

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN EL CONCRETO
REFORZADO EN AMBIENTE URBANO EN LA INDUSTRIA DE LA
CONSTRUCCIÓN DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA

RAMIRO VAZQUEZ DELGADO

DIRECTOR

DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS

CODIRECTOR

DR. ALEJANDRO MUNGARAY MOCTEZUMA

Mexicali, B. C.

Diciembre, 2016

AGRADECIMIENTO

Primeramente doy gracias a Dios por permitirme llegar a esta meta.

A mi familia que siempre me apoyo a lo largo de este trayecto.

A mi esposa y a mi hija por darme ánimos para seguir y no desistir en los momentos difíciles y por creer en mí.

A mi asesor de tesis el Dr. Benjamín Valdez Salas por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haber tenido paciencia para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

Agradezco también a mi codirector al Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma por su apoyo y disponibilidad siempre mostrada.

Por ultimo a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por permitirme formar parte de ella y realizar así, mi postgrado.

CONTENIDO

Resumen	I
Resumen Ejecutivo	II
Introducción.....	III
Planteamiento del problema.....	VI
Hipótesis	VII
Objetivos	VII
Justificación	VIII
1. Marco Teórico.....	- 1 -
1.1 Definición de corrosión	- 1 -
1.2 Concreto reforzado	- 2 -
1.3 Tipos de corrosión en el acero de refuerzo	- 3 -
1.4 Corrosión por carbonatación.....	- 4 -
1.5 Diseño de mezclas	- 7 -
1.5.1 Cemento	- 7 -
1.5.2 Agregados pétreos: arena y grava	- 9 -
1.5.3 Agua.....	- 9 -
1.5.4 Aditivo.....	- 10 -
1.6 Pruebas realizadas al concreto fabricado	- 11 -
1.6.1 Prueba al concreto fresco.....	- 11 -
1.6.2 Pruebas al concreto endurecido	- 15 -
1.7 Técnicas electroquímicas	- 16 -
1.7.1 Potencial de corrosión (Ecorr).....	- 17 -
2. Metodología experimental	- 19 -
2.1 Construcción de los especímenes	- 19 -
2.1.1 Diseño de la mezcla.....	- 22 -
2.1.2 Preparación del acero de refuerzo	- 24 -
2.1.3 Identificación de las varillas	- 29 -
2.1.4 Localización de las Muestras de concreto	- 30 -
2.1.5 Pruebas realizadas al concreto fresco.....	- 30 -
2.1.6 Identificación de los especímenes	- 31 -
2.2 Estación de campo	- 32 -
2.3 Monitoreo de la estación de campo	- 33 -
2.3.1 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto (EC)	- 33 -

2.3.1 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto con acero (ECA).....	- 42 -
3. Resultados	- 46 -
3.1 Resultados de las pruebas del concreto fresco.....	- 46 -
3.1.1 Resultados de temperatura.....	- 46 -
3.1.2 Resultados del revenimiento	- 46 -
3.1.3 Resultados de la masa unitaria y rendimiento	- 46 -
3.1.4 Resultados de contenido de aire.....	- 47 -
3.2 Resultados de la prueba del concreto endurecido	- 47 -
3.2.1 Resultados a la prueba de resistencia a la compresión.....	- 47 -
3.3 Resultados de carbonatación	- 48 -
3.4 Resultados de potenciales de corrosión	- 50 -
3.5 Resultados de estación meteorológica.....	- 54 -
3.5.1 Resultados de parámetros ambientales	- 54 -
4. Discusión de resultados	- 58 -
4.1 Análisis de resultados de las pruebas del concreto fresco	- 58 -
4.1.1 Análisis de temperatura	- 58 -
4.1.2 Análisis del revenimiento.....	- 59 -
4.1.3 Análisis de masa unitaria y rendimiento	- 60 -
4.2 Análisis de resultados de la prueba del concreto endurecido.....	- 62 -
4.2.1 Análisis a la prueba de resistencia a la compresión de especímenes EC en laboratorio y expuestos al ambiente.....	- 63 -
4.3 Análisis de resultados de carbonatación	- 66 -
4.3.1 Análisis de resultados de la profundidad de carbonatación	- 67 -
4.3.2 Análisis de la predicción del tiempo con los coeficientes de carbonatación del cuarto corte	- 68 -
4.4 Análisis de resultados de potenciales de corrosión.....	- 70 -
Conclusiones.....	- 74 -
Bibliografía.....	- 77 -
Anexo A. Graficas de resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC en laboratorio y ambiente.	- 84 -
Anexo B. Imágenes de resultados de carbonatación	- 85 -
Anexo C. Graficas de resultados de estación meteorológica	- 91 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Distribución de puentes por tipo de material [5]	IV
Figura 2.- Elementos constituyentes de la celda de corrosión [8].....	- 1 -
Figura 3.- Esquema de una columna común de concreto reforzado [9]	- 2 -
Figura 4.- Modelo e la vida útil propuesta por Tuutti [10].....	- 3 -
Figura 5.- Esquema de los tipos de corrosión en el acero de refuerzo dentro del concreto reforzado [9]	- 4 -
Figura 6.- Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo [5]	- 5 -
Figura 7.- Medición de potencial [16].....	- 18 -
Figura 8.- Diseño de espécimen de concreto (EC).....	- 20 -
Figura 9.- Diseño de espécimen de concreto con acero (ECA).....	- 21 -
Figura 10.- Distribución de la colocación de las varillas acero y acero inoxidables en los especímenes	- 24 -
Figura 11.- Tramos 30 cm de varilla corrugada de acero al carbono y acero inoxidable	- 25 -
Figura 12.- Perforación de un extremo de la varilla	- 25 -
Figura 13.- Protección de la parte de debajo de la varilla.....	- 26 -
Figura 14.- Varillas pintadas con spray para metal en su extremo	- 26 -
Figura 15.- Cepillado de la parte trasversal de las varillas	- 26 -
Figura 16.- Introducción del cable a la varilla	- 27 -
Figura 17.- Unión del cable y varilla con epóxido	- 27 -
Figura 18.- Varilla con mangueras plásticas en su extremo	- 27 -
Figura 19.- Inyección del producto Sikaflex-1 ^a	- 28 -
Figura 20.- Secado de varillas a temperatura ambiente	- 28 -
Figura 21.- Aplicación de recubrimiento SikaTop-Armatec 110.....	- 28 -
Figura 22.- Secado de recubrimiento SikaTop-Armatec 110 EpoCem	- 29 -
Figura 23.- Varilla de acero inoxidable con preparación especial.....	- 29 -
Figura 24.- Identificación de varillas	- 29 -
Figura 25.- Metodología para la localización del concreto.....	- 30 -
Figura 26.- Identificación de los especímenes.....	- 31 -
Figura 27.- Instituto de Ingeniería de Mexicali	- 32 -
Figura 28.- Estación Meteorológica	- 32 -
Figura 29.- Medición de altura y diámetro de los especímenes EC.....	- 34 -
Figura 30.- Colocación de Cabeceo de especímenes EC	- 34 -
Figura 31.- Especímenes EC cabeceados	- 35 -
Figura 32.- Ensay de resistencia a la compresión de especímenes EC.....	- 35 -
Figura 33.- Medición del corte del espécimen EC	- 37 -
Figura 34.- Corte en seco del espécimen EC	- 38 -
Figura 35.- Sección trasversal del diámetro del espécimen EC de 3cm.....	- 38 -
Figura 36.- Limpieza de la superficie de corte	- 38 -
Figura 37.- Aplicación del indicador fenolftaleína la cara interna del corte	- 39 -
Figura 38.- Base fotográfica y cortes de espécimen EC.....	- 39 -
Figura 39.- Corte de espécimen EC dentro de base fotográfica.....	- 40 -
Figura 40.- Regla de 10 cm en corte de espécimen EC	- 40 -
Figura 41.- Fotografía de corte del espécimen EC	- 40 -

Figura 42.- Levantamiento de la profundidad de carbonatación con AutoCAD 2014 [52]	- 41 -
Figura 43.- Medición de la profundidad de carbonatación con ArcMap 10.2.1[53] ..	41 -
Figura 44.- Desalojo de la cubierta plástica del cable	- 43 -
Figura 45.- Trazo de cuadro de referencia	- 44 -
Figura 46.- Cuadro de referencia humedecido	- 44 -
Figura 47.- Conexiones para la medición de potencial	- 45 -
Figura 48.- Gráfica de análisis de resultados de temperatura ambiente y del concreto en las muestras de concreto, durante la colocación en obra	- 59 -
Figura 49.- Gráfica de análisis de resultados de revenimiento de las muestras de concreto de cimentaciones	- 60 -
Figura 50.- Gráfica de análisis de resultados de revenimiento de la muestra de concreto del entrepiso	- 60 -
Figura 51.- Gráfica de análisis de resultados de masa unitaria de las muestras de concreto	- 61 -
Figura 52.- Gráfica de análisis de resultados de rendimiento de las muestras de concreto	- 61 -
Figura 53.- Gráfica de análisis de resultados de contenido de aire de las muestras de concreto	- 62 -
Figura 54.- Gráfica de análisis de resultados de resistencia a la compresión de los especímenes EC en laboratorio	- 64 -
Figura 55.- Gráfica de análisis de resultados de resistencia a la compresión de los especímenes EC expuestos al ambiente	- 64 -
Figura 56.- Gráfica de análisis de resultados la profundidad promedio de carbonatación de los EC con exposición a seis meses	- 68 -
Figura 57.- Tiempo en el que el frente de carbonatación alcanzará al acero de refuerzo para los EC expuestas a 183 días	- 69 -
Figura 58.- Orden en el que el frente de carbonatación alcanzará a las muestras de concreto	- 70 -
Figura 59.- Gráfica de resultado de potencial de corrosión para varillas sin recubrimiento de los ECA con exposición a seis meses	- 71 -
Figura 60.- Gráfica de resultado de potencial de corrosión para varillas con recubrimiento de los ECA con exposición a seis meses	- 72 -
Figura 61.- Gráfica de resultado de potencial de corrosión para varillas de acero inoxidable 304 con recubrimiento de los ECA con exposición a seis meses	- 73 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Reporte de daños en puentes de Red Federal de Carreteras [5]	IV
Tabla 2.- Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa [5]	- 6 -
Tabla 3.- Clasificación del cemento por sus adiciones [15]	- 7 -
Tabla 4.- Clase de resistencia y especificaciones físicas [15]	- 8 -
Tabla 5.- Características especiales [15]	- 8 -
Tabla 6.- Componentes del cemento [16]	- 8 -
Tabla 7.- Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda [40]	- 18 -

Tabla 8.- Descripción de las muestras de concreto	19 -
Tabla 9.- Materiales utilizados para la elaboración de los especímenes	21 -
Tabla 10.- Tipos de materiales empleados	22 -
Tabla 11.- Dosificación de las mezclas de concreto	22 -
Tabla 12.- Características del cemento	23 -
Tabla 13.- Numeración de varillas	30 -
Tabla 14.- Registro de datos de resistencia a la compresión	36 -
Tabla 15.- Formato para el registro de datos de carbonatación.....	42 -
Tabla 16.- Formato para el registro de datos de potencial.....	45 -
Tabla 17.- Resultados de temperatura del concreto fresco en obra	46 -
Tabla 18.- Resultados de revenimientos del concreto fresco en obra	46 -
Tabla 19.- Resultados de la masa unitaria del concreto fresco en obra	46 -
Tabla 20.- Resultados de contenido de aire del concreto fresco en obra	47 -
Tabla 21.- Resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC en las muestras C1-OA y C1-OB a los 7, 28, 79, 131, 184 días	47 -
Tabla 22.- Resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC en las muestras C2-OA y C2-OB a los 7, 28, 79, 131, 184 días	48 -
Tabla 23.- Resultados de carbonatación en 27 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB.....	48 -
Tabla 24.- Resultados de carbonatación en 78 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB.....	49 -
Tabla 25.- Resultados de carbonatación en 130 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	49 -
Tabla 26.- Resultados de carbonatación en 183 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	49 -
Tabla 27.- Resultados de potenciales de corrosión en 70 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	50 -
Tabla 28.- Resultados de potenciales de corrosión en 84 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	50 -
Tabla 29.- Resultados de potenciales de corrosión en 98 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	51 -
Tabla 30.- Resultados de potenciales de corrosión en 112 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	51 -
Tabla 31.- Resultados de potenciales de corrosión en 126 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	52 -
Tabla 32.- Resultados de potenciales de corrosión en 140 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	52 -
Tabla 33.- Resultados de potenciales de corrosión en 154 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	53 -
Tabla 34.- Resultados de potenciales de corrosión en 168 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	53 -
Tabla 35.- Resultados de potenciales de corrosión en 182 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB	54 -
Tabla 36.- Parámetros ambientales de Mayo del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC.....	54 -
Tabla 37.- Parámetros ambientales de Junio del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC.....	55 -

Tabla 38.- Parámetros ambientales de julio del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC	- 55 -
Tabla 39.- Parámetros ambientales de Agosto del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC.....	- 56 -
Tabla 40.- Parámetros ambientales de Septiembre del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC.....	- 56 -
Tabla 41.- Parámetros ambientales de Octubre del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC.....	- 57 -
Tabla 42.- Parámetros ambientales de Noviembre del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC.....	- 57 -
Tabla 43.- Parámetros de aceptación del concreto fresco NMX-C-155 ONNCCE 2014 [41]	- 58 -
Tabla 44.- Parámetros de aceptación para la resistencia a la compresión NMX-C-155 ONNCCE 2014 [41]	- 62 -
Tabla 45.- Correspondencia entre la relación a/c y $f'c$ del concreto ACI 211.1-1991[54]	- 63 -
Tabla 46.- Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales recomendados [54]..	- 63 -
Tabla 47.- Correspondencia entre la relación a/c y $f'c$ del concreto ACI 211.1-1991[54]	- 65 -
Tabla 48.- Comparación de los valores obtenidos de la resistencia a la compresión a 28 días de EC en laboratorio con los valores que indica el ACI 211.1	- 66 -
Tabla 49.- Comparación de los valores obtenidos de la resistencia a la compresión a 28 días de EC en ambiente con los valores que indica el ACI 211.1	- 66 -
Tabla 50.- Recubrimientos mínimos para el acero de refuerzo que indica el ACI 318S[55].....	- 67 -
Tabla 51.- Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda [40]	- 70 -
Tabla 52.- Orden de las varillas que presentaron rangos de voltaje más negativos (mV)	- 73 -

Resumen

Esta investigación caracteriza la durabilidad de concretos expuestos a condiciones del ambiente urbano de la ciudad de Mexicali, Baja California, utilizando concreto elaborado a nivel industrial dentro de la zona de estudio (plantas de concretos premezclados) y una estación de ensayo de exposición al ambiente también dentro de la zona de estudio con una estación meteorológica, con base en la colocación de especímenes de concreto (EC) y especímenes de concreto con acero (ECA).

Se contó con el apoyo de dos plantas de concretos premezclados (C1 y C2), en las cuales se tomaron dos diseños de muestras de concreto de tipo convencional por planta con una resistencia ($f'c$) de diseño de 210 kg/cm^2 utilizando Cemento Portland CPO-RS, con un total de cuatro muestras con diferentes relaciones agua/cemento (a/c) 0.52, 0.58, 0.60 y 0.65.

Los ensayos se centraron principalmente en evaluar la calidad de concreto fresco de cada muestra, en la evaluación de la calidad del concreto endurecido por medio de la prueba de resistencia a la compresión de EC en laboratorio y expuestos al ambiente, también a la caracterización de los procesos de carbonatación de EC expuestos al ambiente, así como también en la evaluación del potencial de corrosión de ECA expuestos al ambiente.

Esta información permitirá evaluar el uso de los diseños de concretos convencionales, en estructuras de concreto reforzado en la industria de la construcción de Mexicali, Baja California.

Resumen Ejecutivo

Este trabajo presenta una introducción al tema de degradación por corrosión, planteando problemas que se presentan a este deterioro en la infraestructura de concreto, seguida de una corta explicación de los mecanismos básicos de corrosión de acero de refuerzo en concreto.

Se presenta una corta explicación de la caracterización de los materiales utilizados: concreto y acero. Así como también, de las pruebas realizadas a los EC y ECA durante todo su proceso de fabricación, hasta obtener dichos especímenes. Se describe la ubicación de la estación de monitoreo meteorológico y se presentan los resultados de las pruebas del control de calidad del concreto fresco de cada muestra de concreto. Del mismo modo, se exponen los resultados de la calidad de concreto endurecido por medio de la prueba de resistencia a la compresión de EC en laboratorio y expuestos al ambiente; los resultados de profundidad de carbonatación de EC expuestos al ambiente y el potencial de corrosión de ECA expuestos al ambiente; como también los resultados meteorológicos de la estación de campo. Se reportan los resultados de la investigación y una discusión de éstos. Finalmente se exponen las conclusiones y listado de referencias utilizadas en este trabajo.

Introducción

El uso a nivel mundial del concreto reforzado en obras civiles, puentes, pavimentos, presas, tanques de almacenamiento, etc., lo coloca como el material de construcción más utilizado en la actualidad. El tiempo de vida útil de una estructura es función de su fabricación, de acuerdo al servicio que vaya a presentar y a las condiciones a que estará sometido, es deseable que una obra se mantenga en buen estado estructural, químico y estético por tiempo indefinido [1]. Es sin duda uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción, ya que ha hecho posible, en mayor o menor grado, la existencia de la infraestructura de todos los países del mundo [2]. Se considera, en términos generales, que las estructuras de concreto reforzado son durables y que proporcionan una vida útil de 50 años o más, con poco o nulo mantenimiento [3]. Esta durabilidad depende de las características del concreto, del acero y de la interacción entre ambos [4].

Los refuerzos utilizados en el concreto son materiales metálicos que presentan una buena resistencia a la corrosión en medios alcalinos. Durante la elaboración del concreto, debido al uso de cal (CaO) y agua, el cemento hidráulico provee un pH muy alcalino (12 a 12.5). Esto le permite al acero de refuerzo lograr su estado pasivo, protegido por la capa pasiva de óxido (Fe_3O_4), siempre y cuando el pH del concreto no cambie significativamente [3]. Sin embargo, este estado pasivo es difícil de conseguir de manera constante en las diversas etapas de la vida útil de las obras civiles, siendo uno de los más graves problemas en la actualidad el deterioro del concreto por la interacción con el medio ambiente [1].

En México, la Red Federal de Carreteras cuenta con 6,854 puentes, la mayor parte de ellos construidos de concreto reforzado, ver Figura 1 [5].

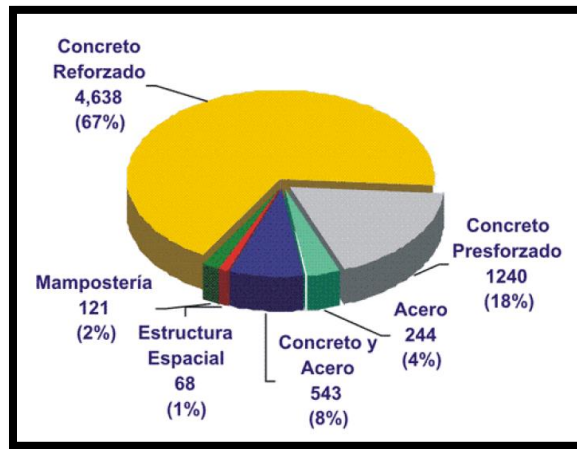


Figura 1.- Distribución de puentes por tipo de material [5]

Por parte, la dependencia de Caminos y Puentes Federales de ingresos y servicios conexos (CAPUFE) tiene a su cargo 2,500 puentes, de los cuales gran parte de ellos son también de concreto reforzado es importante señalar, que una cantidad considerable de estructuras a cargo de la Red Federal de Carreteras, presentan problemas de corrosión por penetración de cloruros y por carbonatación, estos problemas no se presentan en igual proporción en todas las estructuras, como se muestra en la Tabla 1 [5].

Tabla 1.- Reporte de daños en puentes de Red Federal de Carreteras [5]

Puentes prioritarios por corrosión		
Prioridad	Por penetración de cloruros	Por carbonatación
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

Debido a que los problemas de corrosión en las estructuras dependen en gran medida al medio ambiente en las que se encuentran expuestas, es necesario analizar detalladamente el comportamiento de las estructuras en diversas

condiciones ambientales. Con el fin de poder determinar el tratamiento que se le debe dar a las estructuras y tomar en consideración dicho comportamiento para el diseño de nuevas estructuras [5].

En base a lo anterior establecimiento, esta investigación lleva por objetivo obtener más información del comportamiento del concreto reforzado en el ambiente urbano de Mexicali, Baja California, con los materiales que están dentro de la industria de la construcción de dicha zona de estudio. Se contó con una estación de monitoreo expuesta al ambiente de Mexicali y especímenes de concreto (EC) y especímenes de concreto con acero (ECA) expuestos en dicha estación, de la cuales se obtuvieron datos de la calidad del concreto fresco de cada muestra, así como también, la calidad de concreto endurecido por medio de la prueba de resistencia a la compresión de EC en laboratorio y expuesto al ambiente, la profundidad de carbonatación EC expuesto al ambiente y el potencial de corrosión de ECA expuesto al ambiente. Así mismo, se obtuvieron datos meteorológicos de la estación de campo como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación pluvial. En esta investigación se analizaron los datos en un periodo de seis meses que comprende de mayo a noviembre del 2015.

Planteamiento del problema

Las pérdidas económicas causadas por la corrosión de acero de refuerzo en las estructuras de concreto se calculan en billones de dólares por año. Únicamente en los Estados Unidos, la Administración Federal de Caminos ha evaluado en 200 millones de dólares el costo anual de reparación de puentes en el sistema interestatal, monto que se cuadriplica al considerar todos los puentes existentes en el país. Por otra parte, la agencia de Protección de Ambiente (EPA), con sede en los Estados Unidos, indica que el costo total por reparación de la red vial deteriorada por corrosión, originada por el empleo de sales de deshielo, es de aproximadamente 500 millones de dólares por año [6].

Es de vital importancia todo lo que este fenómeno puede ocasionar ya que pueden registrar pérdidas considerables. En la rama de la construcción es indispensable el uso del concreto reforzado, ya que es uno de los sistemas de constructivos más utilizados, por ejemplo en casas-habitaciones, escuelas, hospitales e incluso en obras de gran magnitud como puentes, puertos, etc. [7]. Esto nos indica que es la rama de la construcción más afectada, la cual pues genera el mayor gasto por deterioro de las estructuras de concreto reforzado por la corrosión del acero de refuerzo.

Hipótesis

La infraestructura de concreto elaborado con concreto convencional en la industria de la construcción en la ciudad de Mexicali, Baja California, por alta contaminación de CO₂ y humedades relativas promedio anuales menores al 50%, es menos propensa a carbonatación y no rompen así la pasividad del acero de refuerzo durante seis meses de exposición al ambiente.

Objetivos

General:

- Evaluar la corrosión en el concreto reforzado dentro de la industria de la construcción, de Mexicali, Baja California.

Particulares:

- Evaluar la calidad del concreto fresco de las muestras de los concretos convencionales utilizados para la elaboración de los especímenes EC y ECA, en la zona urbana de Mexicali.
- Evaluar la calidad de concreto endurecido de las muestras de los concretos convencionales, por medio de la prueba de resistencia a la compresión de los especímenes EC en laboratorio y expuesto al ambiente durante 6 meses, en la zona urbana de Mexicali.
- Evaluar la profundidad de carbonatación de los especímenes EC expuestos al ambiente durante 6 meses en la zona urbana de Mexicali.
- Evaluar el potencial de corrosión de los especímenes ECA expuestos al ambiente durante 6 meses, en la zona urbana de Mexicali.

Justificación

En esta investigación se presentarán las discusiones de los resultados obtenidos de exponer especímenes EC y ECA, en condiciones ambientales en Mexicali, Baja California. Esta zona es considerada para esta investigación como zona Urbana. Los resultados obtenidos en esta investigación serán de vital importancia ya que para el caso de concreto reforzado en la zona urbana en cuestión, se encuentra el registro del proyecto de Durabilidad del Concreto (DURACON) a nivel Iberoamericano.

Por lo tanto, ésto ayudará a conocer y evaluará el comportamiento de la corrosión en un lapso de tiempo con materiales utilizados en la industria de la construcción de Mexicali, también una base para futuras investigaciones o disminución de pérdidas económicas que actualmente pueden causar la corrosión en nuestra zona de estudio.

