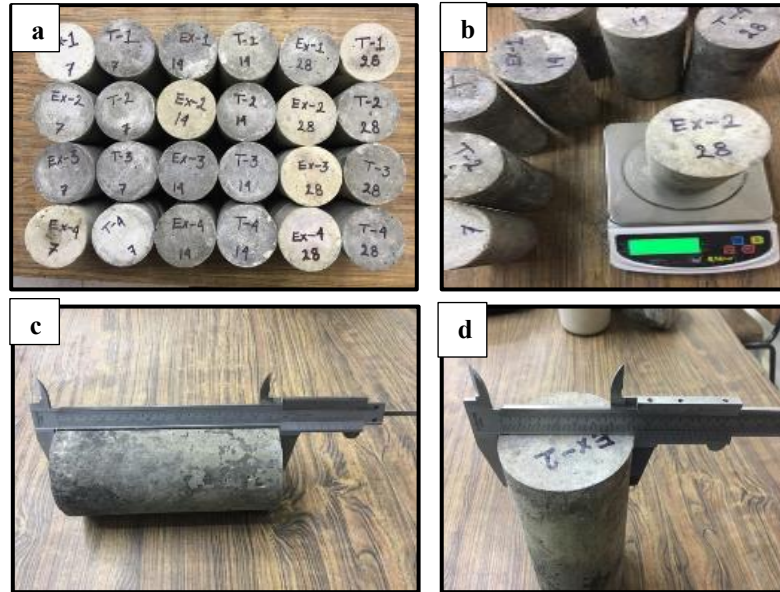


Figura 3.4 (a) Recopilación de los cilindros, (b) Pesaje de cilindros, (c) Medición de altura y (d) Medición de diámetro.

Después se procedió a recabar los datos de las condiciones en que se encontraban los cilindros. Se determinó su masa, diámetro y altura como se muestra en la Figura 3.4 (a, b y c)) con la finalidad de determinar las variaciones de volumen significativas entre los especímenes experimentales y los de control.

3.6.2 Etapa dos.

Densidad, absorción y porosidad.

Para esta prueba se seleccionaron tres cilindros experimentales y tres cilindros de control, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C 642 – 06. Este método de prueba

cubre las determinaciones de la densidad aparente, porcentaje de absorción y porcentaje de huecos en el concreto endurecido (porcentaje de porosidad). Los cilindros de concreto estaban libres de grietas, fisuras o bordes rotos visibles.

Procedimiento:

Obtención de la masa seca.

Lo primero que se realizó fue determinar la masa de las probetas en estado seco, esto se consiguió usando un horno a una T de 100°C durante 72 h (Figura 3.5) retirando las probetas del horno cada 24 h y dejándolas enfriar a temperatura ambiente entre 20°C y 25°C para registrar su peso hasta que su variación fue menor del 0.5% con respecto al peso anterior, al último dato se le designó con la letra “A”.



Figura 3.5 Secado de los cilindros en horno

Obtención de la masa saturada por inmersión.

Para obtener la masa saturada, se sumergieron las probetas en agua a una T de 21°C ± 2 °C por 72 h. Se retiraron y secaron superficialmente cada 12 h para registrar su peso (Figura 3.6), hasta que dos registros consecutivos mostraron un aumento de masa menor al 0.5 % respecto al de la masa mayor, se designó con la letra “B” al último registro.

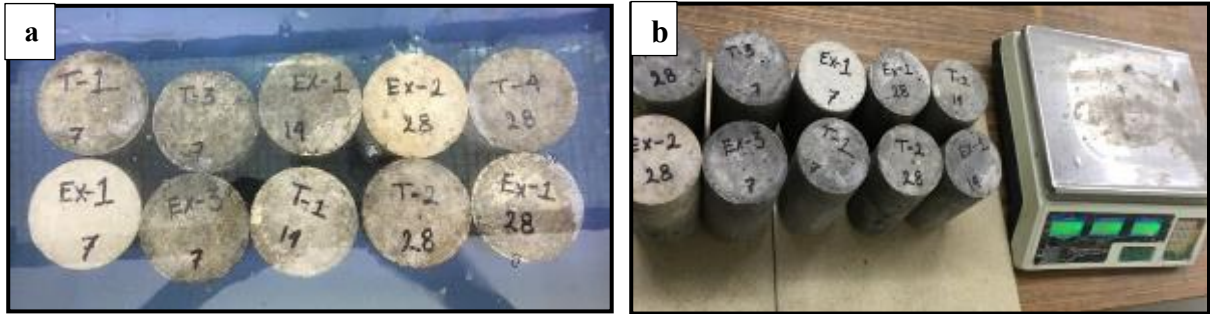


Figura 3.6 (a) Inmersión de las probetas en agua y (b) Determinación de la masa.

Para esta determinación se dispusieron las probetas en un recipiente metálico y se agregó agua hasta cubrirlas totalmente, después se colocó el recipiente sobre una parrilla eléctrica y se mantuvo en ebullición durante 5 h asegurando que los especímenes se mantuvieran sumergidos en su totalidad como se muestra en la Figura 3.7 (a), posteriormente se dejó enfriar el recipiente en condiciones ambientales hasta alcanzar una T de 25°C a 20°C, seguido, se retiraron las probetas del recipiente y se retiró la humedad superficial, procediendo a determinar la masa de cada probeta, designando a este valor como masa saturada por ebullición superficialmente seca, designándole la letra “C”.

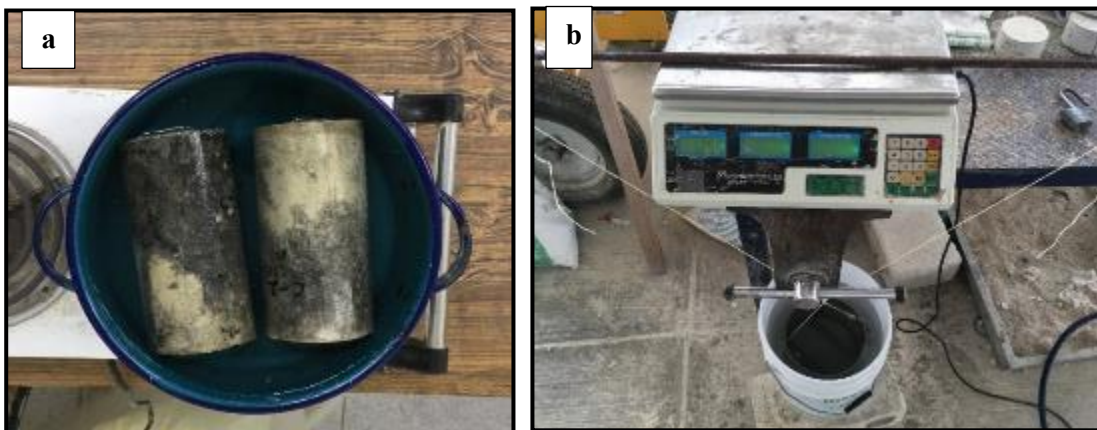


Figura 3.7 (a) Inmersión de las probetas en agua en ebullición y (b) Pesaje en inmersión.

Determinación de la masa de la probeta sumergida.

Para realizar este procedimiento, se empleó un contenedor con agua a temperatura ambiente, en su interior se introdujo una canastilla con orificios que colgaba de un travesaño sobre una báscula, la canastilla quedaba suspendida en equilibrio sin tocar los extremos, ni la base del contenedor, formando una balanza hidrostática, como se muestra en la Figura 3.7 (b), posteriormente se colocó dentro de la canastilla un espécimen a la vez, para obtener su peso sumergido en agua, a este valor se le asignó la letra “D”.

Cálculos.

Empleando los datos de las masas determinadas, de acuerdo con los procedimientos descritos anteriormente, se realizaron los cálculos a partir de las siguientes ecuaciones:

Absorción después de la inmersión,

$$\% = [(B - A) / A] \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Absorción después de inmersión y ebullición,

$$\% = [(C - A) / A] \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Densidad aparente seca,

$$\% = [A / (C - D)] \cdot p = \mathbf{g1} \quad \text{Ec. (3)}$$

Densidad aparente después de la inmersión,

$$= [B / (C - D)] \cdot p \quad \text{Ec. (4)}$$

Densidad aparente después de inmersión y ebullición,

$$= [C / (C - D)] \cdot p \quad \text{Ec. (5)}$$

Densidad aparente,

$$= [A / (B - D)] \cdot p = \mathbf{g2} \quad \text{Ec. (6)}$$

Volumen de poros permeables (vacíos),

$$\% = (g2 - g1) / g2 \times 100 \quad \text{ó} \quad (C - A) / (C - D) \times 100 \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde:

A = masa de muestra secada al horno en aire, g.

B = masa de la muestra de superficie seca en el aire después de la inmersión, g.

C = masa de la muestra de superficie seca en el aire después de la inmersión e hirviendo, g.

D = masa aparente de muestra en agua después de la inmersión e hirviendo, g.

g1 = densidad aparente, seca, mg / m^3 .

g2 = densidad aparente, mg / m^3 .

p = densidad del agua = $1 \text{ mg} / \text{m}^3 = 1 \text{ g} / \text{cm}^3$.

3.6.3 Etapa tres.

Prueba de profundidad de carbonatación.

Para esta prueba fueron seleccionados seis cilindros experimentales y seis cilindros de control, posteriormente, las pruebas fueron realizadas según lo establecido en la Red DURAR y en la RILEM. En donde fue posible determinar la carbonatación en el concreto con una solución indicador ácido-base.

Procedimiento.

Solución indicadora ácido-base.

Preparación de solución de fenolftaleína:

Fue preparada una suspensión (solución) de fenolftaleína al 01%, para lo cual fue pesado 1 g de fenolftaleína (Figura 3.8 (a)), que fue mezclado con 49 ml de alcohol etílico desnaturalizado y 50 ml de agua destilada (Figura 3.8 (b)). Para obtener una suspensión

homogénea, ésta fue sometida a un proceso de agitación vigorosa (500 rpm) durante 25 min (Figura 3.8 (c)). Finalmente, la solución obtenida fue mantenida en un aspersor para su posterior uso.

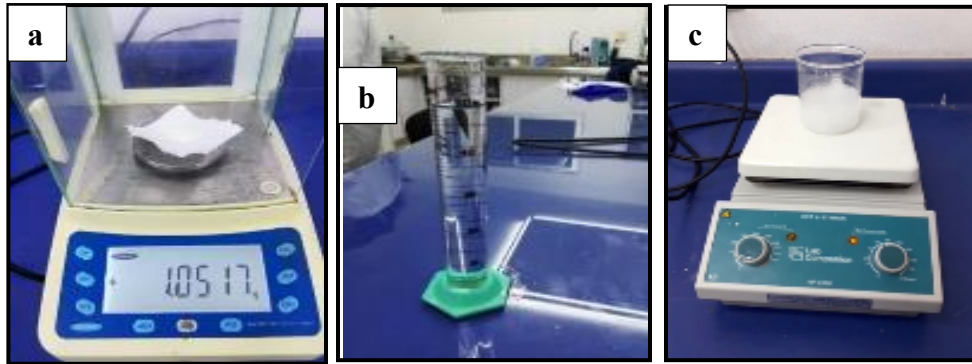


Figura 3.8 (a) Pesaje de fenolftaleína (b) Medición de alcohol etílico y (c) Agitación de solución.

Preparación de especímenes.

Los cilindros de concreto de 75 mm x 150 mm fueron marcados al centro (Figura 3.9 (a)), para guiar el corte que se realizó empleando un cincel y un martillo. Al fracturar el cilindro en dos partes, se procedió a limpiar las superficies interiores, eliminando el polvo. En la Figura 3.9 (b) se puede observar la herramienta empleada en la evaluación de carbonatación.

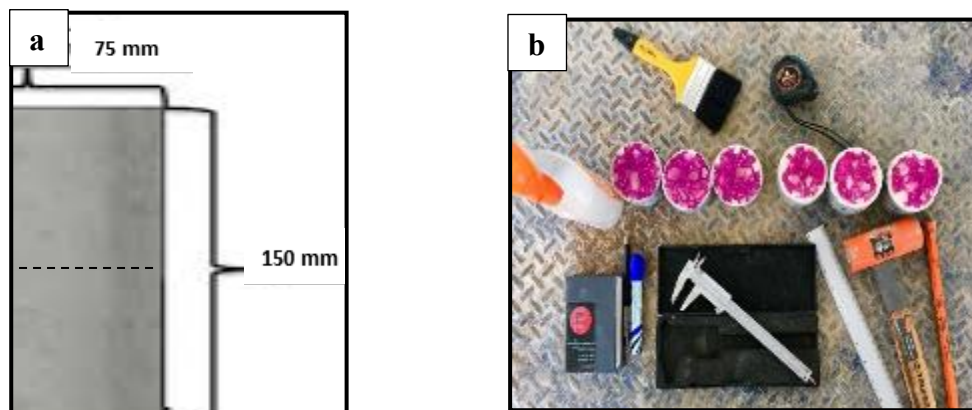


Figura 3.9 (a) Marcas intermedias en las probetas y (b) Medición del frente de carbonatación.

Determinación de la profundidad de carbonatación.

