



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Civil

Que, para obtener el título de Ingeniero Civil, presenta:

Tesis

Titulada:

Patología de concreto reforzado en atmósfera seca urbana no industrial. Caso Morelia, México.

Alumno:

Alonso Maya Ramírez

Director de Tesis:

Dr. Wilfrido Martínez Molina

Codirector Interno:

M.I.T. Cipriano Bernabé Reyes

Codirector Externo:

Dr. Raúl Pável Ruíz Torres

Morelia Michoacán, noviembre de 2022.



Índice

Índice	i
Índice de Tablas.....	iii
Índice de Ilustraciones.....	iv
Dedicatoria.....	vi
Agradecimientos	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
Objetivos	x
• Objetivo General	x
• Objetivos Particulares	x
Justificación.....	xi
Hipótesis	xii
1 Introducción	1
2 Marco teórico de referencia.....	1
2.1 Fundamentos generales de un concreto	1
2.1.1 Definición y antecedentes	1
2.1.2 Clasificación de cementos en México.....	5
2.1.3 Agregados pétreos.....	12
2.1.4 El Cemento hidráulico	14
2.1.5 Reacción álcali-agregado.....	14
2.1.6 Agua	15
2.1.7 Aditivo	15
3 Pruebas para la Caracterización del Concreto	16
3.1 Pruebas al concreto fresco.....	16
3.1.1 Cohesión y Trabajabilidad.....	16
3.1.2 Determinación de la Temperatura de la Mezcla de Concreto	17
3.1.3 Revenimiento	17
3.1.4 Peso volumétrico.....	17
3.1.5 Contenido de aire.....	18
3.1.6 Exudación en el concreto	18
3.1.7 Curado	18
3.1.8 Prueba de resistencia mecánica a compresión simple	19



3.1.9	Prueba de resistencia mecánica a tensión indirecta.....	19
3.1.10	Prueba de resistencia mecánica a tensión por flexión.....	20
3.1.11	Pruebas de deformabilidad	20
3.1.12	Prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión.....	20
3.1.13	Prueba de contracción por secado del concreto hidráulico.....	21
3.1.14	Pruebas de impermeabilidad.....	21
3.1.15	Prueba de densidad, absorción y vacíos en el concreto.....	21
3.1.16	Prueba de absorción capilar.....	22
3.1.17	Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro).....	22
3.1.18	Prueba de resistencia al congelamiento y deshielo (ASTM-C666, 1997)	22
3.1.19	Pruebas de resistencia superficial.....	23
4	Durabilidad de la Estructuras de Concreto Reforzado.....	23
4.1.1	Tipos de Ambiente	24
5	Corrosión de acero estructural en concreto.....	25
5.1.1	Corrosión del acero estructural	26
5.1.2	Evaluación y diagnóstico de Estructuras	27
5.1.3	Técnicas para el cálculo de la velocidad de corrosión.....	27
6	Desarrollo Experimental.....	36
6.1	Etapa 1. Antecedentes: características físicas de los especímenes.....	36
6.1.1	Diseño de la mezcla.....	36
6.1.2	Características y propiedades de los materiales utilizados.....	37
6.1.3	Cemento	38
6.1.4	Agregados pétreos: Arena y Grava	38
6.1.5	Agua	38
6.1.6	Aditivo	39
6.1.7	Condiciones de las Probetas de la Estación Morelia (Ciudad Universitaria) a la Fecha de 05 febrero de 2019.	39
6.2	Etapa 2: Estado actual de las Estructuras y Restauración	40
6.2.1	Procedimiento de Reparación de las Vigas de la Estación de Morelia	40
6.3	Pruebas a las Muestras de Concreto Obtenidas Durante la Restauración	49
6.3.1	Preparación de Muestras	49
6.3.2	Absorción Capilar.....	50
6.3.3	Técnicas electroquímicas.....	56
6.3.4	Potencial de corrosión (Ecorr en mV).....	56



6.3.5	Velocidad de corrosión (I_{corr} en $\mu A/cm^2$)	57
6.3.6	Intensidad de corriente de corrosión	57
6.3.7	Resistividad eléctrica [$k\Omega\text{-cm}$]	59
6.3.8	Resistencia eléctrica [$K\Omega$]	59
7	Resultados Preliminares	60
7.1	Potenciales de corrosión posteriores a la restauración.....	60
7.2	Absorción capilar.....	61
7.3	Preparación de Especímenes para Nuevo Ciclo de Exposición	63
8	Conclusiones.....	65
9	Referencias.....	66

Índice de Tablas

Tabla 1	Clasificación del cemento por sus adiciones.....	5
Tabla 2	Composición del cemento.	6
Tabla 3	Clasificación por características especiales.....	9
Tabla 4	Clasificación por su clase resistente	12
Tabla 5	Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010).....	13
Tabla 6	Tipo de materiales empleados.....	36
Tabla 7	Proporcionamiento de las mezclas para las relaciones $a/c=0.45$ y $a/c=0.65$	37
Tabla 8	Materiales utilizados en la fabricación de las probetas	37
Tabla 9	Características del cemento	38
Tabla 10	Rangos de tiempo para la prueba de absorción capilar (NMX-C-504-ONNCCE, 2015).....	53
Tabla 11	Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda (DURAR, 2000)	57
Tabla 12	Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión (DURAR, 2000)	58
Tabla 13	Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (DURAR, 2000)	59
Tabla 14	Potenciales de corrosión de las barras de acero inmersas en la mezcla $a/c=0.65$	61
Tabla 15	Registro de los Resultados de la Prueba de Absorción, Probeta V6-P5.	61
Tabla 16	Parámetros de la prueba de absorción capilar.....	62



Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Modelo conceptual de la vida de servicio, 7 etapas.....	25
Ilustración 2 Fasores de corriente (I) y potencial (E) separados por un ángulo de fase ϕ (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002)	29
Ilustración 3 Diagrama fasorial para una resistencia (R) y un capacitor (C) en serie. E corresponde al potencial total a través de la combinación de R y C, RI representa el componente resistivo y jX_C representa el componente capacitivo. (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002)	31
Ilustración 4 Similitud de la interfase electrificada con un circuito eléctrico equivalente. (Pérez, 2002)	31
Ilustración 5 Diagrama equivalente con los elementos de resistencia y un capacitor, fungiendo como la resistencia de la solución, R_{tc} y como la doble capa entre metal y electrolito (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).....	32
Ilustración 6 Diagrama de Bode Freq vs $ Z $. Se obtienen los valores de R_{sol} y R_{tc} de manera directa (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).	33
Ilustración 7 Condición de intemperización en la que se encontraban las probetas.....	39
Ilustración 8 Probeta con varillas totalmente dañadas.....	40
Ilustración 9 Probetas reunidas en el laboratorio.....	40
Ilustración 10 Delimitación de la superficie a cortar	41
Ilustración 11 Retire de barra aislante sobrante, sin varilla a proteger.....	41
Ilustración 12 Máquina cortadora con la que se realizaron los cortes necesarios para el retiro de la sección a renovar.	42
Ilustración 13 Vista de los cortes realizados con la metodología explicada anteriormente.	42
Ilustración 14 Una muestra de la fragmentación inducida, logrando una extracción de gran tamaño en la parte central.....	43
Ilustración 15 Vista del armado interior de piezas fragmentadas debidamente identificada.	43
Ilustración 16 Vista del armado exterior de las piezas fragmentadas en la que se aprecia el lugar donde estuvieron ubicadas las barras dentro de la probeta.	43
Ilustración 17 Limpieza mecánica de las barras cubiertas con sellador viejo.....	44
Ilustración 18 Diferencia entre las superficies de barras con y sin el procedimiento de limpieza.....	44
Ilustración 19 Limpieza final con una estopa con la que se remueven partículas finas de suciedad generadas durante la limpieza mecánica.	44
Ilustración 20 Colocación de los cables del #12 con cinchos dobles de nylon.....	44
Ilustración 21 Colocación del sellador de protección dentro de la manguera nueva que cubre la varilla limpia.....	45



Ilustración 22 Se muestra el proceso terminado en una de las barras.....	45
Ilustración 23 Elaboración de las cimbras para el colado de las muestras.	46
Ilustración 24 Preparación y nivelado de las probetas cimbradas para el colado de la sección restaurada.....	46
Ilustración 25 Elaboración de de las muestras.	47
Ilustración 26 Muestras cubiertas con bolsas plásticas durante el proceso de fraguado. .	48
Ilustración 27 Curado de las muestras restauradas.....	48
Ilustración 28 Esquema de cortes de muestras poco carbonatadas.	49
Ilustración 29 Esquema y muestras de concreto extraídas de los cortes a) Diseño; b) Corte realizado a la probeta.	50
Ilustración 30 Esquema de corte de las probetas con mayor carbonatación.....	50
Ilustración 31 Muestras de concreto de especímenes carbonatados (correspondiente al esquema de la ilustración 30).....	50
Ilustración 32 Especímenes puestos en horno para secado.....	52
Ilustración 33 Contenedores de almacenamiento; b) Esquema de la configuración del ensayo de porosidad.....	53
Ilustración 34 Secciones cubiertas con parafina en el proceso de absorción capilar.	54
Ilustración 35 Relación entre la absorción y el tiempo.	62
Ilustración 36 Preparación de las rodajas de concreto con esmalte para la protección al intemperismo.....	63
Ilustración 37 Colocación de los especímenes en la azotea para exposición al intemperismo.....	64



Dedicatoria

Con todo el amor y reconocimiento para mi familia, por permitirme subir en sus hombros y conseguir hasta el más mínimo logro en mi vida, sin ustedes no sería nada. Mis padres Arturo Maya Flores y Adriana Ramírez Escalera que siempre han sido una fuente inagotable de paciencia y amor en mi familia, que siempre han estado ahí para formar una familia amorosa como núcleo de nuestras vidas. A mis hermanos Adriana y Arturo que siempre han sido el modelo perfecto para guiarme y son un ejemplo a seguir de esfuerzo, dedicación y entereza. Para mi niña hermosa, Giuliana belli, la niña que me convirtió oficialmente en tío, ojalá me alcance la vida para verte triunfar mucho. A mi cuñado Stefano Belli, un hermano más. Muy especialmente mi abuela Elisa Flores Arredondo, con todo el amor y agradecimiento que puedo expresar por tanto siempre, los amo a todos, gracias. A mis amigos Diego T., Luis C., Yuni V., Dorie S., Adolfo S., Gerardo E., y Christian V., con quien he pasado grandes momentos y con los cuales he aprendido muchísimo y agradezco siempre. Finalmente, a Porfirio, mi más fiel compañero y amigo, por tantas noches de desvelo a mi lado, siempre estarás conmigo.



Agradecimientos

A el M.I.T. Cipriano Bernabé Reyes sin el cual simplemente esta tesis no se hubiera podido llevar a cabo, estaré eternamente agradecido por tanto siempre. A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, no puedo expresar de una forma completamente correcta lo que significó para mí y para esta tesis, gracias por siempre animarme, por motivarme, pero sobre todo por nunca olvidarme y ver en mi la motivación que incluso yo no vi. Al Dr. Wilfrido Martínez Molina, mi asesor por ayudarme y estar al pendiente de lo que necesité para llevar a cabo esta tesis. A la Dra. Angélica del Valle Moreno por las facilidades otorgadas para acceder al proyecto DURACON. Al Dr. José Trinidad Pérez Quiroz que junto con el Dr. Wilfrido Martínez y la Dra. Angélica del Valle sentaron las bases del proyecto DURACON en Morelia. A la Mtra. Sandra Arguello Hernández por su ayuda e inagotable paciencia en el proceso administrativo. A mi gran amiga Dorothy Smith por su gran apoyo en la corrección de la traducción del abstract de esta tesis y su ayuda siempre, con todo, gracias. Para Alfonso Valle Hernández, Víctor Calderón, Eduardo Barajas grandes amigos y compañeros, además de todos los otros compañeros de servicio social que me ayudaron desinteresadamente, gracias.



Resumen

Las estructuras de concreto reforzado representan una opción viable por la cantidad de materiales de construcción y la gran diversidad que existe en el mercado según las necesidades de proyecto. Sin embargo, es necesario considerar cuestiones de durabilidad y no solo de resistencia mecánica al momento de elegir los materiales. En el concreto hidráulico se debe verificar la zona de exposición de nuestra estructura, para considerar los diseños óptimos para lograr la vida útil de la estructura. El proyecto DURACON permite el análisis de estructuras de concreto desde la perspectiva de durabilidad, al evaluar la carbonatación, potenciales de corrosión, velocidad de corrosión, porosidad, resistividad eléctrica, etc., considerando el ambiente de exposición de la estructura. En el presente trabajo se reporta una parte del proceso, el cual consiste en la restauración de los especímenes colocados en la estación Morelia, específicamente en la azotea del Edificio F de Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las actividades de restauración incluyeron, desde la elaboración de la cimbra, hasta el curado del mortero de restauración. Posteriormente se realizaron lecturas de potenciales de corrosión. A las esquirlas obtenidas de la restauración se les midió la porosidad y los parámetros asociados por medio de la prueba de Fagerlund. Al momento de la realización de este escrito se continúa con el desarrollo de pruebas y el análisis de los resultados ya obtenidos.

Palabras Clave: Concreto, Durabilidad, Corrosión, Carbonatación.



Abstract

Reinforced Concrete structures represents a viable option due to the great amount and diversity of construction materials that exists in the market according to the project needs. Nevertheless, it's necessary to consider durability matters and not just mechanical resistance when choosing materials. Regarding hydraulic concrete, the exposition zone of our structure must be verified to consider the optimal designs in order to achieve it's useful life. DURACON project allows the concrete structures analysis from the durability perspective through the evaluation of carbonation corrosion potentials, speed of corrosion, porosity, electrical resistivity etc., considering the exposition environment of the structure. In this present work paper it's reported a part of the process which consists on the specimens restauration placed on Morelia station, specifically on the "F" building rooftop of University City of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. The restauration activities included from the falsework manufacturing to restoration mortar cure. Subsequently, corrosion potentials lectures were taken. Shards obtained from restoration were measured about their porosity and associated parameters with Fagerlund assay. At the time of finishing this writing, develop of tests and analysis of results already obtained continues.

Key words: Concrete, Durability, Corrosion, Carbonation



Objetivos

- Objetivo General

Mantener la continuidad del trabajo de investigación del proyecto DURACON con la estación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, para obtener información que permita establecer la correlación entre la durabilidad del concreto y la acción del medio ambiente, en una atmósfera seca urbana no industrial, mediante la restauración de las vigas de concreto reforzado y la realización de pruebas electroquímicas.

- Objetivos Particulares

El problema de corrosión del acero de refuerzo del concreto es un problema que consume mucha energía y recursos económicos y humanos. La corrosión presenta distintos niveles de velocidad en función de la atmósfera circundante, esta investigación analiza los daños en la atmósfera particular de la Estación DURACON.

DURACON en la estación Morelia busca generar una correlación entre los factores ambientales de la zona de Morelia y la durabilidad de 2 concretos con diferentes relaciones A/C y para ello, desde 2003 hasta la fecha, una serie de 6 probetas han sido monitoreadas para conocer la condición del concreto, con un promedio de 3 mediciones por año, han sido monitoreadas mediante los parámetros de índice de corrosión (I_{corr} , $\mu A/cm^2$), potencial de corrosión (E_{corr} , mV) y resistividad eléctrica en el concreto de recubrimiento (ρ , $k\Omega\text{-cm}$).