1. Marco Teórico

1.1 Definición de corrosión

La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales, Figura 2 [8]:

- a) Un ánodo, donde ocurre la oxidación
- b) Un cátodo, donde ocurre la reducción
- c) Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- d) Un electrolito; en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso

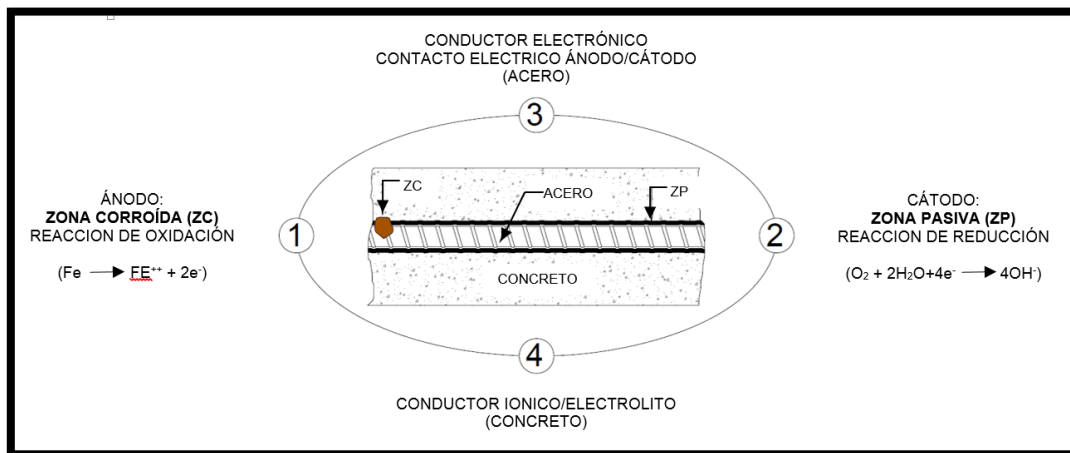


Figura 2.- Elementos constituyentes de la celda de corrosión [8]

La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, así como, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea al acero [5].

1.2 Concreto reforzado

Definimos al concreto reforzado como la unión entre concreto y acero Figura 3. El concreto está compuesto básicamente por el agregado (arena y grava), cemento, agua y en algunos casos, aditivo; el acero que se utiliza depende en gran medida de las especificaciones de la estructura a construir; puede ser acero galvanizado, acero inoxidable o lo que se utiliza comúnmente, que es acero al carbono o de refuerzo.

La relación 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 [5]. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero. A este fenómeno se le denomina pasivación, ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. Esta alcalinidad del concreto se debe principalmente al hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que se forma durante la hidratación de los silicatos (C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF) del cemento y a los álcalis (sodio y potasio), que pueden estar incorporados como sulfatos en los elementos constituyentes del cemento. El concreto también funciona como una capa protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan despasivar al acero e iniciar la corrosión [9].

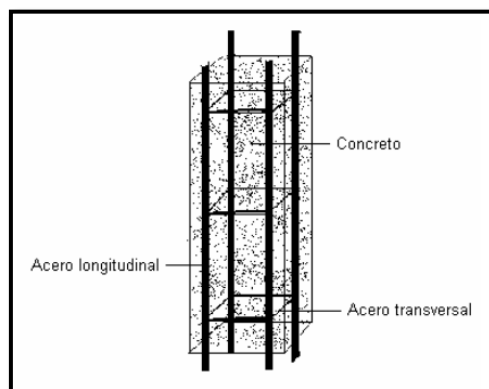


Figura 3.- Esquema de una columna común de concreto reforzado [9]

La corrosión del acero de refuerzo disminuye la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, por lo que predecir la vida útil de las estructuras dañadas por corrosión reviste una enorme importancia. No existe un método totalmente aceptado para calcular la vida residual de las estructuras de concreto reforzado, aunque se han establecido varios procedimientos para estimar su vida útil. Un modelo que describe, desde el punto de vista de la corrosión, el proceso de deterioro de las estructuras es el propuesto por Tuutti, Figura 4.

Quien establece un nivel de corrosión máximo aceptable relacionado con la apariencia de las grietas, y sugiere presencia de dos periodos, que sea el de iniciación y el de propagación [9].

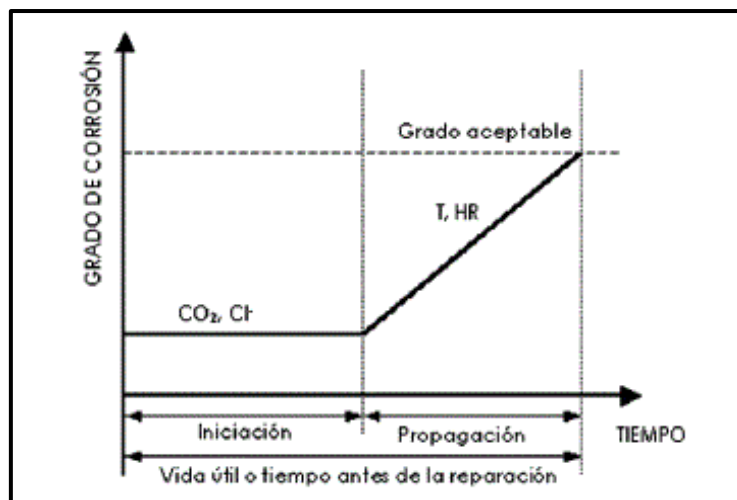


Figura 4.- Modelo e la vida útil propuesta por Tuutti [10]

1.3 Tipos de corrosión en el acero de refuerzo

En el concreto armado, las formas que puede adoptar la corrosión de acero de refuerzo son diversas. Se han clasificado los diferentes tipos o formas de corrosión de acuerdo con la aparición física del ataque. En el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son los siguientes, Figura 5 [9]:

- Corrosión localizada
 - Corrosión por picaduras.

- Corrosión bajo tensión.
- Corrosión uniforme/generalizada

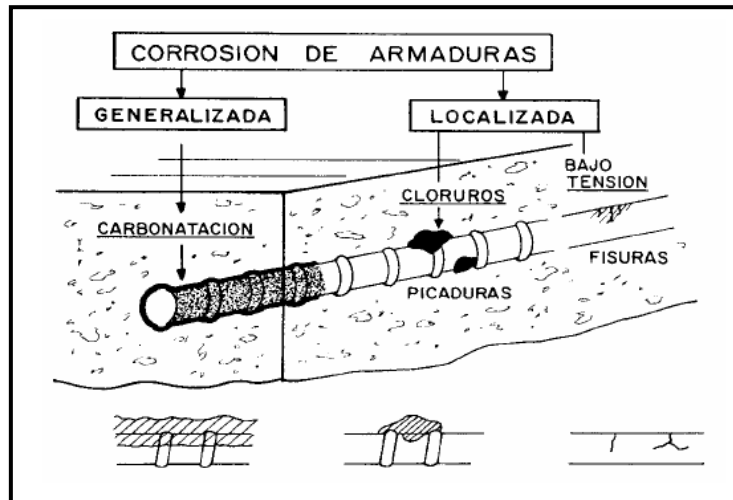


Figura 5.- Esquema de los tipos de corrosión en el acero de refuerzo dentro del concreto reforzado [9]

1.4 Corrosión por carbonatación

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado. En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia el interior de la superficie expuesta del concreto y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión [11].

Es un problema que actualmente afecta a muchas estructuras en el país, cuyo fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte al hidróxido de calcio en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino. El hidróxido de calcio y los iones de sodio (Na) y potasio (K) por su alta alcalinidad, forma en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa

pasiva de hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$, que lo cubre y protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que al descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, el acero pierde su capa pasiva con un pH menor a 11, Figura 6.

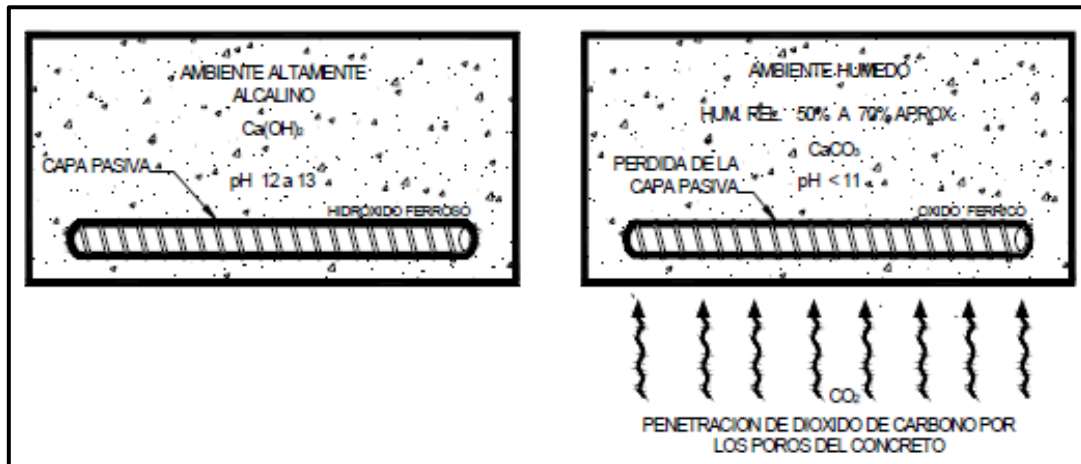


Figura 6.- Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo [5]

La corrosión de acero de refuerzo es el mayor factor en la reducción de la vida de servicio de las estructuras y elementos de concreto reforzado. La carbonatación es el proceso que causa mayor deterioro de las estructuras en ambientes urbanos. Para que este proceso se dé requiere de ciertas condiciones:

- Contenido de humedad;
- Contenido de CO_2 y SO_2 en el ambiente atmosférico;
- Permeabilidad del concreto.
- El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% aproximadamente [12].

A bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono, Tabla 2 [5].

Tabla 2.- Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa [5]

Humedad Relativa % (HR)	Proceso de Carbonatación
HR > 70%	Evita el ingreso de CO ₂
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente
HR < 50 %	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO ₂

El contenido de CO₂ en la atmósfera depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar, ya que existen grandes diferencias en una zona urbana a una zona rural, siendo mayores en la primera [5].

Sólo se requiere una pequeña concentración de CO₂ para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, que normalmente se encuentra en la atmósfera, que está en el rango de 0.03% [13].

La permeabilidad del concreto es otro factor que se debe de controlar, ya que un concreto muy permeable se carbonatará más rápidamente, por tener poca resistencia a la penetración de los fluidos. Para obtener un concreto poco permeable son necesarios agregados de buena calidad, una pasta de cemento con relación agua/cemento baja [5].

Por otra parte, el fenómeno de carbonatación es un problema que tiene relación directa con los parámetros meteorológicos del ambiente al cual se encuentran las estructuras. Mexicali presenta un clima desértico dentro del grupo de seco-áridos, con un comportamiento en las temperaturas con grandes contrastes térmicos, tanto diarios como estacionales, presentando en la estación de verano altas temperaturas (50°C) e inviernos bajas temperaturas (-5°C), y se ve interrumpida por el ascenso térmico de invierno a la primavera, y el continuo descenso térmico del verano al otoño [14]. Esto permitirá, en conjunto con los resultados de las evoluciones físicas y electroquímicas de los especímenes de

concreto (EC) y especímenes de concreto con acero (ECA), definir los niveles que causan la corrosión en la estructura.

1.5 Diseño de mezclas

El diseño de la mezcla de concreto consiste en determinar la cantidad de material que debe emplearse para constituir un volumen unitario de concreto fresco, con el objeto de producir una mezcla económica, cuya calidad sea tal que cumpla con los requisitos especificados para la estructura que se pretende fabricar.

Los materiales que intervienen en la elaboración de una mezcla de concreto:

- Cemento
- Agua
- Agregados pétreos (grava y arena)
- Aditivos (en algunos casos)

1.5.1 Cemento

El cemento hidráulico se define como un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua tiene la propiedad de fraguar y endurece en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad [15].

En México se contempla la fabricación de seis clases de cementos hidráulicos con cinco clases de resistencias y cuatro características especiales, que se rige por la NMX-414-ONNCCE-2014 [15], mostrados en la Tabla 3, 4 y 5.

Tabla 3.- Clasificación del cemento por sus adiciones [15]

Tipo	Denominación
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

Tabla 4.- Clase de resistencia y especificaciones físicas [15]

Clase Resistente	Resistencia compresión (N/mm ²)		
	3 días mínimo	28 días mínimo	máximo
20	---	20	40
30	---	30	50
30 R	20	30	50
40	---	40	---
40 R	30	40	---

La letra R especifica una resistencia a 3 días (resistencia rápida)

Tabla 5.- Características especiales [15]

Simbología	Denominación
RS	Resistencia a los sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali-agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Por otra parte, el cemento se fabrica a partir de sulfato de calcio di-hidratado (Yeso), Óxido de calcio (Cal libre), Magnesia (Periclusa), Alcalis y Clinker.

El Clinker es el producto de la fusión a 1,500°C de la mezcla de caliza (CaCO₃) y arcilla (Al₂O₃, Fe₂O₃ + sílica). Todos estos compuestos reaccionan dando como resultado nuevas especies químicas que son los principales componentes del cemento [16], mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6.- Componentes del cemento [16]

Componente	Fórmula	Forma Abreviada
Silicato dicálcico (belita)	2CaO.SiO ₂	C2S
Silicato tricálcico (alita)	3CaO.SiO ₂	C3S
Aluminato tricálcico	3CaO. Al ₂ O ₃	C3A
Ferrialuminato tetracálcico	4CaO. Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C4AF

1.5.2 Agregados pétreos: arena y grava

Son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto, que al ser mezclados con cementantes, permitan según el caso la elaboración de concretos y morteros [17].

Estos materiales pétreos, también llamados agregados son generalmente divididos en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos generalmente consiste en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores a 5 mm y los agregados gruesos consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominante mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm. Las propiedades físicas y químicas de los agregados son factores que influyen considerablemente al momento de diseñar una mezcla de concreto, ya que éstos ocupan aproximadamente del 60 al 75% del volumen de concreto (70 a 85% de su peso) [18]. En el aspecto físico, los agregados influyen en la durabilidad del concreto en la medida que afectan sus propiedades y su capacidad para resistir los efectos deteriorantes de los medios de contacto, las condiciones ambientales y las de servicio. En el aspecto químico es importante su composición petrográfica y mineralógica debido a que hay ciertas rocas y minerales que pueden reaccionar adversamente con los álcalis en el concreto [5].

1.5.3 Agua

El agua es una materia prima en la elaboración del concreto, y además se utiliza para el curado. La calidad del agua que se utiliza para elaborar la mezcla representa un aspecto importante, ya que influye de manera significativa en el comportamiento y propiedades del concreto. El agua que se utiliza debe estar

libre de impurezas, como son: grasas, aceites, azúcares, ácidos y materia vegetal, ya que éstos impiden o retardan la hidratación [19].

La norma oficial NMX-C-122 establece los parámetros ideales que deben cumplir las aguas naturales o contaminadas, diferente de las potables para emplearse en la elaboración y curado de concretos hidráulico [20].

1.5.4 Aditivo

Los aditivos químicos son materiales que se añaden al concreto ya sea durante o antes del mezclado, con la finalidad de mejorar ciertas características del concreto tanto como en estado fresco como cuando se encuentra endurecido [19]. Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue:

- Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire)
- Aditivos reductores de agua
- Plastificantes (fluidificantes)
- Aditivos aceleradores (acelerantes)
- Aditivos retardadores (retardantes)
- Aditivos de control de la hidratación
- Inhibidores de corrosión
- Reductores de retracción
- Inhibidores de reacción álcali-agregado
- Aditivos colorantes
- Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo [18].

Las razones para el uso de aditivos están perfiladas en las siguientes funciones que pueden desarrollar:

- Incrementan la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua o disminuir el contenido de agua a la misma trabajabilidad
- Retarda o aceleran el tiempo de fraguado inicial
- Modifican la rapidez o la capacidad de sangrado
- Acelera la rapidez de desarrollo de resistencia
- Disminuir la permeabilidad del concreto.
- Incrementar la adherencia entre concreto viejo y nuevo, entre otras [21].

1.6 Pruebas realizadas al concreto fabricado

Para evaluar que el concreto realizado cumple con las características requeridas, se llevan a cabo pruebas de calidad del concreto fresco y endurecido, bajo las normas mexicanas, con apoyo también de las normas de la ASTM.

1.6.1 Prueba al concreto fresco

Las pruebas que se realizaron para evaluar la calidad del concreto fresco son:

- Temperatura
- Revenimiento
- Masa unitaria
- Contenido de aire
- Curado

1.6.1.1 Temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes que influyen en la calidad, tiempo de fraguado y resistencia del concreto. Sin el control de la temperatura del concreto, predecir su comportamiento es muy difícil, si no imposible [22]. La temperatura ambiente 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 moderadas [5].

Un concreto con temperatura inicial alta, probablemente tendrá una resistencia superior a lo normal a edades tempranas y resistencias más bajas a edades tardías. La calidad final del concreto probablemente se verá también disminuida. Por el contrario, el concreto colado y curado a temperaturas bajas desarrollará su resistencia a una tasa más lenta, pero finalmente tendrá una resistencia más alta y será de mayor calidad. La temperatura del concreto se usa para indicar el tipo de curado y protección que se necesitará, así como el lapso de tiempo en que deben mantenerse el curado y la protección. Al controlar la temperatura del concreto dentro de los límites aceptables se podrán evitar problemas tanto inmediatos como futuros [22]. Esta prueba se realiza como lo indica la NMX-C-435-ONNCCE [23] y como lo recomienda la ASTM-C1064/C1064M-08 [24].

1.6.1.2 Revenimiento

El propósito de la prueba de revenimiento es determinar la consistencia del concreto. Es una medida de la fluidez o movilidad relativa de la mezcla de concreto.

El revenimiento no mide el contenido de agua o la trabajabilidad del concreto, es verdad que el incremento o disminución en el contenido de agua causará el correspondiente aumento o disminución en el revenimiento del concreto, siempre y cuando todos los otros materiales y condiciones permanezcan constantes. Sin embargo, muchos factores pueden causar que el revenimiento del concreto cambie sin que cambie el contenido de agua.

Ciertos factores, como el cambio de las propiedades de los agregados o de su granulometría, proporciones de la mezcla, contenido de aire, temperatura del concreto o el uso de aditivos especiales pueden influir en el revenimiento del concreto, o inversamente, pueden resultar en un cambio en el requerimiento de contenido de agua para mantener un revenimiento dado. Por ejemplo, una mezcla con exceso de arena puede requerir más agua de mezclado que las proporciones especificadas en el diseño de mezcla original, pero el revenimiento puede permanecer igual. Por lo tanto, no es posible suponer que la relación agua/cemento sea mantenida simplemente porque el revenimiento está entre los límites de la especificación [25]. Esta prueba se realiza como lo indica la NMX-C-156-ONNCCE [26] y como lo recomienda la ASTM-C143/C143M-08 [27].

1.6.1.3 Masa unitaria

La prueba de la masa unitaria es una herramienta importante utilizada en la calidad del concreto recién mezclado. Determina el peso del material contenido en un metro cúbico del concreto fresco (Kg/m^3). Esto se calcula dividiendo el peso neto de concreto fresco entre el volumen del recipiente que lo contiene [21]. Un cambio en la masa unitaria en el concreto indicara un cambio en uno o más de los otros requisitos del desempeño del concreto. Una masa unitaria más baja pudiera indicar:

- Que los materiales han cambiado
- Un mayor contenido de aire
- Un mayor contenido de agua
- Un menor contenido de cemento
- Un cambio en las proporciones de los ingredientes

Una masa unitaria más alta indicará lo contrario de las características de concreto antes mencionadas [28]. Esta prueba se realiza como lo indica la NMX-C-162-ONNCCE [29] y como lo recomienda la ASTM-C138/C138M-08 [30].

1.6.1.4 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 [5].

En concretos diseñados para alcanzar 200 a 350 Kg/cm², conforme se incrementa el contenido de aire en más de un 5%, habrá una reducción correspondiente en la resistencia del concreto. Típicamente, esta reducción de resistencia será del orden del 3 al 5% por cada 1% de contenido de aire por arriba del valor de diseño [31]. Esta prueba se realiza como lo indica la NMX-C-157-ONNCCE [32] y como lo recomienda la ASTM-C231-08b [33].

1.6.1.5 Curado

El curado es el proceso mediante el cual, en un ambiente especificado de humedad y temperatura, se favorece la hidratación de cemento o de los materiales cementantes en la mezcla [34].

Este proceso ayuda a que el concreto de cemento hidráulico madure y desarrolle sus propiedades mecánicas típicas del material en estado endurecido. El tiempo de curado del concreto se refiere al lapso en el cual se desarrollan las reacciones químicas del cemento con el agua, sin que se realice acción alguna. También se refiere al tiempo durante el cual se ejecutan acciones específicas para mantener el concreto en las condiciones favorables de humedad y temperatura, como pueden ser aplicarle agua, cubrirlo del medio ambiente, calentarlo, etc.

El Instituto Americano del Concreto (ACI), distingue dos tipos diferentes de ambientes extremos que pueden provocar problemas durante el mezclado, transporte, colocación del concreto y curado, los cuales son:

- Clima frío
- Clima cálido

En el clima frío la principal preocupación es que los compuestos del cemento no reaccionen con el agua, o que incluso, ésta se congele. Mientras en el cálido la principal preocupación es que el agua del concreto se evapore rápidamente y que una parte significativa del cemento no se hidrate, por lo tanto no aporte resistencia al material y éste sea muy poroso [35]. Esta prueba se realiza como lo indica la NMX-C-159-ONNCCE [36], la NMX-C-160-ONNCCE [34] y como lo recomienda la ASTM-C31/C31M-09 [37].

1.6.2 Pruebas al concreto endurecido

Las pruebas de concreto endurecido, se evalúan mediante pruebas de resistencias mecánicas (compresión y flexión), que se refiere básicamente a su capacidad de soportar toda clase de esfuerzos. Las pruebas pueden clasificarse de manera general en pruebas mecánicas destructivas y no destructivas.

La prueba más común para evaluar la calidad de concreto endurecido es la prueba de resistencia a la compresión, con clasificación de prueba mecánica destructiva. Es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras.

1.6.2.1 Prueba de resistencia a la compresión

Esta prueba ayuda a determinar la resistencia a compresión de muestras de concreto cilíndricas; consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de concreto, dicha 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 [5]. La prueba se usa como la base para la aceptación del concreto cuando se especifica un requisito de resistencia. Los cilindros son moldeados a partir de una muestra de concreto fresco, curado en condiciones estándares y probado a una edad particular, según se indique en las especificaciones, usualmente a 28 días [38].

La prueba de resistencia a la compresión se determina por las siguientes razones:

- Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada, $f'c$, del proyecto.
- Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros moldeados se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras, para programar las operaciones de construcción, tales como remoción de cimbras o para evaluar la conveniencia de curado y protección suministrada a la estructura [39].

1.7 Técnicas electroquímicas

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema. La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, además de ser pruebas no destructivas. Las más utilizadas son:

- Potencial de corrosión (E_{corr})
- Resistencia de polarización (R_p)

- Voltametría cíclica
- Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Cada una de ellas aporta información acerca de las condiciones de la interfase acero-concreto y con ello del grado de corrosión que se presente en la armadura.

Las técnicas electroquímicas, consisten en la aplicación de señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien la aplicación de señales de corriente y el registro de la respuesta en potencial. De las dos maneras, se polariza la interfase y su respuesta es característica de cada sistema bajo estudio.

Todas las técnicas aportan información que se complementa con apreciaciones visuales de deterioro físico (como cuarteaduras) y químicas (carbonatación y penetración de cloruros principalmente) [16].

1.7.1 Potencial de corrosión (E_{corr})

Cuando hay corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto, existe sobre el acero una diferencia de potencial entre las áreas de media celda anódicas y las áreas de media celda catódicas. La medida del potencial de corrosión indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad del refuerzo [16].

El procedimiento para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto está contenido en la Norma ASTM-C-876 [40]. La cual establece criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión, mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7.- Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda [40]

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%

El método de medición de potencial se realiza conectando una terminal de un voltímetro de alta impedancia, al acero embebido en concreto (+) y la otra terminal, a un electrodo de referencia (-). De esta forma se mide un potencial de media celda, como se ilustra en la Figura 7.

