

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**TESIS**

**“CORROSIÓN Y DETERIORO DEL CONCRETO REFORZADO, EN  
CONDICIONES DEL SUBSUELO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN,  
DE MEXICALI BAJA CALIFORNIA”**

***TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:***

***MAESTRO EN INGENIERÍA***

***PRESENTA***

**ALBERTO EMILIO VALDEZ ANGULO**

**DIRECTOR**

**BENJAMIN VALDEZ SALAS**

**CO-DIRECTOR**

**ALEJANDRO MUNGARAY MOCTEZUMA**

***Mexicali, B. C.***

***Junio de 2018***

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a Dios por concederme vida, capacidad y las herramientas necesarias para poder realizar éste meta.

A mi familia que me apoya incondicionalmente desde el inicio de mis estudios, que ha estado a mi lado en cada escalón que me propongo a subir, incluyendo en este trayecto.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California por permitirme pertenecer a esta gran Institución Educativa que fue el medio, donde yo como estudiante me desempeñe en sus instalaciones del Instituto de Ingeniería y con apoyo de maestros, personal administrativo y compañeros estudiantes que me apoyaron y acompañaron para llegar a la meta.

Gracias a mi Director de tesis Dr. Benjamín Valdez Salas, Co-Director Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma y a mi compañero M.I. Ramiro Vazquez Delgado por su continuo asesoramiento, compartiendo su conocimiento y experiencia para lograr realizar de la mejor manera la investigación y evaluaciones que fueron fundamentales para desarrollar esta tesis.

A Concretera DICOMSA y a su personal, por permitirme el uso de sus instalaciones, equipo y patrocinio de concreto para la construcción de los especímenes de prueba.

## INDICE

### CAPÍTULO 1

<u>RESUMEN</u> .....	- 12 -
1.1 INTRODUCCION.....	- 13 -
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	- 14 -
1.3 HIPOTESIS.....	- 15 -
1.4 OBJETIVOS.....	- 16 -
1.5 JUSTIFICACION.....	- 17 -

### CAPÍTULO 2

#### MARCO TEORICO

2.1 Definición de corrosión.....	- 19 -
2.1.2 Características del concreto para evitar la corrosión.....	- 20 -
2.1.3 Degradación del concreto. ....	- 21 -
2.2 Concreto reforzado.....	- 25 -
2.3 Impacto ambiental y conservación de los recursos empleados en la fabricación del concreto. ....	- 25 -
2.4 Corrosión en el acero de refuerzo.....	- 28 -
2.5 Deterioro por carbonatación y corrosión. ....	- 31 -
-	
2.6 Corrosión en suelos.....	- 32 -
2.7 Diseño de mezclas.....	- 36 -
2.7.1 Cemento.....	- 36 -
2.7.2 Agregados pétreos: arena y grava.....	- 37 -
2.7.3 Agua.....	- 37 -
4.7.4 Aditivos.....	- 37 -
2.8 Análisis de la composición del acero.....	- 39 -
2.9 Análisis de tierra.....	- 39 -
2.9.1 Análisis de PH del suelo.....	- 40 -

2.9.2 Análisis de Resistividad.....	- 41 -
2.9.3 Análisis de Cloruros.....	- 41 -
2.10 Pruebas realizadas al concreto: fresco y fraguado.....	- 43 -
2.10.1 Pruebas al concreto fresco.....	- 43 -
2.10.1.1 Temperatura.....	- 44 -
2.10.1.2 Revenimiento.....	- 44 -
2.10.1.3 Masa unitaria.....	- 44 -
2.10.1.4 Contenido de Aire.....	- 45 -
2.10.1.5 Elaboración de especímenes y curado.....	- 45 -
2.11.1 Pruebas de concreto endurecido.....	- 46 -
2.11.1.1 Prueba de resistencia a la compresión.....	- 46 -
2.11.1.2 Potencial de corrosión (Ecorr).....	- 46 -
2.11.1.3 Análisis de carbonatación por indicador de Fenolftaleína.....	- 48 -

### **CAPITULO 3**

#### **METODOLOGIA**

3.1. Análisis del acero de refuerzo por Espectroscopia de Inducción por rompimiento laser LIBS.....	- 50 -
3.2 Análisis del ambiente de exposición: subsuelo.....	- 53 -
3.2.1 Análisis de pH, OCP, resistividad y contenido cloruros de la tierra...-	53 -
3.2.1.1 Análisis de pH Y OCP.....	- 54 -
3.2.1.2 Análisis de cloruros.....	- 55 -
3.2.1.3 Análisis de resistividad.....	- 55 -
3.3 Construcción de especímenes de concreto.....	- 57 -
3.3.1 Diseño de la mezcla.....	- 57 -
3.3.2 Características y propiedades de los materiales utilizados.....	- 59 -
3.3.2.1 Cemento.....	- 59 -
3.3.2.2 Agregados pétreos: arena y agua.....	- 60 -
3.3.2.3 Agua.....	- 60 -
3.3.2.4 Aditivo.....	- 61 -
3.4 Preparación del acero de refuerzo.....	- 62 -
3.4.1 Protección parte de varilla expuesta en el espécimen.....	- 64 -