Justificación

Es de conocimiento general, dentro del ámbito de construcción, que uno de los problemas más antiguos a los que se ha enfrentado el ser humano es el de protegerse de la agresividad del medio ambiente a través de todos sus componentes para poder vivir con normalidad. En la actualidad, dicho problema en realidad es un terrible desafío por los problemas que enfrentamos con el Cambio Climático y por estar en la obligatoriedad de cumplir con al menos 1 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Sin embargo, la acción del medio ambiente sigue estando presente y ahora el problema no es que el medio ambiente nos afecte, es que el medio ambiente afecte estas estructuras que nos permiten vivir con normalidad. La gran mayoría de las estructuras modernas están hechas de concreto reforzado, es decir, concreto con acero que puede ser acero galvanizado, acero inoxidable y más comúnmente acero al carbón. Las características que provee el concreto reforzado son muchas y de gran versatilidad, como la de darle ductilidad al elemento, la cual es una de las más aprovechadas. Sin embargo, la presencia del acero puede llegar a ser un punto débil paradójicamente, ya que se trata de un material muy susceptible a un fenómeno común llamado corrosión. El fenómeno de corrosión es altamente propiciado por el tipo de ambiente en el que se encuentre, es decir, se trata de un fenómeno en el que el metal tiende a reducirse hasta su estado de menor energía liberando dicha energía mediante un proceso de oxidación que a su vez no es más que un intento de mezclarse con el medio ambiente. Es por ello que se vuelve necesario tomar acciones eficaces para combatir dicho fenómeno, una caracterización específica del grado de influencia del ambiente en las afectaciones generadas al concreto puede ser una pauta importante en el futuro desarrollo de nuestras construcciones (FHWA, 1998).

La utilización del concreto reforzado actualmente representa uno de los materiales de construcción más utilizados ya que posee propiedades convenientes para las necesidades constructivas actuales. Sin embargo, contrario a la creencia popular de que es un material de vida útil larga, existe un gran número de estructuras prematuramente deterioradas debido a la corrosión del acero de refuerzo.



Debido a que esto representa un problema serio, diversos organismos a nivel mundial se han motivado a realizar estudios que determinen las causas y consecuencias de la corrosión, así como alternativas de solución para combatir el fenómeno en la infraestructura de concreto reforzado.

El proyecto DURACON pretende realizar una caracterización zonificada de la influencia del medio ambiente sobre el concreto mediante el monitoreo de especímenes distribuidos en un gran número de estaciones ubicadas en países iberoamericanos. Sin embargo, se trata de un monitoreo de larga duración y ya que finalmente la influencia del medio ambiente se hace presente a través de un deterioro, algunos especímenes han llegado a deteriorarse al grado de imposibilitar su continuo monitoreo. Una gran pausa en el monitoreo de los especímenes puede llegar a representar el fracaso del proyecto y entorpecer los esfuerzos por obtener un parámetro importante en el desarrollo de infraestructura duradera y de calidad.

Estos datos podrán emplearse para predecir los posibles daños a que estarán sometidas las viviendas de nuestros compatriotas y también podrán diseñarse las posibles políticas públicas a seguir para mitigar los daños o para inhibir los mecanismos de deterioro.

Hipótesis

La restauración de las 6 muestras actualmente deterioradas de la estación DURACON Morelia permitirá conocer el impacto del medio ambiente y sus factores en la durabilidad del concreto a través de la medición de parámetros electroquímicos por un periodo de al menos 10 años.

Lograr la reactivación del proyecto DURACON en la estación de Morelia Michoacán, a partir de la restauración de 6 muestras actualmente deterioradas y así permitir realizar un posterior monitoreo constante, adecuado y eficaz.



1 Introducción

Hasta el siglo XVIII puede decirse que los únicos conglomerantes empleados en la construcción fueron los yesos y las cales hidráulicas, sin embargo, es durante este siglo cuando se despierta un interés notable por el conocimiento de los cementos. John Smeaton, ingeniero de Yorkshire (Inglaterra), al reconstruir en 1758 el faro de Eddystone en la costa de Cornish, se encuentra con que los morteros formados por la adición de una puzolana a una caliza con alta proporción de arcilla eran los que mejores resultados daban frente a la acción de las aguas marinas y que la presencia de arcilla en las cales, no sólo las perjudicaba sino que por el contrario, las mejoraba, haciendo que estas cales fraguasen bajo el agua y que una vez endurecidas fuesen insolubles en ella. (historia-del-cemento, 2013)

Para el proyecto DURACON se diseñaron dos tipos de concretos; el primero tiene una relación $a/c = 0.65$; y el segundo con una relación $a/c = 0.45$. DURACON tiene como base pruebas encaminadas en la determinación de los procesos de carbonatación, penetración de cloruros en el concreto y en la determinación del contenido crítico de cloruros de inicio de corrosión, además de la medida de parámetros electroquímicos que hacen posible evaluar la cinética de corrosión de las estructuras. (Lopez Celis & Perez Quiroz , 2006).

2 Marco teórico de referencia

2.1 Fundamentos generales de un concreto

2.1.1 Definición y antecedentes

El concreto se puede definir en términos generales como la mezcla formada a partir de un material aglutinante que en la práctica suele ser un Cemento Portland Hidráulico, un material de relleno (agregados o áridos), agua y ocasionalmente



algún aditivo especial según propiedades deseables, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Guzman, 2001).

Un concreto reforzado no es nada más que la unión entre concreto y acero; los componentes del concreto son en el agregado (arena y grava), cemento, agua y en algunos casos, aditivos; el acero que se utiliza puede variar de acuerdo a las especificaciones de la estructura a construir; puede ser acero galvanizado, acero inoxidable o lo que se utiliza comúnmente: acero al carbón o de refuerzo. La interacción existente entre el concreto y el acero de refuerzo, se basa en que el concreto provee de una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero impidiendo que el acero continúe corroyéndose (Francisco, Tesis Refuerzo-Protección en Estructuras de Concreto Dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica, 2005).

La interacción que existe entre el concreto y el acero de refuerzo le proporciona una protección física en la que el concreto actúa como una capa física protectora que protege al acero de los agentes ambientales como el oxígeno, agua, cloruros y el dióxido de carbono que puedan despasivar al acero y con ello dar inicio a su corrosión. A pesar de ello, cuando el concreto reforzado se encuentra en un ambiente agresivo, en donde existen agentes químicos como los cloruros o sulfatos (presentes en agua de mar, por ejemplo), o el dióxido de carbono de un ambiente urbano, pueden llegar a acumularse en la superficie del concreto y poco a poco introducirse través del recubrimiento de concreto hasta alcanzar al acero (Torres Acosta, 2004).

La utilización del concreto como material de construcción tiene que remontarse al antiguo empleo de materiales cementantes que ya realizaban los egipcios mediante yeso impuro calcinado, posteriormente podemos encontrar evidencia de los griegos y romanos utilizando caliza calcinada y mismos que posteriormente aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada con ladrillos y tejas quebradas. Esta



mezcla es considerada el primer concreto de la historia. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas se combinaba con la cal para producir lo que es conocido como cemento puzolánico debido a que fue en el pueblo de Pozzuoli, en las cercanías del volcán Vesubio donde por primera vez se encontró ceniza volcánica. Actualmente, para describir al cemento obtenido de simplemente moler materiales naturales a temperatura normal se utiliza el nombre de cemento puzolánico (Neville, Tecnología del concreto, 2013).

La mezcla producto de la unión que provee un material cementante llega a ser tan eficiente que incluso estructuras antiguas de distintas culturas y épocas siguen hoy en día en pie, en gran medida gracias a dicha mezcla llamada mortero. Estructuras prehispánicas como las pirámides de Teotihuacán y la gran ciudad de Machu Pichu en Latinoamérica, así como el coliseo romano y el panteón romano siguen en pie y no solo eso, sino que el mortero utilizado en algunas de ellas muestra un deterioro ante la intemperie menor que algunas rocas naturales (Guzman, 2001).

El desarrollo cualitativo posterior de un material cementante a partir de los avances realizados por los griegos y romanos fue poco debido principalmente a la cocción incompleta de la cal llevada a cabo entonces y también producto de una carencia de tobas volcánicas y descuidos de la mano de obra (Guzman, 2001). Fue hasta 1756, en la costa de Cornish Inglaterra cuando John Smeaton fue comisionado para llevar a cabo la reconstrucción del faro de Eddystone que Smeaton descubrió una mejoría en la calidad del mortero cuando se mezclaba puzolana con caliza de alto contenido arcilloso (Neville, Tecnología del concreto, 2013).

En los años posteriores al gran aporte de Smeaton, se lograron desarrollar algunas variantes del cemento hidráulico con lo que mejoró la calidad del concreto tal como el “cemento romano” que obtuvo, a partir de la calcinación de nódulos de caliza arcillosa James Parker, así como algunas otras variantes de cemento (Neville, Tecnología del concreto, 2013). Sin embargo, el progreso más significativo llegó hasta 1824 Joseph Aspdin, un ladrillero, albañil y constructor de Leeds Inglaterra logró obtener la primera patente del “cemento Portland” que se basaba en la cocción de una mezcla entre caliza dura y arcilla finamente triturada, llevada a cabo hasta



eliminar el CO_2 , sin embargo la temperatura utilizada en aquel proceso de cocción era bastante menor que la que se requiere para formar el Clinker, componente fundamental en la elaboración moderna del cemento Portland (Neville, Tecnología del concreto, 2013).

En los orígenes de la fabricación del cemento, se puede decir que prácticamente se elaboraba sólo un tipo de cemento que era el cemento Portland, sin embargo, comenzó a presentarse la necesidad de producir cementos con características distintas a las que posee el cemento Portland y sobre todo a las que poseía en aquel entonces. Posteriormente vino un punto clave en la introducción de materiales suplementarios en la elaboración del cemento y es que en 1970 ocurrió uno de los aumentos más agudos en el costo de la energía, lo que representaría un aumento significativo en el costo del cemento ya que uno de los procesos fundamentales en la elaboración del cemento es la cocción que se lleva a cabo a temperaturas bastante elevadas, por lo que la energía para lograr dichas temperaturas representa una pieza clave. Es así que se comenzaron a utilizar pequeñas cantidades de productos químicos llamados aditivos, así como también se introdujo el uso de otros materiales inorgánicos con el fin de economizar ya que eran más baratos que el cemento Portland y en muchas ocasiones se trataba de desperdicios de procesos industriales o incluso un producto secundario, ejemplo de ello son la escoria granulada de alto horno, ceniza volante o humo de sílice. El cemento hidráulico es un material conglomerante inorgánico que se elabora principalmente partir de elementos tales como el calcio, silicio, aluminio, hierro y magnesio, posee una consistencia

polvorienta, el cual tiene la propiedad de reaccionar al agregarle agua y fraguar, endurecer en virtud de reacciones químicas durante la hidratación, y ya que ha endurecido conservar su resistencia y estabilidad. (Tronconis de Rincón , 2005)

Muchos de los cementos se han desarrollado para asegurar buena durabilidad del concreto sujeto a una variedad de condiciones. Sin embargo, no ha sido posible encontrar en la composición del cemento una respuesta completa al problema de durabilidad del concreto: las principales propiedades mecánicas del concreto



endurecido, tales como resistencia, contracción, permeabilidad, resistencia a la acción de la intemperie, y flujo plástico, también son afectadas por factores ajenos a la composición del cemento, aunque ésta determina en alto grado la rapidez de ganancia de resistencia.

2.1.2 Clasificación de cementos en México

Cuando hablamos de fabricación cemento en México nos referimos a seis clases de cementos hidráulicos según sus adiciones que a su vez poseen cuatro características y cinco clases de resistencias, que se rigen por la Norma Oficial NMX C 414 (NMX-C414, 2017) (NMX-C-414-ONNCE-2017, 2017), Tabla 1.

Tabla 1 Clasificación del cemento por sus adiciones (NMX-C-414-ONNCE-2017, 2017)

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
CPO	Cemento Portland ordinario
CPP	Cemento Portland puzolánico
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de sílice
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno

2.1.2.1 Cemento Portland ordinario

El componente “emblema” del cemento Portland se conoce como Clinker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El cemento Portland se produce por la pulverización del Clinker que además contiene algunos aluminatos de calcio, ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (Yeso) que se muele conjuntamente con el Clinker para elaborar el cemento Portland ordinario como producto final. El cemento Portland posee como componentes



químicos principales calcio, sílice, alúmina y hierro en cantidades apropiadas y se verifica mediante un análisis químico frecuente a todos los materiales para garantizar una calidad alta y uniforme del cemento. (Diseño y control de mezclas de concreto). Estos compuestos interactúan en un horno para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada. Sin embargo, el equilibrio no se mantiene durante el enfriamiento y la rapidez de enfriamiento afectará el grado de cristalización y la cantidad de material amorfo presente en el Clinker enfriado. Sin embargo, puede considerarse que el cemento se encuentra en un estado de equilibrio congelado, o sea que se dice que los productos reproducen el equilibrio existente durante la temperatura de formación del Clinker. Esta suposición se hace para poder calcular la composición de los compuestos de los cementos comerciales, es decir que la composición “potencial” se calcula a partir de cantidades precisas de óxidos que están presentes en el Clinker como si hubiera existido una cristalización completa de los productos en equilibrio. Normalmente se suelen considerar 4 compuestos como los principales componentes del cemento, la tabla 2 los enumera y describe (Neville, Tecnología del Concreto, 2013).

Tabla 2 Composición del cemento (Neville, Tecnología del Concreto, 2013).

Nombre del compuesto	Composición de oxido	Abreviatura
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrita Tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Actualmente en México no se encuentran datos de fabricación cemento Portland ordinario, según el reporte de producción de la CANACEM, en México se han producido desde el 1 de enero de 2013 hasta el 1 de agosto de 2019 271 millones de toneladas de cemento gris (CANACEM, 2019) . Posiblemente dicho comportamiento en la utilización del cemento Portland gris se puede explicar gracias a que se trata de un material admirablemente adecuado para la construcción



general de concreto, siempre y cuando no haya exposición a sulfatos en suelos o aguas freáticas.

2.1.2.2 Cemento Portland Puzolánico

Los cementos Portland puzolánicos son comúnmente conocidos como tipo IP o tipo P. La principal distinción entre ambas designaciones se encuentra en que el tipo IP se puede utilizar para la construcción general y el tipo P se usa para construcciones que no requieran altas resistencias iniciales. Estos tipos de cementos se fabrican mediante la molienda del Clinker del cemento Portland y una puzolana adecuada, o a través de una mezcla entre el cemento Portland o cemento de alto horno con puzolana, o por la combinación de la molienda y el mezclado. El contenido de puzolana presente en este tipo de cemento se encuentra entre el 15% y 40% de la masa total del cemento. El desempeño mostrado por los concretos elaborados a partir de cementos tipo IP es similar al mostrado por concretos elaborados de cemento tipo I o cemento Portland común, esto según pruebas de laboratorio aplicadas en especímenes de ambos concretos.

2.1.2.3 Cemento Portland con escoria granulada de alto horno

Este tipo de cemento se utiliza junto con el cemento Portland común para la confección del concreto o junto con cal para la preparación de mortero, pero no se lo emplea separadamente en concreto estructural. Principalmente, el cemento portland con escoria granulada de alto Horno se produce mediante el mezclado de la escoria granulada de alto horno y el cemento Portland Común, el mezclado de la escoria granulada de alto Horno con la cal hidratada o el mezclado de una combinación de cemento Portland y cal hidratada. Para este tipo de cemento, la cantidad mínima de escoria granulada de alto horno deberá ser del 70% de la masa total del cemento. La escoria granulada de alto horno comúnmente usada es un desperdicio generado a partir de la elaboración de lingotes de hierro, se trata de una cantidad importante de desperdicio, ya que se generan aproximadamente 300kg de escoria por cada tonelada de lingotes de hierro producidos. La escoria granulada de



alto horno es muy similar químicamente hablando al cemento portland, ya que se compone principalmente de una mezcla de cal, sílice y alúmina, es decir, los mismos óxidos que componen al cemento Portland, sin embargo, no en las mismas proporciones. Además de esta, existen escorias no ferrosas. La escoria puede generar un material cementante de varias formas, una de ellas es como materia prima junto con piedra caliza para la fabricación convencional del cemento Portland en seco, el Clinker generado con estos materiales se utiliza para la fabricación de Cemento Portland de alto horno. Este uso de la escoria es económicamente conveniente ya que la escoria no necesita encontrarse en forma de vidrio y la cal está presente en forma de CaO , así que no requiere energía para poder generar la carbonatación.