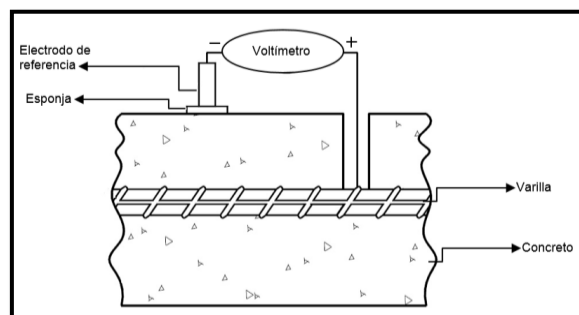


Figura 7.- Medición de potencial [16]

Este método es puramente cualitativo, y siempre se debe complementar con otro tipo de ensayos, tales como la medición de la velocidad de corrosión.

2. Metodología experimental

2.1 Construcción de los especímenes

En este capítulo se describe detalladamente el procedimiento que se siguió para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados en esta investigación, desde la elaboración de los especímenes de estudio, la caracterización del concreto y evaluación del estado del concreto y del acero, durante el tiempo de exposición.

La construcción de los especímenes se realizó con el proceso y calidad de dos plantas de concreto (C1, C2), ubicadas dentro de la zona de estudio. Se tomaron dos muestras de concreto por planta, teniendo un total de cuatro muestras (C1-OA, C1-OB, C2-OA, C2-OB).

Las cuatro muestras son concretos convencionales (resistencia a 28 días) para un diseño de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, con diferentes relaciones agua/cemento (a/c), para dos tipos de elementos cimentación y entrepiso, las cuales se obtuvieron de cuatro viviendas diferentes en la construcción de un fraccionamiento privado ubicado en la zona de estudio. En la Tabla 8, se muestra la descripción de cada muestra.

Tabla 8.- Descripción de las muestras de concreto

Muestra	Elemento	a/c	Resistencia de diseño kg/cm	Edad (días)	Colocación	T.M.A* (mm)	Revenimiento (cm)
C1-OA	Cimentación	0.52	210	28	Directo	19	10
C1-OB	Cimentación	0.60			Directo	19	10
C2-OA	Cimentación	0.58			Directo	19	10
C2-OB	Entrepiso	0.65			Bomba	19	14

*T.M.A (Tamaño máximo del agregado en el concreto)

Para la elaboración de los especímenes de estudio se utilizaron dos tipos: 1) Especimen de concreto (EC) y 2) Especimen de concreto con acero de refuerzo (ECA), elaborando por cada muestra 5 especímenes EC en laboratorio, 7 especímenes EC en obra y 1 espécimen ECA en obra.

Elaborando un total de 48 especímenes EC y un total 4 especímenes ECA, por las cuatro muestras de las dos plantas de concreto, en tiempos con diferencias de siete días aproximadamente por muestra.

El diseño de los especímenes EC y especímenes ECA, fueron en forma cilíndrica, con dimensiones de 15 cm de diámetros aproximadamente y 30 cm de alto aproximadamente, como se muestra en la Figura 8 y 9.

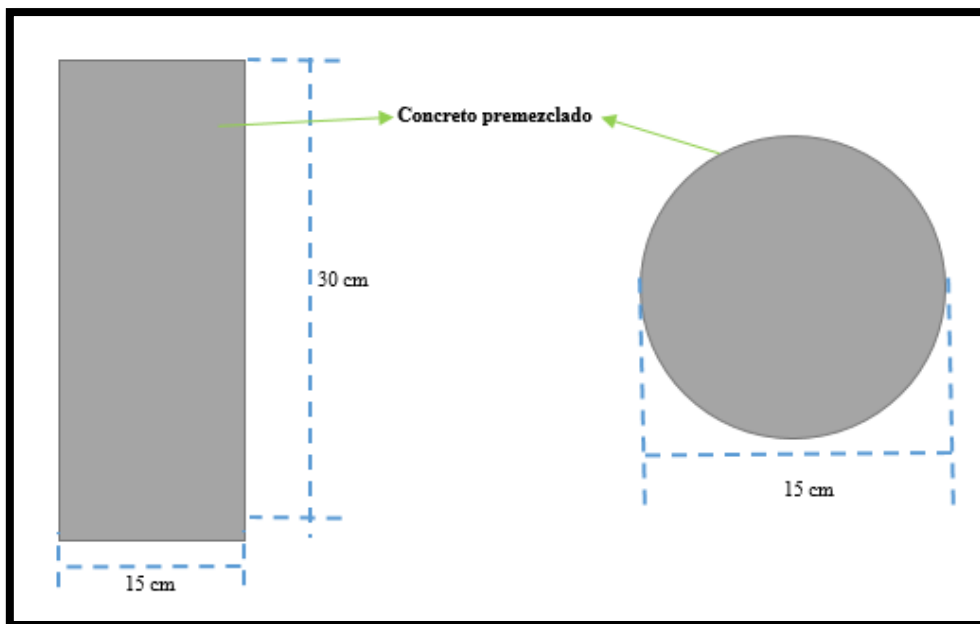


Figura 8.- Diseño de espécimen de concreto (EC)

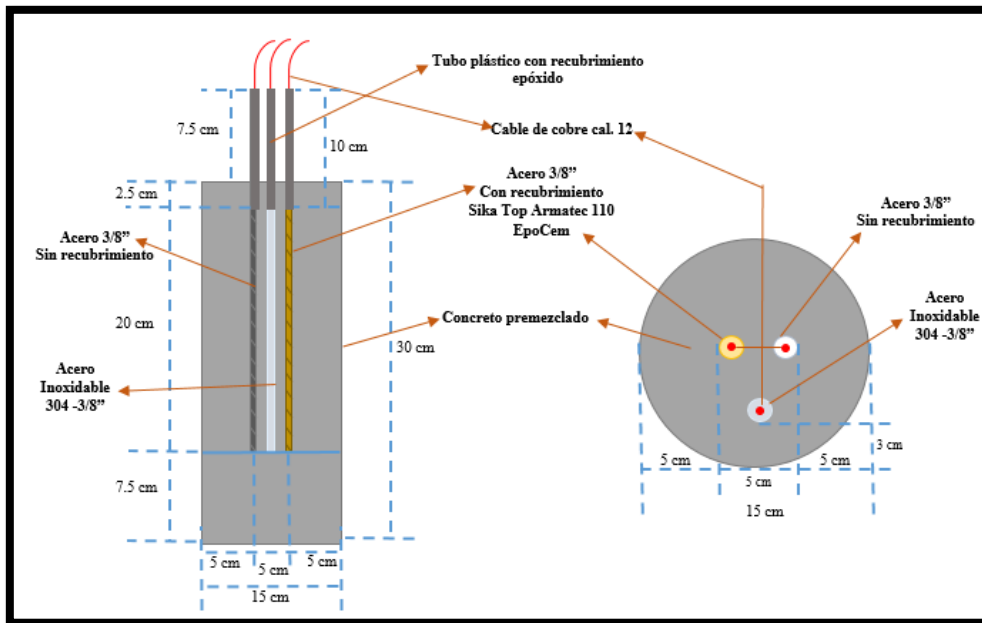


Figura 9.- Diseño de espécimen de concreto con acero (ECA)

Los especímenes fueron elaborados en el laboratorio de cada planta de concreto y en obra, bajo las normas mexicanas de calidad, así como con las normas de las ASTM. Los materiales utilizados se indican en la Tabla 9.

El acero empleado para los especímenes de concreto con acero de refuerzo, fue varilla de acero al carbono corrugada para construcción No. 3 (3/8") Grado 60 y acero inoxidable 304 del No 3 (3/8").

Tabla 9.- Materiales utilizados para la elaboración de los especímenes

Especímenes EC	Especímenes ECA
Cemento	Cemento
Agua	Agua
Arena	Arena
Aditivo	Aditivo
-----	Acero al carbono de 3/8
-----	Acero inoxidable 304 de 3/8

2.1.1 Diseño de la mezcla

El diseño de las mezclas se realizó a nivel industrial por cada planta de concreto C1 y C2, cumpliéndose con los requisitos de desempeño bajo la Norma NMX-155-ONNCCE-2014 [41], las propiedades y características de los materiales se describen en la Tabla 10.

Tabla 10.- Tipos de materiales empleados

Material	C1		C2	
	OA	OB	OA	OB
Cemento	CPO 40 RS de la planta de cemento CEMEX Mexicali, Baja California		CPO 40 RS de la planta de cemento CEMEX Mexicali, Baja California	
Agua	Agua purificada para consumo humano de Mexicali, Baja California		Agua potable de red municipal de Mexicali, Baja California	
Arena	Arena lavada, Banco López Mateos Mexicali, Baja California		Arena lavada, Banco López Mateos Mexicali, Baja California	
Grava	T.M.A. ¾" de roca minera granítica, Banco López Mateos Mexicali, Baja California		T.M.A. ¾" de roca minera granítica, Banco López Mateos Mexicali, Baja California	
Aditivo	RA 700 M, de EUCOMEX		DAG, de CEMEX	

La dosificación que se obtuvo de los diseños de cada muestra por las plantas de concreto se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.- Dosificación de las mezclas de concreto

Contenido (kg/m ³)	C1		C2	
	OA	OB	OA	OB
	A/C=0.52	A/C=0.60	A/C=0.58	A/C=0.65
Cemento	288.14 Kg	284.57 Kg	216.71 Kg	216.25 Kg
Agua	149.57 L	170.42 L	124.71 L	139.25 L
Arena	895.14 Kg	885.42 Kg	898.43 Kg	947.50 Kg
Grava	996.71 Kg	1007.85 Kg	1077.86 Kg	999.00 Kg
Aditivo	4cc/kg de cto	3cc/kg de cto	5cc/kg de cto	6cc/kg de cto

2.1.1.1 Características y propiedades de los materiales utilizados.

2.1.1.1.1 Cemento

El cemento Portland hidráulico que se utilizó para la fabricación de los especímenes de concreto fue el CPO 40 RS, el cual cumple con las especificaciones de la NMX-414-ONNCCE-2014 [15]. En la Tabla 12 se muestra las características.

Tabla 12.- Características del cemento

Tipo de Cemento	Resistencia a la compresión (N/mm ²)	Características Especiales
CPO	40	RS
Cemento Portland Ordinario	Resistencia a la compresión a los 28 días mínima	Resistencia a los Sulfatos
	408 kg/cm ²	

2.1.1.1.2 Agregados pétreos: arena y grava

Los agregados utilizados para las mezclas de concreto por cada planta de concreto C1 y C2, cumplen con las recomendaciones, de la Norma ASTM C 33 [42], que define los requerimientos para evaluar la calidad de los agregados finos y gruesos que se utilizan en la fabricación del concreto, entre otros requerimientos de la Norma NMX C-111- ONNCCE-2014 [17].

2.1.1.1.3 Agua

Para las mezclas que se realizaron a nivel industrial por la planta de concreto C1, se utilizó agua purificada procedente de una planta purificadora de agua. Por otra parte, la planta de concretos C2 utilizó agua potable de la red de suministro para uso doméstico, las dos aguas son procedente de Mexicali, Baja California. Estas aguas poseen buenos antecedentes de uso en la fabricación de concreto,

las cuales cumplen con los requerimientos de la Norma NMX C-122 ONNCCE-2004 [20].

2.1.1.1.4 Aditivo

El aditivo empleado para la elaboración de las mezclas de concreto a nivel industrial para la planta de concretos C1, fue el RA 700 M, de EUCOMEX y para la planta de concretos C2, fue el DAG. Estos aditivos son empleados para todos los concretos convencionales elaborados por cada planta, tienen como función la reducción de agua dentro de la mezcla y retardar el fraguado del concreto, su uso mejora las mezclas de concreto, haciendolas más plásticas y fluidas, para su colocación en obra.

2.1.2 Preparación del acero de refuerzo

A los especímenes de concreto con acero de refuerzo, se les colocaron dos tramos de varillas corrugadas de acero al carbono No. 3 (3/8") Grado 60, de las cuales a una varilla se le aplicó un recubrimiento cementante, y se agregó una tercera varilla de acero inoxidable 304 del No 3 (3/8"). Las varillas corrugadas de acero al carbono se colocaron con 5cm de recubrimiento y la de acero inoxidable con un recubrimiento de 3 cm, como se muestra en la Figura 10.

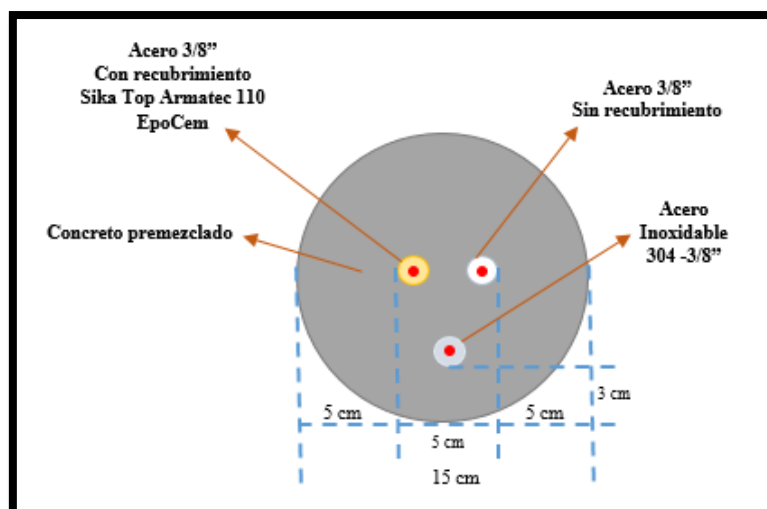


Figura 10.- Distribución de la colocación de las varillas acero y acero inoxidables en los especímenes

Antes de colocar el acero de refuerzo se hizo una preparación especial, para poder fabricar los especímenes en obra, que se describe a continuación:

- Varillas corrugadas de acero al carbono sin recubrimiento y con recubrimiento

Se cortaron en tramos de 30 cm y se limpiaron con un cepillo de alambre para retirar el óxido que pudiera tener, ver Figura 11.



Figura 11.- Tramos 30 cm de varilla corrugada de acero al carbono y acero inoxidable

Las varillas se perforaran en un extremo, con una broca de 7/64” de diámetro a una profundidad de 1.5 cm aproximadamente, ver Figura 12.

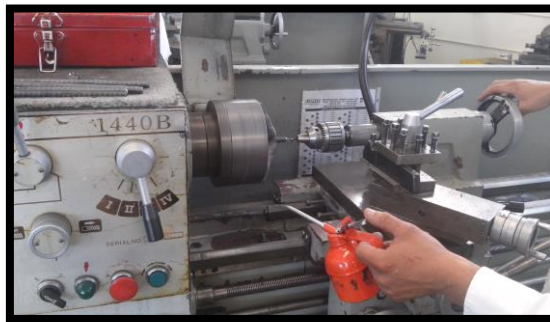


Figura 12.- Perforación de un extremo de la varilla

Se marca la varilla con una distancia de 10 cm de la parte de donde se hizo el orificio para poder pintarse, y se protege la parte de abajo con masking tape y se pintan los 10 cm con pintura de spray para metal, ver Figura 13 y 14.



Figura 13.- Protección de la parte de debajo de la varilla



Figura 14.- Varillas pintadas con spray para metal en su extremo

Pintadas las varillas, se cepilla la parte trasversal, donde se realizó la perforación para que el cable tenga mejor contacto, ver Figura 15.



Figura 15.- Cepillado de la parte trasversal de las varillas

Se introduce en el orificio un cable calibre 12 de 0.15m de largo aproximadamente y se impacta con un cincel y un martillo por la parte exterior, en donde fue el orificio para hacer presión al cable, ver Figura 16.



Figura 16.- Introducción del cable a la varilla

También se aísla y se fija el cable con un producto epóxico para hacer la unión cable/acero, ver Figura 17.

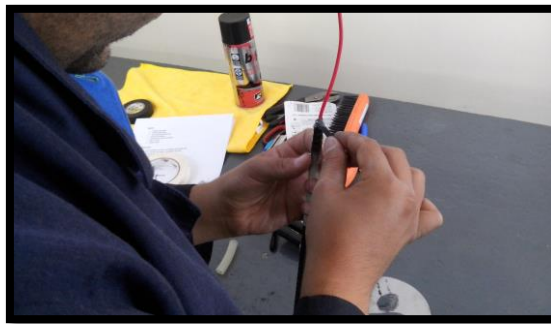


Figura 17.- Unión del cable y varilla con epóxido

Secando el epóxido en los 10 cm pintados, introducir la manguera plástica de 1/2" trasparente por el extremo, cubriendo los 10 cm de pintados, para proteger la unión cable/acero y se inyecta Sikaflex-1^a [43] en las mangueras, para rellenar el espacio y aislar la conexión cable/acero, ver Figura 18 y 19.

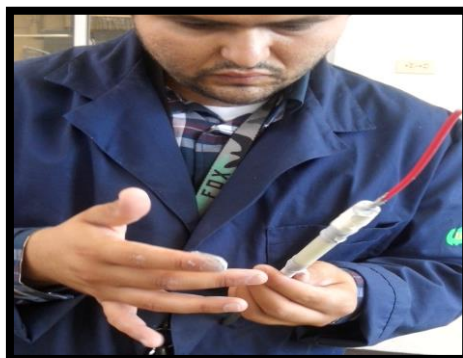


Figura 18.- Varilla con mangueras plásticas en su extremo



Figura 19.- Inyección del producto Sikaflex-1^a

Terminando el procedimiento, las varillas quedan listas y se dejan secar durante 48 horas, a temperatura ambiente, ver Figura 20.



Figura 20.- Secado de varillas a temperatura ambiente

Después del secado de las varillas de acero corrugadas con recubrimiento se le aplicó un recubrimiento anticorrosivo y puente de adherencia a base de resinas epóxicas modificadas y cemento, llamado SikaTop-Armatec 110 [44], ver Figura 21.



Figura 21.- Aplicación de recubrimiento SikaTop-Armatec 110

Posteriormente, se aplicó el recubrimiento y se dejó secar durante 12 horas, ver Figura 22.

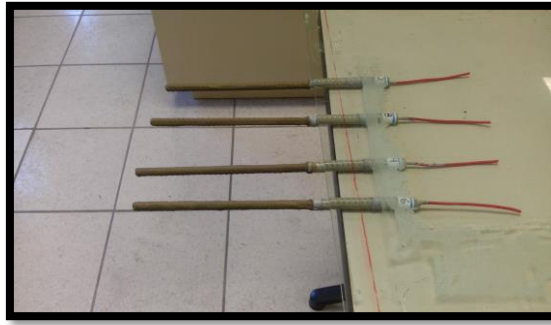


Figura 22.- Secado de recubrimiento SikaTop-Armatec 110 EpoCem

- Varilla de acero inoxidable

Para las varillas de acero inoxidable, se aplicó el mismo procedimiento, de las varillas de acero corrugadas sin recubrimiento y con recubrimiento, excepto el proceso de pintar los 10 cm con pintura de spray para metal y la aplicación de recubrimiento SikaTop-Armatec 110 EpoCem [44], ver Figura 23.



Figura 23.- Varilla de acero inoxidable con preparación especial

2.1.3 Identificación de las varillas

Después de terminada la preparación del acero, a cada una se le identifica de la siguiente manera:

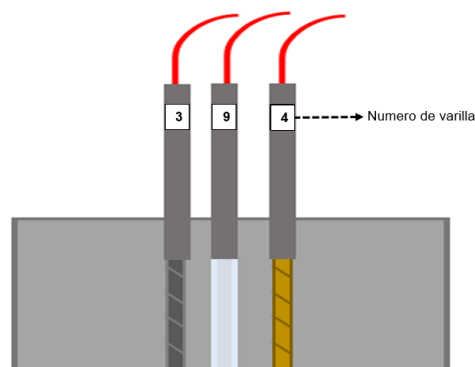


Figura 24.- Identificación de varillas

En la Tabla 2.6 se muestra la el tipo de varilla y característica, de cada número:

Tabla 13.- Numeración de varillas

Numero	Tipo de varilla	Característica
1	Acero al Carbono	Sin recubrimiento
2	Acero al Carbono	Con recubrimiento
3	Acero al Carbono	Sin recubrimiento
4	Acero al Carbono	Con recubrimiento
5	Acero al Carbono	Sin recubrimiento
6	Acero al Carbono	Con recubrimiento
7	Acero al Carbono	Sin recubrimiento
8	Acero al Carbono	Con recubrimiento
9	Acero Inoxidable	Sin recubrimiento
10	Acero Inoxidable	Sin recubrimiento
11	Acero Inoxidable	Sin recubrimiento
12	Acero Inoxidable	Sin recubrimiento

2.1.4 Localización de las Muestras de concreto

Para la elaboración de los especímenes de estudio (EC, ECA) se utilizó la programación de concreto de cada planta de concreto premezclado, para la localización el concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, con CPO40 RS, y que fuera un elemento estructura, ver Figura 25.

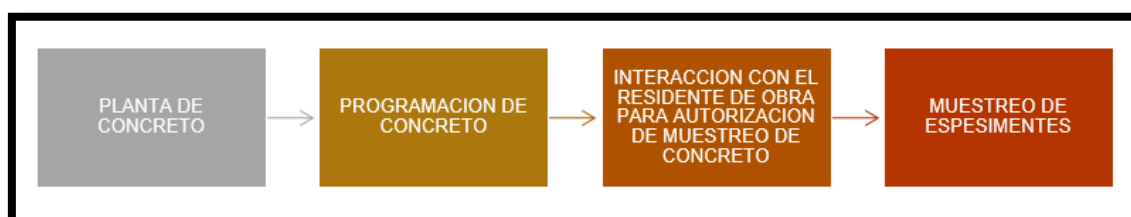


Figura 25.- Metodología para la localización del concreto

2.1.5 Pruebas realizadas al concreto fresco

Para la realización de estas pruebas en laboratorio y en obra, se utilizó el Manual del Técnico Publicación CP-1S (10) del ACI-Grado 1, que define los requerimientos para evaluar la calidad del concreto fresco, entre otros

requerimientos de la Norma Oficial NMX-C. A continuación se enlistan las pruebas al concreto fresco con las normas utilizadas:

- a) Concreto fresco muestreo: Norma ASTM C172-08 y la Norma NMX-C-161-ONNCCE-1997, [45] [46].
- b) Determinar la temperatura del concreto fresco: Norma ASTM C1064/C 1064M-08 y Norma NMX-C-435-ONNCCE-2010, [24] [23].
- c) Determinación del revenimiento en el concreto fresco: Norma ASTM C143/C 143M-08 y Norma NMX-C-156-ONNCCE-2010, [27] [26].
- d) Determinación de la masa unitaria: Norma ASTM C138/C 138M-08 y Norma NMX-C-162-ONNCCE-2010, [30] [29].
- e) Contenido de aire del concreto recién mezclado: Norma ASTM C231-08 y Norma NMX-C-157-ONNCCE-2006, [33] [32].
- f) Curado de Especímenes: Norma ASTM C31/C 31M-09 y Norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 y la Norma NMX-C-160-ONNCCE-2004, [37] [36] [34].

2.1.6 Identificación de los especímenes

Después de terminados los especímenes de cada muestra, a cada uno de ellos se les dio una clasificación dependiendo la planta de concreto y la muestra en la que se tomó.

La nomenclatura de identificación para los especímenes fue de la siguiente manera:

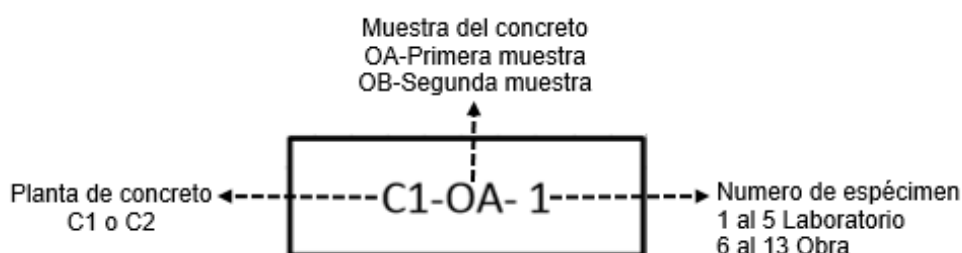


Figura 26.- Identificación de los especímenes

En la Figura 26 se muestra un ejemplo de la nomenclatura de un espécimen, donde fue muestreado con concreto de la planta de concreto C1, de la primera muestra y se elaboró en laboratorio de la planta de concreto.