La Red DURAR y la RILEM recomiendan que después de realizar el corte o que el espécimen se encuentre en contacto con el medio ambiente no deben trascurrir más de 15 minutos para aplicar la solución ácido-base de fenolftaleína con el aspersor. Después de la aplicación por aspersión se produce una coloración fucsia que indica un pH alcalino en un rango de viraje de pH de 8.5 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.5 y presentando un color fucsia por encima de 10. La franja que sigue incolora es la zona carbonatada o también conocido como frente de carbonatación. Una vez evidenciado el viraje de la solución en el concreto, el espesor de la zona carbonatada fue medido con precisión en cinco puntos identificando los valores mínimos y máximos (Figura 3.10 (a) y (b)), evitando realizar mediciones sobre agregados para evitar alteraciones al realizar la media aritmética, este procedimiento se realizó en el tiempo establecido (menos de 20 min).

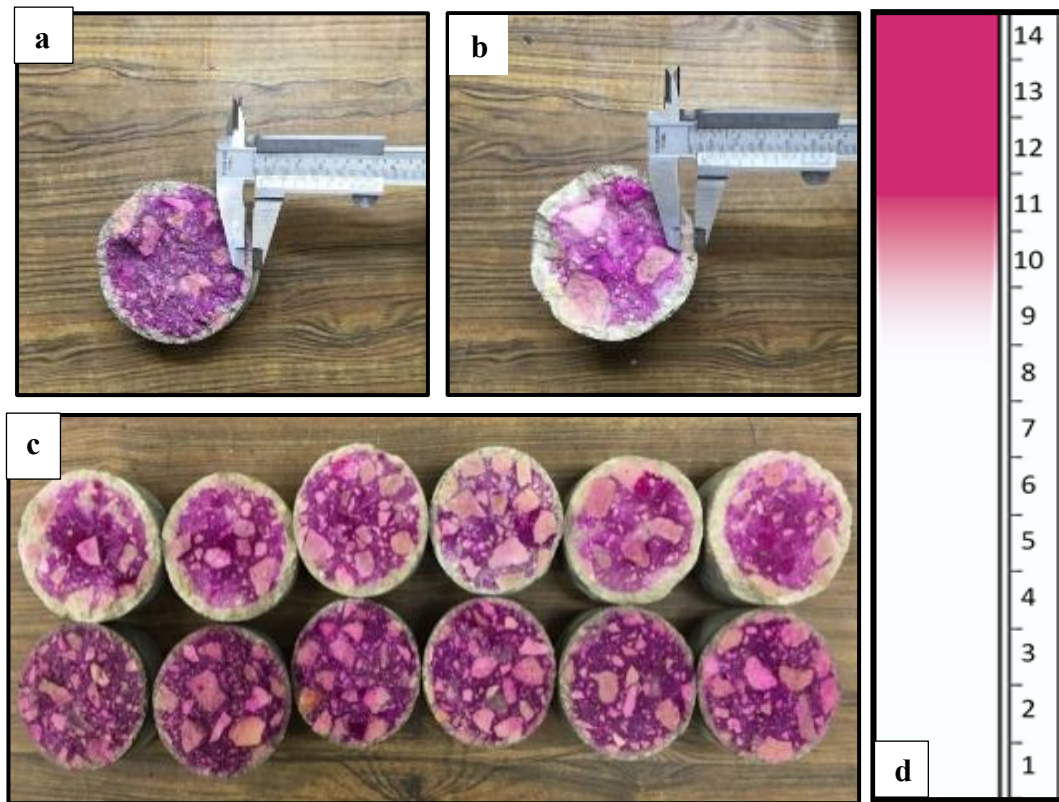


Figura 3.10 (a y b) Cuantificación de carbonatación (c) Probetas de control (arriba) y experimentales (abajo) y (d) Coloración de la fenolftaleína en función del pH.

En la Figura 3.10 (c) se puede apreciar, en la parte superior los especímenes que fueron realizados con concreto normal o de control y en la parte inferior los que fueron elaborados con concreto experimental, también se puede distinguir la diferencia en el espesor del frente de carbonatación, así como la diferente tonalidad de coloración entre los especímenes de control y los experimentales, la coloración con mayor intensidad la tienen los concretos experimentales lo que indica que tienen un pH superior como se puede apreciar en la Figura 3.10 (d), la cual indica la coloración de la fenolftaleína dependiendo del pH en el que se encuentre.

Profundidad de carbonatación ajustada para una forma plana infinita.

Debido a que se emplearon probetas cilíndricas, fue necesario hacer un ajuste de las mediciones de las profundidades de carbonatación, como si se tratara de una superficie plana infinita, siguiendo el procedimiento sugerido por (Jiménez Torrez, Luis Felipe, 2017).

$$Pf = re\sqrt{(1-p)2\ln(1-p)} + p(1 - \frac{p}{2}) \quad \text{Ec. (8)}$$

$$cf_k = \frac{pf}{pr} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$p = \frac{pr}{re} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

Pf = Profundidad de carbonatación ajustada para una forma plana infinita.

re = radio nominal del espécimen de prueba, mm.

p = relación entre el frente de carbonatación promedio y el radio nominal.

x = Medición real del frente de carbonatación, en mm.

pr = Frente de carbonatación promedio, en mm.

p = Relación entre el frente de carbonatación promedio y el radio nominal.

cfk = Factor de corrección de la profundidad de carbonatación (relación entre pf y pr).

Cálculo de la velocidad de carbonatación.

Para realizar la predicción de la velocidad de avance del frente de carbonatación uno de los modelos más sencillos es el que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición.

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} \sqrt{t} \quad \text{Ec. (11)}$$

Con los resultados de una determinación de profundidad de carbonatación es posible predecir la progresión de la misma y el tiempo en el cual alcanzará al acero de refuerzo del concreto si se conoce la profundidad de éste.

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$t = \left(\frac{ec}{K_{CO_2}} \right)^2 \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde:

X_{CO_2} = Profundidad de carbonatación, en mm

K_{CO_2} = Coeficiente de carbonatación, en mm/año^{0.5}

t = Tiempo en años

ec = Profundidad de la armadura de acero

Se calcula el coeficiente K_{CO_2} de la primera determinación y el tiempo en que ocurrió la carbonatación. Se utiliza ese coeficiente junto con la profundidad de la armadura (ec) y se determina en cuanto tiempo la carbonatación alcanzará el acero de refuerzo.

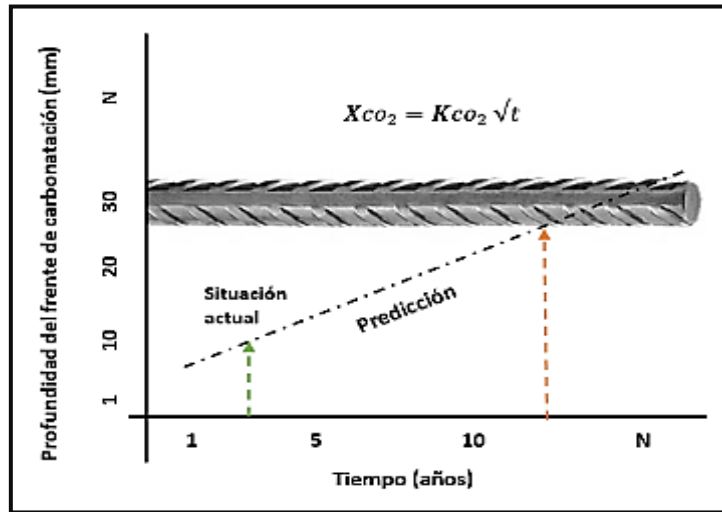


Figura 3.11 Gráfica de predicción del tiempo de vida útil del acero de refuerzo en función del avance del frente de carbonatación.

La Figura 3.11 representa la gráfica de la determinación del tiempo necesario para que la carbonatación alcance el acero de refuerzo.

3.6.4 Etapa cuatro.

3.6.4.1 Prueba de cloruros.

Para realizar esta prueba se dispuso de diez cilindros (cinco de control y cinco experimentales) con las características mencionadas con anterioridad.

La metodología empleada para determinar el comportamiento de las muestras de concretos con propiedades de auto reparación ante la penetración de cloruros provenientes de agua sintética de mar, se detalla a continuación.

Contenido de cloruros antes de la inmersión.

Antes de someter a inmersión los especímenes, se les cortó una rodaja de 15 mm de espesor (Figura 3.12 (a)), posteriormente, las rodajas se pulverizaron empleando un mortero de

porcelana, los polvos obtenidos se cribaron con el tamiz No. 50 hasta obtener 6 g de polvo por cada rodaja de concreto, los polvos se resguardaron en bolsas de plástico para su posterior análisis (Figura 3.12 (b)). Este procedimiento se realizó para determinar la concentración de cloruros que contenían los concretos antes de la inmersión, adquiridos por haber sido curados y elaborados con agua potable de la red de suministro local.



Figura 3.12 (a) Corte de rodajas previo a la inmersión (b) Pulverización de rodajas.

Para la evaluación de los resultados se utilizó la ecuación 14, la cual expresa la cantidad de miligramos de cloruros por litro de solución de nitrato de mercurio, o lo que es igual a las partes por millón (ppm) en solución, correspondiente a una muestra de concreto antes de ser inmersa, conocido comúnmente como “Blanco”.

$$ppm \text{ Cl} = \left[\frac{12 * (B) * M * 35.5(1000/Va)}{1000} \right] \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

B = Cantidad de solución de nitrato de mercurio utilizada para la valoración del blanco (en mm).

M = Concentración del nitrato de mercurio en moles por litro (en M).

Va = Volumen de la muestra analizada.

El método que determina la cantidad de cloruros, se explica más adelante cuando se analiza el contenido de cloruros en función del tiempo de inmersión en solución salina.

Acondicionamiento de los cilindros.

Los cilindros destinados al análisis de difusión de cloruros se prepararon de la siguiente manera:

Se marcó la nomenclatura sobre la circunferencia del cilindro para su identificación, posteriormente se sellaron las caras superior e inferior con una capa de pintura impermeabilizante alquidámica, para impedir el ingreso de la solución acuosa a través de éstas áreas del concreto (Figura. 3.13 (a) y (b)). El sellado fue necesario para que el ingreso de cloruros de sodio hacia el interior del concreto fuera en forma radial, es decir, que penetrara en una sola dirección, para determinar con mayor precisión, las diferentes cantidades de cloruros infiltrados en los cilindros de concreto a distintas distancias de la superficie de contacto.

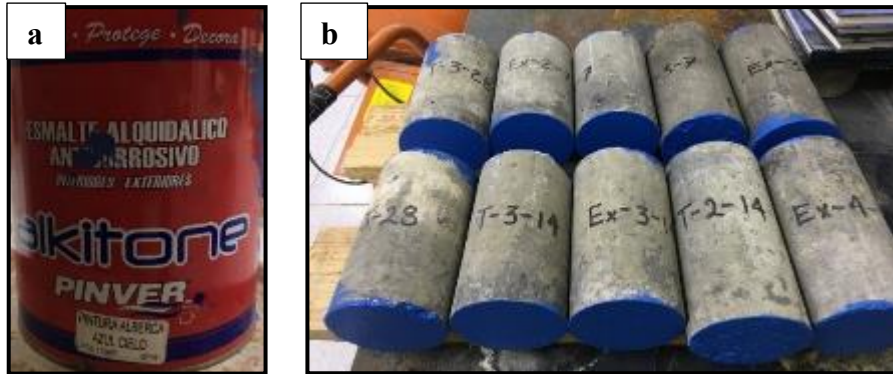


Figura 3.13 (a) Pintura alquidámica empleada y (b) cilindros sellados.

Preparación del agua sintética de mar.

La solución salina que simula el agua de mar se preparó usando sal marina para acuario disuelta en agua destilada, similar a lo establecido en la norma ASTM D 1141-98. La proporción empleada fue de 35 g de sal por un litro de agua destilada, lo cual representa 35,000 ppm, valor de concentración que simula un ambiente marino (Rodríguez et al., 2013),(Tovar et al., 2013).

La sal se disolvió con la ayuda de un agitador magnético a una velocidad de 400 rpm durante 5 min (Figura 3.14 (b)). La solución está dentro de los parámetros precisados en la Tabla 3.2 para el agua sintética de mar.

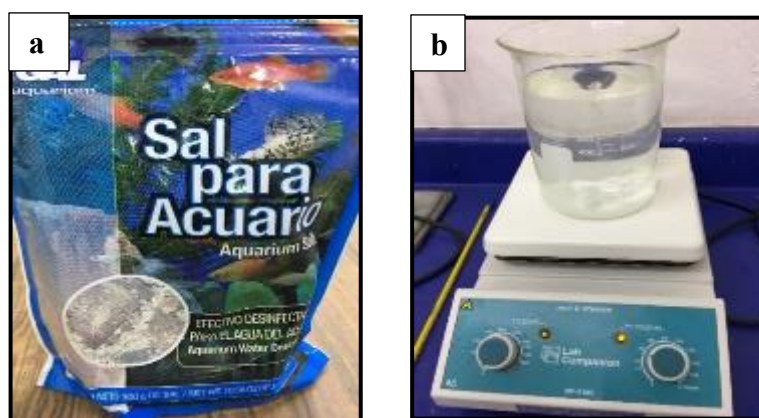


Figura 3.14 (a) Sal para acuario empleada y (b) Disolución en el agitador magnético.