2.1.2.4 Cemento Portland compuesto

Se trata de un cemento elaborado en una combinación de Clinker, yeso y dos o más adiciones que pueden estar en presencia variable, en el caso de la escoria de alto horno puede estar presente desde un 6% hasta un 35%, de 6% a un 35% de material con características puzolánicas, del 1% al 10% de humo de sílice y desde un 6% hasta un 35% de caliza, sin embargo, independientemente de la cantidad y el tipo de material con el que se va a adicionar, la cantidad de Clinker e yeso debe ser mínimo del 50% hasta un 94% (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.1.2.5 Cemento Portland con Humo de Sílice

La utilización del humo de sílice como adición al cemento Portland es relativamente reciente y originalmente se utilizó como una puzolana muy reactiva, sin embargo, su injerencia es también benéfica en otros aspectos tales como la capacidad que poseen las partículas tan finas del humo de sílice de colocarse en una proximidad muy estrecha a los agregados del concreto, o sea, en la interface de la pasta de cemento y agregado, se evita generar una zona de debilidad en el concreto, un efecto pared que puede impedir que las partículas del cemento portland se empaquen con las partículas del agregado ya que las partículas que normalmente



son hasta 100 veces más pequeñas que las del cemento logran hacer el empaque. Un factor que ayuda también es que, debido a su finura, el humo de sílice reduce el sangrado, provocando así que no exista agua de sangrado atrapada por debajo de los agregados gruesos. Todo esto provoca que el concreto fabricado con cemento adicionado con humo de sílice se convierta en un cemento más resistente y con una permeabilidad más baja. Sin embargo, se debe mencionar que el humo de sílice es caro, es un producto secundario de la elaboración de silicio y aleaciones de fierro y silicio a partir de cuarzo de alta pureza y carbón en un horno de arco eléctrico sumergido. Lamentablemente no se encuentra una gran variedad normativa referida al cemento portland adicionado con humo de sílice, la norma ASTM C1240-93 especifica los requisitos para humo de sílice usada en mezclas cementosas (Neville, Tecnología del Concreto, 2013, págs. 60, 467).

2.1.2.6 Cemento con escoria granulada de alto horno

La norma NMX – C – 184 presenta el cemento de escoria, que se compone del 65% al 90% de escoria de alto horno. En la tabla 3 se muestra la clasificación por sus características especiales (NMX-C414, 2017).

Tabla 3 Clasificación por características especiales (NMX-C414, 2017)

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali - agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

2.1.2.7 Cemento resistente a sulfatos

Se trata de un cemento que se presenta debido a la necesidad de encontrar un protector eficiente ante condiciones desfavorables que provocan la degradación del concreto. Cuando el cemento endurece, el hidrato de aluminato de calcio puede



reaccionar con una sal de sulfato derivada del exterior, el producto de adición es sulfoaluminato de calcio formado en la pasta hidratada del cemento. El concreto puede presentar una desintegración gradual debido a que el aumento en el volumen de la fase sólida es hasta del 227%. Además, también se presenta el cambio de base entre el hidróxido de calcio y los sulfatos que genera como resultado la formación del yeso, con un aumento de hasta 124% de fase sólida. Las reacciones descritas anteriormente se conocen comúnmente como ataque de sulfatos, las sales de sulfato de magnesio y sulfato de sodio son especialmente activas y estas reacciones generan un impacto más trascendente en el concreto si son acompañadas de ciclos de humedecimiento y secado alternos. Para solucionar el problema que generan estas reacciones que se presentan en ciertos ambientes, se utiliza un cemento bajo en C_3A , conocido como cemento Portland resistente a sulfatos. Las especificaciones de este tipo de cemento están dadas por la norma ASTM C150-94. El uso de este cemento puede ser de mucha utilidad cuando existe riesgo de que se presenten iones de cloruro en un concreto que posee acero de refuerzo embebido ya que el C_3A se adhiere a iones de cloruro, provocando la formación de cloroaluminato de calcio y como consecuencia estos iones no están disponibles para iniciar la corrosión del acero de refuerzo (Neville, Tecnología del Concreto, 2013).

2.1.2.8 Cemento de baja reactividad álcali-agregado

Se trata de una especificación que indica una baja reactividad ante agregados álcali-reactivos que se especifican para ayudar en el control de la reactividad álcali-agregado. Existen agregados que contienen ciertos constituyentes que pueden provocar una reacción con los hidróxidos alcalinos que están presentes en el concreto lo que puede ser bastante peligroso si provoca una expansión significativa. Dicha reactividad se puede dar en dos formas; reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). Entre ambas, se puede distinguir como más peligrosa la RAS ya que es más común encontrar agregados que contienen minerales reactivos de sílice y contrariamente, la composición de los agregados de



carbonatos reactivos con álcalis no es muy común de encontrar. El deterioro en concretos debido a esta reacción ha llegado a tal que se ha reconocido como una de las fuentes principales de deterioro en estructuras desde los años 30's.

2.1.2.9 Cemento de bajo calor de hidratación

El cemento de bajo calor de hidratación se utiliza para mezclas de concreto en las que se debe reducir la tasa y la cantidad de calor generada por la hidratación del cemento, por consecuencia, este cemento desarrolla su resistencia con una tasa más lenta que otros tipos de cemento, resulta útil en estructuras con volúmenes muy grandes, donde debe ser minimizar el calor generado durante el endurecimiento, lo que lo vuelve un cemento no muy comercial. Esta característica se logra manteniendo el C_3A en un porcentaje máximo de 7% y el C_3S en 35% máximo debido a que estos compuestos producen un calor de hidratación elevado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Una elevación de la temperatura interior en una masa de volumen grande de concreto debida al desarrollo de calor de hidratación, acompañada de una baja conductividad térmica del concreto puede provocar serios agrietamientos (Neville, Tecnología del Concreto, 2013, pág. 52).

2.1.2.10 Cemento Blanco

Es un cemento usado principalmente para fines estéticos, se elabora a partir de materias primas que contengan una cantidad pequeña de óxido de hierro, específicamente menos de 0.3% de la masa de Clínter así como de óxido de manganeso, principalmente se usa la arcilla de porcelana, junto con yeso o alguna piedra caliza libre de ciertas impurezas. El proceso de elaboración es muy delicado, al punto de volverse necesario cambiar el combustible necesario para su elaboración a gas o petróleo para así evitar su contaminación con ceniza de carbón. También es necesario evitar la contaminación con fierro durante la molienda del Clínter por lo que pueden cambiarse las bolas de molienda usuales por bolas de níquel y molibdeno en un molino forrado de piedra o de material cerámico, volviendo el proceso de elaboración del cemento más caro, hasta 3 veces más costoso que



un cemento normal, debido a que conlleva el uso de materiales. En la tabla 4 se muestra la clasificación del cemento por su clase resistente (NMX-C414, 2017).

Tabla 4 Clasificación por su clase resistente (NMX-C414, 2017)

Resistencia MPa (N/mm ²)	Mínimo a 3 días	Mínimo a 28 días	Máximo a 28 días
20	--	20	40
30	--	30	50
30 R*	20	30	50
40	--	40	--
40 R*	30	40	--

*La letra R indica que un cemento es de resistencia inicial alta.

2.1.3 Agregados pétreos

Existe una gran variedad de agregados pétreos requeridos para la elaboración de un concreto, que pueden ir desde el rango de unos cuantos milímetros de diámetro hasta un tamaño máximo que suele utilizarse como referencia límite. A esta distribución de partículas se le llama granulometría y se utiliza, entre otras cosas para diferenciar dichas partículas entre arenas y gravas principalmente. Para elaborar un concreto de buena calidad, es recomendable utilizar los 2 grupos antes mencionados. Todas las partículas de agregado que poseen origen natural fueron parte de una masa mayor que pudo haberse fragmentado hasta obtener el tamaño deseado ya sea por procesos naturales como la abrasión o el intemperismo o bien, por medios artificiales, mediante la trituración mecánica. Por ende, muchas de las propiedades que deseamos obtener en la granulometría de los agregados pétreos pueden ser encontradas (o no) en el análisis de la roca original como pueden ser, por ejemplo, la composición mineral, sus propiedades químicas, la descripción petrográfica, su densidad, su resistencia, la estructura de poro etc. (Neville, Tecnología del Concreto, 2013, pág. 76).



En la tabla 5 se observan algunos de los factores característicos de los agregados y la forma en que se manifiestan (NMX-C003, 2018).

Tabla 5 Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2018)

Componente	Factor	Se manifiesta en:
Agregados	Contaminación por materia orgánica o vegetal (troncos, hojas, raíces, etc.)	Inhibición de reacciones puzolánicas, falta de resistencia, agrietamientos, poca trabajabilidad y plasticidad.
	Alto índice de lajas	Problemas estructurales y de resistencia.
	Granulometría no adecuada	Falta de adhesión, problemas de resistencia, mayor requerimiento de aglomerante.
	Alto contenido de finos	Mayor requerimiento de aglomerantes, problemas de adhesión entre partículas.

El diseño de una mezcla de concreto y sus características finales dependen principalmente de la calidad y propiedades físicas de los agregados pétreos que constituyen mayormente a una mezcla de concreto, esto debido a que su presencia representa más o menos entre un 60 y 75% del volumen del concreto y entre un 70 y 85% de su peso (IMCYC, 2004) , siendo determinante en el proporcionamiento final de la mezcla e influyendo considerablemente en las propiedades mecánicas y físicas el concreto.

La durabilidad de un concreto también está condicionada por las propiedades de los agregados pétreos y su resistencia ante los efectos deteriorantes de su entorno ambiental y sus condiciones de servicio.

En cuanto a aspectos químicos se refiere, la composición mineralógica y petrográfica de los agregados pétreos es para tener en cuenta debido a que existen ciertos tipos de rocas y minerales que pueden generar reacciones adversas en los álcalis del concreto (Manuel, 2005).



2.1.4 El Cemento hidráulico

El cemento hidráulico es un material conglomerante inorgánico principalmente elaborado a partir de calcio, silicio, aluminio, hierro y magnesio, de una consistencia polvorienta, el cual tiene la propiedad de reaccionar al agregarle agua y fraguar, endurecer en virtud de reacciones químicas durante la hidratación, y ya que ha endurecido conservar su resistencia y estabilidad. (Tronconis de Rincón , 2005)

2.1.5 Reacción álcali-agregado

Se trata de un fenómeno que se presenta en concretos fabricados con agregados pétreos sensibles en el que después de algunos años de exposición al medio ambiente y la presencia de lo que comúnmente se conoce como álcalis, es decir óxidos de sodio y potasio provenientes principalmente del cemento utilizado como aglomerante en el concreto, más humedad y temperatura provoca que se genere una especie de gel alrededor de las partículas gruesas de los pétreos que a su vez provoca una expansión que puede llegar a generar rupturas o grietas, debilitando seriamente al concreto (Pasquel C.).

Esta capacidad de reacción con álcalis que pueden llegar a tener los agregados pétreos genera una contingencia que por otro lado su probabilidad de presentarse varía en relación a la ubicación geográfica de los mismos, por ello se deben analizar estas propiedades en agregados pétreos provenientes de regiones con un porcentaje alto de probabilidad de encontrar este tipo de características.

El proceso para verificar la reactividad de los agregados con los álcalis; en primer término, debe efectuarse el examen petrográfico como lo indica la NMX C 265 (NMX-C265, 2010) / ASTM C 295 (ASTM-C295, 2019), con objeto de discernir si los agregados son inocuos o contienen rocas y minerales identificados como potencialmente reactivos con los álcalis.



2.1.6 Agua

El estado en el que se encuentra el agua que se va a utilizar para elaborar un concreto suele ser menospreciada, sin embargo, esto es un error, ya que puede influir significativamente en su comportamiento. La presencia de impurezas como grasas, materia vegetal o ácidos puede ser fatal para el concreto ya que estos retardan o impiden el proceso de hidratación.

Se debe revisar lo escrito en la Norma Oficial NMX C-122 (NMX-C-122, 2019) que establece los requisitos permisibles de cantidades máximas de agentes contaminantes que se consideran en tolerancia para el agua empleada en la elaboración de mezclas de concreto. Además de esto, cabe mencionar que las normas NMX C-252 (NMX-C-252, 2014) y NMX C-253 (NMX-C-253, 2014) se refieren a algunos otros requisitos de calidad en el agua para su uso específico en la elaboración de mezclas para elementos de concreto preesforzado.

2.1.7 Aditivo

Según lo establece en informes, el comité ACI 212, la ASTM C 494 (ASTM-C494-C494M, 1999), la ASTM C 1017 (ASTM-C1017-C1017M, 1996) y la Norma Oficial NMX C 255 (NMX-C-255, 2013), los aditivos son sustancias que se mezclan con el concreto para generar un cambio en sus propiedades o mejorarlas, como pueden ser:

- Reducir la tendencia a la segregación de los agregados pétreos.
- Aumentan el estado de trabajabilidad del concreto sin modificar la cantidad de agua que se requeriría para tener esa misma trabajabilidad.
- Modificar el periodo de fraguado inicial, ya sea aumentándolo o disminuyéndolo.
- Mejoran la capacidad de bombeo del concreto.

Los aditivos modifican las propiedades del concreto endurecido, para:



- ~ Reducir el tiempo en el que desarrolla de su resistencia.
- ~ Cambiar (disminuir) la evolución del calor de hidratación.
- ~ Reducir la presencia de oquedades, lo que disminuye la permeabilidad del concreto.
- ~ Producir un aumento en la cohesión entre un concreto nuevo y uno viejo.

3 Pruebas para la Caracterización del Concreto

Es necesario verificar que el concreto que se elabora tiene las propiedades que se pretenden, es por eso que existen pruebas que se le realizan al concreto ya sea en su etapa fresca o endurecida. En nuestro país realizamos dichas pruebas con base en las normas mexicanas y las normas ASTM.

3.1 Pruebas al concreto fresco

Las pruebas que se realizan al concreto fresco son:

- Cohesión y trabajabilidad
- Determinación de la temperatura de la mezcla de concreto
- Revenimiento
- Peso volumétrico
- Contenido de aire
- Sangrado en el concreto
- Curado

3.1.1 Cohesión y Trabajabilidad

En estado fresco, la característica requerida en las mezclas de concreto es la trabajabilidad, la cual se considera como una propiedad del concreto que determina su capacidad de colocación y compactación adecuadas, permitiendo una buena adherencia y un buen acabado sin que se presente segregación en la mezcla y sin un sangrado excesivo. La consistencia forma parte de la trabajabilidad del concreto, y se relaciona con la cohesión, de manera que la reunión de ambas propiedades



define la facilidad con que una mezcla puede ser trabajada sin que pierda su homogeneidad.

3.1.2 Determinación de la Temperatura de la Mezcla de Concreto

Aunque la temperatura ambiental y del concreto recién mezclado están estrechamente vinculadas, no hay una relación estable entre ambas debido a las diversas condiciones térmicas de sus componentes, tal como ocurre en el caso de los agregados cuya temperatura puede variar en función de su humedad y grado de exposición a los rayos solares. De cualquier modo, cuando la temperatura ambiental es alta, la temperatura del concreto al mezclarlo también se incrementa si no se ejercen acciones moderadoras.

Es un hecho reconocido que al aumentar la temperatura inicial del concreto disminuye su resistencia final; es decir, el concreto que se cura inicialmente a temperaturas elevadas desarrolla menor resistencia última, lo cual se atribuye a que las altas temperaturas alteran la morfología de los productos de hidratación del cemento en detrimento de las propiedades del concreto endurecido.