2.2 Estación de campo

Para el desarrollo de la parte experimental referente a los procesos de resistencia a la compresión a nivel ambiente, los procesos de carbonatación y a la medición de potencial de corrosión, que permitan evaluar la resistencia del concreto y la cinética de corrosión en los especímenes EC y ECA, expuestas a un ambiente urbano, se colocaron los especímenes en la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja California, ver Figura 27 y 28.



Figura 27.- Instituto de Ingeniería de Mexicali



Figura 28.- Estación Meteorológica

Lo anterior, con el fin de poder obtener los datos de temperatura promedio, humedad relativa precipitación pluvial y velocidades del viento, etc. Con una mejor confiabilidad de datos.

2.3 Monitoreo de la estación de campo

El estudio consiste en someter aproximadamente a medio año de exposición dichos especímenes. Durante este tiempo se realizaron periódicamente pruebas, divididas en dos grupos: 1) pruebas realizadas a los especímenes EC y 2) pruebas realizadas a los especímenes ECA. Ambas se describen a continuación:

2.3.1 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto (EC)

Las mediciones que se realizaron a estos especímenes son:

- Resistencia a la compresión.
- Profundidad de carbonización.

2.3.1.1 Procedimiento de la medición de la resistencia a la compresión

Para realizar esta prueba se tomó un espécimen EC en laboratorio y un espécimen EC expuesto al ambiente de la misma edad y de la misma muestra de concreto. Estas pruebas se realizaron durante 7, 28, 79, 131 y 184 días aproximadamente.

Los equipos utilizados para realizar esta prueba fueron dos prensas hidráulicas; en la planta C1 se utilizó el equipo ALCON y en la planta C2 se utilizó el equipo FORNEY TEST EQUIPMENT, cuyas características es que son prensas eléctricas con tablero digital para ensaye a compresión, equipada con bombas de válvulas regulables de aplicación de carga, con un alcance de medición de 120,000 kg y retención de carga máxima, las cuales cumplen con la Norma ASTM C 39 [47].

El procedimiento que se realizó para las mediciones son las siguientes:

- a) Medición de los especímenes.
- b) Cabeceo de los especímenes.
- c) Ensaye de especímenes.
- d) Información de la resistencia a la compresión.
- e) Determinación de la resistencia a la compresión.

2.3.1.1.1 Medición de los especímenes

El registro de la medida de la altura y diámetro de los especímenes, antes de cabecear constituyen una valiosa información para los datos correspondientes a la resistencia del concreto.



Figura 29.- Medición de altura y diámetro de los especímenes EC

2.3.1.1.2 Cabeceo de los especímenes

Posteriormente se cabecean los extremos de los especímenes con mortero de azufre en base a los Norma ASTM C 617 [48] y la Norma NMX-C-109-ONNCCE-2010 [49], con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga.



Figura 30.- Colocación de Cabeceo de especímenes EC



Figura 31.- Especímenes EC cabeceados

2.3.1.1.3 Ensaye de especímenes

Alcanzado la resistencia mínima especificada del mortero de azufre, se ensaya los especímenes EC, con las prensas ya antes mencionadas, de acuerdo a las Normas ASTM C 39 [47] y la Norma NMX-C-083-ONNCCE-2002 [50], las cuales nos ayudará a obtener la carga máxima del espécimen y determinar la resistencia del concreto.



Figura 32.- Ensay de resistencia a la compresión de especímenes EC

2.3.1.1.4 Determinación de la resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión del concreto, se utilizó la ecuación que relaciona la carga máxima alcanzada por el espécimen, con el área de la superficie donde se aplicó la carga.

$$R_c = \frac{Carga}{\hat{Área}}$$

Donde:

R_c= Resistencia a la compresión del concreto, en Kg/cm²

Carga= Carga máxima alcanzada y registrada pos el espécimen, en Kg

Área= Área del espécimen, en cm²

De cada espécimen ensayado se obtuvo un registro de la información ya antes mencionada y se calculó la resistencia a la compresión.

Tabla 14.- Registro de datos de resistencia a la compresión

Resultados de la resistencia a la compresión															
Nom.	Muestreo	Edad de Ensayo	Fecha de Ensayo	Diam. 1 (cm)	Diam. 2 (cm)	Diam.Prom. (cm)	Área (cm ²)	Peralte 1 (cm)	Peralte 2 (cm)	Peralte Prom. (cm)	Carga (Kg)	Rc (Kg/ cm ²) Espesimen	Rc (Kg/ cm ²) Requerida	Coeficientes de conversión (%)	
C1-OA-1	Laboratorio	7	20/05/2015	14.90	14.90	14.90	174.37	29.80	29.90	29.85	33740	194	210	92	
C1-OA-2	Laboratorio	28	10/06/2015	14.90	14.90	14.90	174.37	29.70	29.80	29.75	40950	235	210	112	
C1-OA-3	Laboratorio	79	31/07/2015	14.90	14.90	14.90	174.37	29.70	29.70	29.70	43610	250	210	119	
C1-OA-4	Laboratorio	131	21/09/2015	14.90	14.90	14.90	174.37	29.60	29.60	29.60	47160	270	210	129	
C1-OA-5	Laboratorio	184	13/11/2015	14.90	15.10	15.00	176.72	29.80	29.90	29.85	46430	263	210	125	
C1-OA-6	Obra	7	20/05/2015	15.10	15.10	15.10	179.08	30.30	30.40	30.35	31800	178	210	85	
C1-OA-7	Obra	28	10/06/2015	15.20	15.20	15.20	181.46	30.30	30.30	30.30	37490	207	210	98	
C1-OA-8	Obra	79	31/07/2015	15.20	15.20	15.20	181.46	30.10	30.10	30.10	39990	220	210	105	
C1-OA-9	Obra	131	21/09/2015	15.10	15.10	15.10	179.08	30.20	30.20	30.20	34910	195	210	93	
C1-OA-10	Obra	184	13/11/2015	15.10	15.20	15.15	180.27	30.10	30.10	30.10	38850	216	210	103	

2.3.1.2 Procedimiento de la medición de la velocidad de carbonatación

Para esta prueba se usaron los espécimen EC expuestos al ambiente y que fueron ensayados por la prueba de resistencia a la a compresión. Esta prueba está basada a la Norma RILEM CPC-18 [51], que consiste en la determinación de la profundidad de la capa carbonatada en la superficie de concreto endurecido por medio de un indicador. Las mediciones se realizaron 27, 78, 130 y 183 días aproximadamente.

Esta prueba se realizó con una cortadora de metal de 14” marca MAKITA de 15 AMP y un disco diamantado de 14” para concreto, así como también un indicador (1% de fenolftaleína en 70 % de alcohol etílico) para la medición de la profundidad de la carbonatación de acuerdo a la Norma RILEM CPC-18[51]. Para la medición de la profundidad de la carbonatación, se fabricó una base

fotográfica con cámara de 8 megapíxeles y la instalación de dos software; AutoCAD 2014 [52] y ArcMap 10.2.1 [53] en una computadora.

El procedimiento que se realizó para las mediciones de la profundidad de carbonatación consistió en:

- a) Medir el corte del espécimen EC.
- b) Cortar del espécimen EC.
- c) Aplicar el indicador en el corte del espécimen EC.
- d) Medir la profundidad de carbonatación.
- e) Determinar la velocidad de carbonatación K.

2.3.1.2.1 Medición del corte espécimen EC

Se mide el espécimen EC, con una altura de 3 cm aproximadamente alrededor del espécimen, para poder realizar el corte y obtener una sección transversal del diámetro del espécimen.



Figura 33.- Medición del corte del espécimen EC

2.3.1.2.2 Corte del espécimen EC

Se realiza el corte en seco en la sección medida en el espécimen con la cortadora de metal y el disco diamantado, y posteriormente obtener la sección transversal del diámetro, con la altura de 3 cm.



Figura 34.- Corte en seco del espécimen EC



Figura 35.- Sección transversal del diámetro del espécimen EC de 3cm

2.3.1.2.3 Aplicación del indicador en el corte del espécimen EC

Después de realizado el corte, se retira de la cara interna del corte todo el material que queda suelto o polvo de la superficie. Después se le aplica con un atomizador el indicador elaborado.



Figura 36.- Limpieza de la superficie de corte



Figura 37.- Aplicación del indicador fenolftaleína la cara interna del corte

Posteriormente, sin que todo este procedimiento tarde más de 15 minutos se identificó y se protegió del ambiente, para poder trasportarla al laboratorio donde se realizaron otras mediciones de precisión.

2.3.1.2.4 Medición de la profundidad de carbonatación

En laboratorio se realizó la medición de la profundidad de carbonatación, utilizando la base fotográfica con cámara de 8 megapíxeles y los programas AutoCAD 2014 [52] y ArcMap 10.2.1 [53], para tener mediciones más precisas.

El procedimiento para la medición de la profundidad de la carbonatación se describe a continuación:

- Se introduce el corte del espécimen EC, en la base fotográfica a nivel y la colocación de una regla transparente de 10 cm encima del espécimen.



Figura 38.- Base fotográfica y cortes de espécimen EC



Figura 39.- Corte de espécimen EC dentro de base fotográfica

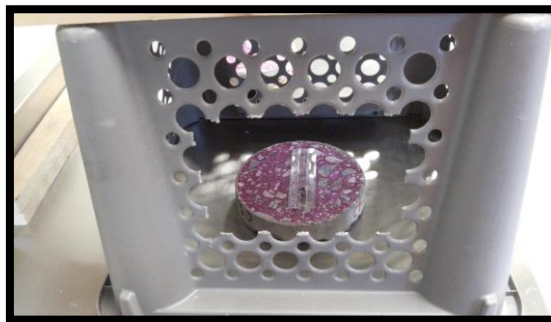


Figura 40.- Regla de 10 cm en corte de espécimen EC

- Posteriormente, se tomo una fotografía de 8 megapíxeles, la cual nos ayudó a obtener una imagen donde se pueda visualizar la carbonatación y poderla escalar en el programa AutoCAD 2014.

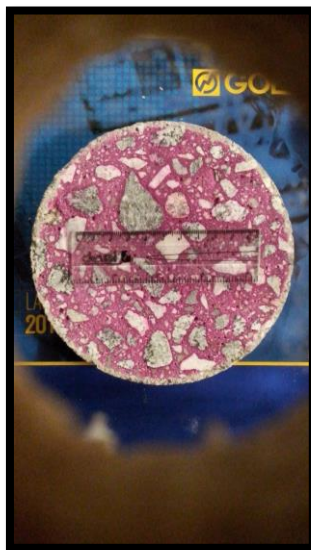


Figura 41.- Fotografía de corte del espécimen EC

- El programa AutoCAD 2014 ayudó a escalar el corte del espécimen EC, lo más aproximado a sus medidas reales, con el fin de realizar un levantamiento de su diámetro exterior y de la profundidad de carbonatación presente en el espécimen.

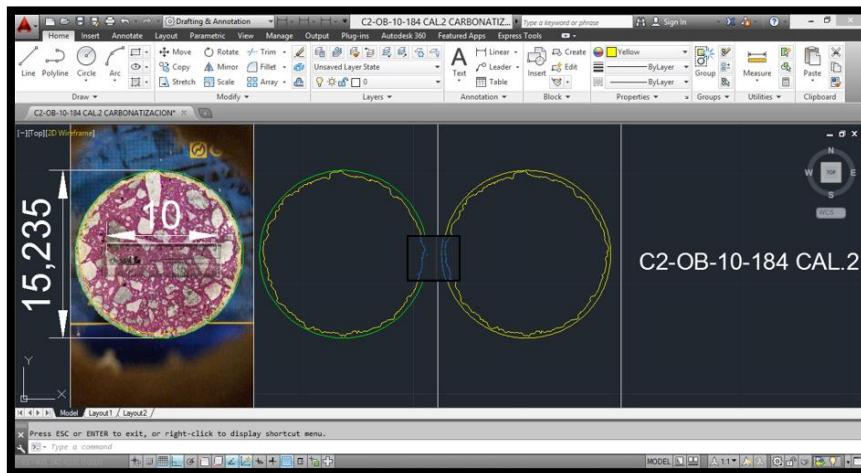


Figura 42.- Levantamiento de la profundidad de carbonatación con AutoCAD 2014 [52]

Realizado el levantamiento con programa AutoCAD 2014, se exporta el archivo al programa ArcMap 10.2.1, para poder obtener la medición de la profundidad de carbonatación.

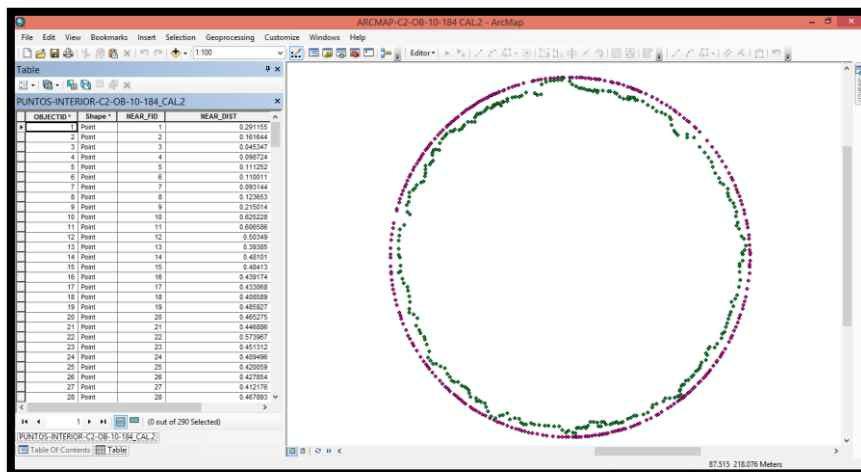


Figura 43.- Medición de la profundidad de carbonatación con ArcMap 10.2.1[53]

2.3.1.2.5 Determinación de la velocidad de carbonatación K

Para predecir la velocidad de carbonatación de los especímenes EC, se tiene la ecuación que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición.

$$K_C = \frac{X}{\sqrt{t}}$$

Donde:

K_C = Coeficiente de carbonatación, mm/año^{1/2}.

X= Profundidad de carbonatación, mm.

t= Tiempo en años.

De cada espécimen se obtuvo un registro y cálculo de la velocidad de carbonatación.

Tabla 15.- Formato para el registro de datos de carbonatación

Nom.	Muestreo	Relacion A/C	Fecha de exposición	Fecha de corte	Dias transcurridos	Tiempo en años	Numero de corte	Area Carb. Cm2	Profun. de carb. Promedio(mm)	Velocidad de carbonatación (Kc)
C1-OA-7	Obra	0.52	14/05/2015	10/06/2015	27	0.07	1	11.93	2.55	9.38
C1-OA-8	Obra	0.52	14/05/2015	31/07/2015	78	0.21	2	15.61	3.35	7.25
C1-OA-9	Obra	0.52	14/05/2015	21/09/2015	130	0.36	3	12.35	2.64	4.42
C1-OA-10	Obra	0.52	14/05/2015	13/11/2015	183	0.50	4	12.46	2.64	3.73
C1-OB-7	Obra	0.60	18/05/2015	17/06/2015	27	0.07	1	15.84	3.34	12.28
C1-OB-8	Obra	0.60	18/05/2015	05/08/2015	78	0.21	2	14.07	3.03	6.55
C1-OB-9	Obra	0.60	18/05/2015	26/09/2015	130	0.36	3	12.96	2.79	4.67
C1-OB-10	Obra	0.60	18/05/2015	18/11/2015	183	0.50	4	12.93	2.82	3.98
C2-OA-7	Obra	0.58	26/05/2015	22/06/2015	27	0.07	1	12.02	2.58	9.49
C2-OA-8	Obra	0.58	26/05/2015	12/08/2015	78	0.21	2	13.79	2.88	6.23
C2-OA-9	Obra	0.58	26/05/2015	03/10/2015	130	0.36	3	14.82	3.17	5.31
C2-OA-10	Obra	0.58	26/05/2015	25/11/2015	183	0.50	4	14.03	2.97	4.19
C2-OB-7	Obra	0.65	28/05/2015	24/06/2015	27	0.07	1	13.7	2.91	10.70
C2-OB-8	Obra	0.65	28/05/2015	14/08/2015	78	0.21	2	16.66	3.69	7.98
C2-OB-9	Obra	0.65	28/05/2015	05/10/2015	130	0.36	3	16.46	3.77	6.32
C2-OB-10	Obra	0.65	28/05/2015	27/01/2015	183	0.50	4	18.73	4.02	5.68

2.3.1 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto con acero (ECA)

La medición que se realizó a estos especímenes son:

- Potenciales de corrosión.

2.3.2.1 Procedimiento de la medición de potenciales de corrosión

Para esta prueba se usaron los especímenes ECA, la cual está basado a la Norma ASTM C 876 [40] que consiste en la determinación de la probabilidad de la actividad corrosiva del acero dentro del concreto. Las mediciones se realizaron

70, 84, 98, 112, 126, 140, 154, 168, 182 días aproximadamente, a cada una de las varillas embebidas en el concreto.

Esta prueba se realizó con un electrodo de cobre sulfato de cobre (CSC) portátil RE-5 M.C. MILLER, con dimensiones 3.5 cm de diámetros y 15 cm de largo aproximadamente, también un multímetro digital hp 3466A, caimanos eléctricos y esponja.

El procedimiento que se realizó para las mediciones de potenciales de corrosión:

- a) Preparación de los especímenes ECA.
- b) Medición de potencial de corrosión.

2.3.2.1.1 Preparación del espécimen ECA

Para la preparación de los especímenes ECA, se retiró 0.5 cm aproximadamente de la cubierta del plástica exterior del cable conductor que está conectado a cada varilla y tener contacto con el conductor de cobre, para posteriormente realizar las conexiones.

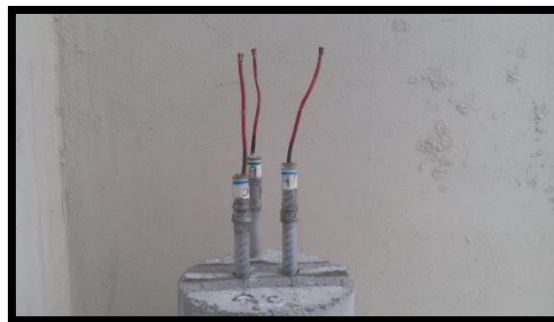


Figura 44.- Desalojo de la cubierta plástica del cable

Por otra parte se trazó en el espécimen, un cuadro de referencia para realizar todas las mediciones para evitar alteraciones en el valor del potencial.

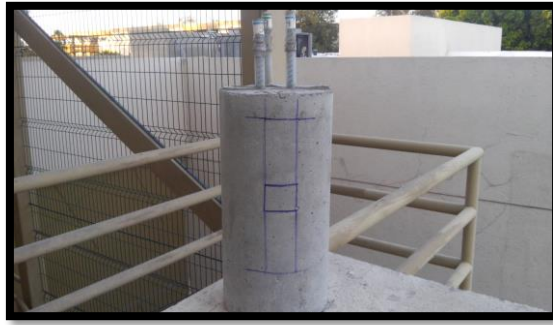


Figura 45.- Trazo de cuadro de referencia

En todas las mediciones de potencial, se humedeció los especímenes con una esponja limpia sobre el cuadro de referencia con agua destilada para no introducir contaminantes en las probetas.

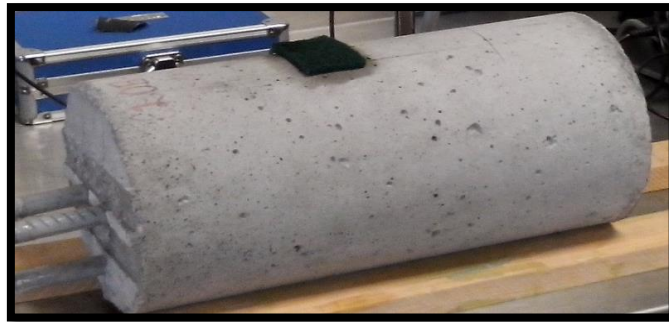


Figura 46.- Cuadro de referencia humedecido

2.3.2.1.2 Medición de potencial de corrosión

Se realizó la medición de potencial, con el multímetro digital en el rango de milivolts (mV), el cable positivo conectado con caimanos a una varilla embebida en el concreto (electrodo de trabajo) y el cable negativo se conecta al electrodo de referencia CSC.

Después el electrodo de referencia CSC, se apoya sobre una esponja humedecida con agua destilada, en el cuadro de referencia del espécimen.

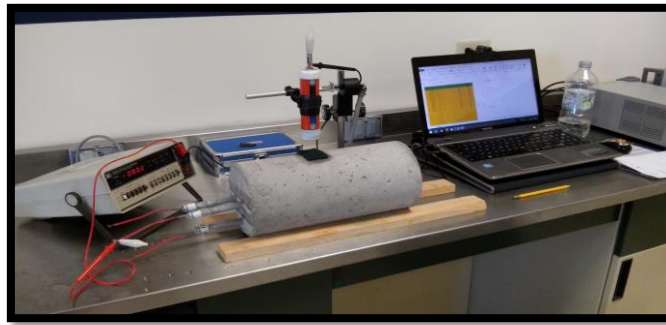


Figura 47.- Conexiones para la medición de potencial

Se registraron la mediciones de potencial en una base de datos, cuando la lectura se ha estabilizado ± 0.02 mV. Esto se repitió con cada varilla embebida en el concreto.