Tabla 3.2 Composición química promedio del agua sintética de mar (SEMARNAT), (ASTM D 1141-98), (González, 2018).

Sales disueltas	Peso (g) por cada 1000 ml de agua	% Total
Cloruro de Na	27.213	77.8
Cloruro de Mg	3.807	10.9
Sulfato de Mg	1.658	4.7
Sulfato de Ca	1.260	3.6
Sulfato de K	0.863	2.5
Carbonato de Ca	0.123	0.5
Bromuro de Mg	0.076	
(Salinidad aproximada 3.45% - pH 7.9 – 8.3)		

Proceso de inmersión de los cilindros.

Los cinco cilindros de control y los cinco experimentales se sumergieron en su totalidad dentro de un contenedor con agua sintética de mar, a una temperatura promedio de 25 °C,

dejándolos en inmersión durante dos semanas, verificando diariamente la temperatura y el nivel de la solución salina (Fig. 3.15).

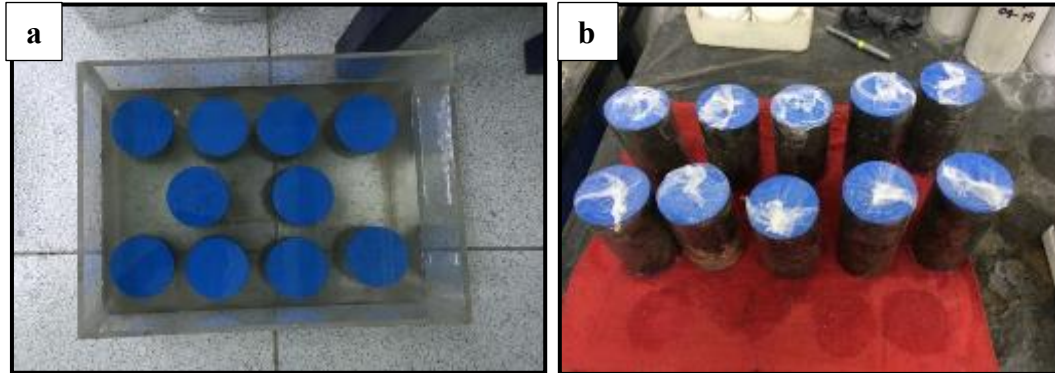


Figura 3.15 (a) Cilindros inmersos en solución salina (b) Cilindros después de inmersión.

Corte de rodajas de los cilindros.

Después de dos semanas en inmersión fueron retirados los cilindros del contenedor y con una franela se limpió el exceso de agua. A continuación se protegieron con una película plástica de emplaye, para evitar que se contaminaran de polvo al cortarlos, esto sirvió también para marcar sobre la circunferencia a 20 mm de la base del espécimen (Figura 3.16 (a)), después se procedió a cortar sobre la marca, empleando un esmeril con un disco de metal adiamantado, obteniendo una rodaja por cilindro (Figura 3.16 (b)).

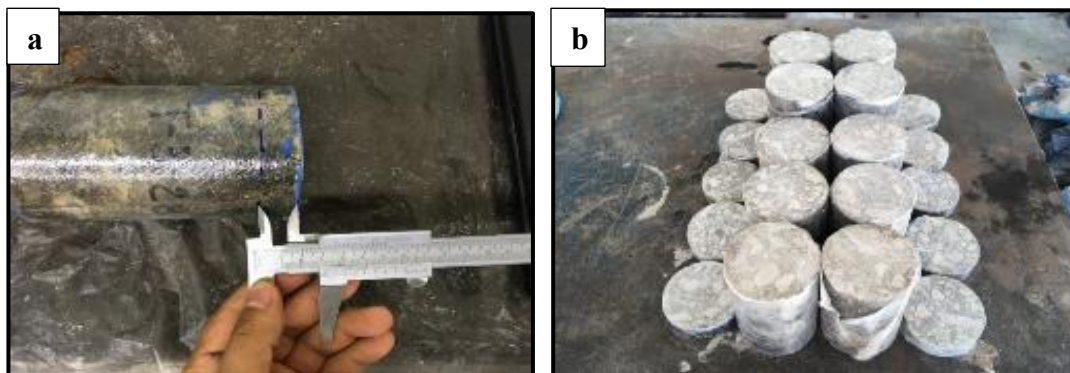


Figura 3.16 (a) Marcado de cilindros (b) Corte de cilindros.

Posteriormente se procedió a sellar nuevamente la cara expuesta del cilindro y después de dejar secar la pintura alquidámica de 24 a 32 h. Se sumergieron nuevamente en su totalidad en el contenedor con la solución salina, realizando el mismo procedimiento de corte de rodajas cada dos semanas, en la Tabla 4.10 se marcan los periodos de inmersión y de corte de los cilindros.

Barrenado a diferentes circunferencias de profundidad.

Las rodajas obtenidas se marcaron con un compás a 5 mm, 15 mm y a 25 mm de la circunferencia del cilindro como se puede apreciar en la Figura 3.17 (a). A continuación fue barrenada cada circunferencia por separado empleando un taladro con brocas de diferente diámetro, para obtener el polvo de cada circunferencia en específico (Figura 3.17 (b)).

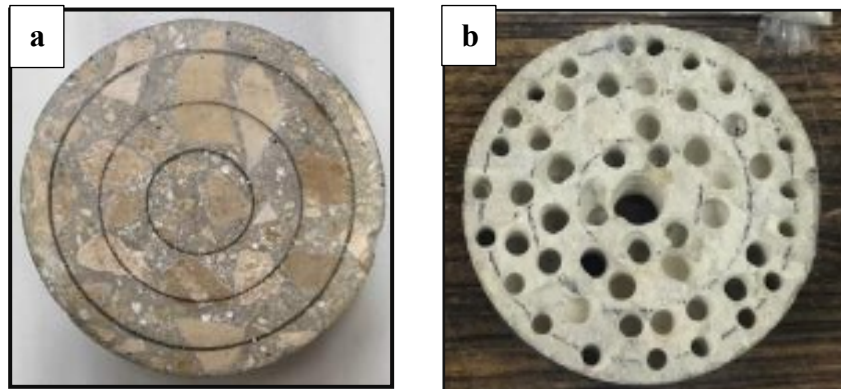


Figura 3.17 (a) Marcado de circunferencias y (b) Barrenado en cada circunferencia.

Después de barrenar se empleó un mortero de porcelana para disminuir el tamaño de partícula de los granos de polvo, posteriormente fue cribado con el tamiz No. 50, obteniendo 6 g de polvo por cada circunferencia. Se empleó el tamiz de ese diámetro porque con el tamaño de partícula obtenido no influye en la extracción de los cloruros libres existentes en la muestra (Castro-Borges P., 2012). Los polvos obtenidos de cada circunferencia y rodaja fueron resguardados independientemente en bolsas de plástico para su posterior análisis (Figura 3.26 (a y b)).



Figura 3.18 (a) Polvos y rodajas barrenadas y (b) Polvos de concreto cribado en tamiz No. 50.

Procedimiento para determinar la cantidad de cloruros en los concretos.

La cantidad de cloruros presente en un concreto puede ser determinada a través de diferentes técnicas analíticas (UNE, 80-217,1991; ASTM C-114-82; ASTM D411-82;FM-5-516,1987). La técnica seleccionada es de carácter destructivo y se basa en la obtención de una disolución a partir de la muestra sólida de los polvos de concreto.

El procedimiento de determinación de cloruros totales que se empleó corresponde al método del FDOT, debido a la facilidad de aplicación y confiabilidad en los resultados obtenidos en investigaciones anteriores (Jiménez Torrez, Luis Felipe, 2017), el cual se desarrolla fundamentalmente en las siguientes etapas:

a) En la primera etapa las muestras de polvo de concreto cribado fueron secadas a 110°C y enfriadas a temperatura ambiente en un desecador. Posteriormente se obtuvieron muestras duplicadas de 3 g aproximadamente.

b) En la segunda etapa, se preparó una solución por cada muestra, con 5 ml de agua destilada, 35 ml de ácido nítrico y algunas gotas de indicador de naranja de metilo hasta alcanzar una coloración rosada, la cual fue sometida a un proceso de digestión ácida calentándola hasta hervir con el fin de extraer los cloruros totales presentes en el polvo.

c) La tercera etapa, consistió en filtrar al vacío la solución. Lo cual se realizó en un diámetro y poro de 20 μm colocado en un embudo plano.

d) En la cuarta etapa las muestras filtradas fueron aforadas con agua destilada hasta alcanzar un total de 100 ml.

e) La quinta etapa correspondió a un proceso de titulación con nitrato de plata (AgNO_3) colocando las muestras en un agitador magnético. Los potenciales electroquímicos (mV) se leyeron en un voltímetro al introducir electrodos selectivos de cloruros en las muestras en agitación. En primer lugar, se analizó una muestra preparada con agua destilada y nitrato de potasio (KNO_3), denominada “blanco” que sirvió para determinar el potencial de escalamiento. Posteriormente se titularon las muestras aforadas con adiciones sucesivas de 0.5 ml (AgNO_3) hasta alcanzar el potencial antes obtenido, y cuatro adiciones posteriores para obtener una recta lo más definida posible.

f) Finalmente, en la sexta etapa, se obtuvieron los puntos de intersección de las rectas definidas por los potenciales eléctricos (mV) y la cantidad de AgNO (ml).

El cálculo se efectuó con la ecuación 15.

$$\% \text{Cl} = \frac{35.453 \text{VN}}{10 \text{W}} \quad \text{Ec. (15)}$$

Dónde:

%Cl = Concentración de cloruros por peso de concreto.

V = Al punto de intersección de la recta definida por los potenciales en el eje de las abscisas de una Gráfica de Grand (mV).

N = A la normalidad del nitrato de plata.

W = Peso de la muestra (g).

Para expresar los resultados en % por peso de cemento, se multiplicó la concentración obtenida por el peso volumétrico del concreto, dividiendo luego por el peso volumétrico del cemento.

Los coeficientes de difusión fueron calculados con la Ecuación 16 que da solución a la 2ª Ley de Fick (D. Callister, 2016) en estado no estacionario.

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2Dt}\right) \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde:

C_s = Concentración de cloruros en la superficie.

C_o = Concentración inicial de cloruros en el concreto.

C_x = Concentración de cloruros a una profundidad x .

t = Tiempo de exposición.

D = Coeficiente de difusión aparente de los cloruros (cm^2/s).

CAPÍTULO 4

Análisis y resultados

4.1 Descripción del estado inicial de los cilindros.

Las características de las probetas seleccionadas se describen en las Tablas 4.1 y 4.2. En ellas se puede apreciar la nomenclatura, peso, diámetro, altura, fecha de elaboración y el tiempo de vida promedio al momento del análisis. El diámetro en los cilindros es constante a 75 mm para los cilindros experimentales y de control. La altura varía en un cilindro para los de control y en cuatro para los experimentales. El peso de los cilindros experimentales y de control resultó con la desviación estándar más alta. Sin embargo, es de considerarse que el concreto suele presentar de manera natural cambios en su volumen (diámetro y altura) asociados a la edad del elemento, grado de exposición ambiental de la pieza y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, contenido y naturaleza de los agregados, contenido de agua, relación a/c de la mezcla y proporción agregado/cemento (IMCyC, 2012). La dilatación y la variación en el peso de los cilindros puede estar dada por la edad, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, principalmente.

Tabla 4.1 Datos de los cilindros de control.

Cilindros de control.					
Nomenclatura	Peso (g)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Fecha de elaboración	Tiempo transcurrido hasta su análisis
T1-7	1440	75	150	26 de febrero de 2018	Un año ocho meses
T2-7	1445	75	150		
T3-7	1450	75	150		
T4-7	1450	75	150		
T5-7	1450	75	150		
T1-14	1475	75	150	26 de febrero de 2018	Un año ocho meses
T2-14	1455	75	150		
T3-14	1450	75	150		
T4-14	1450	75	150		
T5-14	1450	75	150		
T1-28	1450	75	150	19 de febrero de 2018	Un año nueve meses
T2-28	1485	75	150		
T3-28	1455	75	150		
T4-28	1460	75	152		
Promedio	1454.6	75	150.1		

Tabla 4.2 Datos de los cilindros experimentales.

Cilindros experimentales.					
Nomenclatura	Peso (g)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Fecha de elaboración	Tiempo transcurrido hasta su análisis
Ex1-7	1450	75	151	26 de febrero de 2018	Un año ocho meses
Ex2-7	1445	75	150		
Ex3-7	1470	75	150		
Ex4-7	1455	75	150		
Ex5-7	1455	75	150		
Ex1-14	1435	75	150	26 de febrero de 2018	Un año ocho meses
Ex2-14	1455	75	150		
Ex3-14	1450	75	150		
Ex4-14	1460	75	151		
Ex5-14	1460	75	151		
Ex1-28	1455	75	151	19 de febrero de 2018	Un año nueve meses
Ex2-28	1445	75	150		
Ex3-28	1450	75	150		
Ex4-28	1445	75	150		
Promedio	1454.6	75	150.4		

De los 28 cilindros utilizados, fueron 14 experimentales y 14 de control, de los cuales se emplearon: 6 para pruebas físicas de porosidad, densidad y absorción; 12 para la prueba de carbonatación y 10 para la prueba de cloruros.