3.1.3 Revenimiento

La prueba de revenimiento muestra la trabajabilidad del concreto, siendo ésta una medición para saber qué tan fácil resulta colocar, manejar y compactar el concreto; cuanto más elevado es el revenimiento, más colocable es la mezcla.

Esta prueba se realiza como lo indica la NMX C 156 (NMX-C-156, 2010) y la recomiendan las normas ASTM C 143, (ASTM-C143-C143M, 2000) y ASTM C 1362. (ASTM-C1362, 1997).

3.1.4 Peso volumétrico

La obtención del peso volumétrico del concreto se utiliza para determinar el peso por metro cúbico de concreto. Esta prueba se realiza de acuerdo a la NMX C-162 (NMX-C-162, 2014) y como lo recomienda la ASTM C 29, (ASTM-C29-C29M,



1997)ASTM C 138, 5 (ASTM-C138-C138M, 2001) dividiendo el peso neto del concreto fresco entre el volumen del recipiente que lo contiene.

3.1.5 Contenido de aire

El contenido de aire en el concreto fresco compactado es un parámetro muy importante para conocer el comportamiento del concreto a la intemperie, y para verificar la variación del contenido de aire debido al uso de aditivos químicos para incrementar la trabajabilidad del concreto.

Esta prueba proporciona el porcentaje de contenido de aire en el concreto fresco con respecto al volumen del concreto; la medición se basa en el cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión como lo establecen la NMX C 157 (NMX-C157, 2006)¹ y el método de la ASTM C 231 (ASTM-C231, 1997)

3.1.6 Exudación en el concreto

El sangrado es la migración del agua hacia la superficie del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos (cemento, arena y grava) dentro de la mezcla. El asentamiento de estos sólidos es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad. Un sangrado excesivo aumenta la relación a/c en la parte superior, dando como resultado una capa superior débil, y baja durabilidad.

El método de ensaye de la ASTM C 232 (ASTM-C232, 1999) cubre el procedimiento para determinar las cantidades de agua relativas, y de agua de mezclado que sangraran de una muestra de concreto fresco, bajo las condiciones de ensaye.

3.1.7 Curado

Curar el concreto es procurar que en su interior siempre existan condiciones de humedad y temperatura propicias para que todo el cemento que contiene alcance a hidratarse. Cualquier cantidad de cemento que no se hidrate dejará de contribuir al desarrollo de las propiedades del concreto. Tomando en cuenta que la completa



hidratación puede requerir meses, e incluso años, resulta improbable disponer de agua interna en todo ese tiempo cuando la estructura opera en condición seca. Por tal motivo, se acostumbra especificar la resistencia de proyecto del concreto a una edad reducida, que normalmente es 28 días, considerando que la gran mayoría de su contenido de cemento del orden del 70 al 80% debe haberse hidratado a esa edad.

Lo anterior presupone el compromiso de asegurar que no le falta agua interna al concreto durante sus primeros 28 días de edad. Para tratar de conseguirlo existen varios procedimientos, que en síntesis se agrupan en dos sistemas de curado húmedo: 1) aportación de agua al concreto desde el exterior a fin de reponer la que se pierde por evaporación y la que se consume por hidratación del cemento, y 2) un cubrimiento temporal de la superficie expuesta del concreto para evitar la pérdida por evaporación del agua interna, confiando que ésta sea suficiente para mantener la hidratación del cemento durante al menos 28 días.

3.1.8 Prueba de resistencia mecánica a compresión simple

Esta prueba ayuda a determinar la resistencia a compresión de muestras de concreto cilíndricos; ésta consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de concreto, esta carga se aplica en pequeñas cantidades hasta el momento que ocurra la falla; la resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área de la sección transversal del cilindro. La normativa aplicable es (ASTM-C39-C39M, 2001) (ASTM-C192-C192M, 2000) (NMX-C-083, 2014).

3.1.9 Prueba de resistencia mecánica a tensión indirecta

La resistencia a la tensión indirecta del concreto se determina por el ensaye de cilíndricos cargados a compresión en dirección diametral, bajo los criterios de las Normas Oficiales NMX C 159 (NMX-C-159, 2016), NMX-C-163 (NMX-C-163, 2019) y ASTM C 496 (ASTM-C496, 1996).



3.1.10 Prueba de resistencia mecánica a tensión por flexión

La resistencia del concreto a tensión por flexión está influenciada por ciertas características y propiedades de los agregados, tales como su dureza y resistencia, textura superficial y forma de partícula; de modo que cuando estas características no son favorables, se dificulta alcanzar altas resistencias a tensión por flexión, aun con el empleo de muy bajas relaciones agua/cemento, (ASTM-C192-C192M, 2000) (ASTM-C78, 2000).

3.1.11 Pruebas de deformabilidad

El concreto endurecido experimenta deformaciones debido a esfuerzos progresivos de compresión hasta la falla; estas deformaciones denotan un comportamiento inelástico, excepto en un intervalo inicial de esfuerzos, inferiores a 40-45% de la falla (Torres Acosta, 2004), en que ofrece un desempeño semielástico. Esto permite asignarle al concreto un módulo de elasticidad a compresión que depende notablemente de los agregados; las pruebas con las que se puede determinar esta propiedad se mencionan enseguida.

3.1.12 Prueba del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto a compresión

Esta prueba evalúa la determinación:

- 1 Conforme al módulo de elasticidad de Young
- 2 La relación de Poisson de cilindros de concreto y corazones de concreto, cuando se encuentran bajo tensión de compresión longitudinal

Esta prueba proporciona una tensión para el valor del cociente de tensión, y un cociente lateral para la tensión longitudinal para el concreto endurecido a cualquier edad y en condiciones de curado determinadas. Las pruebas se realizaron, bajo la Norma Oficial NMXC 128 (NMX-C128, 2013) y ASTM C 469 (ASTM-C469, 1994).



3.1.13 Prueba de contracción por secado del concreto hidráulico

La contracción por secado del concreto se origina básicamente en la pasta de cemento conforme endurece y pierde humedad; en tanto que la función de los agregados en este aspecto consiste más bien en restringir la contracción de la pasta.

Una baja gravedad específica, y alta absorción de los agregados son signos de elevada porosidad de las rocas que los constituyen. A su vez, una elevada porosidad de la roca es sintomática de un alto grado de compresibilidad y en consecuencia menor capacidad para restringir la contracción de la pasta de cemento. Por consiguiente, los agregados constituidos por rocas con esas características propician mayor contracción por secado en el concreto. Normativa: (ASTM-C157-C157M, 1999).

3.1.14 Pruebas de impermeabilidad

El concreto debe de resistir por sí mismo la penetración de fluidos líquidos como el agua, soluciones acuosas, fluidos gaseosos como el aire y otros gases; esta propiedad se puede satisfacer si, tenemos un concreto con una baja relación agua/cemento, adicionando a la mezcla de concreto puzolanas y realizando un curado del concreto de calidad; para medir esta propiedad se pueden realizar las siguientes pruebas:

3.1.15 Prueba de densidad, absorción y vacíos en el concreto

Es la propiedad del concreto de poseer una baja permeabilidad a los fluidos; es una condición necesaria para el buen desempeño y durabilidad de las estructuras; es posible evaluar esta propiedad, bajo el criterio de la ASTM C 642, (ASTM-C642, 1994) que nos ayuda a determinar la densidad, el porcentaje de absorción y el porcentaje de porosidad o vacíos en el concreto endurecido.



La porosidad del concreto se considera como los espacios vacíos que quedan en la masa del concreto a consecuencia de la evaporación del agua excedente al mezclarse, y al aire atrapado durante su fabricación.

3.1.16 Prueba de absorción capilar

La absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los, espacios capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua en estado líquido. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto, a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente.

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: (**e**) porosidad efectiva; (**k**) absorción capilar; y (**m**) resistencia a la penetración del agua; el valor de **m** esta únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.

3.1.17 Prueba de resistencia a la penetración de fluidos (ión cloruro)

Esta prueba determina la conductancia eléctrica del concreto para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro. Esta prueba se puede aplicar a los tipos de concreto donde las correlaciones se han establecido entre esta prueba y procedimientos de acumulación del cloruro a largo plazo, tal como lo describe AASHTO T 259. La norma americana para la prueba se define por la normativa mexicana (ASTM-C1202, 1997).

3.1.18 Prueba de resistencia al congelamiento y deshielo (ASTM-C666, 1997)

Esta prueba determina el llamado periodo de inmunidad a la congelación, que corresponde al tiempo o número de ciclos que el concreto puede experimentar congelación y al deshielo sin registrar deterioro. Aunque este periodo de inmunidad no es identificable, con el tiempo de servicio del concreto en condiciones de campo



si permite hacer evaluaciones comparativas entre diferentes agregados sometidos a prueba. Las pruebas que nos ayudan a verificar la aptitud de los agregados al congelamiento y deshielo, son la ASTM C 682 (ASTM-C682, 1994) y la ASTM C 671. (ASTM-C671, 1994)

3.1.19 Pruebas de resistencia superficial

Es la capacidad que tiene el concreto para poder resistir las fuerzas de abrasión, fricción, erosión e impacto pudiendo ser estas de índole mecánico o hidráulico, esta propiedad se determinó bajo los lineamientos de las siguientes pruebas:

- a. Prueba de Resistencia a la Abrasión Mecánica (ASTM-C418, 1998) (779M, 2000) (ASTM-C-994, 1999)
- b. Prueba de Resistencia a la Abrasión Hidráulica (ASTM-C-1138, 1997)

4 Durabilidad de la Estructuras de Concreto Reforzado

Las principales acciones del deterioro que afectan la durabilidad de las estructuras de concreto según la norma NMX-C155-ONNCCE, son:

- a) Físicas y mecánicas, generalmente asociadas al congelamiento y deshielo erosión, fenómenos geológicos, hundimientos diferenciales y cambios de volumen por gradientes térmicos o de humedad.
- b) Ataque químico por exposición a ácidos, gases, aguas y suelos que contienen sustancias químicas agresivas incluyendo sulfatos y microorganismos biológicos.
- c) Reacción química de agregados con los álcalis del cemento.
- d) Mecanismos que ocasionan corrosión del acero de refuerzo o de embebidos metálicos en el concreto propiciada principalmente por carbonatación y la presencia de iones de cloro.

En la ilustración 7 se muestran las siete etapas del modelo conceptual de la vida de servicio, obtenido de la norma NMX-C-530-2018 (NMX-C-530, 2018)



4.1.1 Tipos de Ambiente

Para la realización de un proyecto que sea exitoso, deben considerarse las condiciones del ambiente o entorno en que la estructura será proyectada. En este sentido, las consideraciones realizadas por normativa española se plasman en un conjunto de combinaciones entre clases generales de exposición, frente a la corrosión de las armaduras y clases específicas de exposición relativas a los otros procesos de degradación (EHE-08, 2010).

		Planeación de Vida de Servicio de Proyecto	Preparación para la vida de servicio	Inicio de la vida de servicio	Vida de servicio	Vida de servicio residual	Vida residual	Final de vida residual
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6	Etapa 7
Características		Diseño arquitectónico, estructural y de durabilidad	Construcción Supervisión	Puesta en servicio e inicio de vida útil Planeación de mantenimiento	Etapa de propagación 1 Mantenimiento preventivo o no Entrada de agresivos	Etapa de propagación 2 Mantenimiento correctivo Final de vida útil	Cualquier mantenimiento no recupera desempeño mínimo	Inicio del colapso parcial o total
	Óptimo	Condición mínima de proyecto						
	Mínimo	Condición mínima de servicio						
	No aceptable	Condición paliativa para alejar colapso (cambio de uso)						
Desempeño de proyecto y estructura en términos globales		Condición de colapso						

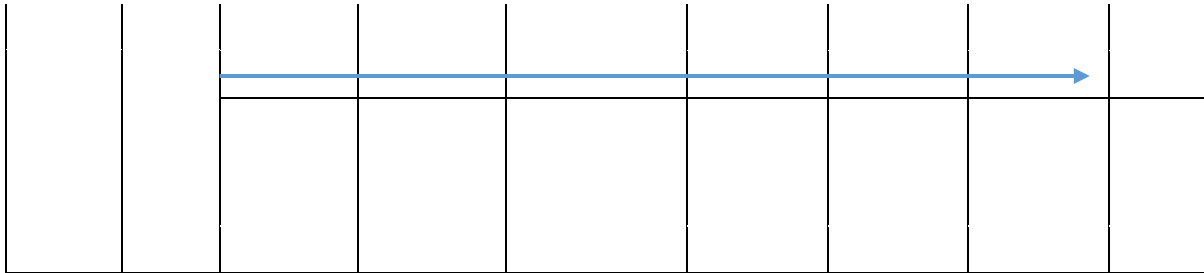


Ilustración 1 Modelo conceptual de la vida de servicio, 7 etapas.

5 Corrosión de acero estructural en concreto

Para resistir el ataque exterior, un concreto debe de ser impermeable a las soluciones reactivas, propiedad que depende de la correcta formulación, del mezclado, la compactación y el curado (Guy, 1980, pág. 421). El término corrosión se aplica aquellos procesos que conducen a la destrucción química o electroquímica de un metal. Al exponer superficies limpias de metales a acción del aire seco, éstas reaccionan con el O_2 oxidándose, en este caso el proceso de corrosión transcurre en un medio no iónico y se denomina corrosión química. Si esos mismos metales se ponen en contacto con una solución acuosa conductora, se producen procesos de óxido – reducción con el paso de iones del metal a la solución (oxidación) y con la reducción de alguna especie presente en el medio corrosivo. Estos fenómenos transcurren con una disminución de energía libre e implican la vuelta del metal a la forma en que se encuentra en la naturaleza (Medina Custodio, 2006).

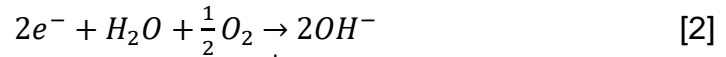
Dicho de otra manera, la corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica en el cual la zona anódica y catódica se crea en la superficie del metal, en un material que actúa como un electrolito y cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para formar una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material en contacto con otro, para intercambiar electrones, y de un medio conductor. El material que pierde electrones se conoce como ánodo y experimenta la reacción de oxidación; el material que acepta los electrones se reduce y se le llama cátodo; el medio en donde se encuentran el ánodo y el cátodo, y permite el flujo de iones se conoce como electrolito (Villabona Ortiz, Tejada Tovar, & Villabona Durán, 2013).



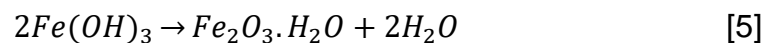
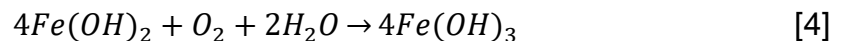
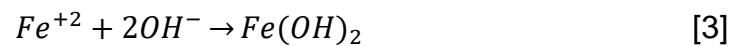
La reacción anódica se muestra en [1]



La reacción catódica se expresa en [2]



Los iones hidroxilo presentes en la reacción catódica reaccionan con Fe^{2+} y producen hidróxido ferroso [3], el cual a su vez reacciona con el oxígeno y el agua presente en el hormigón produciendo hidróxido férrico [4]; el último componente corresponde al óxido de hierro hidratado [5], el cual aumenta hasta 10 veces el volumen original (EN206-1, 2000).



5.1.1 Corrosión del acero estructural

La corrosión de las barras de refuerzo es una de las principales causas de la degradación del concreto armado; su fuente principal, en ambientes marinos, es el ion cloruro, que causa graves daños a la estructura puesto que las barras de acero presentes dentro del concreto son susceptibles a la corrosión al penetrar estos iones en la profundidad del acero (Jamil, Montemor, Boulif, & Shiri, 2003; Lee, Moon, & Swam, 2005; Ki-Yong & Ha-Won, 2007; Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010)

En la hidratación del cemento Portland las principales fases mineralógicas producen C-S-H (silicatos de calcio hidratados) y además Portlandita a la solución, lo cual se estima entre un 20 y 30% en masa (Ramachandran & Beaudain, 2001).