Tabla 16.- Formato para el registro de datos de potencial

Medición	Fecha de Medición	Nom.	Días	No. Varilla	Tem. Laboratorio (°F)	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC
1	22/07/2015	C1-OA-13	70	1	76	-126.67
1	22/07/2015	C1-OA-13	70	2	76	-128.48
1	22/07/2015	C1-OA-13	70	10	76	-142.47
2	05/08/2015	C1-OA-13	84	1	76	-101.19
2	05/08/2015	C1-OA-13	84	2	76	-133.09
2	05/08/2015	C1-OA-13	84	10	76	-177.74
3	19/08/2015	C1-OA-13	98	1	76	-93.86
3	19/08/2015	C1-OA-13	98	2	76	-122.65
3	19/08/2015	C1-OA-13	98	10	76	-167.62
4	02/09/2015	C1-OA-13	112	1	76	-93.22
4	02/09/2015	C1-OA-13	112	2	76	-120.84
4	02/09/2015	C1-OA-13	112	10	76	-167.12

3. Resultados

3.1 Resultados de las pruebas del concreto fresco

3.1.1 Resultados de temperatura

Tabla 17.- Resultados de temperatura del concreto fresco en obra

Muestra		A/C	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura Concreto (°C)
C1	OA	0.52	27.5	30.1
	OB	0.60	24.8	28.3
C2	OA	0.58	27.0	26.8
	OB	0.65	34.5	30.7

3.1.2 Resultados del revenimiento

Tabla 18.- Resultados de revenimientos del concreto fresco en obra

Muestra		A/C	Revenimiento (cm)
C1	OA	0.52	18
	OB	0.60	20
C2	OA	0.58	13
	OB	0.65	17

3.1.3 Resultados de la masa unitaria y rendimiento

Tabla 19.- Resultados de la masa unitaria del concreto fresco en obra

Muestra		A/C	Masa unitaria (Kg/cm ³)
C1	OA	0.52	2304
	OB	0.60	2299
C2	OA	0.58	2311
	OB	0.65	2253

3.1.4 Resultados de contenido de aire

Tabla 20.- Resultados de contenido de aire del concreto fresco en obra

Muestra		A/C	Contenido de aire (%)
C1	OA	0.52	1.4
	OB	0.60	2.3
C2	OA	0.58	4.9
	OB	0.65	5.5

3.2 Resultados de la prueba del concreto endurecido

3.2.1 Resultados a la prueba de resistencia a la compresión

Tabla 21.- Resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC en las muestras C1-OA y C1-OB a los 7, 28, 79, 131, 184 días

Muestra	Núm. EC	Muestreo	A/C	Edad de ensaye	Rc (Kg/cm ²)	Diseño Rc (Kg/cm ²)	Conversión (%)
C1	1	Laboratorio	0.52	7	194	210	92
	2			28	235		112
	3			79	250		119
	4			131	270		129
	5			184	263		125
	6	Obra		7	178		85
	7			28	207		98
	8			79	220		105
	9			131	195		93
	10			184	216		103
	1	Laboratorio	0.60	7	195		93
	2			28	245		117
	3			79	249		119
	4			131	270		129
	5			184	263		125
	6	Obra		7	174		83
	7			28	224		107
	8			79	235		112
	9			131	216		103
	10			184	219		104

Tabla 22.- Resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC en las muestras C2-OA y C2-OB a los 7, 28, 79, 131, 184 días

Muestra	Núm. EC	Muestreo	A/C	Edad de ensaye	Rc (Kg/cm ²)	Diseño Rc (Kg/cm ²)	Conversión (%)
C2	OA	Laboratorio	0.58	7	207	210	99
				28	233		111
				79	286		136
				131	274		131
				184	286		136
		Obra		7	197		94
				28	205		98
				79	219		104
				131	207		99
				184	221		105
	OB	Laboratorio	0.65	7	202		96
				28	216		103
				79	243		116
				131	239		114
				184	246		117
		Obra		7	160		76
				28	183		87
				79	172		82
				131	164		78
				184	174		83

3.3 Resultados de carbonatación

Tabla 23.- Resultados de carbonatación en 27 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra	Núm. EC	Muestreo	A/C	X*	Kc**
C1	OA	7	Obra	0.52	9.38
	OB			0.60	12.28
C2	OA			0.58	9.49
	OB			0.65	10.70

** X (profundidad de carbonatación, mm)

*** (Kc= Coeficiente de carbonatación, mm/año^{1/2})

Tabla 24.- Resultados de carbonatación en 78 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	X*	Kc**
C1	OA	8	Obra	0.52	3.35	7.25
	OB			0.60	3.03	6.55
C2	OA			0.58	2.88	6.23
	OB			0.65	3.69	7.98

** X (profundidad de carbonatación, mm)

*** (K_c= Coeficiente de carbonatación, mm/año^{1/2})

Tabla 25.- Resultados de carbonatación en 130 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	X*	Kc**
C1	OA	9	Obra	0.52	2.64	4.42
	OB			0.60	2.79	4.67
C2	OA			0.58	3.17	5.31
	OB			0.65	3.77	6.32

** X (profundidad de carbonatación, mm)

*** (K_c= Coeficiente de carbonatación, mm/año^{1/2})

Tabla 26.- Resultados de carbonatación en 183 días de exposición de especímenes EC de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	X*	Kc**
C1	OA	10	Obra	0.52	2.64	3.73
	OB			0.60	2.82	3.98
C2	OA			0.58	2.97	4.19
	OB			0.65	4.02	5.68

** X (profundidad de carbonatación, mm)

*** (K_c= Coeficiente de carbonatación, mm/año^{1/2})

3.4 Resultados de potenciales de corrosión

Tabla 27.- Resultados de potenciales de corrosión en 70 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-126.67
					2	-128.48
					10	-142.47
OB	0.60			3	-140.29	
				4	-128.07	
				9	-160.56	
C2	OA			0.58	5	-95.23
					6	-128.79
					11	-164.59
OB	0.65			7	-110.43	
				8	-150.15	
				12	-171.32	

Tabla 28.- Resultados de potenciales de corrosión en 84 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-101.19
					2	-133.09
					10	-177.74
OB	0.60			3	-114.76	
				4	-128.27	
				9	-161.34	
C2	OA			0.58	5	-85.07
					6	-125.72
					11	-164.51
OB	0.65			7	-84.93	
				8	-136.71	
				12	-155.65	

Tabla 29.- Resultados de potenciales de corrosión en 98 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-93.86
					2	-122.65
					10	-167.62
OB	0.60			3	-99.42	
				4	-130.14	
				9	-177.09	
C2	OA			0.58	5	-84.61
					6	-125.83
					11	-165.42
OB	0.65			7	-73.94	
				8	-121.43	
				12	-141.91	

Tabla 30.- Resultados de potenciales de corrosión en 112 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-93.22
					2	-120.84
					10	-167.12
OB	0.60			3	-121.81	
				4	-132.34	
				9	-174.64	
C2	OA			0.58	5	-97.56
					6	-127.99
					11	-161.11
OB	0.65			7	-77.18	
				8	-125.76	
				12	-137.83	

Tabla 31.- Resultados de potenciales de corrosión en 126 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC		
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-97.36		
					2	-118.84		
					10	-154.75		
OB	0.60			3	-118.57			
				4	-125.33			
				9	-166.49			
C2	OA			13	Obra	0.58	5	-82.18
							6	-129.45
							11	-166.73
OB	0.65					7	-82.34	
						8	-119.41	
						12	-163.88	

Tabla 32.- Resultados de potenciales de corrosión en 140 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC		
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-115.64		
					2	-125.48		
					10	-166.59		
OB	0.60			3	-109.82			
				4	-131.78			
				9	-157.95			
C2	OA			13	Obra	0.58	5	-85.84
							6	-124.65
							11	-164.48
OB	0.65					7	-83.54	
						8	-115.32	
						12	-145.89	

Tabla 33.- Resultados de potenciales de corrosión en 154 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC		
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-107.15		
					2	-128.96		
					10	-135.81		
OB	0.60			3	-102.27			
				4	-120.91			
				9	-160.72			
C2	OA			13	Obra	0.58	5	-88.33
							6	-128.79
							11	-162.57
OB	0.65					7	-80.95	
						8	-138.63	
						12	-147.52	

Tabla 34.- Resultados de potenciales de corrosión en 168 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC		
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-103.53		
					2	-122.87		
					10	-140.39		
OB	0.60			3	-110.38			
				4	-128.59			
				9	-170.62			
C2	OA			13	Obra	0.58	5	-92.67
							6	-131.52
							11	-159.69
OB	0.65					7	-91.78	
						8	-133.39	
						12	-141.47	

Tabla 35.- Resultados de potenciales de corrosión en 182 días de exposición de especímenes ECA de las muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB

Muestra		Núm. EC	Muestreo	A/C	Numero de varilla	Potencial de Corrosión Ecorr (mV) vs CSC		
C1	OA	13	Obra	0.52	1	-111.64		
					2	-130.49		
					10	-159.53		
OB	0.60			3	-123.89			
				4	-118.71			
				9	-156.28			
C2	OA			13	Obra	0.58	5	-96.22
							6	-133.15
							11	-157.88
OB	0.65					7	-96.29	
						8	-120.22	
						12	-140.56	

3.5 Resultados de estación meteorológica

3.5.1 Resultados de parámetros ambientales

Tabla 36.- Parámetros ambientales de Mayo del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC

Parámetros		Periodo	Primer Mes Mayo
Temperatura (°C)	Promedio		25.15
Humedad relativa (%)	Promedio		34.70
Precipitación pluvial (mm)	Suma		16.76
Velocidad del viento (m/s)	Promedio		2.53

Tabla 37.- Parámetros ambientales de Junio del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC

Parámetros \ Periodo		Segundo Mes Junio
Temperatura (°C)	Promedio	32.47
Humedad relativa (%)	Promedio	30.59
Precipitación pluvial (mm)	Suma	4.32
Velocidad del viento (m/s)	Promedio	2.65

Tabla 38.- Parámetros ambientales de julio del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC

Parámetros \ Periodo		Tercer Mes Julio
Temperatura (°C)	Promedio	34.21
Humedad relativa (%)	Promedio	33.47
Precipitación pluvial (mm)	Suma	1.78
Velocidad del viento (m/s)	Promedio	2.42

Tabla 39.- Parámetros ambientales de Agosto del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC

Parámetros \ Periodo		Cuarto Mes Agosto
Temperatura (°C)	Promedio	37.20
Humedad relativa (%)	Promedio	32.47
Precipitación pluvial (mm)	Suma	-----
Velocidad del viento (m/s)	Promedio	2.41

Tabla 40.- Parámetros ambientales de Septiembre del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC

Parámetros \ Periodo		Quinto Mes Septiembre
Temperatura (°C)	Promedio	33.08
Humedad relativa (%)	Promedio	37.20
Precipitación pluvial (mm)	Suma	-----
Velocidad del viento (m/s)	Promedio	2.09

Tabla 41.- Parámetros ambientales de Octubre del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC

Parámetros		Periodo	Sexto Mes Octubre
Temperatura (°C)	Promedio		27.73
Humedad relativa (%)	Promedio		31.86
Precipitación pluvial (mm)	Suma		-----
Velocidad del viento (m/s)	Promedio		1.95

Tabla 42.- Parámetros ambientales de Noviembre del 2015 de la estación meteorológica del instituto de ingeniería de Mexicali de la UABC

Parámetros		Periodo	Séptimo Mes Noviembre
Temperatura (°C)	Promedio		14.57
Humedad relativa (%)	Promedio		25.24
Precipitación pluvial (mm)	Suma		-----
Velocidad del viento (m/s)	Promedio		2.11

4. Discusión de resultados

4.1 Análisis de resultados de las pruebas del concreto fresco

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas del concreto fresco se analizó si estos resultados se encuentran dentro de los parámetros de aceptación de las especificaciones de la Norma NMX-C-155 ONNCCE 2014 [41], para un concreto convencional, las cuales se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 43.- Parámetros de aceptación del concreto fresco NMX-C-155 ONNCCE 2014 [41]

Prueba	Especificaciones
Temperatura (NMX-C-435-ONNCCE-2010)	Entre 10 y 32°C
Revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE-2010)	Menos de 5 +/- 1.5 cm De 5 a 10 +/- 2.5 cm Más de 10 +/- 3.5 cm
Masa Unitaria (NMX-C-162-ONNCCE-2014)	Entre 1900 kg/m ³ y 2400 kg/m ³
Rendimiento (NMX-C-162-ONNCCE-2014)	Entre 99% y 102%
Contenido de aire (NMX-C-157-ONNCCE-2006)	Entre 1 y 3%

4.1.1 Análisis de temperatura

Con los resultados obtenidos de la temperatura del concreto fresco, de cada muestra se puede afirmar que de acuerdo a las especificaciones antes mencionadas, la temperatura del concreto se encuentra dentro de los

parámetros de aceptación para su colocación en obra, como lo muestra la Figura 48.

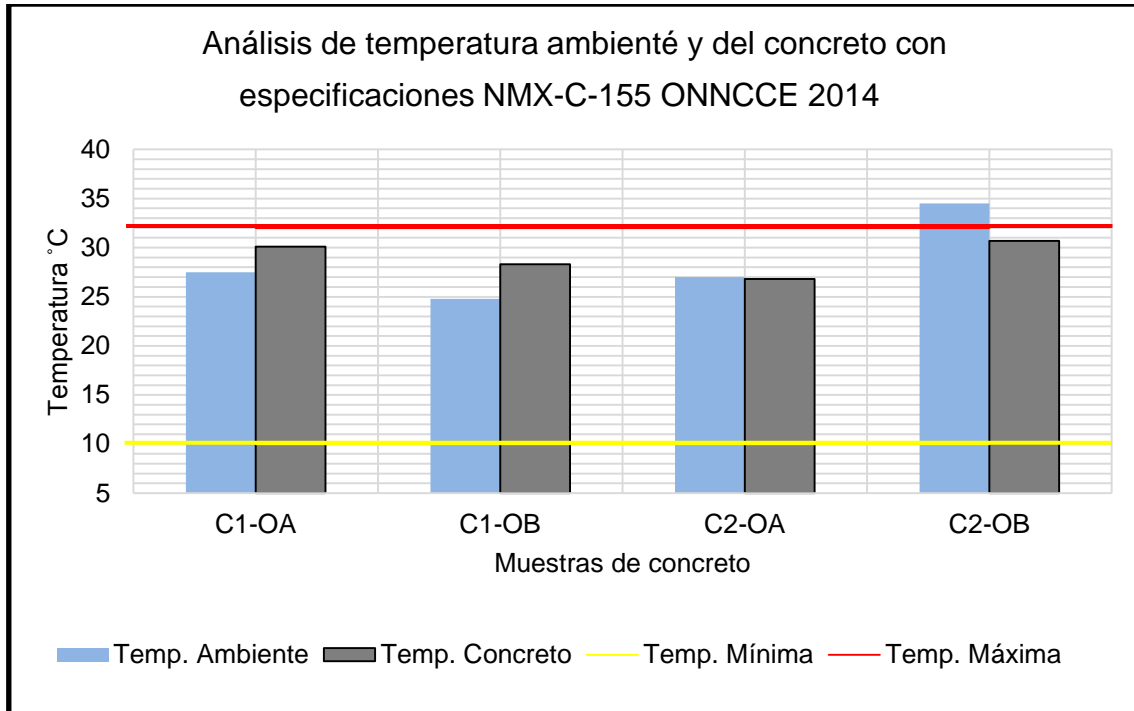


Figura 48.- Gráfica de análisis de resultados de temperatura ambiente y del concreto en las muestras de concreto, durante la colocación en obra

4.1.2 Análisis del revenimiento

Los resultados de los revenimientos del concreto fresco, muestra que según lo recomendado en las especificaciones antes mencionadas, las tres muestras para las cimentaciones (C1-OA, C1-OB y C2-OA) pasaron los revenimientos máximos especificados, lo cual no eran recomendable para la colocación del concreto en obra, excepto la muestra del entrepiso (C2-OB), que cumplió quedando por debajo del revenimiento máximo especificado, como lo muestra la Figura 49 y 50.

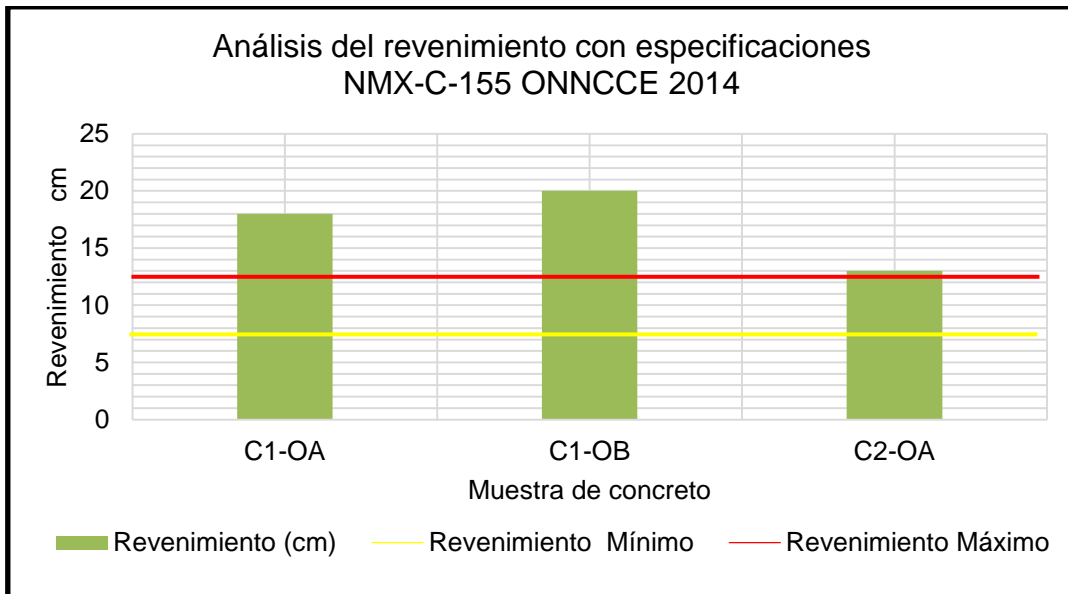


Figura 49.- Gráfica de análisis de resultados de revenimiento de las muestras de concreto de cimentaciones

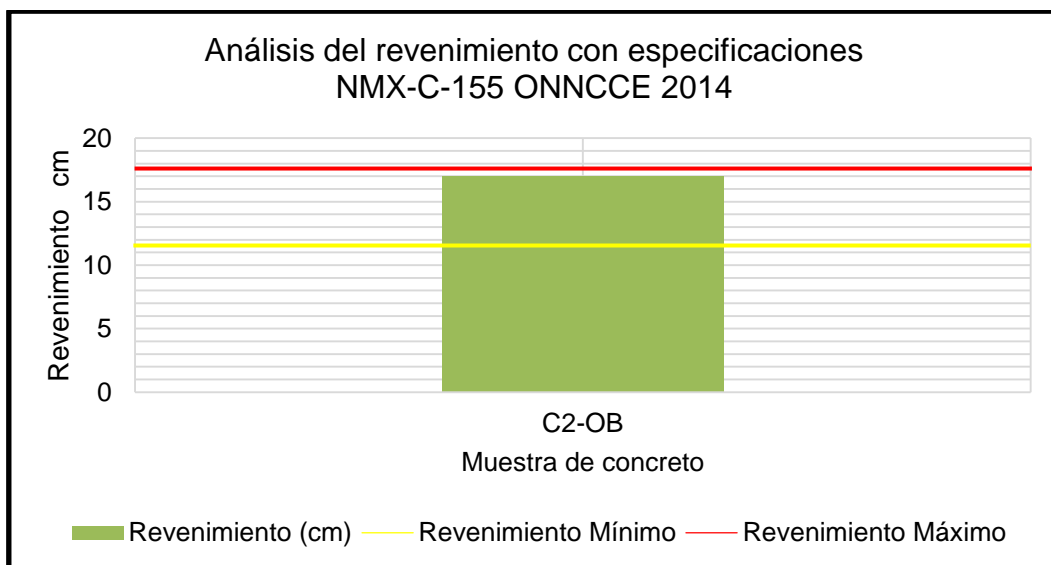


Figura 50.- Gráfica de análisis de resultados de revenimiento de la muestra de concreto del entrepiso

4.1.3 Análisis de masa unitaria y rendimiento

Los resultados de masa unitaria y el rendimiento de las muestras de concretos fresco, nos muestra que se encuentran dentro de los límites mínimos y máximos de las especificaciones ya antes mencionadas y como lo muestra la Figura 51 y 52.

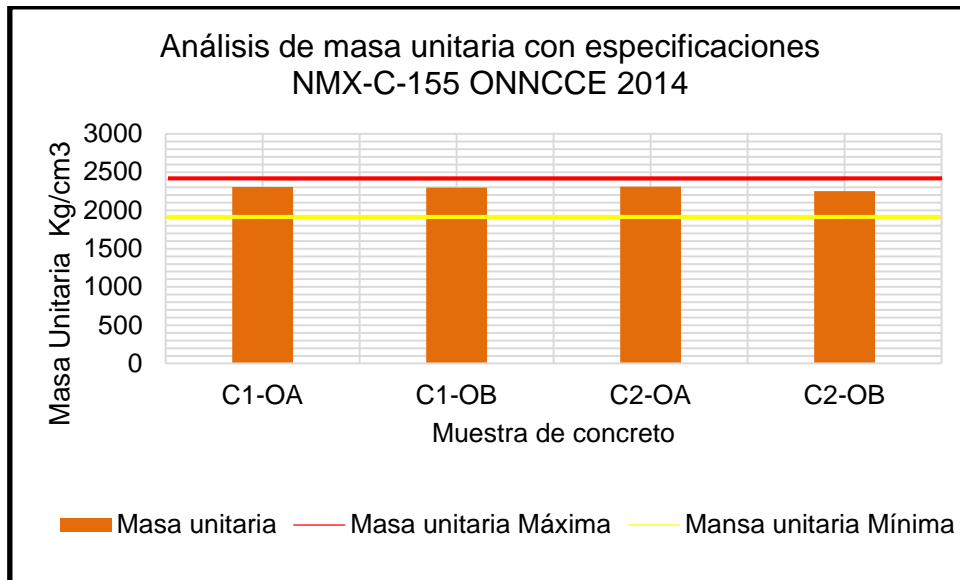


Figura 51.- Gráfica de análisis de resultados de masa unitaria de las muestras de concreto

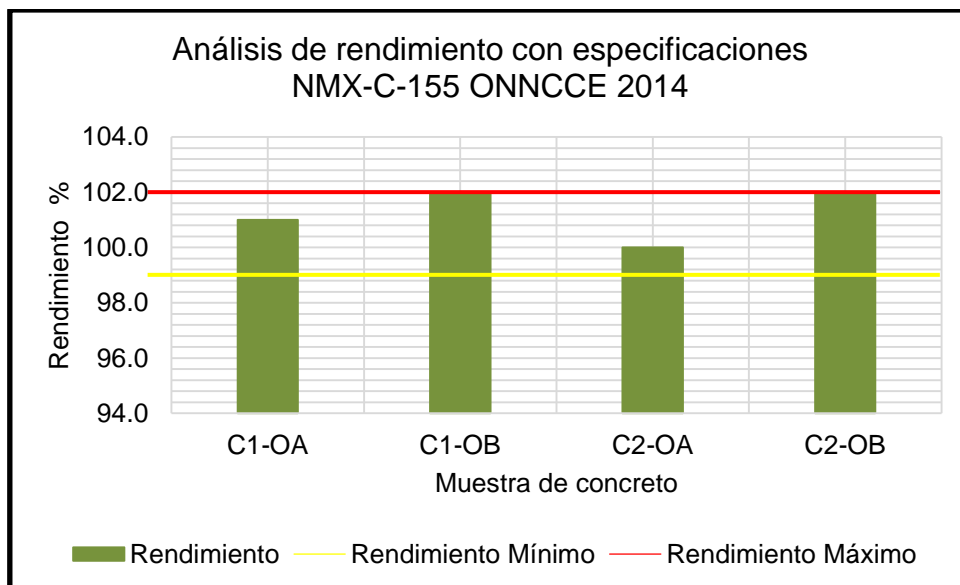


Figura 52.- Gráfica de análisis de resultados de rendimiento de las muestras de concreto

4.1.4 Análisis del contenido de aire

Con los resultados obtenidos del contenido de aire en el concreto fresco, se puede ver que las muestras C1-OA y C1-OB se encuentran en los límites mínimos y máximos de contenido de aire antes mencionado en las especificaciones y se puede tomar como concreto sin aire incluido. Por otra parte las muestras C2-OA y C2-OB sobre pasan los límites máximos especificados y se toman como concreto con aire incluido, como lo muestra la Figura 53.

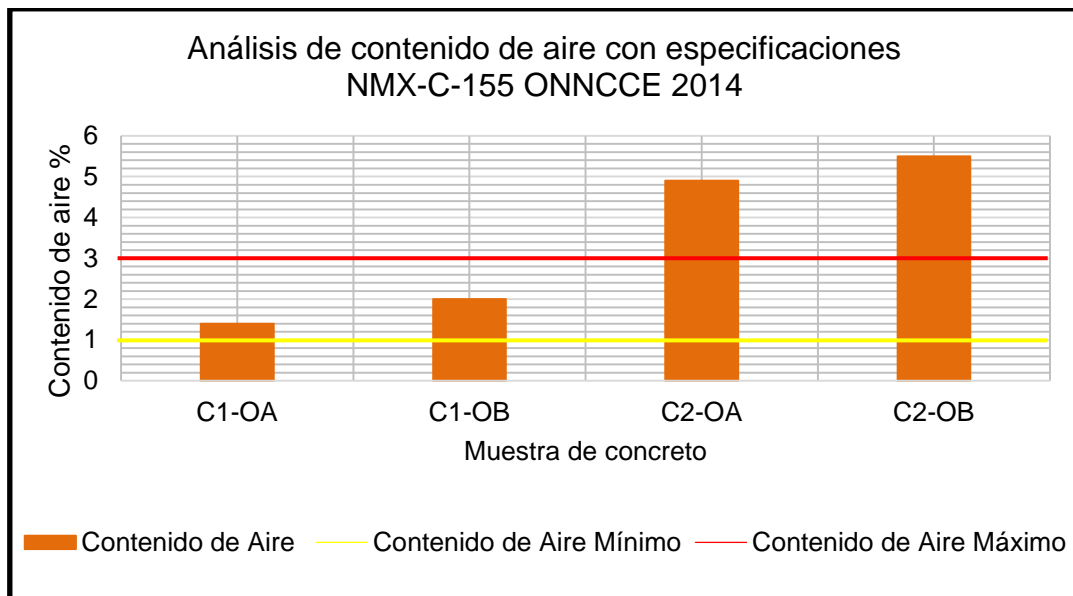


Figura 53.- Gráfica de análisis de resultados de contenido de aire de las muestras de concreto

4.2 Análisis de resultados de la prueba del concreto endurecido

Los resultados que se obtuvieron de las muestras ensayadas por la prueba de la resistencia a la compresión, se analizaron con los parámetros de aceptación para su cumplimiento de un concreto convencional, en base a las especificaciones de la Norma NMX-C-155 ONNCCE 2014 [41], mostrados en la Tabla 44. También se analizaron con la Tabla 45, adaptada por el ACI 211.1-1991[54]. La cual toma en cuenta la resistencia a la compresión aproximada para distintas relaciones a/c.