4.2 Densidad, absorción y porosidad.

El método empleado fue la prueba estándar para densidad aparente, porcentaje de absorción y vacíos en concreto endurecido (porcentaje de porosidad) ASTM C642-06. En las Tablas 4.3 y 4.4 se muestran los pesos en gramos por cilindro obtenidos bajo las diferentes condiciones.

Tabla 4.3 Datos de los pesos obtenidos en los cilindros de control.

Cilindros de control (150 mm).				
Muestra	Masa de las muestras (g)			
Control	Masa seca al horno	Masa saturada	Masa saturada después de ebullición	Masa sumergida aparente
Clave	A	B	C	D
T1-7	1410	1515	1495	840
T1-14	1445	1550	1540	860
T1-28	1455	1560	1545	880

Tabla 4.4 Datos de los pesos obtenidos en los cilindros experimentales.

Cilindros de control (150 mm).				
Muestra	Masa de las muestras (g)			
Experimental	Masa seca al horno	Masa saturada	Masa saturada después de ebullición	Masa sumergida aparente
Clave	A	B	C	D
Ex1-7	1445	1500	1500	825
Ex1-14	1405	1490	1470	820
Ex1-28	1420	1520	1490	825

Con los valores obtenidos se realizaron las Tablas 4.5 y 4.6, en las cuales se muestran las ecuaciones empleadas para las tres determinaciones, así como los resultados obtenidos por cilindro y el valor promedio. En éstas determinaciones se calculó un valor promedio de las muestras, independientemente de la edad de curado, pues debido a la edad que tenían los cilindros, este factor no afecta de manera significativa.

Tabla 4.5 Resultados obtenidos en las pruebas físicas de concretos de control.

Cilindros de control.				
Ecuación	Clave	Porosidad (%)	Determinación	
	Control		Densidad aparente	Absorción (%)
Porosidad % = $\frac{C-A}{D-C} \times 100$	T1-7	12.97	2.08	7.44
Densidad aparente = $\frac{A}{B-D} \cdot p$	T1-14	13.97	2.09	7.26
Absorción % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	T1-28	13.53	2.14	7.21
	Valor promedio	13.49	2.11	7.31

Tabla 4.6 Resultados obtenidos en las pruebas físicas de concretos experimentales.

Cilindros experimentales.				
Ecuación	Clave		Determinación	
	Experimental	Porosidad (%)	Densidad aparente	Absorción (%)
Porosidad % = $\frac{C-A}{D-C} \times 100$	Ex1-7	8.14	2.14	3.80
Densidad aparente = $\frac{A}{B-D} \cdot p$	Ex1-14	10.00	2.09	6.05
Absorción % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	Ex1-28	10.52	2.04	7.04
	Valor promedio	9.56	2.09	5.63

4.2.1 Densidad aparente.

La densidad del concreto se define como el peso por unidad de volumen y está asociada al grado de compactación de un material. Para un concreto convencional su valor oscila entre 2.25 y 2.5. La densidad normalmente experimenta ligeras variaciones con el tiempo, que provienen principalmente de la evaporación del agua de amasado y que en total puede significar una variación de alrededor del 7% de la densidad inicial (Aïtcin & J Flat, 2016).

Una buena densidad es resultado de buenas prácticas al momento de elaborar el concreto, generando un mínimo de huecos y poros, además se ve favorecida cuando el proceso de curado es en tanque de agua o cámara húmeda (como se realizó).

Es importante considerar además, que existe una relación directa entre la densidad y las propiedades del concreto: a una menor densidad del concreto endurecido, decrecen las cualidades intrínsecas del material, incrementando la absorción de agua y generando un mayor número de poros permeables (S. P. Zhang & Zong, 2014) por lo que el concreto se vería más propenso al ataque por este medio.

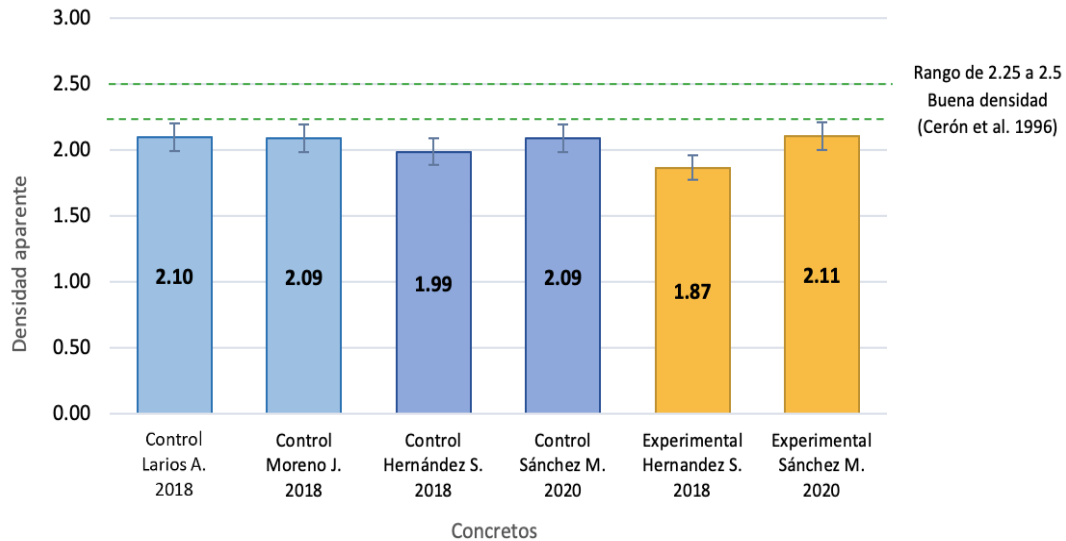


Figura 4.1 Gráfica de la densidad aparente.

En la Figura 4.1 se observan, en las dos primeras barras de la izquierda, los resultados obtenidos en estudios anteriores realizados por (Larios A., 2018) y (Moreno J., 2018), donde se empleó la misma relación a/c de 0.5 y se ocupó agregado calizo de la misma región, en ambas investigaciones se obtuvieron resultados similares en densidad aparente. Éstos resultados son un referente para contrastar las densidades que presentan los concretos que emplean el agregado calizo en la ciudad de Chetumal. Posteriormente, las dos barras del centro pertenecen a concretos de control, el primer valor corresponde al evaluado por Hernández, S. la cual tiene un valor de 1.99, mientras que el resultado obtenido en este estudio alcanzó un valor de 2.09, lo que indica que las probetas se densificaron durante los 20 meses que estuvieron en resguardo, ésta tendencia es característica del concreto debido a la continua hidratación de las partículas de cemento a medida que se alcanzan las máximas resistencias (Bullard et al., 2011). Finalmente, las dos barras de la derecha pertenecen a los concretos experimentales, en los resultados de Hernández, S. se puede observar una densidad igual a 1.87, alcanzando un valor de 2.1 en los estudios efectuados, lo anterior indica una mayor densificación para los concretos con agregado

impregnado, los cuales alcanzaron el valor máximo en la gráfica. Éste incremento de densidad tiene consecuencias positivas en las propiedades físicas de porosidad y absorción, principalmente para disminuir sus porcentajes. A pesar de dicho incremento, es importante resaltar que ninguno de los valores reportados alcanzaron un rango igual o superior a 2.25, a partir del cual (Cerón et al., 1996) marcan como una buena densidad para el concreto. Lo anterior puede ser consecuencia de las condiciones físicas propias del agregado de la zona, que como se ha mencionado anteriormente es poroso y de baja densidad (Solís Carcaño & I. Moreno, 2006), (Solís et al., 2012).

4.2.2 Porcentaje de absorción.

Para fines prácticos, la absorción superficial resulta más relevante de determinar, pues dicha zona es la que ofrece protección al acero de refuerzo. Una absorción inferior al 10% se considera adecuada para un concreto con relación de a/c 0.5 (Cerón et al., 1996) (Solís Carcaño & I. Moreno, 2006).

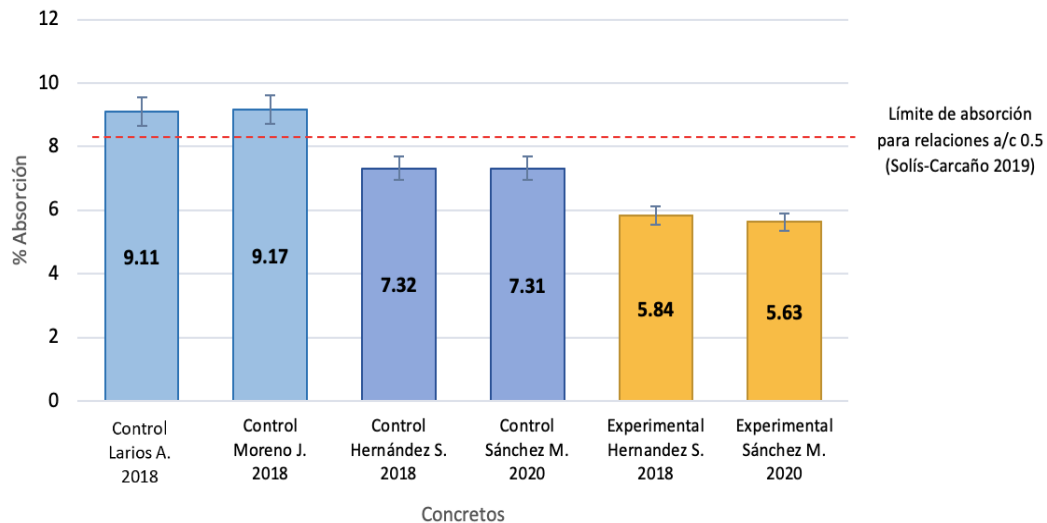


Figura 4.2 Gráfica de resultados en porcentaje de absorción.

Las dos primeras barras de la izquierda muestran los resultados obtenidos en estudios anteriores donde se empleó agregado calizo en condiciones normales. Los resultados de (Larios A., 2018) alcanzan un valor de 9.11% mientras que los de (Moreno J., 2018) oscilan en 9.17%, los dos valores son muy cercanos al límite que marca (Solís-Carcaño 2019) como máximo porcentaje de absorción para concretos elaborados con una relación a/c de 0.5, ya que como se ha mencionado con anterioridad, mientras mayor sea el porcentaje de absorción de un elemento de concreto, incrementa las posibilidades de que agentes agresivos externos penetren al interior de la matriz del concreto, mermando el rendimiento y durabilidad del elemento. Las dos barras del centro corresponden a los concretos de control, donde el resultado de Hernández, S. marca un 7.32% mientras el resultado obtenido en el presente estudio es de un 7.31%, indicando una constante en este valor en función del tiempo de resguardo. Por último, en los concretos experimentales (las dos barras de la derecha) Hernández S. reporta un porcentaje de absorción de 5.84% y la presente investigación arrojó un resultado de 5.63% existiendo una ligera reducción en la absorción de 0.19%, teniendo una diferencia de 1.69% en comparación con los concretos de control y una diferencia de hasta el 3.5% menor que los de investigaciones anteriores. A pesar de que esta diferencia no es tan elevada, da pauta para valorar una mejor calidad en los concretos con agregado impregnado (Solís et al., 2012) (NMX-C-263-ONNCCE-2010).

La absorción evaluada indicaría una menor interconexión de poros en la superficie de recubrimiento del concreto experimental. Este hecho puede asociarse a la formación de productos de hidratación en la superficie de las probetas debido a la humedad del ambiente y al propio proceso de hidratación a edades posteriores, favorecido por la presencia de silicato de sodio en el agregado, como se reportó con anterioridad (Hernández Susana, 2018). Además, un decremento en la absorción del concreto es evidente por la disminución de micro grietas tanto en el concreto de recubrimiento como en la ITZ (zona de contacto entre el agregado impregnado y la pasta cementante) (Hernández Susana, 2018) (Scrivener et al., 2004), hecho que se relaciona con la liberación del silicato de sodio de los agregados una vez transcurrido cierto tiempo a partir de su elaboración. Sin embargo, para tener una discusión más a detalle al respecto sería necesario un análisis microestructural y de fases cristalinas (DRX) con el fin de dictaminar qué

productos son los que realmente están propiciando la disminución de la absorción a estas edades de análisis.

4.2.3 Porcentaje de porosidad.

La porosidad es una medida de la proporción del volumen total del concreto ocupado por poros, y se acostumbra expresar en porcentaje. Si la porosidad es alta y los poros están interconectados, éstos contribuyen al transporte de los fluidos a través del concreto, de manera que su permeabilidad también es alta. Por otro lado, si los poros son discontinuos o inefectivos de otra manera con respecto al transporte, entonces la permeabilidad del concreto es baja, aun si su porosidad es alta (Solis Carcaño & I. Moreno, 2006).