La Portlandita no aporta un beneficio a la acción mecánica de la matriz cementante, sin embargo, mantiene un ambiente alcalino (alto pH, 12-13) necesario para evitar



la corrosión del acero de refuerzo promovida por la carbonatación del concreto (Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004).

Cuando se da el proceso de corrosión en el concreto, la sección transversal de la barra de refuerzo se hace más pequeña, reduciendo así la capacidad de carga del elemento de hormigón armado (Kondratova, Montes, & Bremner, 2003). En el ambiente marino, el acero de refuerzo a la corrosión es el resultado natural de la penetración de cloruros en el hormigón, bajo estas condiciones, la despasivación de barras de acero puede conducir a la formación localizada de capas de óxido porosas en la interfase acero/concreto. Como las capas de óxidos de hierro tienen un volumen dos o cuatro veces mayor que el volumen de hierro, se pueden generar tensiones en el hormigón y crear fisuras que pueden causar una aceleración del proceso de corrosión (Villabona Ortiz, Tejada Tovar, & Villabona Durán, 2013)

5.1.2 Evaluación y diagnóstico de Estructuras

La evaluación del comportamiento de adición de materiales sustitutos de cemento en la elaboración de morteros y/o concretos y su efecto en la resistencia a la corrosión puede determinarse por medio de técnicas electroquímicas, tales como Resistencia a la polarización Lineal (ASTM-G3, 2004; ASTM-G5, 2004; ASTM-G59, 2003), Extrapolación de Tafel (ASTM-G3, 2004; ASTM-G5, 2004; ASTM-G59, 2003) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (ASTM-G106, 2004).

Mediante el ensayo de resistencia lineal a la polarización (LPR) se han estudiado sistemas de concreto Portland armado (Feliu, Gonzalez, Miranda, & Feliu, 2005). Otras investigaciones incluyen medidas de corrosión por iones cloruros, comparadas por métodos electroquímicos y pérdida de peso (Poupard, L'hostis, Catunaud, & Petrelazar, 2006).

5.1.3 Técnicas para el cálculo de la velocidad de corrosión

5.1.3.1 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)



El uso de la impedancia en corriente alterna ya se conocía y aplicaba en el área de ingeniería eléctrica. Se comenzó a utilizar para el estudio y caracterización de materiales hasta la década de 1970, y alcanzó gran aceptación por su característica de señales en función de la frecuencia, lo que permite analizar un sistema y sus componentes (Pérez, 2002).

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la ley de Ohm [6].

$$E = IR \quad [6]$$

En donde E es en volts, I en amperes y R en ohms. En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente [7].

$$E = IZ \quad [7]$$

En la ecuación 7, Z representa la impedancia del circuito, con unidades de ohm. La impedancia difiere de la resistencia en que esta última depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada. La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de Hertz (Hz) o número de ciclos por segundo. Y así como la resistencia tiene a la conductividad como recíproco, la impedancia tiene la admitancia (Y) (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).

Para comprender la teoría que soporta la técnica de EIS, es conveniente describir a la corriente y al voltaje como vectores giratorios o “fasores”, los cuales pueden ser representados en un plano complejo o “Diagrama de Argand”.

Un voltaje sinusoidal puede ser representado por la siguiente expresión [8].

$$E = \Delta E \text{ sen } \omega t \quad [8]$$

Donde E es el valor instantáneo del potencial, ΔE es la amplitud máxima y ω es la frecuencia angular, misma que se relaciona con la frecuencia f ($\omega = 2\pi f$). En la mayoría de los casos, la corriente (I) asociada a una señal de potencial, es también sinusoidal, de la misma frecuencia (ω) pero de amplitud y fase diferente a la del potencial. Esto se representa de la siguiente manera [9].

$$I = \Delta I \text{ sen } (\omega t + \phi) \quad [9]$$

De manera esquemática esto se observa en la ilustración 2.

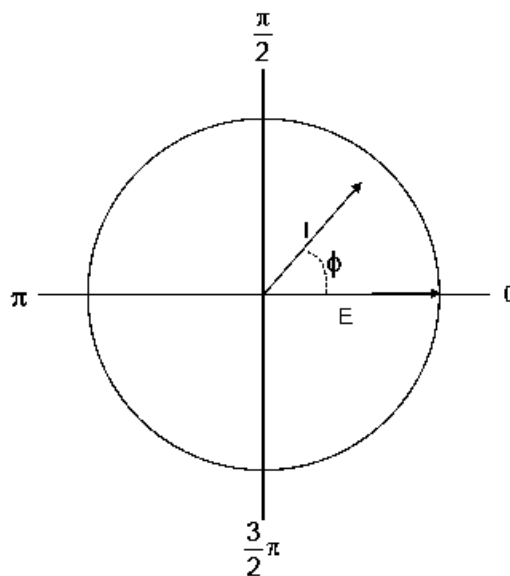


Ilustración 2 Fasores de corriente (I) y potencial (E) separados por un ángulo de fase ϕ (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002) .

Lo anterior es establecido para circuitos simples, sin embargo, en el tema de corrosión surgen mecanismos que necesitan ser resueltos mediante un circuito eléctrico equivalente, siendo el empleo de capacitores una solución a muchos sistemas electroquímicos. Por ello, a continuación, se desarrollan los argumentos matemáticos incluyendo un capacitor al sistema.

Cuando un capacitor se considera en el circuito eléctrico diferentes aspectos deben tomarse en cuenta. El concepto de “capacitancia” (C), puede definirse a partir de las relaciones entre el potencial E , aplicado entre las placas del capacitor y la carga (q), según la siguiente expresión [10]:



$$q = CE \quad [10]$$

Manipulando la ecuación anterior para convertir la carga q en corriente, y considerando la ecuación 11, puede obtenerse:

$$I = \omega C \Delta E \cos(\omega t) \quad [11]$$

Si el término $1/\omega C$ es reemplazado por X_c factor denominado reactancia capacitiva) se tiene la siguiente expresión [12]:

$$I = \frac{\Delta E}{X_c} \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad [12]$$

La ecuación tiene una forma similar a la ley de ohm, donde X_c toma el papel de R y se considera un ángulo de fase diferente a cero e igual a $\pi/2$. Como el ángulo de fase es positivo se dice que la corriente esta adelantada al potencial.

En notación de fasores, la caída de potencial total para una resistencia (R) y un capacitor (C) es:

$$E = E_R + E_C = I(R - jX_C) \quad [13]$$

O bien:

$$E = IZ \quad [14]$$

En donde el término $Z=(R-jX_c)$ recibe el nombre de "impedancia". Así el ángulo de fase (ϕ) puede definirse como:

$$\tan \phi = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega RC} \quad [15]$$

La relación entre las ecuaciones 6 a 15 puede representarse de manera gráfica en la ilustración 3.

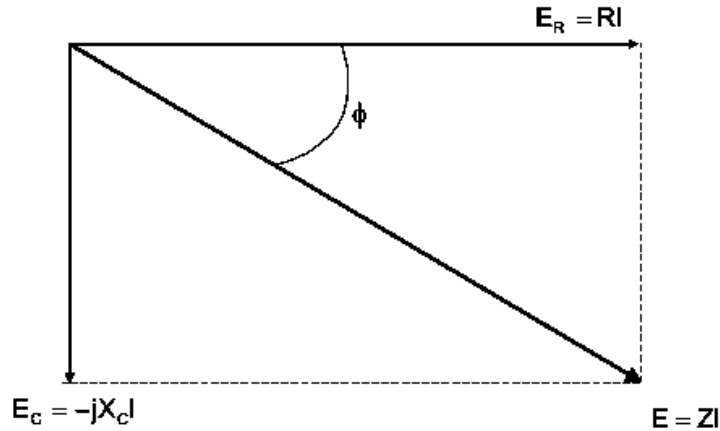


Ilustración 3 Diagrama fasorial para una resistencia (R) y un capacitor (C) en serie. E corresponde al potencial total a través de la combinación de R y C, RI representa el componente resistivo y $jX_C I$ representa el componente capacitivo. (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002)

La finalidad de establecer la solución de un circuito eléctrico que incluya un capacitor es poder aplicarlo al cálculo de la velocidad de corrosión, tomándolo como un circuito equivalente que represente al sistema en conjunto. Para ello se debe de considerar la resistencia propia de la transferencia de carga, la resistencia de la solución que funge como electrolito y el fenómeno de la doble capa que ocurre en la interfase metal-electrolito, ilustración 4, en la que las cargas positivas y negativas están separadas a una distancia muy pequeña desde la superficie del electrodo hasta el seno de la solución, por lo que se le puede considerar como un capacitor cargado con una capacitancia C_{dl} .

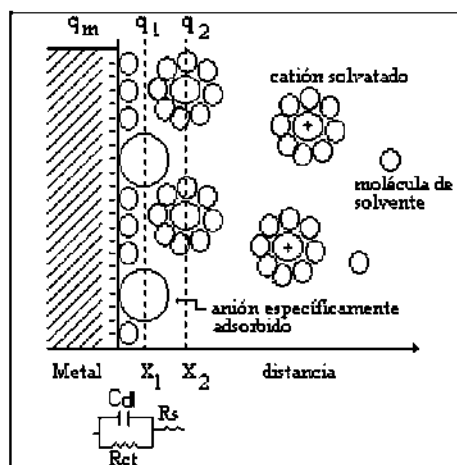


Ilustración 4 Similitud de la interfase electricada con un circuito eléctrico equivalente. (Pérez, 2002)

El valor de esta capacitancia depende de muchas variables como lo son el potencial de electrodo, temperatura, concentración iónica, tipo de iones, capas de óxido, rugosidad del electrodo, impurezas en la superficie (Medina Custodio, 2006).

En la ilustración 5 se muestra un ejemplo de circuito eléctrico equivalente (Randles) para una celda de corrosión, así como la interpretación en un diagrama de Nyquist (Z' vs $-Z''$).

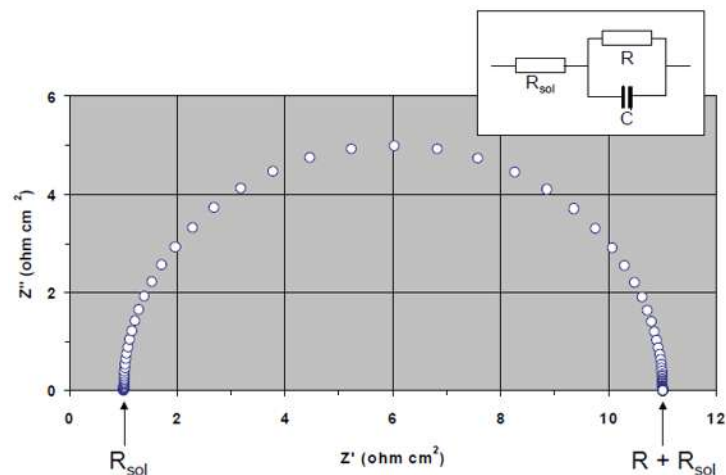


Ilustración 5 Diagrama equivalente con los elementos de resistencia y un capacitor, funcionando como la resistencia de la solución, R_{tc} y como la doble capa entre metal y electrolito (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).

Del mismo ensayo, se obtienen los gráficos de Bode, que pueden ser frecuencia (Hz) vs $|Z|$ y frecuencia (Hz) vs ángulo de fase ($^\circ$), sin descartar otras configuraciones que pueden ayudar en análisis complejos.

En la ilustración 6 se presenta el diagrama de Bode- Z_{mod} , y del cual se pueden obtener los mismos resultados con referencia a las frecuencias.

Al conjunto de puntos graficados para diagrama es a lo que se le llama espectros de impedancia.

Se debe destacar que la configuración de diferentes circuitos eléctricos puede arrojar el mismo resultado, sin embargo, la elección de la configuración debe ser congruente con el sistema real.

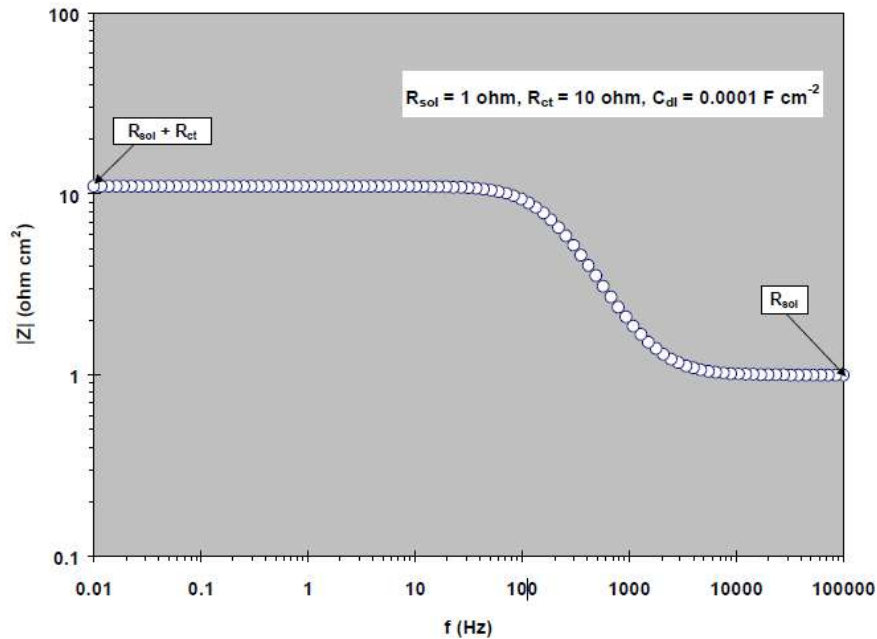


Ilustración 6 Diagrama de Bode Freq vs $|Z|$. Se obtienen los valores de R_{sol} y R_{ct} de manera directa (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).

5.1.3.2 Resistencia a la polarización lineal (R_{pl})

Una de las técnicas utilizadas para el cálculo de la velocidad de corrosión es la Resistencia a la Polarización Lineal (R_{pl}), siguiendo los lineamientos que enmarca la norma ASTM G59 (ASTM-G59, 2003).

La técnica electroquímica de la resistencia a la polarización, permite medir la velocidad instantánea de corrosión, ha sido la más utilizada en los últimos 50 años y se define como la pendiente de la tangente a la curva de polarización en las vecindades del potencial de corrosión E_{corr} , en caso de una reacción controlada por transferencia de carga (Medina Custodio, 2006). En 1978 C. Andrade presenta resultados de mediciones de la velocidad de corrosión en morteros utilizando ésta técnica (Andrade & González, 1978).

Los resultados de la R_{pl} permiten conocer comportamientos activos o pasivos del sistema en estudio y la velocidad con que ocurren, es decir, se puede inferir mediante estos resultados la velocidad de corrosión. Para ello es necesario conocer



las pendientes de Tafel (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

Cuando los electrones circulan por el electrolito encuentran una cierta dificultad al moverse, a esta "dificultad" se le llama Resistencia a la polarización. La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización. Así esta ecuación es una analogía de la ley de Ohm, que establece que la intensidad de la corriente eléctrica i que circula por un elemento resistivo, es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada V , e inversamente proporcional a la resistencia del mismo R , según expresa la ecuación [16] y [17] (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010):

$$i = \frac{V}{R} \quad \text{ley de ohm} \quad [16]$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Stern y Geary} \quad [17]$$

La constante B depende exclusivamente de las pendientes de Tafel, que son calculadas a partir de una curva de Tafel o de polarización. Este valor oscila entre los 60 y 120 mV/década (Rodríguez Gómez F. , 2000; Tres G. & E. Saborio, 2004).