Tabla 44.- Parámetros de aceptación para la resistencia a la compresión NMX-C-155 ONNCCE 2014 [41]

Prueba	Especificaciones
Resistencia a la compresión (NMX-C-083-ONNCCE-2002)	El concreto debe alcanzar la resistencia especificada a la edad de 28 días u otra edad convenida.

Tabla 45.- Correspondencia entre la relación a/c y f'c del concreto ACI 211.1-1991[54]

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ² *	Relación agua/cemento	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	=
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

*Los valores son resistencias promedio estimadas para concreto que no tiene más del porcentaje de aire que se indica en la Tabla 46. Para una relación a/c constante se reduce la resistencia del concreto conforme se incrementa el contenido de air.

Tabla 46.- Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales recomendados [54]

Revenimiento		Agua, kg/m ³ de concreto para los tamaños máximos nominales de agregado indicados							
(cm)	(pulg)	9.5 mm (3/8)*	12.5 mm (1/2)*	19 mm (3/4)*	25 mm (1")*	37.5 mm (1 1/2)*	50 mm (2")**	75 mm (3")**	150 mm (6") **
Concreto sin aire incluido									
2.5 a 5.0	1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	6 a 7	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire		3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido									
2.5 a 5.0	1 a 2	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10	3 a 4	202	193	184	175	165	157	133	119
15 a 17.5	6 a 7	216	205	197	184	174	166	154	---
Contenido promedio [§] total de aire, para el nivel de exposición, %									
Exposición	Baja	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5**xx	1.0**xx
	Media	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5**xx	3.0**xx
	Extrema+++	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5**xx	4.0**xx

4.2.1 Análisis a la prueba de resistencia a la compresión de especímenes EC en laboratorio y expuestos al ambiente

Los resultados registrados de las resistencias a la compresión de los especímenes curados en laboratorio, mostraron resultados de resistencia más alta que la resistencia de diseño, con resistencias aproximadas del 234 kg/cm² para C1-OA-2, 245 kg/cm² para C1-OB-2, 233 kg/cm² para C2-OA-2 y 215 kg/cm² para C2-OB-2, las cuales cumplen con los parámetros de aceptación de la Norma NMX-C-155 ONNCCE 2014.

Y con los resultados registrados de la resistencia a la compresión de especímenes curados en ambiente, mostraron un resultado con resistencia alta

y tres resultados con resistencias bajas que la resistencia de diseño, con resistencias aproximadas de 206 kg/cm² para C1-OA-7, 224 kg/cm² para C1-OB-7, 205 kg/cm² para C2-OA-7 y 183 kg/cm² para C2-OB-7. Las tres resistencias bajas no cumplen con los parámetros de aceptación antes mencionados.

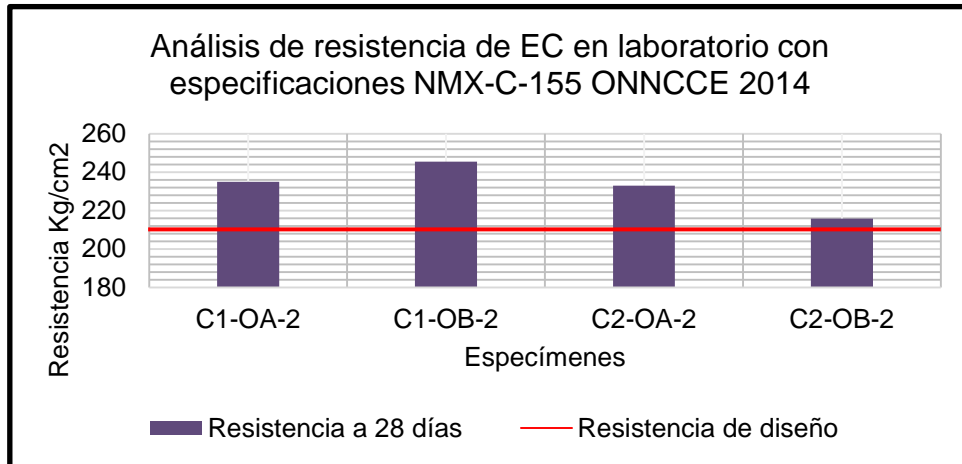


Figura 54.- Gráfica de análisis de resultados de resistencia a la compresión de los especímenes EC en laboratorio

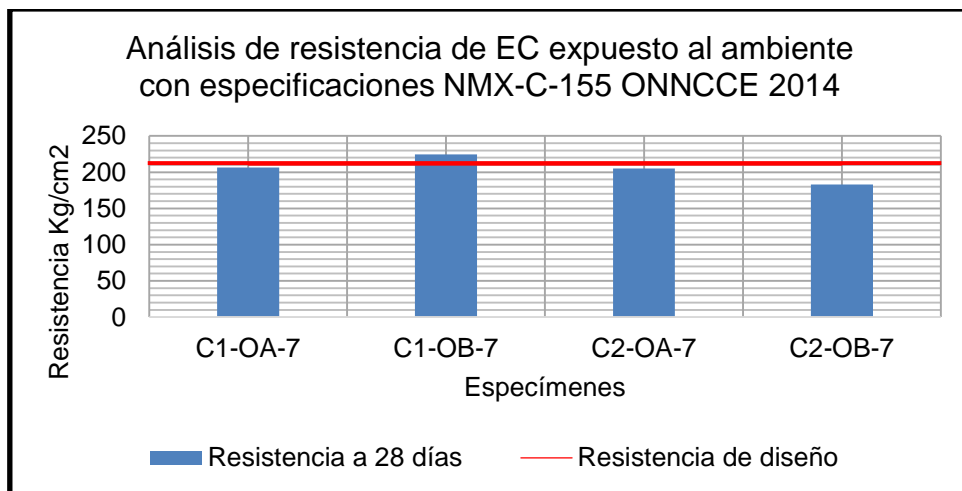


Figura 55.- Gráfica de análisis de resultados de resistencia a la compresión de los especímenes EC expuestos al ambiente

Para analizar la relación entre la resistencia a la compresión a 28 días y la relación a/c en la Tabla 45, se realizó una interpolación para obtener el valor equivalente para las muestras de concreto con relaciones a/c 0.52, 0.58, 0.60 y 0.65, donde se usaron los valores de las columnas de concreto sin aire incluido y con aire incluido, ya que lo analizado en el contenido de aire de la muestras de

concreto fresco las muestras C1-OA y C1-OB entran en los valores de concreto sin aire incluido y las muestras C2-OA y C1-OA entran en los valores de concreto con aire incluido. Ya realizadas las interpolaciones de las resistencias a la compresión a 28 días que les corresponde a cada relación a/c ya antes mencionadas se muestran en la Tabla 45.

Tabla 47.- Correspondencia entre la relación a/c y f'_c del concreto ACI 211.1-1991[54]

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²	Relación agua/cemento	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	=
350	0.48	0.40
319	0.52	-----
280	0.57	0.48
261	0.60	-----
216	-----	0.58
210	0.68	0.59
182	-----	0.65
140	0.82	0.74

En el análisis de los valores interpolados con respecto a los EC en laboratorio es mayor para la relación a/c 0.52, 0.58, 0.65 y menor para la relación a/c 0.60 que muestra las Tabla 48. Los análisis de los valores interpolados con respecto a los EC en ambiente son menores para la relación a/c 0.52, 0.60, 0.58 y mayor para la relación a/c 0.65 que muestra las Tabla 49.

Tabla 48.- Comparación de los valores obtenidos de la resistencia a la compresión a 28 días de EC en laboratorio con los valores que indica el ACI 211.1

Relación a/c	Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²		Evaluación de EC en laboratorio y ACI 211.1
	EC en laboratorio	ACI 211.1	
0.52	235	319	26 % menos aprox.
0.60	245	261	6 % menos aprox.
0.58	232	216	7 % mas aprox.
0.65	215	182	18 % mas aprox.

Tabla 49.- Comparación de los valores obtenidos de la resistencia a la compresión a 28 días de EC en ambiente con los valores que indica el ACI 211.1

Relación a/c	Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²		Evaluación de EC en ambiente y ACI 211.1
	EC en ambiente	ACI 211.1	
0.52	207	319	35 % menos aprox.
0.60	224	261	14 % menos aprox.
0.58	205	216	5 % menos aprox.
0.65	183	182	0.5% mas aprox.

4.3 Análisis de resultados de carbonatación

En los resultados que se obtuvieron de los especímenes ensayados por la prueba de la profundidad de carbonatación, se analizó el comportamiento de la profundidad de carbonatación de los EC de cada muestra (C1-OA, C1-OB, C2-OA C2-OB) y por otra parte se analizó la predicción del tiempo en que la carbonatación alcanzará acero de refuerzo con los coeficientes de carbonatación del cuarto corte de los especímenes C1-OA-10, C1-OB-10, C2-OA-10, C2-OB-10 basándonos a las especificaciones de la protección del concreto para el acero de refuerzo del ACI 318S[55].

Tabla 50.- Recubrimientos mínimos para el acero de refuerzo que indica el ACI 318S[55]

Caso	Recubrimiento Mínimo (mm)
	Concreto Reforzado
Concreto expuesto a suelo o a la intemperie: Barras No. 19 a No. 57	50
Concreto expuesto a suelo o a la intemperie: Barras No. 16, alambre (16 mm de diámetro) y menores	40

4.3.1 Análisis de resultados de la profundidad de carbonatación

Con los resultados de la profundidad de carbonación (X) que se obtuvieron en la estación de campo del Instituto de Ingeniería de Mexicali, se calculó el coeficiente de carbonatación (K_c), para cada uno de los EC expuestos a al ambiente, con la siguiente expresión:

$$K_c = \frac{X}{\sqrt{t}}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos de la profundidad de carbonatación de los cuatro cortes en la exposición de seis meses nos muestra que:

- Los EC elaborados con muestra C2-OB presentan un incremento de la profundidad de carbonatación del primer al cuarto corte y con el resultado más altos con 4.02 mm de la profundidad de carbonatación durante la exposición de seis meses con respecto a los EC de las muestras C1-OA, C1-OB y C2-OA.
- Los EC elaborados con la muestra C2-OA presenta un incremento de la profundidad de carbonatación del primer al tercer corte y un decremento del tercer al cuarto corte y presentando el resultado más alto con 2.97 mm de la profundidad de carbonatación durante la exposición de seis meses con respecto a los EC de las muestras C1-OA, C1-OB.

- Los EC elaborados con la muestra C1-OB presenta un decremento de la profundidad de carbonatación del primer al cuarto corte y presentando el resultado más alto con 2.82 mm de la profundidad de carbonatación durante la exposición de seis meses con respecto a los EC de las muestras C1-OA.
- Los EC elaborados con la muestra C1-OA presenta un incremento de la profundidad de carbonatación del primer al segundo corte y un decremento del segundo al cuarto corte y presentando el resultado más bajo con 2.64 mm de la profundidad de carbonatación durante la exposición de seis meses con respecto a los EC de las muestras C1-OB, C2-OA y C2-OB.

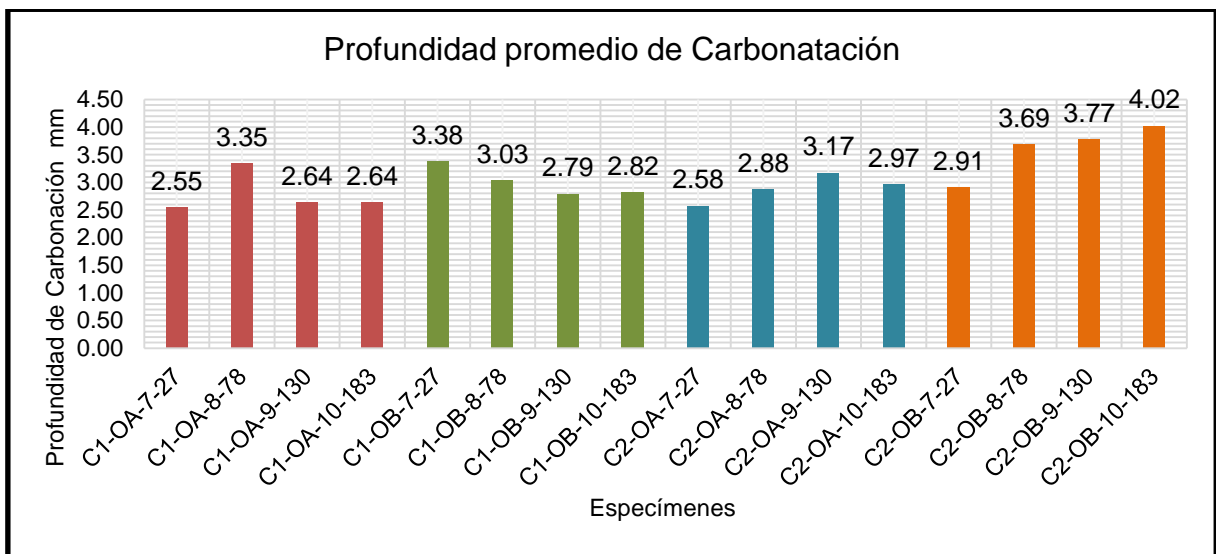


Figura 56.- Gráfica de análisis de resultados la profundidad promedio de carbonatación de los EC con exposición a seis meses

4.3.2 Análisis de la predicción del tiempo con los coeficientes de carbonatación del cuarto corte

Con los resultados de la profundidad de carbonatación del cuarto corte de los especímenes C1-OA-10, C1-OB-10, C2-OA-10, C2-OB-10 con exposición de

seis meses, se determinó el coeficiente de carbonatación, de las cuatro muestras de concreto C1-OA, C1-OB, C2-OA, C2-OB, con el fin de brindar un panorama más amplio del comportamiento de la carbonatación de las muestras de concreto.

Con los resultados de la determinación del coeficiente de carbonatación, es posible de pronosticar el avance de la misma y el tiempo en el cual la carbonatación llegará al acero de refuerzo en el concreto, mediante la siguiente fórmula:

$$t = \left(\frac{X}{K_c} \right)^2$$

El cálculo de la predicción del tiempo en el que el frente de carbonatación alcanzará al acero de refuerzo con base a las especificaciones de la protección del concreto para el acero de refuerzo mencionados anteriormente se muestra la Tabla 57.

Figura 57.- Tiempo en el que el frente de carbonatación alcanzará al acero de refuerzo para los EC expuestas a 183 días

Nomenclatura	Relación a/c	K _c	Tiempo en años	
			Protección del concreto para el acero de refuerzo del ACI 318S	
			40 mm	50 mm
C1-OA-10	0.52	3.73	115	180
C1-OB-10	0.60	3.98	101	158
C2-OA-10	0.58	4.19	91	142
C2-OB-10	0.65	5.68	50	78

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 58 se muestra el orden desde el primero al último en que el frente de carbonatación alcanzará al acero de las muestras de concreto (C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB).

Figura 58.- Orden en el que el frente de carbonatación alcanzará a las muestras de concreto

Orden	Muestra de concreto
1°	C2-OB
2°	C2-OA
3°	C1-OB
4°	C1-OA

4.4 Análisis de resultados de potenciales de corrosión

Los resultados que se obtuvieron de los especímenes ECA ensayados por la prueba de potencial de corrosión, se analizaron de acuerdo a la Norma ASTM C 879, los cuales muestran los criterios para el análisis en la Tabla 7.

Tabla 51.- Criterio de evaluación de las mediciones de potenciales de media celda [40]

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%

Los potenciales de corrosión que presentaron las varillas sin recubrimiento en los especímenes ECA, estuvieron en un rango de -70 a -140 mV aproximadamente. A continuación se describen los rangos que presentaron cada una:

- La varilla 1 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C1-OA, presentó rangos de -93 a -126 mV.
- La varilla 3 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C1-OB, presentó rangos de -99 a -140 mV.
- La varilla 5 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C2-OA, presentó rangos de -82 a -97 mV.

- La varilla 7 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C2-OB, presentó rangos de -73 a -110 mV.

En base a los criterios para evaluar potencial de corrosión de la ASTM C 876, los rangos de las varillas (1, 3,5 y 7) sin recubrimiento de las cuatro muestras (C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB) se encuentran arriba de los -200 mV, que señala menor al %5 de probabilidad de que pueda existir corrosión y la varillas se encuentren en estado pasivo.

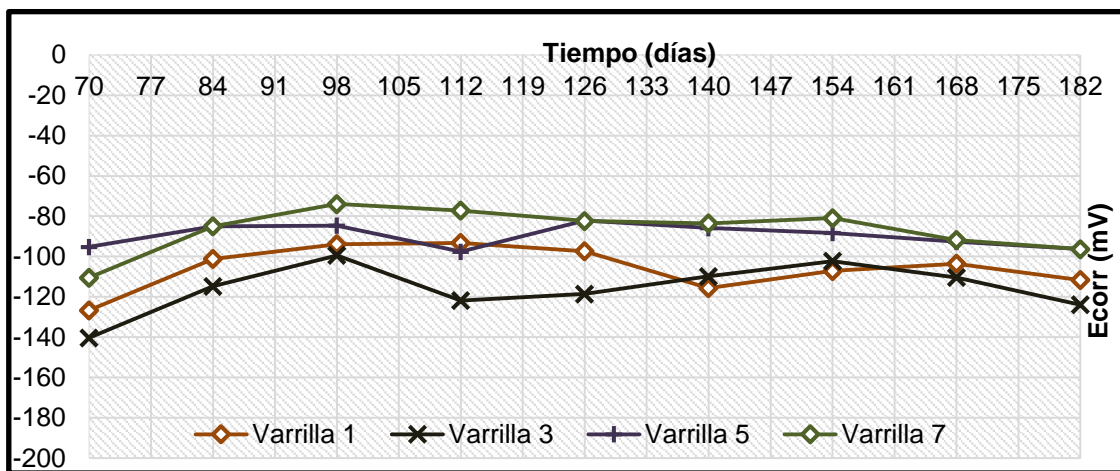


Figura 59.- Gráfica de resultado de potencial de corrosión para varillas sin recubrimiento de los ECA con exposición a seis meses

En la varillas con recubrimiento los potenciales de corrosión que presentaron en los especímenes ECA, estuvieron en un rango de -115 a -150 mV. A continuación se describen los rangos que presentaron cada una:

- La varilla 2 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C1-OA, presentó rangos de -118 a -133 mV.
- La varilla 4 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C1-OB, presentó rangos de -118 a -132 mV.
- La varilla 6 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C2-OA, presentó rangos de -124 a -133 mV.
- La varilla 8 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C2-OB, presentó rangos de -115 a -150 mV.

En base a los criterios para evaluar potencial de corrosión de la ASTM C 876, los rangos de las varillas (2, 4, 6 y 8) con recubrimiento de las cuatro muestras (C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB) se encuentran arriba de los -200 mV, que señala menor al %5 de probabilidad de que pueda existir corrosión y la varillas se encuentren en estado pasivo.

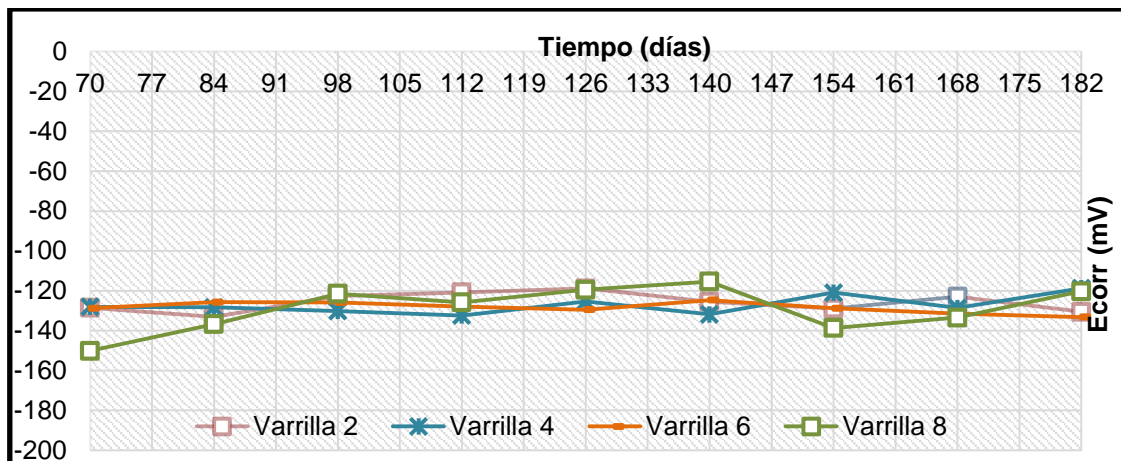


Figura 60.- Gráfica de resultado de potencial de corrosión para varillas con recubrimiento de los ECA con exposición a seis meses

Por otra parte las varillas acero inoxidable 304 los potenciales de corrosión que presentaron en los especímenes ECA, estuvieron en un rango de -135 a -177 mV aproximadamente. A continuación se describen los rangos que presentaron cada una:

- La varilla 10 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C1-OA, presentó rangos de -135 a -177 mV.
- La varilla 9 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C1-OB, presentó rangos de -156 a -177 mV.
- La varilla 6 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C2-OA, presentó rangos de -157 a -166 mV.
- La varilla 8 de los especímenes ECA elaborados con la muestra C2-OB, presentó rangos de -137 a -171 mV.

En base a los criterios para evaluar potencia de corrosión de la ASTM C 876, los rangos de las varillas (9, 10, 11 y 12) de acero inoxidable 304 de las cuatro muestras (C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB) se encuentran arriba de los -200 mV, que señala menor al %5 de probabilidad de que pueda existir corrosión y la varillas se encuentren en estado pasivo.

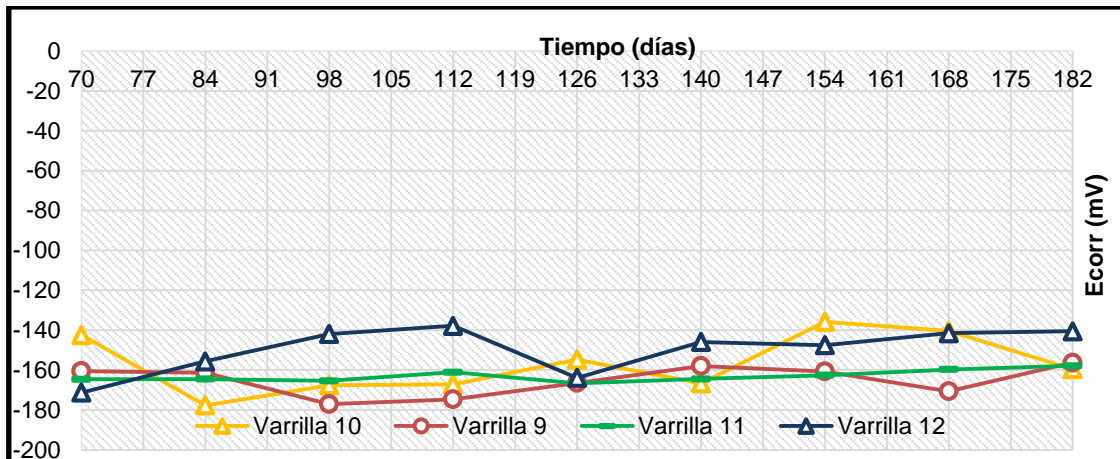


Figura 61.- Gráfica de resultado de potencial de corrosión para varillas de acero inoxidable 304 con recubrimiento de los ECA con exposición a seis meses

De acuerdo con los evaluaciones obtenidas en la Tabla 52 se muestra el orden desde el primero al último, de las varillas que presentaron rangos más negativos de mV en la prueba de potencial de corrosión en los especímenes ECA con las muestras de concreto (C1-OA, C1-OB, C2-OA y C2-OB).

Tabla 52.- Orden de las varillas que presentaron rangos de voltaje más negativos (mV)

Orden	Varillas	Rango (mV)
1°	Acero inoxidable 304	-135 a -177
2°	Acero al carbono con recubrimiento	-115 a -150
3°	Acero al carbono sin recubrimiento	-70 a -140

Conclusiones

El deterioro por corrosión de las estructuras de concreto armado es un fenómeno cuyo proceso involucra la interacción continua del medio ambiente con el concreto, por lo cual es importante conocer las causas de su origen y desarrollo para controlarlo a fin de prolongar la vida útil de las obras civiles.

La influencia del medio ambiente en el deterioro del concreto es fundamental para medios marinos, rurales y urbanos. En el caso de Mexicali se encuentra en un medio urbano, por esta razón el concreto debe ser diseñado con los requerimientos específicos de servicio para cada estructura de acuerdo al sitio en que sea construido.