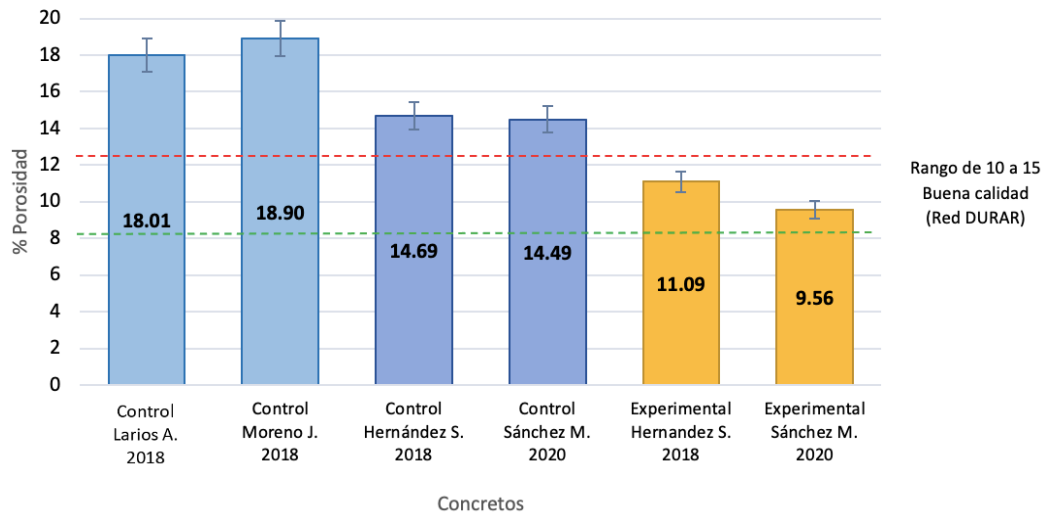


Figura 4.3 Gráfica de resultados en porcentajes de porosidad.

En la gráfica de la Figura 4.3 las dos barras de la izquierda, al igual que en los resultados de densidad, son de investigaciones realizadas con anterioridad. Estos valores sirven como referente de las propiedades físicas de los concretos que utilizan una relación a/c de 0.5 y

emplean agregado calizo. En ambos resultados descritos por (Larios A., 2018) y (Moreno J., 2018), es evidente que los valores están por encima del límite superior que marca la Red DURAR, que es de 10 a 15% de porosidad para un concreto de buena calidad. Los concretos de control reportados por (Hernández, S., 2018) alcanzan un valor de 14.69%, es decir, apenas por debajo del límite superior, mientras que en la presente investigación se alcanzó un valor de 14.49%, es decir, que aunque la porosidad disminuyó, aún no alcanza la definición de un concreto de muy buena calidad. Estos valores son casi invariables a pesar del tiempo que permanecieron en resguardo (20 meses). Por el contrario, para los resultados de los concretos experimentales, se obtuvo un valor por debajo del límite inferior tanto para los concretos evaluados por Hernandez S. con un porcentaje de porosidad de 11.09%, como para los de ésta investigación con un porcentaje de 9.56%, siendo este último valor, el único que está por debajo de lo establecido por la Red DURAR, indicando por tanto, que es un concreto de muy buena calidad, lo que incrementa consecuentemente sus prestaciones de durabilidad.

La diferencia en estos resultados puede estar asociada al proceso de cicatrización del micro agrietamiento (Mao et al., 2020), lo cual fue reportado en el trabajo anterior, así como a la técnica empleada en los concretos experimentales al permitir la formación de productos de hidratación al interior del agregado, en la ITZ y con ello reducir la porosidad en la pasta cementante (Hernández Susana, 2018). En cualquier concreto es importante disminuir el porcentaje de porosidad pues con ello se disminuye la exposición ambiental del concreto de recubrimiento y por tanto de la matriz cementante, disminuyendo el ingreso de líquidos y gases asociados al deterioro prematuro del concreto. Del mismo modo, estos valores bajos de porosidad se asocian a los obtenidos en absorción, lo que indica que además de que existe una menor cantidad de poros, estos son discontinuos y no favorecen las propiedades de transporte de los concretos.

El análisis de las propiedades físicas del concreto en función del tiempo y en las condiciones ambientales similares a una situación de exposición real permiten determinar el comportamiento del agente reparador en la hidratación del concreto a escala y condiciones reales.

El empleo del silicato de sodio según se ha reportado (Alghamri et al., 2016), (Restuccia et al., 2017), (Hernández Susana, 2018) propicia la continua formación del gel C-S-H (principal

producto resistente del concreto), a través de una segunda hidratación de la portlandita con el silicio. La formación continua de C-S-H genera concretos más resistentes, asociados a una pasta más densa, en la mayoría de los casos y por lo tanto a una disminución gradual de poros. Además de la formación del gel C-S-H en la matriz del cemento, se ha reportado que por la exposición al CO₂ del ambiente también se puede generar la precipitación de CaCO₃ el cual, mientras permanezca en el concreto de recubrimiento sin alcanzar el acero embebido resulta favorable para las propiedades físicas y mecánicas del concreto (De Muynck et al., 2008).

4.3 Carbonatación.

En la determinación de carbonatación es importante resaltar que haber realizado la determinación después de un proceso natural tiene mayor significancia que la evaluación de un proceso acelerado (como se realiza en la mayoría de ensayos para esta patología) (Venkat Rao & Meena, 2017). La literatura que estudia el fenómeno de carbonatación en un ambiente donde la estructura prestará servicio, es decir, en condición natural, es limitada, a pesar de que para fines prácticos resulta más adecuada pues representa el comportamiento real del elemento (Ekolu, 2016).

Dicho lo anterior, se presentan los resultados de las cinco mediciones y su promedio por cilindro realizadas al frente de carbonatación natural en ambos concretos (Tablas 4.7 y 4.8).

Tabla 4.7 Medidas de carbonatación obtenidas de los cilindros de control.

Nomenclatura	Cilindros de control.					Promedio (mm)
	Frente de carbonatación (mm)					
T2-7	6	5	5	6	4	5.2
T3-7	5	5	6	5	6	5.4
T2-14	6	5	6	5	7	5.8
T3-14	4	6	5	6	7	5.6
T2-28	5	7	6	5	5	5.6
T3-28	6	5	4	6	5	5.2
Promedio general						5.47

Tabla 4.8 Medidas de carbonatación obtenidas de los cilindros experimentales.

Nomenclatura	Cilindros experimentales.					Promedio (mm)
	Frente de carbonatación (mm)					
Ex2-7	3	2	3	4	2	2.3
Ex3-7	2	2	4	3	3	2.3
Ex2-14	2	3	2	4	4	2.5
Ex3-14	3	4	2	2	3	2.3
Ex2-28	3	2	3	4	3	2.5
Ex3-28	4	3	2	3	4	2.7
Promedio general						2.44

En las tablas 4.7 y 4.8 se muestra el frente de carbonatación promedio para los seis cilindros experimentales y para los seis cilindros de control, los cuales corresponden a 2.44 y 5.57 mm, respectivamente.

Tabla 4.9 Valores obtenidos al ajustar la profundidad de carbonatación a superficie plana infinita.

Concreto	p_r	r_e	p	$1-p$	$1-(p/2)$	p_r	cf_k
Control	5.47	37.5	0.15	0.85	0.93	5.33	0.97
Experimental	2.44	37.5	0.07	0.93	0.97	2.41	0.99

En la Figura 4.4 es posible apreciar la profundidad de carbonatación ajustada a una forma plana infinita y concuerda con lo observado en las imágenes de los cilindros al aplicar la solución de fenolftaleína, demostrando que los concretos de control tienen una profundidad de carbonatación 45% mayor que los concretos experimentales. Lo anterior indica que los mecanismos de transporte asociados a las propiedades físicas estudiadas (porosidad y absorción) repercuten directamente en los procesos de deterioro del concreto de control.

Es de considerarse, que la carbonatación, al ser una patología que evoluciona en función del tiempo (es un proceso lento y paulatino) y de la exposición al CO₂, depende de estos mecanismos de transporte, por lo tanto, la disminución de la porosidad y absorción en los concretos experimentales propician un menor ingreso de CO₂ que puede entrar por medio del agua o el aire y con ello, asegurar la permanencia del ambiente alcalino propio del cemento. En

la condición en la que se evaluó la carbonatación, la exposición al CO₂ fue gradual, progresiva y de acuerdo a la concentración de CO₂ del ambiente, es decir, sin someter a un proceso acelerado, por lo que, el comportamiento del concreto ha representado el comportamiento real de exposición. Ésta exposición ambiental favorece a los concretos experimentales para el fenómeno de auto reparación, debido a que están en presencia de humedad, condición que desencadena el mecanismo de reparación, sin embargo, también genera las condiciones para las sustancias antes mencionadas puedan ingresar con mayor facilidad a través de la humedad ambiental. En consecuencia de lo anterior, la exposición ambiental pudo haber cumplido una doble función, (1) la humedad propició la mejora de las propiedades de absorción y porosidad y (2) favoreció el ingreso de agentes dañinos en los concretos de control debido a la naturaleza del propio material, presentando un comportamiento similar al que ya presentan las estructuras de concreto encontradas en la ciudad de Chetumal.

De igual manera, en estudios previos (Venkat Rao & Meena, 2017) se ha demostrado que la profundidad de carbonatación se ve afectada directamente por la porosidad, un concreto más poroso tendrá una profundidad de carbonatación mayor. Como se observó en los resultados de porosidad, los concretos de control rebasaron el límite permitido de porosidad, consecuentemente la profundidad de carbonatación incrementó para estos cilindros.

Además de la porosidad, el silicato de sodio podría tener un efecto significativo en el acero de refuerzo (Ibrahim et al., 1999), debido a que éste compuesto permitiría mantener la alcalinidad de la pasta, asegurando con ello la pasividad de la capa protectora del acero (Sivasubramanian & Gino, 2019).

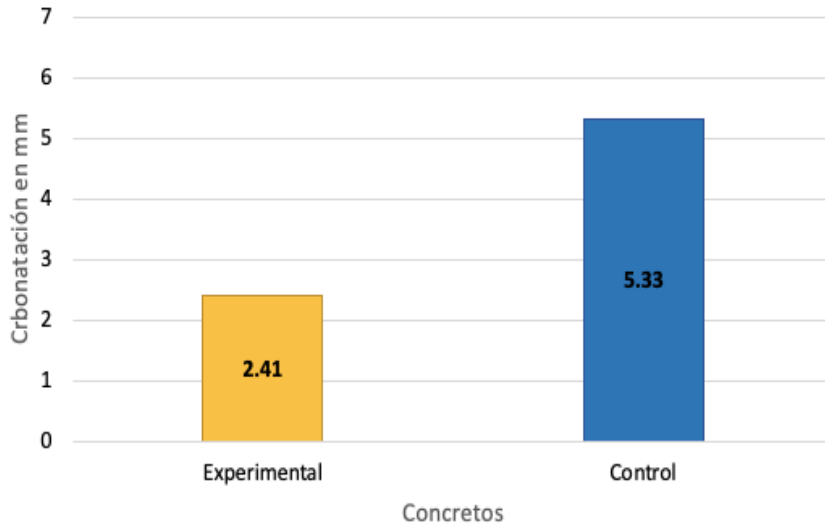


Figura 4.4 Gráfica del frente de carbonatación corregido para una superficie plana infinita.

Los coeficientes de carbonatación obtenidos se pueden apreciar en la Figura 4.5 donde se observa que los concretos experimentales tienen un mejor desempeño. La Red DURAR indica que valores de K_{CO_2} de 2 a 3 mm/año^{0.5} (en función del recubrimiento) pueden ser considerados como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación, mientras que valores de K_{CO_2} mayores de 6 mm/año^{0.5} indican concretos de muy baja resistencia.

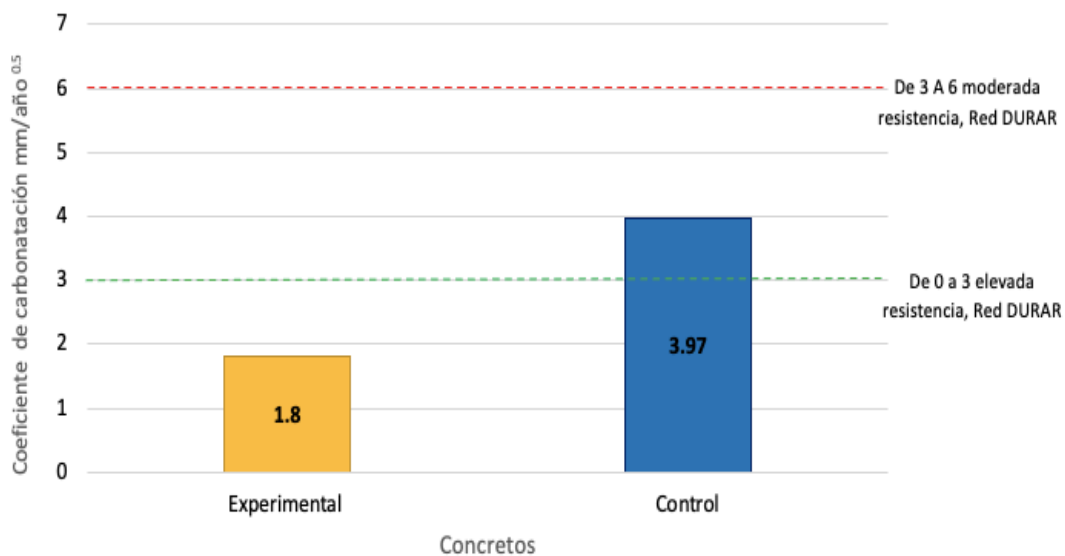


Figura 4.5 Gráfica de los resultados del coeficiente de carbonatación.