Es de suma importancia mencionar que la ecuación de Stern y Geary, es válida cuando exista control activacional o de transferencia de carga. El metal debe estar sumergido en un electrolito conductor, o sea que la resistividad de las soluciones no sea alta y debe encontrarse libre de películas resistivas, pues la R_p es una técnica que globaliza las contribuciones resistivas y no alcanza a discriminarlas. Si se trabaja con sistemas altamente resistivos se recomienda el uso de otra técnica electroquímica llamada Espectroscopia de impedancia electroquímica (Medina Custodio, 2006).



La ventaja de utilizar la técnica de Rpl es que proporciona velocidad de corrosión instantánea, y teniendo como limitaciones la necesidad de un potencial estable, una adecuada velocidad de barrido y la caída óhmica en sistemas altamente resistivos (Rodríguez Gómez F. , 2002).



6 Desarrollo Experimental

6.1 Etapa 1. Antecedentes: características físicas de los especímenes.

6.1.1 Diseño de la mezcla

El diseño de las mezclas realizó en el Centro Tecnológico del Concreto APASCO, con los materiales que se muestran en la tabla 6, cumpliéndose con los requisitos de desempeño bajo la Norma ASTM C192, (ASTM-C192-C192M, 2000) las características y propiedades de los materiales utilizados se describen a continuación:

Tabla 6 Tipo de materiales empleados

Material		Procedencia
Cemento	a/c = 0.45	CPO 30 RS de la Planta Orizaba
	a/c = 0.65	
Agua	a/c = 0.45	Potable, red municipal de Toluca, México
	a/c = 0.65	
Arena	a/c = 0.45	Del río Balsas, Lázaro Cárdenas, Michoacán
	a/c = 0.65	
Grava	a/c = 0.45	T.M.A. ½" de Tribasa, Los Reyes, México
	a/c = 0.65	
Aditivo	a/c = 0.45	Sikament 190 CR, de Sika
	a/c = 0.65	

El proporcionamiento que se obtuvo del diseño de las mezclas se muestra en la siguiente tabla:



Tabla 7 Proporcionamiento de las mezclas para las relaciones $a/c=0.45$ y $a/c=0.65$

Contenido (kg/m^3)	Mezcla con relación $a/c = 0.45$	Mezcla con relación $a/c = 0.65$
Cemento	411 kg	285 kg
Agua	185 kg	185 kg
Grava	1010 kg	1033 kg
Arena	731 kg	812 kg
Aditivo	4 cc/kg de cemento	4 cc/kg de cemento

6.1.2 Características y propiedades de los materiales utilizados

Todas las probetas fueron fabricadas con cemento Portland I o similar según nomenclatura mexicana de cementos. En la tabla 8 se muestran los materiales utilizados para la fabricación del total de las probetas.

Tabla 8 Materiales utilizados en la fabricación de las probetas

Características del cemento	Portland Tipo I (Superficie específica Blaine a 3600 y (% de C_3A))
Características de los agregados	Agregados de silicio grueso triturado de 19 mm Arena cuarzosa
Características de los aditivos	0,3% respecto a peso de cemento de aditivo plastificante tipo Plastiment VZ de Sika o similar.



6.1.3 Cemento

El cemento Pórtland hidráulico que se utilizó para la fabricación de los especímenes de concreto fue el CPO 30 RS, el cual tiene las siguientes características:

Tabla 9 Características del cemento

Tipo de cemento	clase resistente (N/mm ²)		característica especial
CPO	30		RS
Cemento Pórtland ordinario	Resistencia mecánica a la compresión a los 28 días		Resistente a los sulfatos
	Mín.	Máy.	
	Más de 306 kg/cm ²	Más de 510 kg/cm ²	

6.1.4 Agregados pétreos: Arena y Grava

Los agregados empleados para las mezclas con una relación $a/c=0.45$ y $a/c=0.65$, cumplen con las recomendaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, así como con la Norma ASTM C 33 (ASTM-C33, 2001) “Especificaciones de los Agregados para el Concreto”, que define los requerimientos para evaluar la calidad de los agregados finos y gruesos que se utilizan en la fabricación del concreto, como es el tamaño máximo nominal del agregado, entre otros requerimientos de la Norma Oficial NMX C-111 (NMX-C-111, 2018).

6.1.5 Agua

Fue agua potable procedente de la red local de suministro para uso doméstico y no se le apreció olor, color ni sabor; contiene menos de 2,000 partes de millón (ppm) de sólidos disueltos totales; posee buenos antecedentes de uso en la fabricación de concreto. Así mismo; cumple con los requisitos que establece la Norma Oficial NMX C-122 (NMX-C-122, 2019) y la ASTM C 94 (ASTM-G102, 1999).

6.1.6 Aditivo

El aditivo para la elaboración de las mezclas fue el Sikament®–190 CR, como un aditivo reductor de agua de rango medio-plastificante de corto retardo.

6.1.7 Condiciones de las Probetas de la Estación Morelia (Ciudad Universitaria) a la Fecha de 05 febrero de 2019.

Las vigas de la estación de ciudad universitaria tienen dimensiones de 15cmx15cmx30cm. Las barras de acero son de 3/8” de diámetro, con una longitud variable que sobresale de las caras perpendiculares a la longitud.

Las probetas están ubicadas en la azotea del edificio F de Ciudad Universitaria que corresponde al laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, ilustración 7.



Ilustración 7 Condición de intemperización en la que se encontraban las probetas.

Las probetas estaban expuestas sobre canales de aluminio, los cuales se sostenían sobre escaleras. En las ilustraciones 8 y 9 se puede observar el deterioro de los materiales que recubren las barras de acero que salen de las vigas.



Ilustración 8 Probeta con varillas totalmente dañadas.



Ilustración 9 Probetas reunidas en el laboratorio.

6.2 Etapa 2: Estado actual de las Estructuras y Restauración

6.2.1 Procedimiento de Reparación de las Vigas de la Estación de Morelia

El siguiente procedimiento se realizó para darle mantenimiento a las conexiones, que se encuentran en mal estado, de las barras de acero de refuerzo y, aprovechando los cortes realizados a las vigas con varilla para liberar las conexiones eléctricas de las barras de refuerzo, realizar análisis de profundidad de carbonatación y resistividad eléctrica. El procedimiento se explica a continuación:

1. Se marcó con un lápiz, en las 4 caras de la viga de cada extremo de éstas (de donde salen las barras de refuerzo) para delimitar la zona de concreto de la viga que será separada para liberar las puntas de las conexiones de las barras de refuerzo. Estas líneas perimetrales se colocarán a 5 cm de los extremos de cada viga, ilustración 10.



Ilustración 10 Delimitación de la superficie a cortar

2. Utilizando un cúter u otro equipo, se retira la cubierta de plástico y el sellador de la parte de la barra que sobresale de la cara, para facilitar la separación y extracción de la sección de concreto que se cortará, ilustración 11.



Ilustración 11 Retire de barra aislante sobrante, sin varilla a proteger

3. Se realizó una doble incisión, es decir equivalente a 2 espesores del disco, mayor a 1 cm de profundidad dependiendo de la proximidad de las barras con una cortadora tipo banco con disco de corte para concreto (para que los cortes queden perpendiculares al borde de la probeta), sobre las líneas trazadas en el paso anterior. Se debe tener cuidado de no tocar las barras de refuerzo con el disco de corte para evitar cortes de dichas barras, ilustraciones 12 y 13.



Ilustración 12 Máquina cortadora con la que se realizaron los cortes necesarios para el retiro de la sección a renovar.

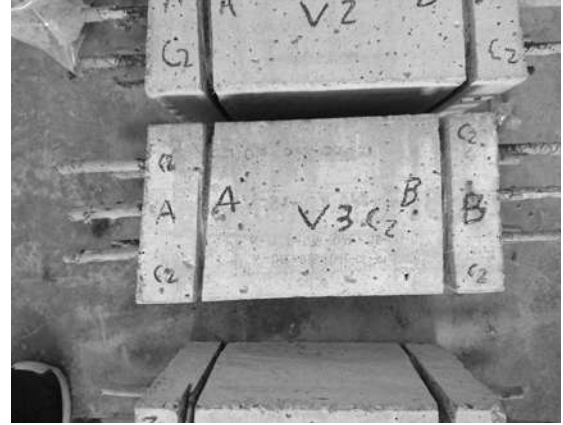


Ilustración 13 Vista de los cortes realizados con la metodología explicada anteriormente.

4. Con un cincel plano y un marro pequeño (o martillo) se hace que la incisión perimetral se propague hacia adentro de la sección de la viga de concreto. El procedimiento es darle suficientes golpes a lo largo de la incisión hecha en las cuatro caras de la viga, rotando la viga para que se vaya propagando esta separación en los cuatro frentes o caras de la misma. La fuerza y colocación de los golpes influirá en el tipo de propagación de la grieta. Intentar que el concreto salga casi completo o, que los pedazos desprendidos estén de buen tamaño para realizarles las pruebas mencionadas. Son dos extremos en las vigas, por lo que se tendrá que repetir este procedimiento dos veces por cada viga. Se deberá tener la debida precaución para realizar una fragmentación segura en donde no se corra el riesgo de perder los fragmentos obtenidos, para fines prácticos, se recomienda realizar la fragmentación sobre un costal abierto o una bolsa resistente, ilustración 14.
5. Las porciones de concreto se guardaron en bolsas de plástico, etiquetadas para saber a qué viga pertenecen y de qué extremo fue extraídas, tomando como referencia para identificarlos, que la cara expuesta se vea de frente. Los extremos cortados de las probetas de las dos estaciones se remitieron al IMT para su análisis.



Ilustración 14 Una muestra de la fragmentación inducida, logrando una extracción de gran tamaño en la parte central.



Ilustración 15 Vista del armado interior de piezas fragmentadas debidamente identificada.



Ilustración 16 Vista del armado exterior de las piezas fragmentadas en la que se aprecia el lugar donde estuvieron ubicadas las barras dentro de la probeta.

6. Una vez separadas las dos porciones de la viga se desnudaron las barras de refuerzo de la manguera plástica y del epóxico, realizando una limpieza concienzuda de éstas mediante el uso de equipo de abrasión (taladro con copa de cepillo de alambre). Se extrajo lo que quedó del cable de cobre que funcionaba como conexión eléctrica para las mediciones electroquímicas. Este procedimiento se realizó 12 veces por viga.



Ilustración 17 Limpieza mecánica de las barras cubiertas con sellador viejo.



Ilustración 18 Diferencia entre las superficies de barras con y sin el procedimiento de limpieza.

7. Se colocó un nuevo cable de cobre del No. 12 con una longitud de entre 15 a 20 cm. Para unir el cable con la barra de refuerzo se utilizaron cinchos dobles de nylon, para mejorar la sujeción se coloca un cincho sobre el cable de cobre descubierto, posteriormente se realiza un dobléz con el mismo cable descubierto por encima del primer cincho, para posteriormente colocar el segundo cincho realizando así una especie de candado. Una vez colocado el cincho se corta con pinzas o cúter la parte que sobresale.



Ilustración 19 Limpieza final con una estopa con la que se remueven partículas finas de suciedad generadas durante la limpieza mecánica.



Ilustración 20 Colocación de los cables del #12 con cinchos dobles de nylon.

8. Una vez colocado el cable de cobre, se restituyó la manguera plástica transparente de $\frac{1}{2}$ ". Se comprobó el circuito cerrado para cada una de las barras antes de la colocación del sellador, esto con la finalidad de asegurar las conexiones y poder hacer los cambios necesarios. Una vez comprobado el circuito se rellenó la manguera con un sellador Sikaflex 1A.



Ilustración 21 Colocación del sellador de protección dentro de la manguera nueva que cubre la varilla limpia.



Ilustración 22 Se muestra el proceso terminado en una de las barras.

9. Se prepararon las cimbras para el colado de las secciones de 5 cm. La cimbra se elaboró con dimensiones específicas para cada viga, ya que eran irregulares en sus dimensiones transversales. Se elaboraron a partir de un bastidor de pino armado con engrapadora y pistola neumática y un triplay de caobilla de 6 mm de espesor. El largo de la cimbra fue de 30 cm para cada viga para asegurar la dimensión final de la viga.
10. Se comprobó la verticalidad con un nivel de mano. En algunos casos la cimbra no logró sujetar la viga para mantenerla vertical, en ese caso se coloca un pequeño puntal al centro de la viga.



Ilustración 23 Elaboración de las cimbras para el colado de las muestras.



Ilustración 24 Preparación y nivelado de las probetas cimbradas para el colado de la sección restaurada.

11. Se humedeció la superficie del concreto hasta lograr la saturación superficial. Después se colocó un puente de adherencia, en nuestro caso SikaTop-

Armatec 110 EpoCem, para lograr la unión entre concreto viejo y el mortero de reparación. Se restituyó la sección cortada de 5 cm de espesor con un mortero de altas prestaciones. El mortero utilizado fue Sika Grout 212. Los colados de ambos extremos se realizaron con 2 días de diferencia entre cada colado para permitir un fraguado óptimo y así evitar fallas al momento de voltear las probetas.



Ilustración 25 Elaboración de las muestras.

12. Se protegió la punta del cable desnudo con capuchones y se le colocaron bolsas de plástico para evitar la pérdida de humedad durante el tiempo de fraguado del mortero.



Ilustración 26 Muestras cubiertas con bolsas plásticas durante el proceso de fraguado.

13. Se realiza el proceso de descimbrado de las probetas una vez fraguados ambos extremos. Posteriormente se realiza el proceso de curado de las muestras en un cuarto húmedo durante 14 días, realizando además un proceso de saturación superficial de manera continua. Después de este proceso las vigas quedaron en condición para restablecerse en el sitio de monitoreo.



Ilustración 27 Curado de las muestras restauradas.

6.3 Pruebas a las Muestras de Concreto Obtenidas Durante la Restauración

6.3.1 Preparación de Muestras

A las vigas expuestas al intemperismo en la azotea del Edificio F de Ciudad Universitaria en Morelia, se les cortó una rodaja de 5 cm para realizar pruebas de carbonatación, resistividad eléctrica, velocidad de pulso y porosidad. En las ilustraciones de la 29 a la 31 se presentan los cortes a los especímenes obtenidos de las rodajas. Se observa que los cortes no son iguales, esto se debe a que se decidió considerar los espesores carbonatados, con la finalidad de evaluar las diferencias entre el concreto afectado por carbonatación y el que no.

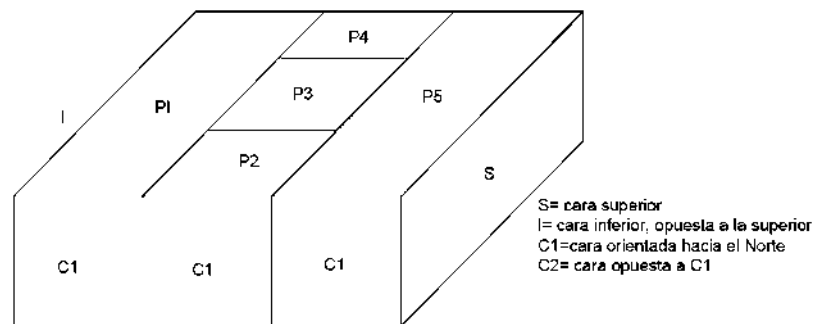


Ilustración 28 Esquema de cortes de muestras poco carbonatadas.

La coloración mostrada en la ilustración 29 b) se debe a la fenolftaleína, utilizada para realizar las pruebas de carbonatación.

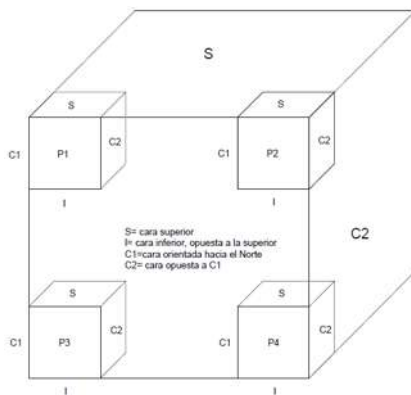


Ilustración 29 Esquema y muestras de concreto extraídas de los cortes a) Diseño; b) Corte realizado a la probeta.