Con los resultados de las evaluaciones que se realizaron en el presente trabajo de tesis podemos concluir:

- Los resultados de la calidad del concreto fresco de las muestras de concretos convencionales utilizados para la elaboración de los especímenes EC y ECA, no cumplieron con todas las especificaciones del concreto fresco, que marca la NMX-C-155 ONNCCE 2014.
- Los resultados de la calidad de concreto endurecido de las muestras de concretos convencionales por medio de la prueba de resistencia a la compresión de los especímenes EC en laboratorio y expuesto al ambiente, presentaron resultados favorables los especímenes EC en laboratorio de las cuatro muestras C1-OA, C1-OB, C2-OA, C2-OB a los 28 días, cumpliendo con lo indicado en las especificaciones NMX-C-155 ONNCCE 2014, que el concreto debe alcanzar la resistencia especificada a la edad de 28 días en este caso $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$. En los especímenes EC expuestos al ambiente, elaborados con las muestras C1-OB, C2-OA, C2-OB presentaron resultados desfavorables a los 28 días, no

cumpliendo con lo indicado en la norma ya antes mencionada, excepto el espécimen EC expuesto al ambiente elaborado con la muestra C1-OA.

- Los resultados de la profundidad de carbonatación, de los especímenes EC expuestos al ambiente, presentaron profundidades 2.6mm (C1-OA), 2.8mm (C1-OB), 2.9mm (C2-OA) y 40mm (C2-OB) en una exposición de 183 días al ambiente urbano de Mexicali, las cuales nos dan predicción del tiempo con los coeficientes de carbonatación, donde nos indicó que alcanzará primero al acero del espécimen EC elaborado con la muestra C2-OB, la cual presentó una resistencias de $f'c=174 \text{ kg/cm}^2$ quedando por debajo de la resistencia de diseño y la cual presentaba la relación a/c más alta.
- Los resultados del potencial de corrosión de los especímenes ECA, expuestos al ambiente, nos indicó que el acero de los especímenes elaborados con las cuatro muestras (C1-OA, C1-OB, C2-OA, C2-OB) se encontraba pasivo durante la exposición al ambiente de 183 días, con probabilidad menor al %5 de que pueda existir corrosión en base a las especificaciones de la Norma ASTM C 876.

Por otra parte la metodología experimental para la evaluación de los objetivos planteados en este trabajo, se enfocó en otras metodologías ya implementadas para la evaluación de la corrosión del concreto reforzado en ambientes urbanos, la cual se apoya con diferentes normas como la NMX-C, ASTM, RILEM. La cual se puede tomar como una metodología estandarizada para este tipo de evaluación.

La hipótesis empleada en este trabajo puede afirmar que el acero dentro de los concretos convencionales se encuentra en estado pasivo durante los seis meses de exposición al ambiente, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos de la

carbonatación son inferiores para alcanzar al acero de refuerzo dentro de los meses de estudio.

Por lo tanto es indispensable incluir una rutina de inspección en la infraestructura de concreto, en la zona urbana de Mexicali, Baja California, así como promover una normativa que incluya una evolución de la profundidad de la carbonatación del concreto, así como también técnicas electroquímicas para poder asegurar las condiciones del acero de refuerzo.

Bibliografía

- [1]Rendon Belmonte, M. (Septiembre de 2013). Estudio de la película de óxido formada en la superficie de a armadura metlica de estructuras de concreto protegidas catódicamente. Mexicali, Baja California.
- [2]Castro P, Castillo R, Carpio J, Genescá J, Helene P, López W, . . . Véleva L. (1998). *Corrosión en estructuras de concreto armado* (Primera ed.). D. F., Mexico: IMCYC.
- [3]Raicho R, Veleva L, & Valdéz B. (2009). *Corrosión de metales y degradación de materiales*. Mexicali, Baja California, México: Departamento de Editorial Universitaria.
- [4]Sanjuán M, & Castro P. (2001). *Acción de los agenes quimicos y físicos sobre el concreto* (Primera ed.). D.F., México: IMCYC.
- [5]López Celis, R., Pérez Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M., Martínez Molina, W., Ariza Aguilar, L. E., . . . Valdez Salas, B. (2006). Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. *Publicación Técnica No. 292*. Sanfandila, Querétaro, México: IMT.
- [6]García Rodríguez, F. (2011). Corrosión del acero del refuerzo. *Construcción y tecnología en concreto*, 1(07).
- [7]Hernández Sangabriel, H. (2008). Comportamiento de la corrosión en el concreto armado y su relación con el medio ambiente en la zona de Tampico, Tamaulipas. *Tesis para obtener el titulo de ingeniero civil*. Xalapa, Veracruz, México.
- [8]Trocónis de Rincón Oladis y miembros de la Red DURAR. (Agosto de 2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en*

Estructuras de Hormigón Armado.-, Tercera Edición, 13-40. Maracaibo, Venezuela.

- [9] Lee Orantes , F., Torres Acosta , A., Terán Guillén , J., & Martínez Madrid , M. (2006). Caracterización de un sistema de refuerzo-protección en elementos de concreto reforzado dañados por corrosión, utilizando compuestos base fibras de carbón. *Publicación Técnica No 295* . Sanfandila, Querétaro: IMT.
- [10] Solano Rodríguez, S. A., Estupiñán Durán, H. A., Vásquez Quintero, C., & Peña Ballesteros, D. Y. (2013). Simulación de la difusión del Cl⁻ hasta la despasivación del acero de refuerzo en concreto con microsílice y expuesto a carbonatación. *Revista Boletín Ciencias de la Tierra*.
- [11] Campos Silva, A. R. (Diciembre de 2011). Estudio de la carbonatación del concreto en condiciones aceleradas y naturales: aplicación al ambiente de la zona metropolitana de Monterrey. *Tesis para obtener el título el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción*. Montarey, Nuevo León, México.
- [12] Francois , R., & Arliguie, G. (1994). *Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment ACI SP-145* . EUA: American Concrete Institute.
- [13] Montani, R. (Diciembre 2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Contruccion y Tecnologia*.
- [14] SEDESOL. (2011). *Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali, B.C.* Mexicli: Programa Hábitat 2010.
- [15] NMX-C-414. (2014). Industria de la construcción, cementantes hidráulicos, especificaciones y métodos de ensayo. *ONNCCE*. México.

- [16]Del Valle A, Pérez T, & Martínez M. (2001). El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Publicación Técnica No. 182*. Sanfandila, Queretaro, México: IMT.
- [17]NMX-C-111. (2014). Industria de la construcción, agregados para concreto hidráulico, especificaciones y métodos de ensayo. *ONNCCE*. México.
- [18]Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (Primera Edición ed.). EE.UU.: Portland Cement Association.
- [19]Viveros Castillo, O. A. (Octubre de 2008). Comportamiento del potencial de corrosión de concreto reforzado expuesto al ambiente de la ciudad de Xalapa, Veracruz. *Tesis para obtener el título de ingeniero civil*. Xalapa, Veracruz, México.
- [20]NMX-C-122. (2004). Industria de la construcción, agua para concreto especificaciones. *ONNCCE*. México.
- [21]IMCYC. (Junio de 2004). Para hacer un buen concreto. *Conceptos Básicos del Concreto*. México.
- [22]IMCYC. (Octubre de 2007). El concreto en obra- problemas, causas y soluciones. *Pruebas al concreto fresco*. México.
- [23]NMX-C-435. (2010). Industria de la construcción, concreto hidráulico, determinación de la temperatura del concreto fresco. *ONNCCE*. México.
- [24]ASTM-C1064/C1064M-08. (2011). Método de ensaye estandar para la medición de temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado. En *Certificacion del ACI-Grado 1* (págs. 9-16).
- [25]IMCYC. (Noviembre de 2007). El concreto en obra- problemas, causas y soluciones . *Pruebas al concreto fresco Revenimiento*. México.

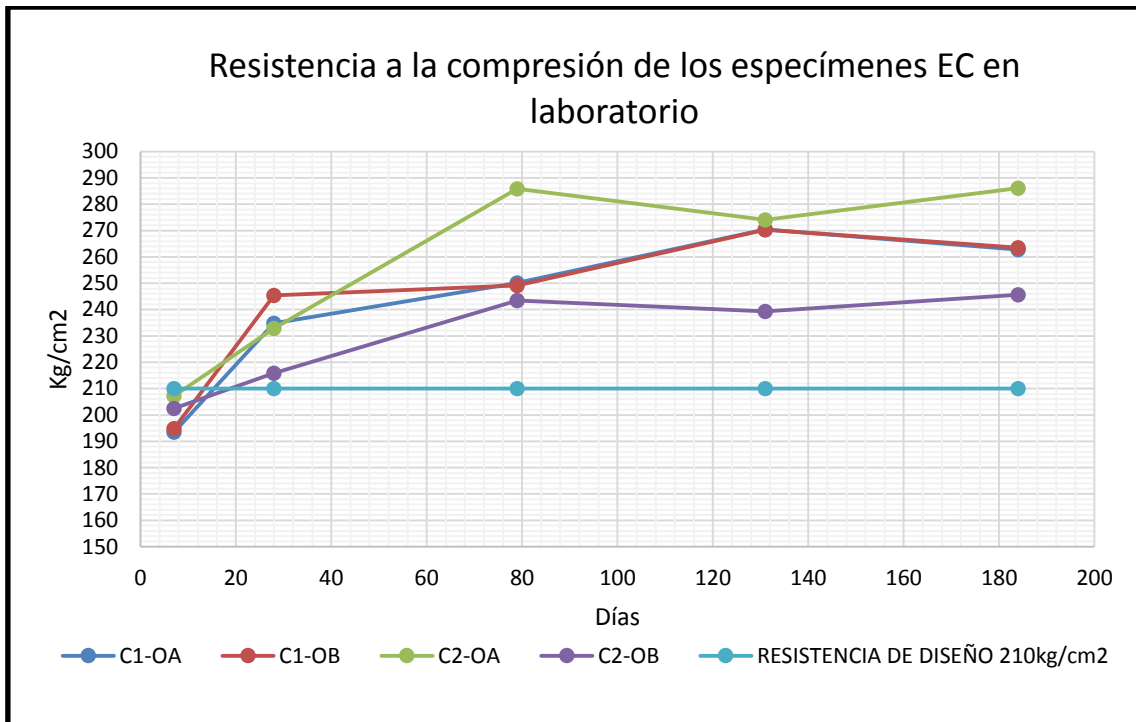
- [26]NMX-C-156. (2010). Industria de la construcción, concreto hidráulico, determinación del revenimiento en el concreto fresco. *ONNCCE*. México.
- [27]ASTM-C143/C143M-08. (2011). Método de ensaye estándar para a determinación del revenimiento en el concreto a base de cemento hidráulico. En *Certificación del ACI-Grado 1* (págs. 25-34).
- [28]IMCYC. (Diciembre de 2007). El concreto en obra- problemas, causas y soluciones. *Determinación de la masa unitaria*. México.
- [29]NMX-C-162. (2014). Industria de la construcción, concreto hidráulico, determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por método gravimétrico. En *ONNCCE*. México.
- [30]ASTM-C-138/C138M-08. (2011). Método de ensaye estándar para determinar por medio del método gravimétrico peso unitario, volumen producido y contenido de aire del concreto. En *Certificación del ACI-Grado 1* (págs. 36-45).
- [31]IMCYC. (Enero de 2008). El concreto en obra- problemas, causas y soluciones. *Determinación del de aire del concreto recién mezclado por el método de presión*. México.
- [32]NMX-C-157. (2006). Industria de la construcción, concreto hidráulico, determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión. *ONNCCE*. México.
- [33]ASTM-C-231-08b. (2011). Método de ensaye estándar, para determinar por método de presión, el contenido de aire del concreto recién mezclado. En *Certificación del ACI-Grado 1* (págs. 48-64).
- [34]NMX-C-160. (2004). Industria de la construcción, concreto, elaboración y curado en obra de especímenes de concreto. *ONNCCE*. México.

- [35]Solís Carcaño, R., & Moreno, E. (11 de Noviembre de 2005). Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo. México, Yucatán.
- [36]NMX-C-159. (2004). Industria de la construcción, concreto hidráulico, elaboración y curado de especímenes den laboratorio. *ONNCCE*. México.
- [37]STM-C31/C31M-09. (2011). Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra. En *Certificación del ACI-Grado 1* (págs. 83-96).
- [38]IMCYC. (Mayo de 2006). El concreto en obra- problemas, causas y soluciones. *Baja resistencia en los resultados de ensaye de cilindros de concreto*. México.
- [39]IMCYC. (Junio de 2006). El concreto en obra- problemas, causas y soluciones. *Pruebas de resistencia a la compresión del concreto*. México.
- [40]ASTM-C-876. (1999). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. *American Society for Testing and Materials*. EUA.
- [41]NMX-C-155. (2014). Industria de la construcción, concreto hidráulico, dosificación de masa, especificaciones y métodos de ensayo. *ONNCCE*. México.
- [42]ASTM-C-33. (2002). Stndard specification for concrete aggregates. *American Society for Testing and Materials*. EUA.
- [43]Sikaflex-1a. (2010). *Sellador elásatico de pliuterano de alto desempeño*. México.
- [44]SikaTop-Armtec -110-EpoCem. (s.f.). *Recubrimiento anicorrosivo y puente de adherencia* . México.

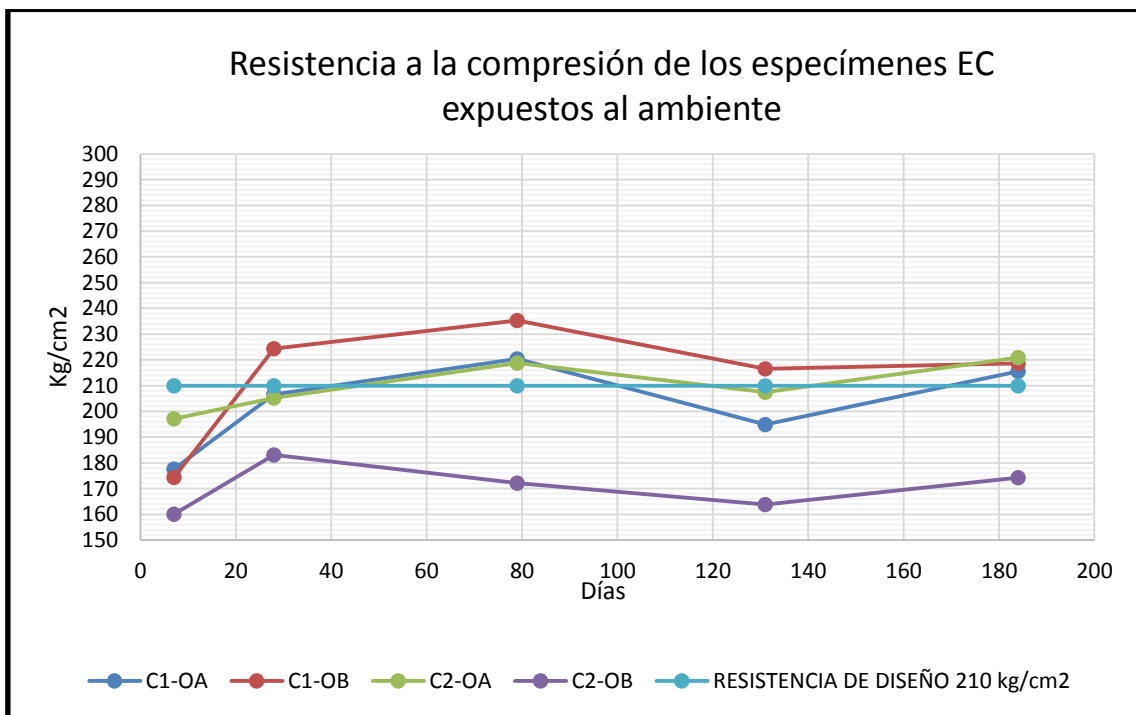
- [45]ASTM-C172-08. (2011). Práctica Normalizada para Muestreo de Concreto Recién Mezclado. En *Certificación del ACI-Grado 1* (págs. 17-24).
- [46]NMX-C-161. (1997). Industria de la construcción, concreto fresco, muestreo. ONNCCE. México.
- [47]ASTM-C-39. (2004). Compressive strength of cylindrical concrete specimens. *American Society for Testing and Materials*. EUS.
- [48]ASTM-C617. (2003). Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. *American Society for Testing and Materials*. EUA.
- [49]NMX-C-109. (2013). Industria de la construcción, concreto hidráulico, cabeceo de especímenes. En ONNCCE. México.
- [50]NMX-C-083. (2014). Industria de la construcción, concreto, determinación de la resistencia a la compresión de especímenes, métodos de ensayo. En ONNCCE. México.
- [51]RILEM. (1998). CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures, Volumen 21(Numero 126)*.
- [52]AutoCAD 2014
- [53]ArcMap 10.2.1
- [54]ACI-Comite211. (1991). Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete. *American Society Institute*. EUA.
- [55]ACI-Comité318. (2005). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. *American Society Institute*. EUA.
- Valdéz B, & Schorr M,. (2013). *Corrosión y prevención de la infraestructura industrial*. Barcelona, España: OmniaScience.
- Kessler, R. J., Powers, R. G., & Lasa, I. R. (1997). Cathodic Protection Using Zinc Sheet Anodes and an Ion Conductive Gel Adhesive. *NACE*, Paper No. 234.

- Gundaker, E. F. (1996). Corrosion monitoring and protection for infrastructure. *2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE.*
- Serrano, I., & Moreno, E. (2006). Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado. *Revista Académica de la FIUADY*, 37-45.
- Maritza M. (2012). Caracterización de la familia del anciano con deterioro cognitivo. *Revista Cubana de Salud Pública*, 246-252.

Anexo A. Graficas de resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC en laboratorio y ambiente.



Grafica A.1.1 Resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC en laboratorio durante 184 días.



Grafica A.1.2 Resultados de resistencia a la compresión de especímenes EC expuestos al ambiente durante 184 días.

Anexo B. Imágenes de resultados de carbonatación

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.254762	0.249502	0.493519	0.049557	0.078153	11.929

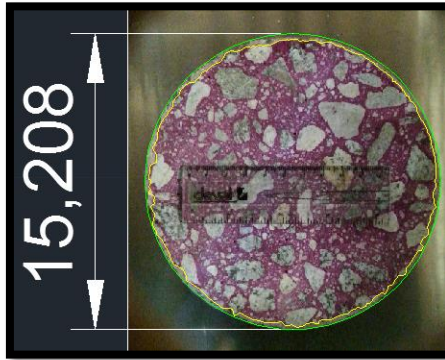


Imagen B.1.1 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OA-7, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.334592	0.333630	0.652163	0.133493	0.075789	15.6106

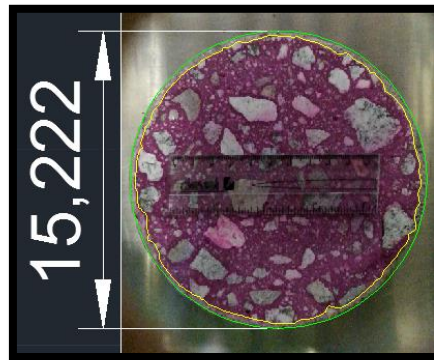


Imagen B.1.2 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OA-8, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.263794	0.258642	0.477669	0.057064	0.069496	12.3549

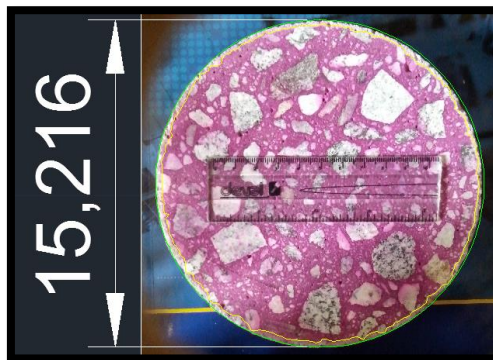


Imagen B.1.3 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OA-9, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm2)
0.264262	0.272227	0.481452	0.016189	0.088652	12.4579

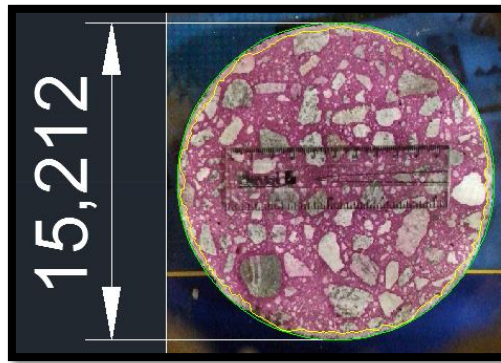


Imagen B.1.4 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OA-10, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm2)
0.338313	0.333089	0.575408	0.084821	0.076374	15.8437

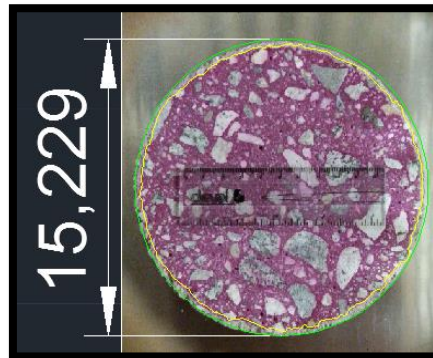


Imagen B.1.5 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OB-7, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm2)
0.303091	0.301844	0.536232	0.064378	0.060396	14.076



Imagen B.1.6 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OB-8, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.278991	0.289895	0.444386	0.058317	0.069831	12.9588

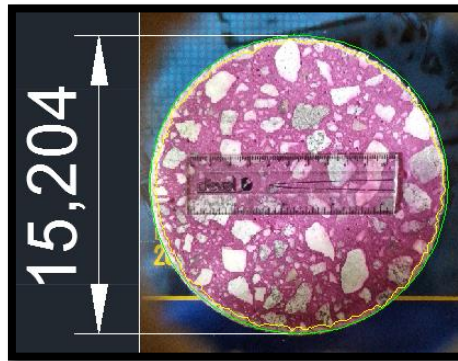


Imagen B.1.7 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OB-9, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Area Carbonatada (cm ²)
0.281991	0.282600	0.698086	0.054211	0.107635	12.9265

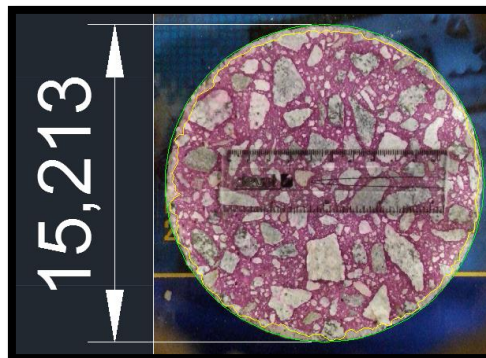


Imagen B.1.8 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C1-OB-10, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.257830	0.254933	0.498003	0.048172	0.068686	12.0225

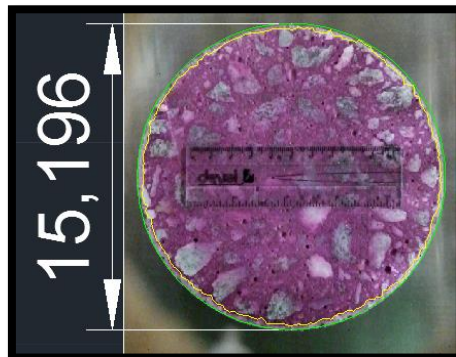


Imagen B.1.9 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OA-7, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.287614	0.285633	0.489809	0.060737	0.081644	13.7951

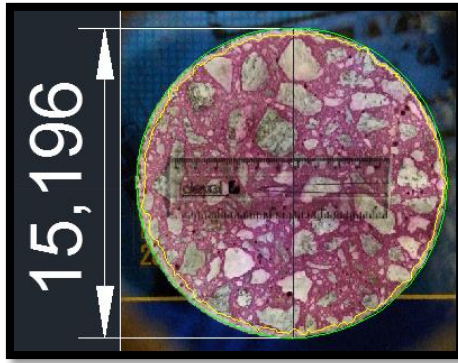


Imagen B.1.10 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OA-8, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.317190	0.317403	0.652111	0.078239	0.090571	14.8158

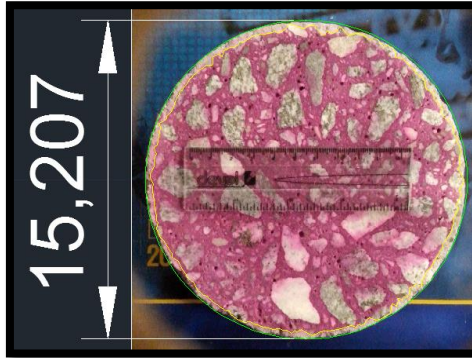


Imagen B.1.11 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OA-9, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.296874	0.324187	0.537973	0.018834	0.121899	14.0261