Los resultados muestran que los concretos de control tienen coeficientes de carbonatación dentro de los rangos aceptables por la Red DURAR, pero los concretos experimentales los superan significativamente, ya que tienen una mayor durabilidad ante esta patología con una diferencia de 2.17 mm/año^{0.5}

Con estos resultados se puede predecir que si la armadura de acero tiene un recubrimiento de 30 mm la carbonatación tardará en los concretos de control 57 años en alcanzar un punto crítico para iniciar el proceso de despasivación del acero y con ello su corrosión, mientras que en los concretos experimentales tardaría cerca de 277 años. En México las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (NTCC, RCCDMX) establecen que las estructuras para edificios (viviendas, oficinas y estructuras de ingeniería civil) deben tener una vida útil de cuando menos 50 años (Celis et al., 2006), por lo que la implementación de ésta técnica en zonas costeras puede resultar efectivo para prolongar el tiempo de vida útil.

4.4 Penetración de cloruros.

El transporte de iones de cloruro en el concreto es un proceso complejo que involucra todos los mecanismos de transporte mencionados con anterioridad, sin embargo, se ha reconocido que la difusión es el principal mecanismo de transporte de cloruro, actuando desde el entorno.

Los cilindros estuvieron 61 días dentro de la solución salina al 3.5%. En la Tabla 4.10 se muestran las fechas de inmersión y de corte de rodajas, los días que se mantuvieron fuera de la solución posterior al corte de la rodaja, fueron para permitir que la pintura que sellaba los extremos del cilindro pudiera secar y con ello permitir exclusivamente la difusión de forma radial.

Tabla 4.10 Periodos de inmersión y de corte de rodajas en cilindros.

Fechas de inmersión y corte de rodajas						
Nomenclatura	Primera inmersión	Primer corte	Segunda inmersión	Segundo corte	Tercera inmersión	Tercer corte
T4-7						
T5-7						
T4-14						
T5-14	18-10-2019	08-11-2019	11-11-2019	02-12-2019	05-12-2020	27-12-2020
T4-28						
Ex4-7						
Ex5-7						
Ex4-14						
Ex5-14						
Ex4-28						
61 días de inmersión	20 días de inmersión		20 días de inmersión		21 días de inmersión	

En la Tabla 4.11 se presentan los resultados de los análisis químicos realizados a polvos obtenidos de las rodajas de concreto a diferentes circunferencias radiales de profundidad (5, 15, 25 y 35 mm), se puede apreciar que los concretos de control tuvieron una mayor concentración de cloruros hasta 25 mm de profundidad y a los 35 mm la cantidad es igual tanto para los cilindros de control como para los experimentales, esto indica que los iones cloruro a 61 días de inmersión no alcanzaron a difundirse hasta el centro del cilindro y que la concentración inicial previa a la inmersión era aproximadamente de Cl- % 0.15.

Tabla 4.11 Valores obtenidos en el análisis químico de los polvos de concreto.

Mezcla	Lecturas (cm)				Peso (g)		Concentración Cl- (%)				
	0.5	1.5	2.5	3.5	Cemento	Concreto	0.5	1.5	2.5	3.5	
T	1	0.08	0.06	0.04	0.03	456	2315	0.45	0.35	0.20	0.15
	2	0.08	0.07	0.04	0.03	456	2315	0.44	0.36	0.20	0.15
							Promedio	0.44	0.35	0.20	0.15
Ex	1	0.07	0.05	0.035	0.03	456	2315	0.38	0.28	0.18	0.15
	2	0.08	0.06	0.037	0.03	456	2315	0.41	0.30	0.19	0.15
							Promedio	0.40	0.29	0.18	0.15

En la Figura 4.6 se presentan los perfiles de concentración de cloruros totales por peso de concreto a una profundidad máxima de 35 mm.

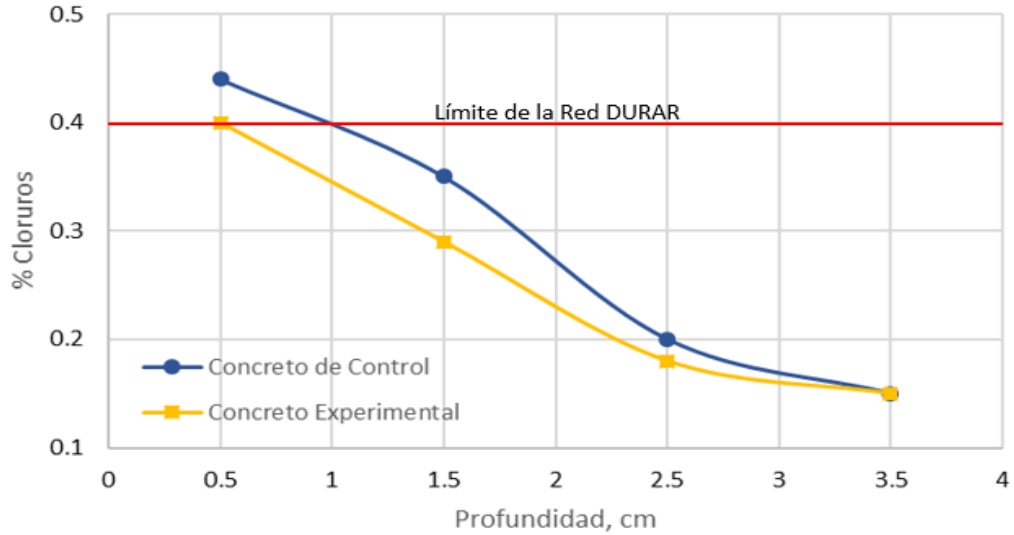


Figura 4.6 Perfiles de cloruros en especímenes sumergidos en solución salina.

Los concretos de control alcanzaron valores por encima de lo recomendado por la Red DURAR (Cloruros < 0.4%) a una profundidad de 5 mm mientras que los experimentales superan el límite a esa misma profundidad. Estos primeros 5 mm tienen un efecto importante en la penetración de cloruros, de acuerdo a los resultados obtenidos, se podría asumir que es la sección donde hubo mayor formación de productos de hidratación, hecho que disminuye el ingreso del ión en el concreto experimental. Por otro lado, tanto los concretos experimentales como los de control muestran un cambio de pendiente a partir de los 25 mm de profundidad, lo que indica que a partir de dicha profundidad el ingreso de cloruros disminuye de manera representativa decreciendo por tanto el riesgo de corrosión del acero de refuerzo (si lo hubiere) (Valdés et al., 2005), (Tovar et al., 2013).

Los coeficientes de difusión se pueden comparar en la Figura 4.7 donde se observa que el coeficiente de difusión es mayor en los concretos de control, lo cual se atribuye a un mayor efecto de absorción de las sales, que puede generar un mayor riesgo de corrosión del acero (Tejada et al., 2016). A pesar de la mejora en los concretos experimentales con respecto a los de control, dichos valores de difusión siguen siendo elevados para la relación a/c 0.5, por

ejemplo, (Jimenez Torrez, Luis Felipe, 2017) alcanzó un coeficiente de $1.34 \text{ cm}^2/\text{s} \times 10^{-7}$ en concretos de control para la misma relación a/c, mientras que para una relación a/c 0.7 alcanzó un valor de $2.57 \text{ cm}^2/\text{s} \times 10^{-7}$. Por otro lado, Arteaga en 2018, tuvo un coeficiente de $3.46 \text{ cm}^2/\text{s} \times 10^{-7}$, resultado similar al de ésta investigación para la misma relación a/c de 0.5, una aclaración importante es que se empleó el mismo tipo de agregado. Los elevados coeficientes de difusión pueden estar fuertemente asociados con las características de los agregados de la región, debido a su naturaleza geológica.

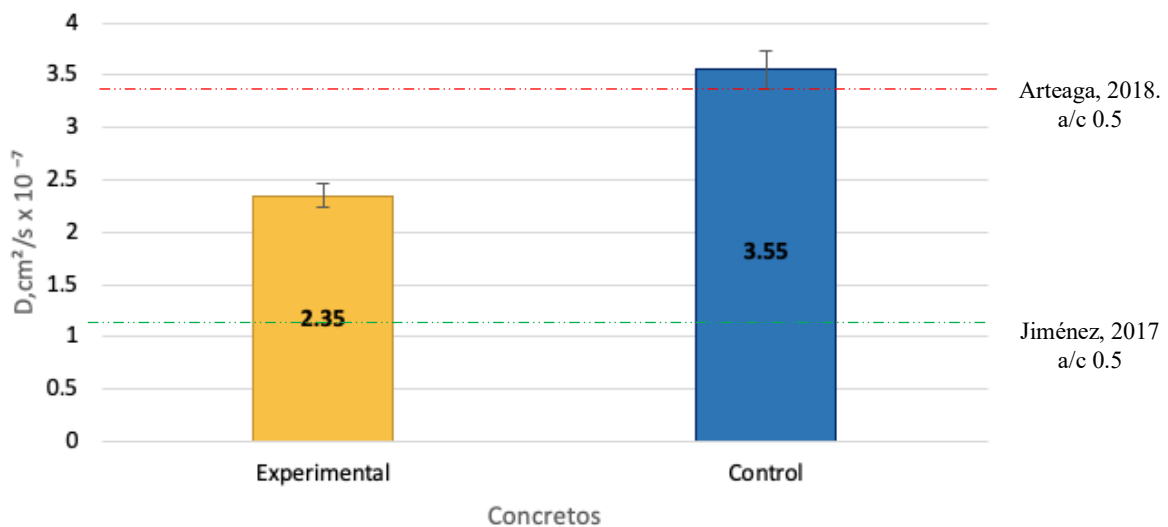


Figura 4.7 Difusión de cloruros en especímenes sumergidos en solución salina.

La disminución en la difusión del ion cloruro del concreto experimental está directamente relacionada con la disminución de la porosidad, pues a medida que el número de poros (interconectados) disminuye, el grado de absorción disminuirá gradualmente.

Se ha reportado con anterioridad (Ahirkar & Bhatkar, 2019) que la formación de productos de hidratación (favorecidos por la presencia de silicato de sodio) en edades tardías, como el gel C-S-H o la precipitación de CaCO_3 , disminuyen el microagrietamiento y porosidad, reduciendo por tanto el coeficiente de difusión.

En tanto que la contribución del PVA a los concretos puede estar asociada a un efecto sellador tanto en los poros de los agregados como en las micro grietas (Kang et al., 2018) aunque este

hecho no es observable ni medible a través de las determinaciones empleadas, por lo que el análisis MEB sería conveniente para validar dicha información.

CONCLUSIONES

El concreto auto reparable ha sido objeto de una creciente atención de la investigación durante las últimas décadas. Se han desarrollado varias metodologías para propiciar la auto reparación, pero su efecto sobre la durabilidad y la vida útil del concreto apenas se ha investigado. En este estudio se ha evaluado indirectamente a través de parámetros como la absorción de agua, porosidad y densidad aparente en concreto expuesto a condiciones ambientales reales. Además, se ha evaluado el ingreso de cloruros y el efecto de la carbonatación, con lo que se ha concluido lo siguiente:

1. La resistencia a los agentes ambientales incluyendo las aguas agresivas, iones libres o gases, está directamente relacionada con las propiedades mecánicas del concreto y puede por lo tanto, ser deducida de los datos de resistencia mecánica.
2. La presencia de silicato de sodio disminuye la absorción y la porosidad en el concreto experimental, disminuyendo por tanto la difusión de agentes externos.
3. Los coeficientes de carbonatación alcanzados fueron 1.8 para el concreto experimental y 3.97 para el concreto control, existiendo una diferencia del 45% entre ambos. El concreto experimental presenta elevada resistencia de acuerdo a la Red DURAR.
4. La presencia de silicato de sodio en el concreto, disminuyó el proceso y profundidad de carbonatación en el concreto, la diferencia de tiempo de vida útil entre ambos concretos es de 220.6 años asegurando con ello la protección del acero de refuerzo que pudieran llegar a tener las estructuras fabricadas mediante esta técnica.
5. El concreto experimental estuvo por debajo de los límites establecidos por la Red DURAR para la concentración de cloruros, que debe ser menor al 0.4%, incluso a una profundidad de 5 mm, que es la más vulnerable por ser el concreto superficial. A esta misma profundidad el concreto control no alcanza dicha especificación.
6. El coeficientes de difusión (D) en el concreto experimental es elevado en comparación con otras investigaciones, a pesar de ello, en contraste con el concreto control, se observa una diferencia de $1.20 \text{ cm}^2/\text{s} \times 10^{-7}$, lo que implica que la técnica de impregnación mejoró el desempeño del concreto ante esta patología.