En la ilustración 30 se muestran los cortes realizados a las probetas carbonatadas, justo con la intención de corroborar las diferencias con el concreto sano.

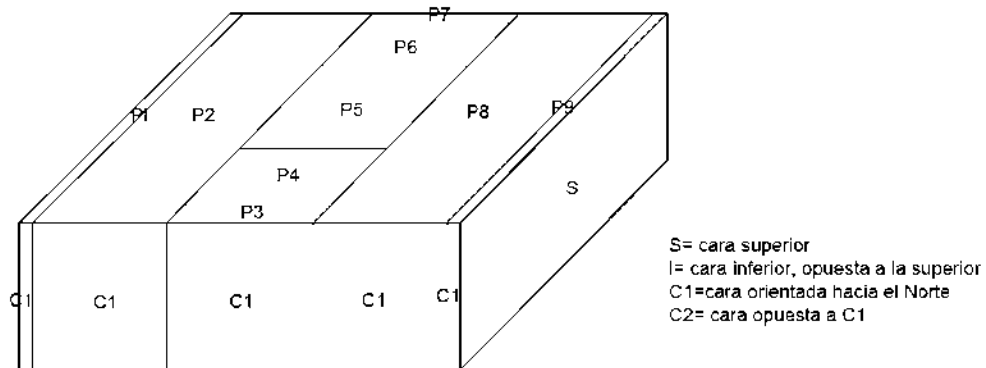


Ilustración 30 Esquema de corte de las probetas con mayor carbonatación



Ilustración 31 Muestras de concreto de especímenes carbonatados (correspondiente al esquema de la ilustración 30).

6.3.2 Absorción Capilar

La absorción capilar es el proceso de penetración de agua en el concreto, determinado por las características de capilaridad de la matriz de concreto. Definido como masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua en estado líquido.



Representa la porosidad efectiva accesible al agua y por lo tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente (NMX-C-504-ONNCCE, 2015). Como porosidad del hormigón se consideran los espacios vacíos que quedan en la masa de hormigones y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación. Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en (CYTED-DURAR, 1998):

- Poros de gel.
- Poros capilares.
- Poros de aire.

La metodología de ensayo se debe a Fagerlund y describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos a través de tres coeficientes: Resistencia a la penetración del agua (m), Coeficiente de absorción capilar (K) y Porosidad efectiva (ϵe) (CYTED-DURAR, 1998).

Preparación de probetas

Equipo y materiales.

- Vernier, precisión 0.02 mm.
- Cubeta de fondo plano con tapa
- Esponja
- Parilla
- Resina epoxi o parafina.
- Balanza con aproximación al 0.01g
- Cortadora de disco para concreto.
- Cronómetro

Procedimiento

1. Cortar cada cilindro con ayuda de la cortadora, en total se obtienen 3 rodajas con un espesor de 5cm y un diámetro de 10cm.



2. Colocar los especímenes en el horno a una temperatura de 50°C durante 3 días.



Ilustración 32 Especímenes puestos en horno para secado.

3. Pasados los 3 días de acondicionamiento colocar los especímenes de forma que haya flujo libre de aire alrededor de los especímenes, por lo cual, se debe mantener una separación de 5cm en todas las direcciones entre ellos, asegurando evitar el contacto con las paredes del recipiente, almacenar así por 15 días.

4. Pasados 15 días registrar la masa de cada espécimen con una precisión de 0.01g.

5. Medir 4 diámetros con precisión de 0.1mm en la superficie del espécimen que se expone al agua.

6. Sellar la superficie lateral de cada espécimen utilizando cera derretida aplicada con una brocha, de forma que se cubran todos los poros.

7. Medir la masa del espécimen sellado con una precisión de 0.01g y se registra como la masa inicial (m_0).

8. En el recipiente plástico colocar la esponja y llenar con agua de forma que el nivel de esta sea de 3 ± 1 mm por encima de la esponja, este nivel debe mantenerse durante todo el periodo de prueba, ilustración 33.

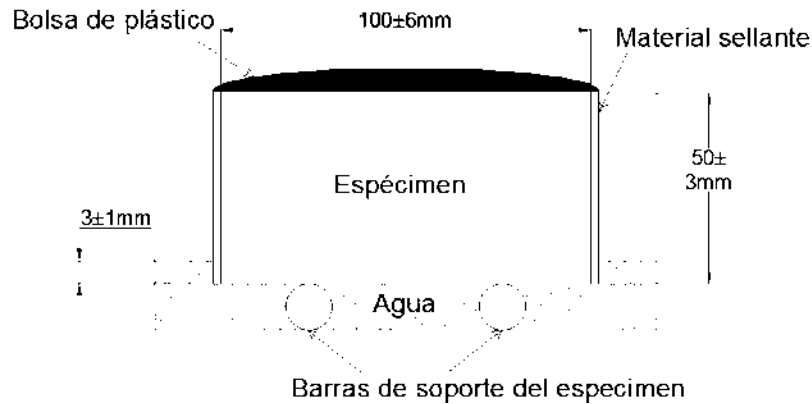


Ilustración 33 Contenedores de almacenamiento; b) Esquema de la configuración del ensayo de porosidad.

9. Iniciar la medida del tiempo con el cronómetro e inmediatamente colocar la superficie de ensayo del espécimen sobre la esponja, anotar hora y fecha.

10. De acuerdo a la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 (NMX-C-504-ONNCCE, 2015) se registran las masas en los intervalos mostrados en la tabla 10.

Para culminar con las mediciones que nos permitirán obtener los parámetros de la prueba, se realizarán las mediciones hasta que el agua sature completamente la muestra, comprobándolo con lecturas constantes de sus masas.

Tabla 10 Rangos de tiempo para la prueba de absorción capilar (NMX-C-504-ONNCCE, 2015)

Tiempo	60 s	5min	10min	20min	30min	60min	Una medición cada hora desde la hora 2 hasta la 6	1 medición por día, del día 1 hasta el 3	1 medición por día, del día 4 al 7	1 medición final al menos 24 h después del día 7 y antes del día 9
							2 h 3 h 4 h 5 h 6 h	24 h 48 h 72 h	96 h 120 h 144 h 168 h	192 h
Tolerancia	2 s	10 s	2 min	2 min	2 min	2 min	5 min	2 h	2 h	2 h

En la ilustración 34 se muestra la probeta preparada y en el proceso de absorción.



Ilustración 34 Secciones cubiertas con parafina en el proceso de absorción capilar.

Cálculos

El índice de absorción (I) que establece la norma NMX-C-504 (NMX-C-504-ONNCCE, 2015) se calcula con la ecuación 18:

$$I = \frac{m_t - m_o}{a * d} \quad [18]$$

Donde:

I= índice de absorción (mm)

mt= Masa, en el tiempo t (g)

m0= Masa, en el tiempo cero (g)

a= zona expuesta de la muestra (mm²)

d= densidad del agua (g/mm³)

La densidad del agua a la temperatura de 25±2°C tendrá un valor de 0.001g/ mm³ (NMX-C-504-ONNCCE-2015).



Los coeficientes se calculan en base en las ecuaciones 19 a 22:

$$m = \frac{t}{z^2} (s / m^2) \quad [19]$$

Donde:

m= Resistencia a la penetración del agua (s/m²)

z= profundidad de penetración del agua.

t= tiempo de penetración del agua.

$$k = \frac{(m_t - m_0) / A}{\sqrt{t}} \quad [20]$$

Donde:

k= Coeficiente de absorción capilar (kg / m²s^{1/2}).

mt= Masa, en el tiempo t (Kg)

m0= Masa, en el tiempo cero (Kg)

A= Área de contacto de la muestra(m²)

t= tiempo (s)

$$\varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} \quad [21]$$

Donde:

εe= Porosidad efectiva (%).



Con los datos ya calculados la Sorción Capilar o Sortividad, se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad [22]$$

La sortividad es una característica del concreto hidráulico endurecido que indica su capacidad de absorción de agua a nivel capilar. Se define como el incremento de masa en un espécimen en función del tiempo, cuando es expuesto a una fuente de agua en forma unidireccional (CYTED-DURAR, 1998). Un ejemplo de cálculo de los parámetros se muestra en el anexo A.6.

6.3.3 Técnicas electroquímicas

Las técnicas experimentales que se utilizan para medir la corrosión en las estructuras son las pruebas electroquímicas, las cuales nos permiten conocer las características físicas y eléctricas del sistema.

6.3.4 Potencial de corrosión (E_{corr} en mV)

Cuando el acero se corroe en el concreto, existe sobre el acero una diferencia de potencial entre las áreas de media celda anódicas y las áreas de media celda catódicas. El potencial de corrosión de media celda puede medirse por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido (Francisco, Tesis Refuerzo-Protección en Estructuras de Concreto Dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica., 2005)

El criterio general para interpretar las mediciones de potencial, según la norma ASTM C 876. En la tabla 11 se muestra el criterio según la Red DURAR.



Tabla 11 Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda (DURAR, 2000)

Potencial de corrosión (E_{corr}) Cu/CuSO ₄	Probabilidad de corrosión
Más negativo que -0.350 v	Mayor del 95%
Más positiva que -0.200 v	Menor del 5%
Valores de -0.200 a -0.350 v	Aproximadamente 50%

6.3.5 Velocidad de corrosión (I_{corr} en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Se llama velocidad de corrosión (I_{corr}) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm^2 día; aunque la forma usual es definirla a partir de medidas de tipo electroquímico, transformando este dato a partir de la densidad del metal, en unidades de penetración en (mm/año o mils/year).

6.3.6 Intensidad de corriente de corrosión

Es la corriente por unidad de área, de un metal en un medio agresivo (corrosivo), y determinada mediante una técnica electroquímica y con el uso de un potencióstato/galvanostato; generalmente se reporta en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ o A/cm^2 . Para estas pruebas se utilizó el equipo Gcor que emplea la técnica de resistencia a la polarización por el método de corriente confinada, este equipo que puede ser empleado en pruebas de campo sobre estructuras de concreto porque confina el área a medir, su velocidad de corrosión. La resistencia a la polarización es la habilidad de un material a ceder o ganar electrones. Es la facilidad con la cual un metal tiende a sufrir o no corrosión.

La intensidad de corrosión se puede calcular con la fórmula [23].



$$I_{corr} = \frac{0.026}{R_p} \quad [23]$$

Donde:

I_{corr} = Intensidad de corrosión en ($\mu A/cm^2$, mA/cm^2 o A/cm^2)

0.26 = Constante que se obtiene de las pendientes de Tafel

R_p = Resistencia a la polarización de un metal

La velocidad de corrosión se puede obtener a partir de la intensidad de corrosión multiplicando ésta por un factor que es 11.6, o se puede calcular empleando las leyes de Faraday:

$$I_{corr} * 11.6 = \frac{mm}{año} \quad [24]$$

El objetivo de esta prueba es determinar la velocidad a la cual la estructura pierde sección, por corrosión de la misma.

Tabla 12 Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión (DURAR, 2000)

Velocidad de corrosión (i_{corr}) $\mu A/cm^2$	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 - 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevada
>1	Muy elevada



6.3.7 Resistividad eléctrica [$k\Omega\text{-cm}$]

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el (ohm-cm u ohm-m).

Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Está en función de variables como: tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, y la porosidad de las estructuras, entre otras.

Tabla 13 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (DURAR, 2000)

Resistividad del concreto (ρ) $k\Omega\text{.cm}$	Pronóstico de Corrosión
$\rho > 200$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo moderado
$\rho < 10$	Alto riesgo

6.3.8 Resistencia eléctrica [$K\Omega$]

El método supone que cuando se emplea un material dieléctrico para sellar la superficie del concreto, su resistencia eléctrica es una medida de su impermeabilidad.

El método se puede aplicar a cualquier elemento con una capa impermeabilizada no conductora, previniendo que el acero de refuerzo no contenga ningún recubrimiento epóxico. Debido a que la resistencia es uno de los factores que controlan la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

7 Resultados Preliminares

7.1 Potenciales de corrosión posteriores a la restauración

Los resultados de potenciales de corrosión para el acero embebido en las mezclas de concreto con relación agua/cemento de 0.45 se muestra en el gráfico 1. Se puede observar que para la relación $a/c=0.45$ los potenciales se muestran más negativos a la menor profundidad, mientras que a mayor profundidad del acero los potenciales son más positivos. Y qué relación hay con las caras?

Los potenciales, en general, se muestran con valores más positivos que -200 mV lo que indica que al momento de la realización de la prueba el acero se encuentra con una probabilidad de estar desarrollando la corrosión del 10%.

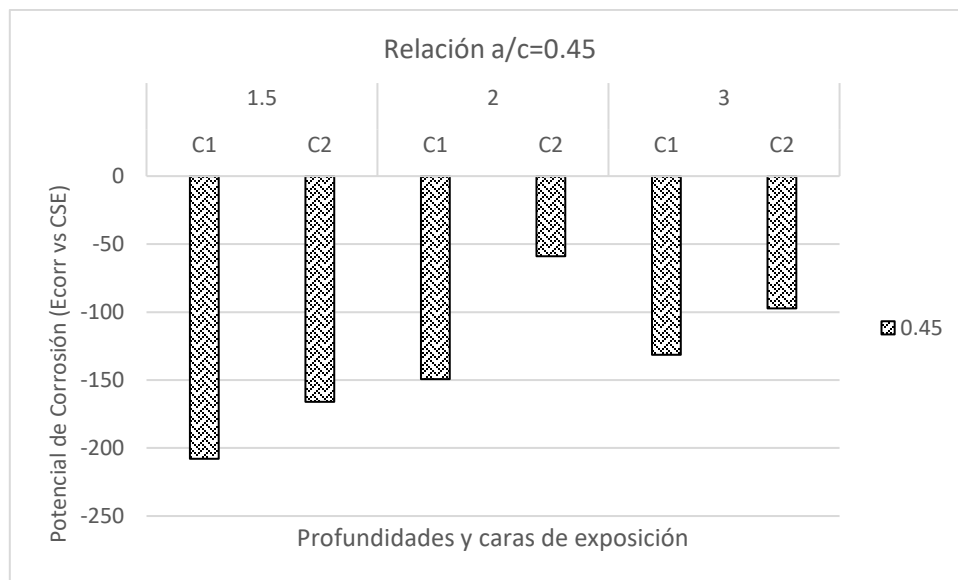


Gráfico 1 Potenciales de corrosión de las diferentes barras de acero embebidas en la mezcla $a/c=0.45$.

En la tabla 14 se muestran los resultados de potenciales de corrosión para el acero inmerso en el concreto con relación $a/c=0.65$. Se observa que la C1 de exposición presenta, en las diferentes muestras para la barra de profundidad 2 cm, valores de potenciales de corrosión



más positivos que los de la cara C2 de exposición. Cuál es la cara expuesta a los vientos dominantes?

Tabla 14 Potenciales de corrosión de las barras de acero inmersas en la mezcla a/c=0.65

Muestra	Cara	Barra	Espesor de Rec.	a/c	Potencial
V2	C1	2	2	0.65	-69
V2	C2	2	2	0.65	-170
V5	C1	2	2	0.65	-85
V5	C2	2	2	0.65	-283
V6	C1	2	2	0.65	-71
V6	C2	2	2	0.65	-217

7.2 Absorción capilar

Los resultados de absorción capilar se muestran en la tabla 15, donde se registran las diferencias de las masas en el tiempo. Se muestra un ejemplo de cálculo, considerando una de las muestras de concreto.

Tabla 15 Registro de los Resultados de la Prueba de Absorción, Probeta V6-P5.