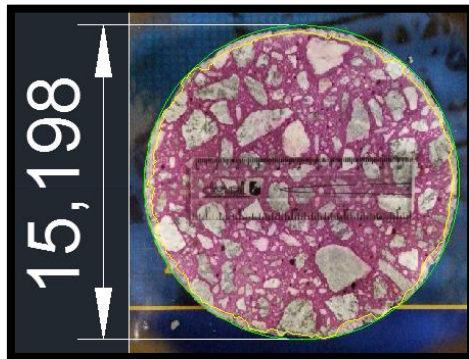


Imagen B.1.12 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OA-10, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.291127	0.299588	0.519989	0.049427	0.074068	13.6975

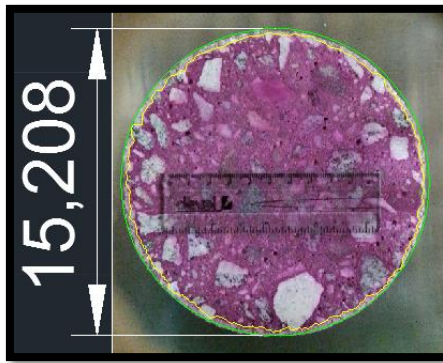


Imagen B.1.13 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OB-7, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.368635	0.394383	0.590569	0.010995	0.111901	16.6576

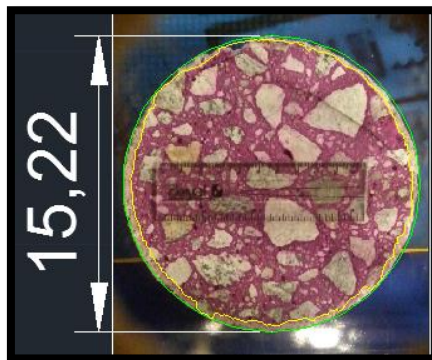


Imagen B.1.14 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OB-8, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm ²)
0.377249	0.401929	0.688200	0.026348	0.122631	16.4621

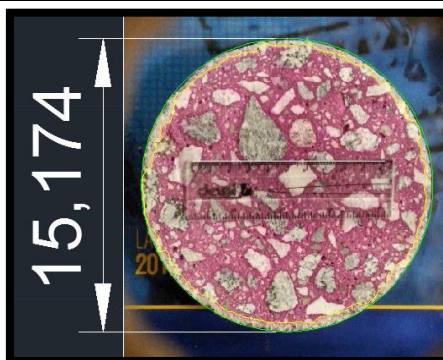


Imagen B.1.15 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OB-9, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

Promedio (cm)	Media (cm)	Dis.Max (cm)	Dis.Min (cm)	Desviación Estándar	Área Carbonatada (cm2)
0.402108	0.409496	0.723019	0.045347	0.111978	18.7268

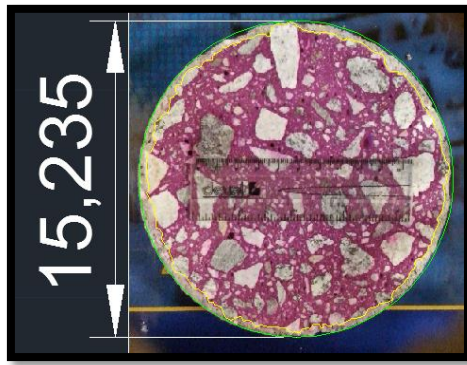


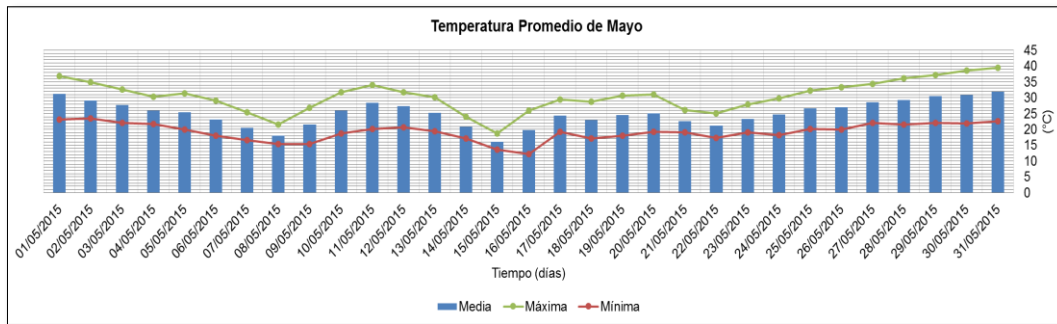
Imagen B.1.15 Levantamiento de profundidad de carbonatación de espécimen

C2-OB-9, con software AutoCAD 2014 y ArcMap 10.2.1

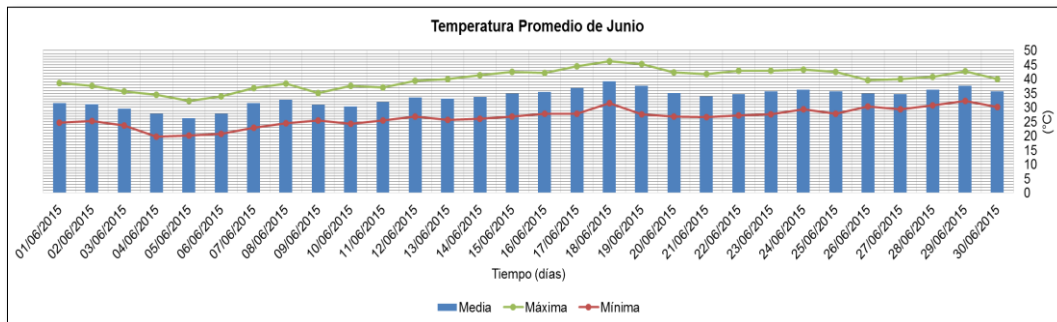
Anexo C. Graficas de resultados de estación meteorológica

Datos meteorológicos de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnic

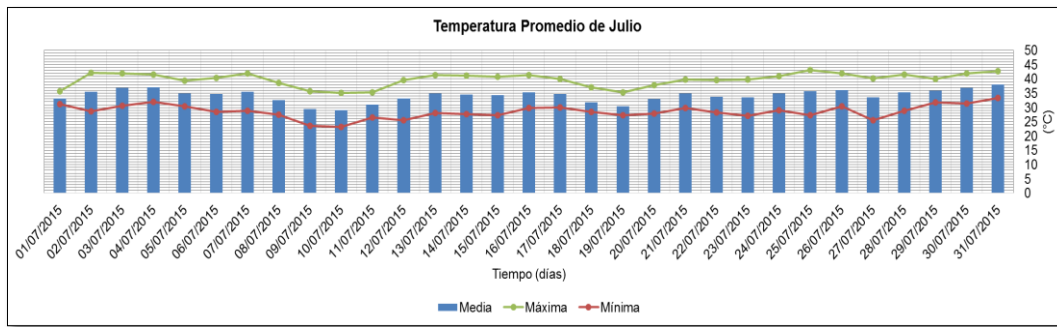
- Temperatura



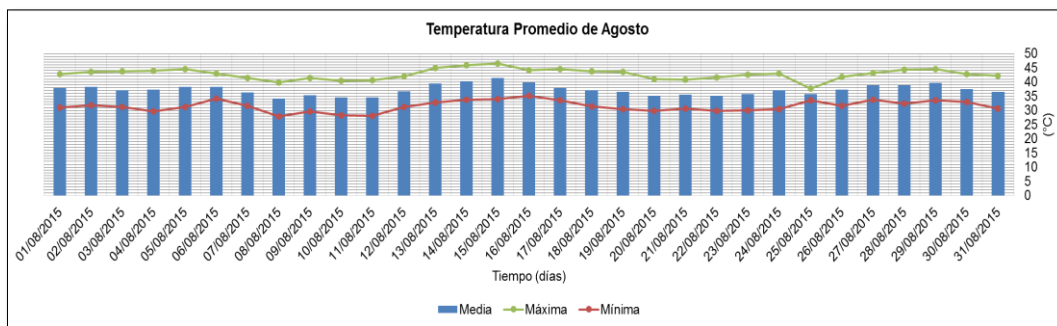
Grafica C.1.1 Valores del mes de Mayo de la temperatura promedio de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnic.



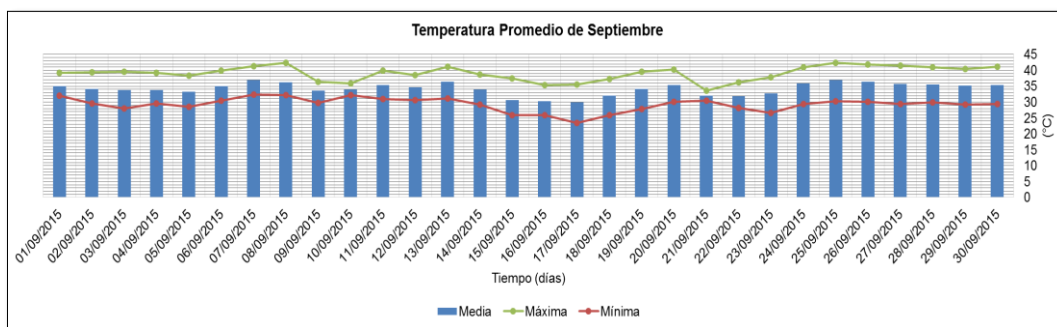
Grafica C.1.2 Valores del mes de Junio de la temperatura promedio de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnic.



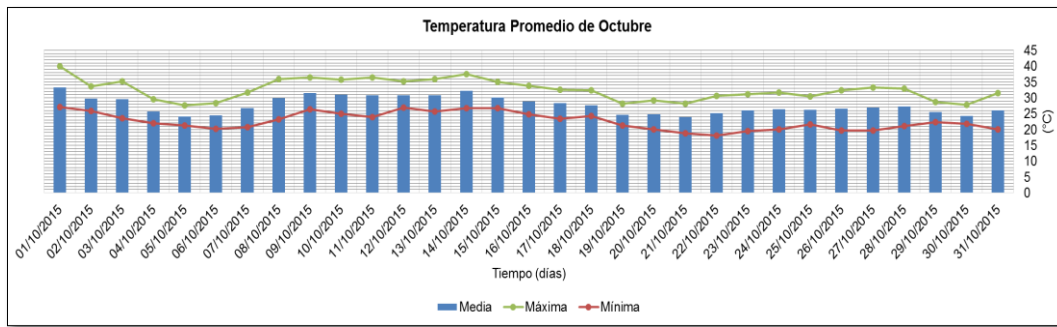
Grafica C.1.3 Valores del mes de Julio de la temperatura promedio de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.



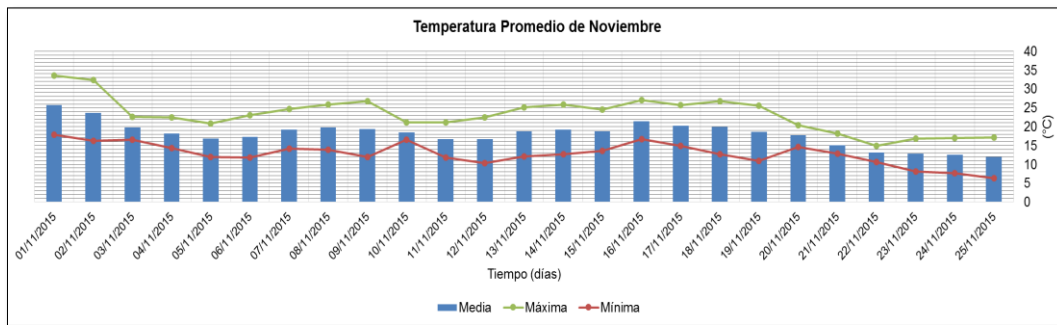
Grafica C.1.4 Valores del mes de Agosto de la temperatura promedio de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.



Grafica C.1.5 Valores del mes de Septiembre de la temperatura promedio de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.

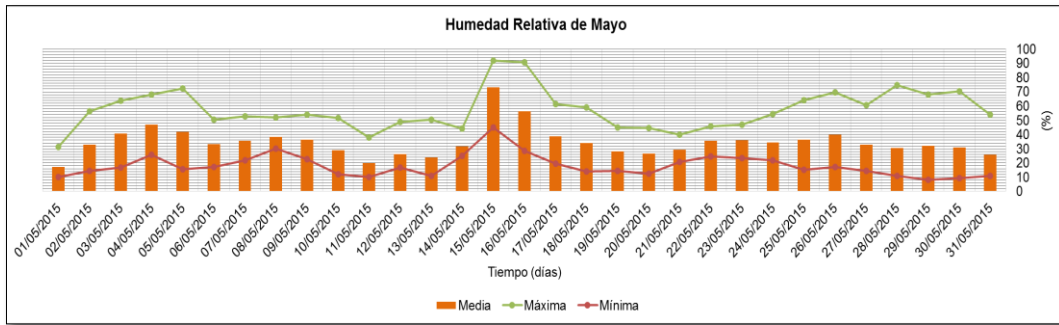


Gráfica C.1.6 Valores del mes de Octubre de la temperatura promedio de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.

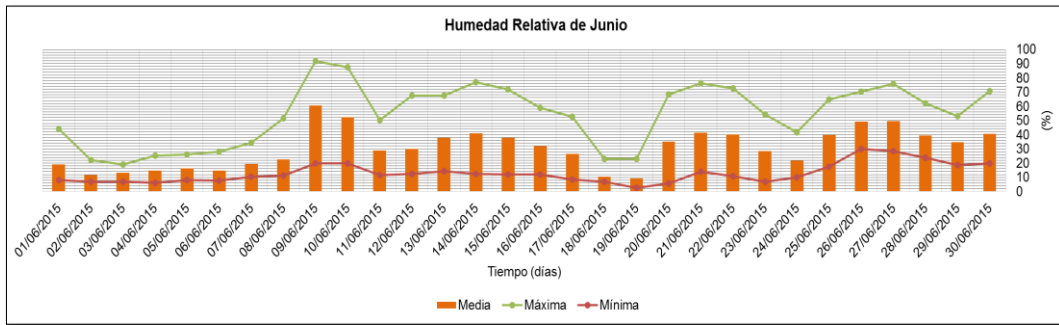


Gráfica C.1.7 Valores del mes de Noviembre de la temperatura promedio de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.

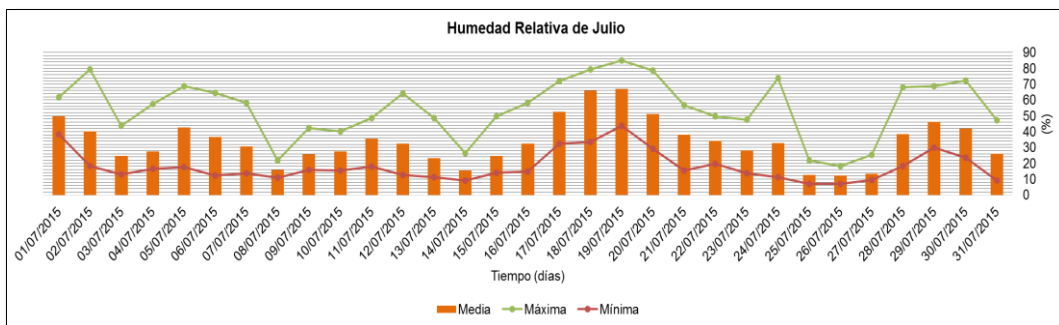
- **Humedad Relativa**



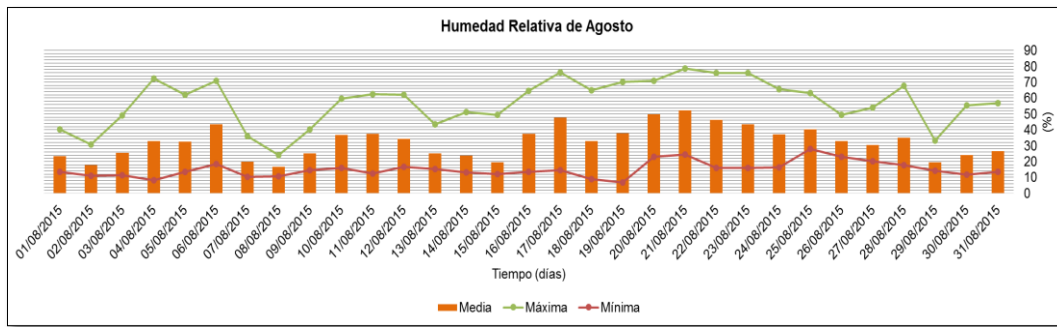
Gráfica C.1.8 Valores del mes de Mayo de la humedad relativa de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.



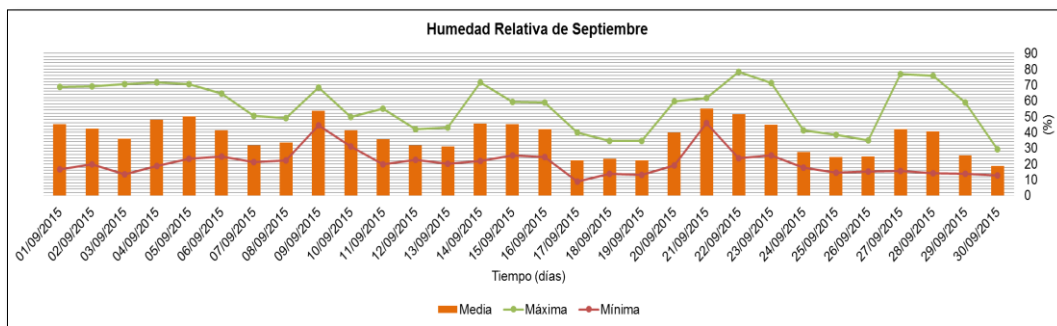
Gráfica C.1.9 Valores del mes de Junio de la humedad relativa de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.



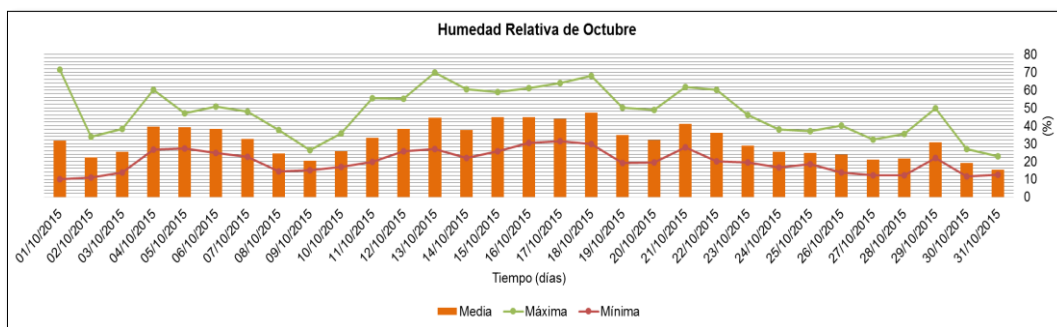
Gráfica C.1.20 Valores del mes de Julio de la humedad relativa de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.



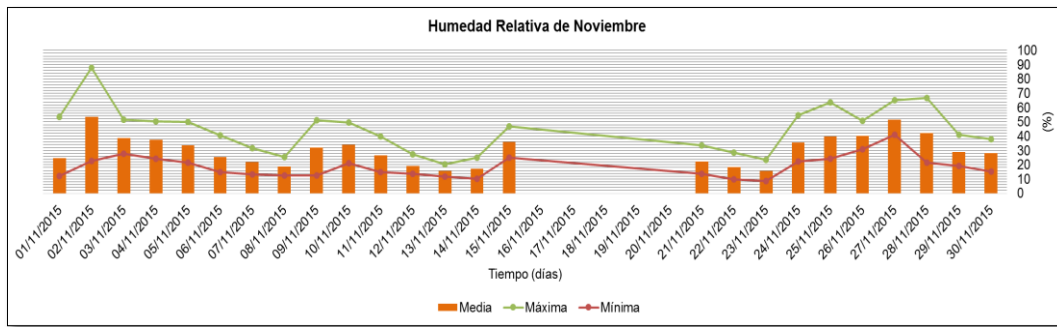
Grafica C.1.21 Valores del mes de Agosto de la humedad relativa de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Calífornica.



Grafica C.1.22 Valores del mes de Septiembre de la humedad relativa de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Calífornica.

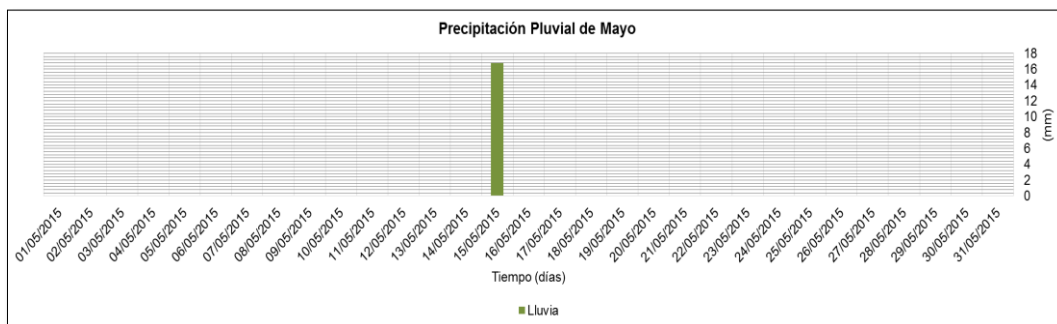


Grafica C.1.23 Valores del mes de Octubre de la humedad relativa de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Calífornica.

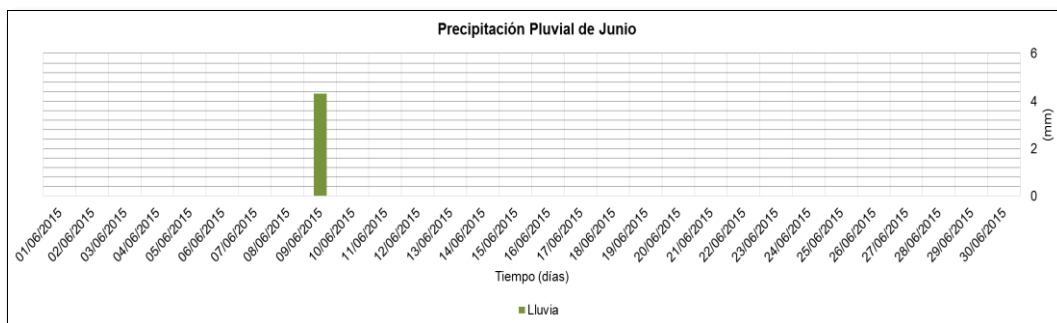


Grafica C.1.24 Valores del mes de Noviembre de la humedad relativa de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.

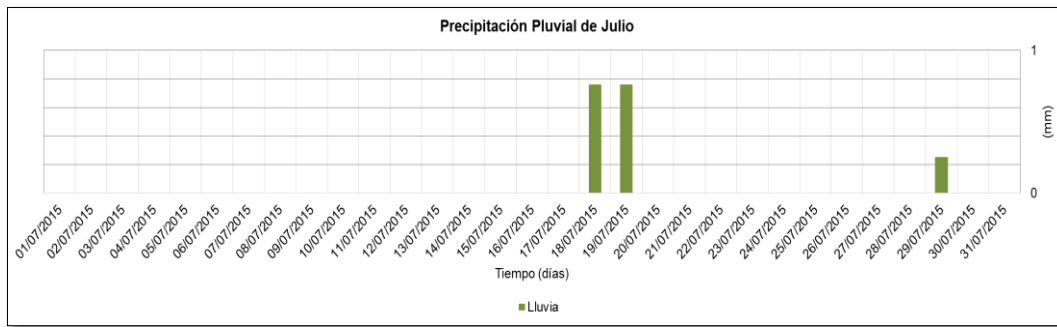
- **Precipitación Pluvial**



Grafica C.1.25 Valores del mes de Mayo de la precipitación pluvial de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.



Grafica C.1.26 Valores del mes de Junio de la precipitación pluvial de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Califórnica.



Grafica C.1.27 Valores del mes de Julio de la precipitación pluvial de la estación del Instituto de Ingeniería de Mexicali de la Universidad de Baja Calíornica.