RECOMENDACIONES

1. Para comprender de manera más amplia el proceso de reparación del concreto es conveniente someter a un mayor agrietamiento las probetas, el cual puede ser inducido por técnicas de resistencia a la flexión de dos o tres puntos o a la compresión antes del punto de falla y analizar las condiciones de recuperación.
2. Las propiedades físicas como la porosidad pueden ser determinadas mediante técnicas de observación directa (Microscopio óptico o electrónico) para una mejor valoración de los tipos de poros que se han formado y que han sido “rellenados” con nuevos productos de hidratación.
3. Es conveniente analizar mediante Difracción de Rayos X las fases cristalinas y con ello determinar los productos de hidratación que ha propiciado la presencia de silicato de sodio y los generados después de las pruebas de durabilidad en el concreto.
4. Los ensayos mediante MEB aportarían gran información sobre el proceso de liberación de silicato de sodio y la efectividad de la encapsulación por lo que se recomiendan ampliamente.
5. Se recomienda incluir diversas técnicas para valorar los diferentes mecanismos de difusión en el concreto y con ello predecir el comportamiento e ingreso de agentes externos al concreto en diferentes tiempos de curado y con ello valorar el grado de efectividad del agente reparador en las microgrietas y poros interconectados del concreto.
6. Se recomienda finalmente realizar más ensayos en el concreto con propiedades de auto reparación en la cual se modifiquen variables como relaciones a/c, resistencias de diseño, tiempo y tipo de curado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 211.3R-97. (1997). *Proportions for No-slump Concrete (Guía de Elección de las Proporciones para el concreto con revenimiento Cero)*. American Concrete Institute.

Acosta, A. A. T., Quiroz, J. T. P., Rentarías, A. J. R., & Madrid, M. M. (2006). *ESTUDIO DE LA CORROSIÓN EN BARRAS DE ACERO INOXIDABLE EN CONCRETO CONTAMINADO POR CLORUROS CUANDO SE LE APLICAN ESFUERZOS RESIDUALES*. 99.

Ahirkar, V., & Bhatkar, M. (2019). *A Review Paper on Improving Durability of Self Healing Concrete*. 06(09), 4.

Ahn, T.-H., & Kishi, T. (2010). Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2), 171–186. <https://doi.org/10.3151/jact.8.171>

Aïtcin, P.-C., & J Flat, R. (2016). *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing.

Alexander, M., Beushausen, H.-D., Dehn, F., & Moyo, P. (Eds.). (2008). *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II: 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR-2, 24-26 November 2008, Cape Town, South Africa*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439828403>

Alghamri, R., & Al-Tabbaa, A. (2020). Self-healing of cracks in mortars using novel PVA-coated pellets of different expansive agents. *Construction and Building Materials*, 254, 119254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119254>

Alghamri, R., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 910–921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>

Ardila, M. J. S. (2006). *MODELACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO POR PENETRACIÓN DE CLORUROS*. 57.

Arya, C. (1990). An assessment of four methods of determining the free chloride content of concrete. *Materials and Structures*, 12.

Asociación de Productores de cemento. (2019). *Reporte ASOCEM - Estadísticas Internacionales 2019.pdf*.

Barneyback, R. S., & Diamond, S. (1981). Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 11(2), 279–285. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90069-7)

Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review. *Construction and Building Materials*, 15(2–3), 93–103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)

- Belleghem, B. V. (2017). *Application of a Self-Healing Mechanism in Concrete to Reduce Chloride Ingress Through Cracks*. 2, 10.
- Bildirici, M. E. (2019). Cement production, environmental pollution, and economic growth: Evidence from China and USA. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(4), 783–793. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01667-3>
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- Carcaño, R. G. S., Moreno, É. I., & Borges, P. C. (2005). *Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera*. 6.
- Carrillo, J., Cárdenas Pulido, J., & Aperador Chaparro, W. (2015). Effect of chloride ion on the compressive mechanical properties of RC-65/35-BN steel fiber reinforced concrete. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 149–171. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.7075>
- Castro-Borges P. (2012). *Análisis de daños por la interacción de cargas ambientales y estructurales en una subestructura marina.pdf*.
- Celis, R. L., Quiroz, J. T. P., Acosta, A. A. T., Madrid, M. M., Molina, W. M., Aguilar, L. E. A., Cántora, E. Z., Llongueras, J. G., & Salas, B. V. (2006). *DURABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO EXPUESTA A DIFERENTES AMBIENTES URBANOS DE MÉXICO*. 257.
- Cerón, M., Duarte, F., & Castillo, W. (1996). *Propiedades físicas de los agregados pétreos de la Ciudad de Mérida*. Boletín Académico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Clifton, J. (2000). *Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report*. 44.
- Costa, A., & Appleton, J. (1999). Chloride penetration into concrete in marine environment—Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Materials and Structures*, 32(4), 252–259. <https://doi.org/10.1007/BF02479594>
- Crespo Sánchez, S. (2016). *Análisis del agrietamiento en concreto a través de la técnica de emisiones acústicas.pdf*.
- D. Callister, W. (2016). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Paraninfo.
- De Belie, N., Van Belleghem, B., Erşan, Y. Ç., & Van Tittelboom, K. (2019). Durability of self-healing concrete. *MATEC Web of Conferences*, 289, 01003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928901003>
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., & Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 1005–1014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.005>
- Del Valle, A., Pérez, T., & Marínez, M. (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. SCT.

- Díaz, J. E. G. (2014). *MODELOS DE PENETRACIÓN DEL IÓN CLORURO ORIENTADOS A LA PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO*. 156.
- Dunuweera, S. P., & Rajapakse, R. M. G. (2018). Cement Types, Composition, Uses and Advantages of Nanocement, Environmental Impact on Cement Production, and Possible Solutions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/4158682>
- Ekolu, S. O. (2016). *A review on effects of curing, sheltering, and CO2 concentration upon natural 2 carbonation of concrete .pdf*.
- Ferreira, C. F., Paliga, C. M., & Torres, A. da S. (2018). Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS. *Revista ALCONPAT*, 8(2), 123–137. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>
- Garnicas, P., Pérez, A., Gómez, J. A., & Obbil, E. (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. SCT.
- Gehlot, T., Sankhla, D. S. S., & Saini, K. K. (2019). *Critical Review on effect of Chloride Penetration on Concrete and Various Rapid Chloride Penetration Tests Methods* □. 6(2), 8.
- Giannaros, P., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Sealing of cracks in cement using microencapsulated sodium silicate. *Smart Materials and Structures*, 25(8), 084005. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084005>
- Gilford, J., Hassan, M. M., Rupnow, T., Barbato, M., Okeil, A., & Asadi, S. (2014). Dicyclopentadiene and Sodium Silicate Microencapsulation for Self-Healing of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(5), 886–896. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000892](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000892)
- Gjørsv, O. E. (2011). Durability of Concrete Structures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36(2), 151–172. <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0033-5>
- Glasser, F. P., Marchand, J., & Samson, E. (2008). Durability of concrete—Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 226–246. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.015>
- Gopinath, R., Alexander, M., & Beushausen, H. (2017). *Predicting depth of carbonation of concrete for varying climatic conditions*. 5.
- Goyal, A., Pouya, H. S., Ganjian, E., & Claisse, P. (2018). A Review of Corrosion and Protection of Steel in Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(10), 5035–5055. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3303-2>
- Helene, P., Guignone, G., Vieira, G., Roncetti, L., & Moroni, F. (2018). Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 11(3), 544–563. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000300007>
- Hernández Susana. (2018). *Evaluación del proceso de auto reparación de un concreto con agregado grueso impregnado con una solución de silicato de sodio*. [Tesis de maestría]. Instituto Tecnológico de Chetumal.

- Hernández-Castañeda, O., Mendoza-Escobedo, C. J., Universidad Nacional Autónoma de México, & Universidad Nacional Autónoma de México. (2006). Durabilidad e infraestructura: Retos e impacto socioeconómico. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 7(1), 57–70.
<https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2006.07n1.005>
- Huang, X., Ranade, R., & Li, V. C. (2013). Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 923–931. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000674](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000674)
- Huet, B., L’Hostis, V., Idrissi, H., & Tovená, I. (2003). *A REVIEW ON CORROSION MECHANISMS OF REINFORCED CONCRETE DEGRADATION*. 9.
- Ibrahim, M., Al-Gahtani, A. S., Maslehuddin, M., & Dakhil, F. H. (1999). Use of Surface Treatment Materials to Improve Concrete Durability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 36–40.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(36))
- Jimenez Torrez, Luis Felipe. (2017). *Concreto con agregados reciclados* (Vol. 1). Editorial Académica Española.
- Jonkers, H. M. (2011). *Bacteria-based self-healing concrete*. 12.
- Kanellopoulos A. (2016). *Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete synthesis, characterisation and proof of concept.pdf*.
- Kang, C., Huh, J., Tran, Q. H., & Kwak, K. (2018). Evaluation of Self-Healing Performance of PE and PVA Concrete Using Flexural Test. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–10.
<https://doi.org/10.1155/2018/6386280>
- Kayondo, M., Combrinck, R., & Boshoff, W. P. (2019). State-of-the-art review on plastic cracking of concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 886–899.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.197>
- Kubissa, W., & Jaskulski, R. (2013). Measuring and Time Variability of The Sorptivity of Concrete. *Procedia Engineering*, 57, 634–641. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.080>
- Kusuma, G. H., Budidarmawan, J., & Susilowati, A. (2015). Impact of Concrete Quality on Sustainability. *Procedia Engineering*, 125, 754–759. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.122>
- Liu, F., Wang, B., Xing, Y., Zhang, K., & Jiang, W. (2020). Effect of Polyvinyl Alcohol on the Rheological Properties of Cement Mortar. *Molecules*, 25(3), 754.
<https://doi.org/10.3390/molecules25030754>
- Mačiulaitis, R., Vaičienė, M., & Žurauskienė, R. (2009). THE EFFECT OF CONCRETE COMPOSITION AND AGGREGATES PROPERTIES ON PERFORMANCE OF CONCRETE. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 15(3), 317–324.
<https://doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.317-324>
- Mackechnie, J. R. (2001). *Predictions of reinforced concrete durability in the marine environment.pdf*. Department of Civil Engineering University of Cape Town.
- MacLaren, D. C., & White, M. A. (2003). Cement: Its Chemistry and Properties. *Journal of Chemical*

- Education*, 80(6), 623. <https://doi.org/10.1021/ed080p623>
- Maldonado-Bandala, E. E., Nieves-Mendoza, D., Vela-Jiménez, J. L., & Castro-Borges, P. (2017). Evaluación de problemas patológicos asociados a carbonatación y sulfatos en una torre de concreto con más de 50 años de servicio. *Revista ALCONPAT*, 14.
- Mao, W., Litina, C., & Al-Tabbaa, A. (2020). Development and Application of Novel Sodium Silicate Microcapsule-Based Self-Healing Oil Well Cement. *Materials*, 13(2), 456. <https://doi.org/10.3390/ma13020456>
- Medeiros, M. H. F., Gobbi, A., Réus, G. C., & Helene, P. (2013). Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. *Construction and Building Materials*, 44, 452–457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.078>
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
- Moreno, E., E. (2006). *Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación*. 8.
- Moreno, E. I., Lara, G. G. D., Sarabia, E. J. C., & Gómez, F. D. (2004). *Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración*. 14.
- Mostavi, E., Asadi, S., Hassan, M. M., & Alansari, M. (2015). Evaluation of Self-Healing Mechanisms in Concrete with Double-Walled Sodium Silicate Microcapsules. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 04015035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001314](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001314)
- Muhammad, N. Z., Shafaghat, A., Keyvanfar, A., Abd. Majid, M. Z., Ghoshal, S. K., Mohammadyan Yasouj, S. E., Ganiyu, A. A., Samadi Kouchaksaraei, M., Kamyab, H., Taheri, M. M., Rezazadeh Shirdar, M., & McCaffer, R. (2016). Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 112, 1123–1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.017>
- Neon Gan, S., & Shahabudin, N. (2019). Applications of Microcapsules in Self-Healing Polymeric Materials. En F. Salaün (Ed.), *Microencapsulation—Processes, Technologies and Industrial Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83475>
- Neville, A. (2001). *Consideration of durability of concrete structures: Past, present, and future*. 5.
- Park, S.-S., Kim, Y. Y., Lee, B. J., & Kwon, S.-J. (2014). Evaluation of Concrete Durability Performance with Sodium Silicate Impregnants. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/945297>
- Pelletier, M. M., Brown, R., Shukla, A., & Bose, A. (2011). *Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent*. 22.
- Restuccia, L., Reggio, A., Ferro, G. A., & Tulliani, J.-M. (2017). New self-healing techniques for cement-based materials. *Procedia Structural Integrity*, 3, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.016>

- Rivero, L. G. A., Arjona, D. A. L., & Uc, S. G. K. (2019). *CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS CALIZOS PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETO EN VALLADOLID, YUCATÁN*. 10.
- Rodríguez, S. A. S., Durán, H. A. E., Quintero, C. V., & Ballesteros, D. Y. P. (2013). SIMULACIÓN DE LA DIFUSIÓN DEL Cl- HASTA LA DESPASIVACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN CONCRETO CON MICROSÍLICE Y EXPUESTO A CARBONATACIÓN. . . ISSN, 10.
- Sanjuan Barbudo, M. Á., & Chinchón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*. <https://lectura.unebook.es/viewer/9788497173056>
- Schutter, G. D., & Audenaert, K. (2004). Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. *Materials' and Structures*, 37, 6.
- Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*, 12(4), 411–421. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>
- Silva, A. R. C., Fajardo, G., & Mendoza-Rangel, J. M. (2016). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL AVANCE DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO EN AMBIENTE NATURAL Y ACELERADO*. 8, 21.
- Silva, C. (2011). *Análisis de métodos de prevención de la reacción álcali-agregado: Análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero*. 10.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., & Fraaij, A. (2011). *Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a self-healing agent in blast furnace slag mortar*. 20.
- Sivasubramanian, J., & Gino, Y. (2019). *EFFECT OF SODIUM SILICATE ON HARDENING PROPERTY OF CONCRETE*. 9.
- Solís Carcaño, R. G., & Alcocer Fraga, M. Á. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(4), 1–13. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2019.20n4.039>
- Solis Carcaño, R., & I. Moreno, E. (2006). *Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo.pdf*.
- Solís, R. G., Moreno, E., & Arjona, E. (2012). Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. *Revista ALCONPAT*, 2(1), 21–28. <https://doi.org/10.21041/ra.v2i1.23>
- Soroka, I. (2017). The effect of different curing conditions on compressive strength of concrete. En I. Soroka, *Portland Cement Paste and Concrete* (pp. 194–226). Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-03994-4_8
- Stefanoni, M., Angst, U., & Elsener, B. (2018). Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review. *Cement and Concrete Research*, 103, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>
- Talaiekhosani, A., Keyvanfar, A., Shafaghat, A., Andalib, R., Majid, M. Z. A., Fulazzaky, M. A., Zin, R. M., Lee, C. T., Hussin, M. W., Hamzah, N., Marwar, N. F., & Haidar, H. I. (2014). *A Review of*

Self-healing Concrete Research Development. 2(1), 11.