Tiempo (t)		\sqrt{t}	Masa (m)	Δm	Wt-Wo/Ao
min	s	s ^{1/2}	g	g	mm
0	0	0	190	0.000	0.00
1	60	8	190.2	0.200	0.09
5	300	17	190.6	0.600	0.26
10	600	24	190.8	0.800	0.35
20	1200	35	191	1.000	0.44
30	1800	42	191.2	1.200	0.52
60	3600	60	191.6	1.600	0.70
120	7200	85	192.2	2.200	0.96
180	10800	104	192.6	2.600	1.14
240	14400	120	193	3.000	1.31
300	18000	134	193.2	3.200	1.40
360	21600	147	193.4	3.400	1.49
1440	86400	294	195.8	5.800	2.53
2880	172800	416	197.4	7.400	3.23
4320	259200	509	198.3	8.300	3.63
5760	345600	588	199	9.000	3.93
7200	432000	657	199.6	9.600	4.19
8640	518400	720	200	10.000	4.37



10080	604800	778	200.3	10.300	4.50
11520	691200	831	200.5	10.500	4.59
12960	777600	882	200.7	10.700	4.67
14400	864000	930	200.7	10.700	4.67
15840	950400	975	200.7	10.700	4.67

En la ilustración 35 se ha realizado el cálculo utilizando el método gráfico para obtener, junto con el método analítico, los parámetros de la absorción capilar (Fagerlund).

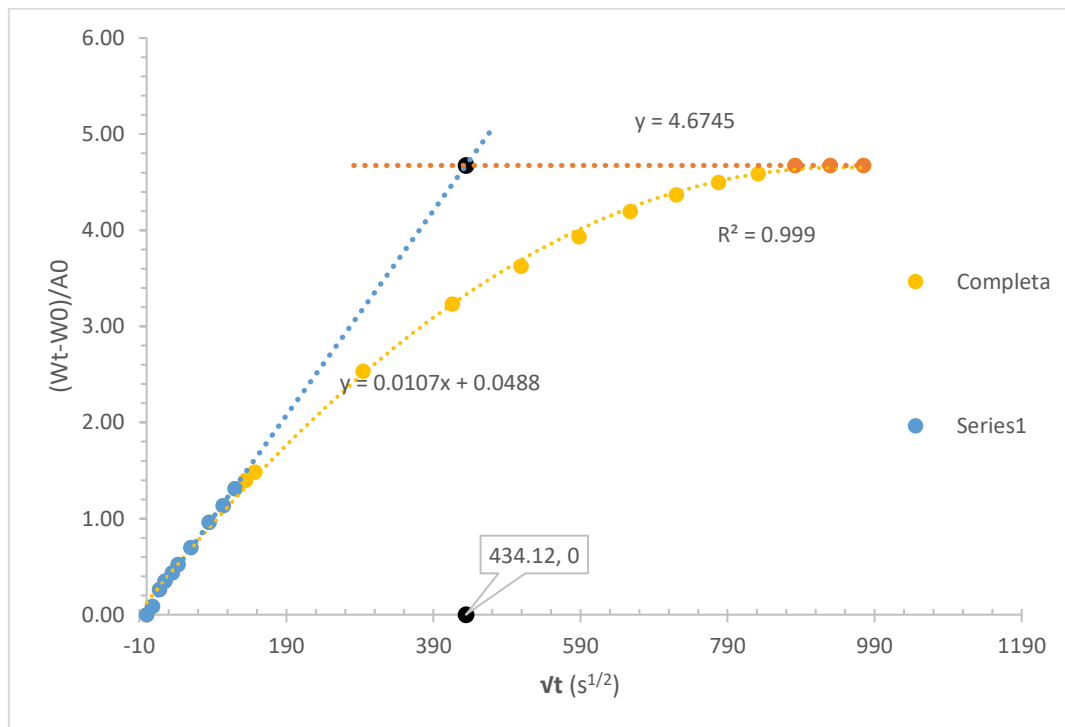


Ilustración 35 Relación entre la absorción y el tiempo.

En la tabla 16 se muestran los resultados que arroja la prueba de absorción capilar. EL parámetro de porosidad efectiva indica la relación de poros, para las mezclas de relación $a/c=0.65$ se han obtenido al momento valores mayores al 10%. Para las relaciones $a/c=0.45$ los valores de porcentaje de poros son inferiores a 10%.

Tabla 16 Parámetros de la prueba de absorción capilar.

Resultados de la Prueba de Absorción, espécimen V6-P5	
l=	1.07E-02
tn=	188460.46 s

k1=	1.06E-02 kg/((m ²) *(s ^{1/2}))
m=	1.26E+08 s/m ²
ε_e(%)=	11.94
S=	8.91E-05 m/s ^(1/2)

7.3 Preparación de Especímenes para Nuevo Ciclo de Exposición

Posteriormente a la determinación de parámetros de durabilidad, se procedió a la preparación de las probetas prismáticas para su colocación en el mismo sitio de intemperismo que ocupaban en la azotea del edificio F de Ciudad Universitaria en la Ciudad de Morelia.

La preparación consistió en la limpieza de la superficie de los especímenes, para posteriormente aplicar un material contra intemperismo en las caras donde no es importante la exposición para las futuras evaluaciones.

El material de protección contra el intemperismo fue un Esmalte 100 Premiun de Pinturas Comex. La aplicación se realizó previa dilución con *thinner* marca Comex, en la proporción suficiente para lograr la aplicación en la superficie del concreto, tal como se muestra en la ilustración 36.



Ilustración 36 Preparación de las rodajas de concreto con esmalte para la protección al intemperismo.

Una vez colocado el esmalte en las secciones de concreto se procedió con la colocación de las probetas en los espacios sobre la azotea del edificio F. Las rodajas se colocaron cerca de los prismas con acero de refuerzo, con la finalidad de mantenerlas en las mismas



condiciones de exposición considerando la dirección del viento, necesario para la evaluación del avance por carbonatación. En la ilustración 37 se muestran las condiciones de la colocación de los especímenes sobre perfiles metálicos.



Ilustración 37 Colocación de los especímenes en la azotea para exposición al intemperismo.



8 Conclusiones

Lo mostrado en el presente trabajo representa parte del trabajo del proyecto DURACON. Las actividades que consistieron en la restauración de los especímenes del proyecto nos han permitido conocer la aplicación de diferentes materiales de para reparación en la construcción. Una vez que se desarrolla la restitución de los materiales dañados, nos podemos percatar de la influencia de la carbonatación y de la corrosión generalizada de la estructura de acero. Fue imperante reconocer los elementos que conforman la estructura para su correcta reparación, así como la forma en que actúan los agentes patógenos, influyendo de manera importante la orientación de la estructura.

Las acciones de restauración permitirán continuar con el monitoreo de los especímenes de prueba. Hasta el momento se siguen analizando las condiciones de carbonatación del concreto y se ha comenzado con el análisis de pruebas físicas para la caracterización. En los resultados mostrados de las pruebas se hace mención de la porosidad y de los potenciales de corrosión, los cuáles se mantienen en su mayoría con potenciales más positivos que -200 mV.

Es necesario mencionar que los trabajos realizados son solo una pequeña parte del compendio de pruebas y tratamiento de resultados que actualmente se están desarrollando en la Estación del edificio F de Ciudad Universitaria, en Morelia.



9 Referencias

- 779M, A.-C.-C. (2000). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*. E.U.A.
- Andrade, C., & González, J. (1978). Determinación electroquímica cuantitativa de la velocidad de corrosión de un acero de construcción. Evaluación de la susceptibilidad al ataque por picaduras. Parte II: ensayos en morteros. (C. S. Científicas, Ed.) *Materiales de Construcción*, 28(169).
- ASTM-C1017-C1017M. (1996). *Standard Specification for Chemical Admixture for Use in Producing Flowing Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C-1138. (1997). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*. E.U.A.
- ASTM-C1202. (1997). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. E.U.A.
- ASTM-C1362. (1997). *Standard test Method for flow of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C138-C138M. (2001). *Standard Test Method for Density (Unit Wigh), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C143-C143M. (2000). *Standard Test Method for Slum of Hydraulic-Cement Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C150. (1999). *Standard Specification for Portland*. E.U.A.
- ASTM-C157-C157M. (1999). *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C192-C192M. (2000). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. (A. S. Materials., Ed.) E.U.A.
- ASTM-C231. (1997). *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. E.U.A.
- ASTM-C232. (1999). *Standard Test Methods for Bleeding of Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C295. (1996). *Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C29-C29M. (1997). *Standard Test Method for Bulk density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. E.U.A.
- ASTM-C33. (2001). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. E.U.A.
- ASTM-C39-C39M. (2001). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. (A. S. Materials., Ed.) E.U.A.
- ASTM-C418. (1998). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting*. E.U.A.



- ASTM-C469. (1994). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. (A. S. Materials, Ed.) E.U.A.
- ASTM-C494-C494M. (1999). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C496. (1996). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete*. (A. S. Materials, Ed.) E.U.A.
- ASTM-C642. (1994). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. E.U.A.
- ASTM-C666. (1997). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. E.U.A.
- ASTM-C671. (1994). *Standard Test Method for Critical Dilation of Concrete Specimens Subjected to Freezing*. E.U.A.
- ASTM-C682. (1994). *Standard Practice for Evaluation of Frost Resistance of Coarse Aggregates in Air-Entrained Concrete by Critical Dilatation Procedures*. E.U.A.
- ASTM-C78. (2000). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. (A. S. Materials., Ed.) E.U.A.
- ASTM-C-876. (1999). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.- American Society for Testing and Materials*. E.U.A.
- ASTM-C-994. (1999). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method*. E.U.A.
- ASTM-G102. (1999). *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*¹. *ASTM International*.
- ASTM-G106. (2004). *Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements*.
- ASTM-G3. (2004). *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*.
- ASTM-G5. (2004). *Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*.
- ASTM-G59. (2003). *Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*.
- CANACEM. (1 de Agosto de 2019). *canacem.org.mx*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>
- CYTED-DURAR. (1998). En *Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (SEGUNDA ed., pág. 128).



- DURAR, T. d. (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. (Tercera Edición ed.). (CYTED, Ed.) Maracaibo, Venezuela.
- EHE-08. (2010). *Instrucción del Hormigón Estructural* (Cuarta ed.). España: Centro de Publicaciones-Secretaría General-Ministerio de fomento.
- EN206-1. (2000). Hormigón-Parte 1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad. *CEN*.
- Feliu, S., Gonzalez, J., Miranda, J., & Feliu, V. (2005). Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures. En *Corrosion Science* (págs. 237-238).
- FHWA. (Septiembre de 1998). *Federal Highway Administration Research and Technology*, FHWA-RD-98-088. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/98088/history.cfm>
- Francisco, L. O. (2005). *Tesis Refuerzo-Protección en Estructuras de Concreto Dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica*. Celaya, Guanajuato, México .
- Francisco, L. O. (2005). *Tesis Refuerzo-Protección en Estructuras de Concreto Dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica*. Celaya, Guanajuato, México.
- Guy, A. (1980). Deterioro de los Materiales. En *Fundamentos de Ciencia de los Materiales* (pág. 421). México: Mc Graw Hill.
- Guzmán, D. S. (1993). *Tecnología del concreto y del mortero* . Santafé de Bogotá , D.C, Bogotá Colombia : Bhandar Editores LTDA.
- Guzman, D. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta ed.). Santa Fé de Bogotá D.C. , Colombia.: BHANDAR EDITORES LTDA.
- IMCYC. (2004). *Para hacer un buen concreto.- Conceptos Básicos del Concreto*. México. istoriamundial.files.wordpress.com. (11 de 2013). Obtenido de <https://istoriamundial.files.wordpress.com/2013/11/historia-del-cemento-2.pdf>
- Jamil, H., Montemor, F., Boulif, R., & Shriiri, A. (2003). An electrochemical and analytical approach to the inhibition mechanism of an amino-alcohol-based corrosion inhibitor for reinforced concrete. En *Electrochimica Acta* (págs. 3509-3518).
- Ki-Yong, A., & Ha-Won, S. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. En *Corrosionscience* (págs. 4113-4133).
- Kondratova, I., Montes, P., & Bremner, T. (2003). Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs. En *Cement & Concrete Composites* (págs. 483-490).
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association.



- Lee, S., Moon, H., & Swam, Y. (2005). Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. En *Cement & Concrete Composites* (págs. 65-76).
- Lopez Celis, R., & Perez Quiroz, J. (2006). *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesto a diferentes ambientes urbanos de México*. Técnico, IMT, Sanfadila.
- Manuel, M. F. (2005). *Durabilidad de Estructuras de Concreto en México*. (Primera ed.). México: IMCYC.
- Medina Custodio, O. (2006). *Tesis: Análisis del deterioro por corrosión microbiológica en un acero al bajo carbono*. México: UNAM.
- Mendoza F., J., Durán R., R., & Genescá LL., J. (2002). *Notas: Espectroscopía de Impedancia Electroquímica en Corrosión*. México: Instituto Mexicano del Petroleo-UNAM.
- Neville, A. M. (2013). *Tecnología del concreto*. Mexico. Distrito Federal, México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Neville, A. M. (2013). *Tecnología del Concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- NMX-C003. (2010). *Industria de la Construcción-Cal Hidratada- Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C128. (1997). *Industria de la Construcción. Concreto Sometido a Compresión. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson..* (ONNCCE, Ed.) México.
- NMX-C157. (1987). *Determinación del contenido de aire del concreto*. México.
- NMX-C265. (1984). *Industria de la Construcción. Agregados para Concreto. Examen Petrografico. Método de prueba*. México: ONNCCE.
- NMX-C414. (2017). *Industria de la Construcción.- Cementos Hidráulicos.- Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCE-2017. (2017). *Industria de la construcción cemento para albañilería (Mortero)-Especificaciones y metodos de ensayo*.
- NMX-C-504-ONNCCE. (2015). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN CAPILAR EN CONCRETO HIDRÁULICO-MÉTODO DE ENSAYO*. México.
- NMX-C-530. (2018). *Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones*. ONNCCE.
- NMX-C83. (2002). *Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto. Método de Prueba*. México: ONNCCE.
- Pasquel C., E. (s.f.). *Reacción álcali-agregado: El VIH del concreto*. Recuperado el 2019



- Pérez, T. (2002). *Aplicación de la Técnica Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.
- Poupard, O., L'hostis, V., Catunaud, & Petrelazar, I. (2006). Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. En *Cement and Concrete Research* (págs. 504-520).
- Ramachandran, V. S., & Beaudain, J. J. (2001). Handbook of Analytical Techniques in Concrete. En *Principles, Techniques and Applications* (pág. 15). Williams Anderw publishing.
- Rodríguez Gómez, F. (2000). Resistencia a la Polarización. En D. I. Metalúrgica. UNAM.
- Rodríguez Gómez, F. (2002). *Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión*. México: Depto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Química UNAM.
- Torres Acosta, A. (2004). *Periodo de iniciación de la Corrosión (T1) en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino*. (Quinta ed., Vol. Volúmen 2). Revista Internacional Construlink (RCI).
- Tórres Gómez, R., Aperador, W., Vera , E., Mejía de Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS. *Dyna*(164), 52-59.
- Tres G. , & E. Saborio. (2004). Corrosion Rate Evaluation of de Copper Cable Used in Grounding Systems at the ICE- Costa Rica . En *Portugaliae Electrochimica Acta* (págs. 345-360).
- Tronconis de Rincón , O. (2005). *Memorias del Curso de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado Querétaro*. Queretaro, Queretaro , México.
- Valdez Tamez, P. L., Das Roy, T. K., & Rivera Villareal, R. (2004). Evaluación de la velocidad de Hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. En *Ciencia UANL* (Vol. VII, págs. 190-195).
- Villabona Ortiz, A., Tejada Tovar, C., & Villabona Durán, Y. (2013). Determinación electroquímica de la corrosión en el hormigón armado en solución salina. *Ingenium*, 35-39.
- Villabona Ortiz, Á., Tejada Tovar, C., & Villabona Durán, Y. P. (2013). Evaluation of corrosion in reinforced concrete cylindrical specimens. En *Ingenium* (págs. 35-39).