Tang, W., Kardani, O., & Cui, H. (2015). Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review. *Construction and Building Materials*, 81, 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.054>

Taus, V. (2003). *Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados*.

Tayebani, B., & Mostofinejad, D. (2019). Self-healing bacterial mortar with improved chloride permeability and electrical resistance. *Construction and Building Materials*, 208, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.172>

Taylor, H. F. W. (1997a). *Cement chemistry* (2nd ed). T. Telford.

Taylor, H. F. W. (1997b). *Cement chemistry* (2nd ed). T. Telford.

Tejada, C. N., Villabona Ortiz, A., & Barrios Fontalvo, M. (2016). Método de perfiles de difusión de cloruros para la estimación de la corrosión en ambientes marinos. *Prospectiva*, 14(1), 23. <https://doi.org/10.15665/rp.v14i1.642>

Tobón, J. I. (2006). *Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación*. 15.

Tovar, C. T., Ortiz, A. V., & Durán, Y. P. V. (2013). *Modelo de difusión de cloruros en probetas cilíndricas de hormigón armado sumergidas en agua sintética*. 9.

Ullah, H., M Azizli, K. A., Man, Z. B., Ismail, M. B. C., & Khan, M. I. (2016). The Potential of Microencapsulated Self-healing Materials for Microcracks Recovery in Self-healing Composite Systems: A Review. *Polymer Reviews*, 56(3), 429–485. <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1107098>

Valdés, A. C., Brito, N. D., Mellor, E. G., Martínez, M., & Pérez, F. C. (2005). *Influencia de la penetración de Iones Cloruros en el Hormigón Armado a diferentes relaciones Agua/Cemento y Condiciones de Exposición*. 36, 16.

Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. *Materials*, 6(6), 2182–2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>

Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D., & Jacobs, P. (2011). Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.004>

Vásquez, B. (2016). *INDUSTRIA DEL CEMENTO EN MÉXICO: ANÁLISIS DE SUS DETERMINANTES*. 26.

Venkat Rao, N., & Meena, T. (2017). A review on carbonation study in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263, 032011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032011>

Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review.

Construction and Building Materials, 152, 1008–1014.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>

Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7), 763–770.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>

Yam, J. L. C., Carcaño, R. S., & Moreno, E. I. (2003). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. 8.

Yang, Z., Hollar, J., He, X., & Shi, X. (2011). A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 506–512.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.010>

Zhang, S. P., & Zong, L. (2014). Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1–8.

<https://doi.org/10.1155/2014/650373>

Zhang, T., & Gjrv, O. E. (1996). Diffusion behavior of chloride ions in concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(6), 907–917. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00069-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00069-5)

ANEXOS

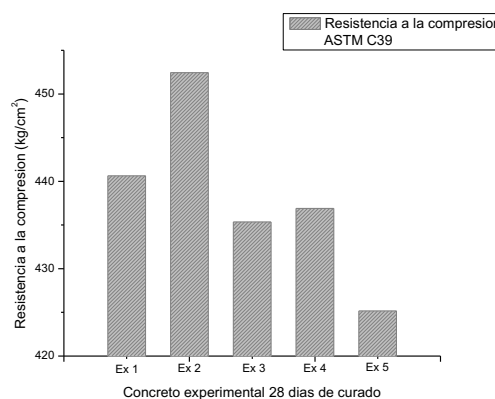
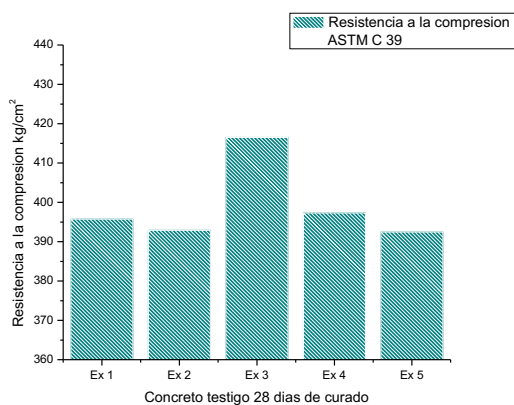
A continuación, se presentan los resultados más significativos que se obtuvieron en la investigación previa en la que se sometieron a prueba los mismos tipos de concretos empleados en el presente trabajo, con la finalidad de que el lector pueda consultarlos en este mismo documento y se formule un mejor criterio del comportamiento de estos concretos.

Los resultados que se presentan son: Resistencia a la compresión, Dureza de Vickers, Monitoreo del proceso de autor reparación.

Resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión		
28 días de curado - Testigo	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
Testigo 1	395.7	Tipo 6
Testigo 2	392.884764	Tipo 3
Testigo 3	416.508472	Tipo 6
Testigo 4	397.314209	Tipo 3
Testigo 5	392.462912	Tipo 6

Resistencia a la compresión		
28 días de curado - Experimental	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
Experimental 1	440.624341	Tipo 3
Experimental 2	452.436195	Tipo 3
Experimental 3	435.351192	Tipo 3
Experimental 4	436.897982	Tipo 3
Experimental 5	425.156437	Tipo 6

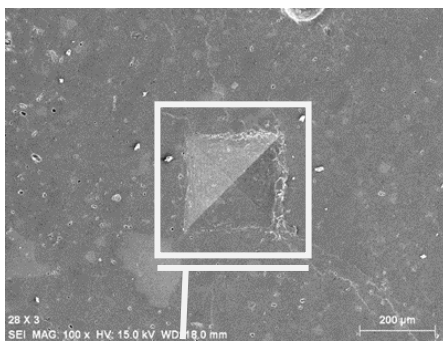


Tipo de mezcla	Resistencia a la compresión promedio (kg/cm ²)
Experimental 28 días de curado	438.09
Testigo 28 días de curado	398.97
Experimental 14 días de curado	385.65
Testigo 14 días de curado	380.44
Experimental 7 días de curado	372.91
Testigo 7 días de curado	370.98

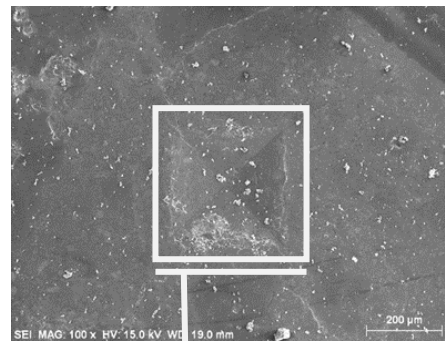
Prueba de dureza de Vickers.

Mezcla de concreto experimental 28 días de curado	
No. Marca	Dureza (Hv)
1	59.5
2	37.9
3	35.2
4	44.7

Mezcla de concreto testigo 28 días de curado	
No. Marca	Dureza (Hv)
1	27.6
2	46.3
3	43
4	36.2

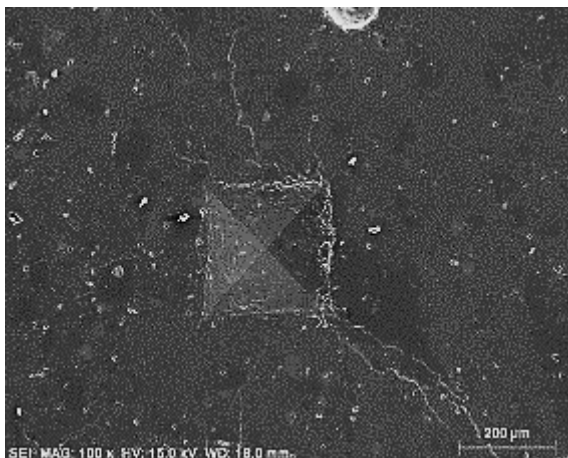


Prueba de dureza Vickers en concreto experimental curado por 28 días.

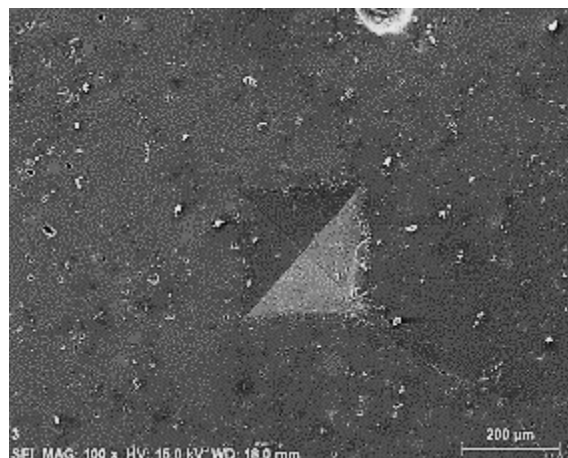


Prueba de dureza Vickers en concreto testigo curado por 28 días.

Monitoreo del proceso de Auto reparación.



Huella en concreto curado por 28 días – PRIMER MONITOREO



Huella en concreto curado por 28 días – CUARTO MONITOREO

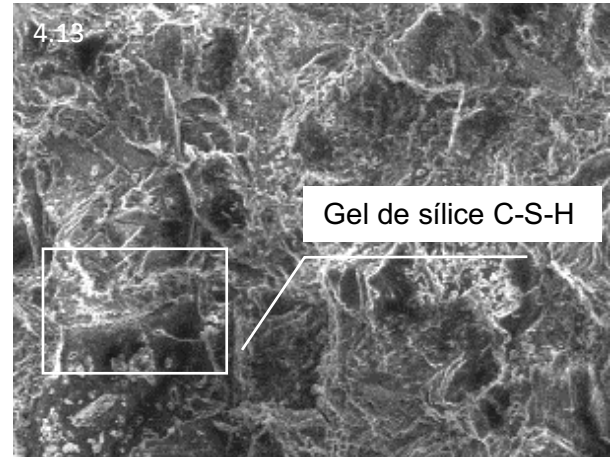
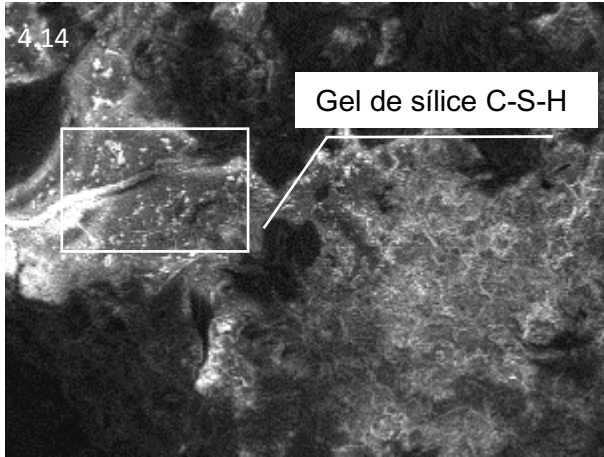
Primer monitoreo 28 - EXP

Diseño experimental, 28 días de curado		
1° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	μm
100 x	674.5	μm ²
500x	81.41666667	μm
1000 x	92.42	μm
5000 x	14.315	μm
10 000 x	0.001045	μm
40 000 x	98.37	nm

Cuarto monitoreo 28 - EXP

Diseño experimental, 28 días de curado		
4° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	μm
100 x	643	μm ²
500x	76.31	μm
1000 x	81.85	μm
5000 x	13.415	μm
10 000 x	0.000530255	μm
40 000 x	53.65	nm

Resultados de la visualización en el Microscopio Electrónico de Barrido.



Diferencia en la porosidad