3.4.2 Colocación de cables de conexión al acero de refuerzo.....	64 -
3.4.3 Plantillas para espécimen.....	65 -
3.5 Pruebas Realizadas al concreto fresco.....	68 -
3.5.1 Concreto fresco muestreo.....	69 -
3.5.2 Determinar la temperatura del concreto fresco.....	69 -
3.5.3 Determinación del revenimiento en el concreto fresco.....	70 -
3.5.4 Determinación de la masa unitaria.....	71 -
3.5.5 Contenido de aire del concreto recién mezclado.....	72 -
3.5.6 Curado de Especímenes.....	74 -
3.5.7 Descimbrado e Identificación de los especímenes.....	76 -
3.6 Estación de campo, entierro de los especímenes en subsuelo.....	77 -
3.6.1 Monitoreo de la estación de campo.....	80 -
3.7 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto endurecido...-	80 -
3.7.1 Procedimiento de medición de la resistencia a la compresión.....	80 -
3.7.1.1 Medición de los especímenes.....	82 -
3.7.1.2 Cabeceo de los especímenes.....	82 -
3.7.1.3 Prueba de resistencia a la compresión de los especímenes.....	83 -
3.7.1.4 Determinación de la resistencia a la compresión.....	84 -
3.8.1 Corte del espécimen.....	85 -
3.8.2 Aplicación del indicador en el corte del espécimen.....	86 -
3.8.3 Medición de la profundidad de carbonatación en el espécimen.....	86 -
3.8.5 Determinación de la velocidad de la carbonatación K.....	88 -
3.8.6 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto tipo viga con acero.....	88 -
3.9 Procedimiento de medición de potencial de corrosión.....	88 -
3.9.1 Protección del armado del espécimen.....	91 -

## **CAPITULO 4**

### **RESULTADOS**

4.1 Resultados del análisis de ambiente de exposición: subsuelo.....	92 -
--	------

<b>4.2. Resultados de análisis de acero de refuerzo: método de Espectroscopia de Inducción por Rompimiento Laser LIBS para determinar la composición del acero.....</b>	<b>- 93 -</b>
<b>4.3. Resultados pruebas de concreto fresco.....</b>	<b>- 95 -</b>
<b>4.3.1 Análisis de Temperatura concreto a/c 0.49.....</b>	<b>- 96 -</b>
<b>4.3.2 Análisis de Revenimiento concreto a/c 0.49.....</b>	<b>- 97 -</b>
<b>4.3.3 Análisis de Contenido de Aire concreto a/c 0.49.....</b>	<b>- 97 -</b>
<b>4.3.4 Análisis de Masa Unitaria concreto a/c 0.49.....</b>	<b>- 98 -</b>
<b>4.4.1 Análisis de Temperatura, concreto a/c 0.66.....</b>	<b>- 100 -</b>
<b>4.4.2 Análisis de Revenimiento, concreto a/c 0.66. ....</b>	<b>- 100 -</b>
<b>4.4.3 Análisis de Contenido de Aire, concreto a/c 0.66.....</b>	<b>- 101 -</b>
<b>4.4.4 Análisis de masa unitaria, concreto a/c 0.66.....</b>	<b>- 101 -</b>
<b>4.5. Resultados resistencia a compresión.....</b>	<b>- 101 -</b>
<b>4.6. Resultados del análisis de potencial de corrosión.....</b>	<b>- 106 -</b>
<b>4.7. Resultados de análisis de carbonatación en especímenes de concreto.....</b>	<b>- 112 -</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>- 129 -</b>
<b>Bibliografías.....</b>	<b>- 133 -</b>

### **INDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1.1 Análisis de potencial de corrosión.....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>Figura 2.1 Etapa temprana y avance de la carbonatación en el concreto armado.....</b>	<b>- 32 -</b>
<b>Figura 2.2 Corrosión del acero causado por carbonatación. ....</b>	<b>- 33 -</b>
<b>Figura 2.3 Agente causantes de la carbonatación, pH en el concreto y aumento en el diámetro del acero por corrosión. ....</b>	<b>- 34 -</b>
<b>Figura. 2.4 Índices de Resistividad, Potencial redox, pH, Cloruros, Sulfatos y Cloruros. ....</b>	<b>- 40 -</b>
<b>Figura. 3.1 Diagrama de elaboración de muestras y pruebas de concreto fresco.....</b>	<b>- 49 -</b>

<b>Figura. 3.2</b> Exposición de los especímenes y pruebas de concreto endurecido.....	<b>- 50 -</b>
<b>Figura. 3.3</b> Pulido de muestras de acero. ....	<b>- 51 -</b>
<b>Figura. 3.4</b> Análisis de varilla corrugada 3/8" por medio de Espectroscopia de Inducción por rompimiento laser LIBS. ....	<b>- 52 -</b>
<b>Figura. 3.5</b> Análisis de varilla 1/4" (alambrón) por medio de Espectroscopia de Inducción por rompimiento laser LIBS. ....	<b>- 52 -</b>
<b>Figura. 3.6</b> Recolección de muestras de tierra. ....	<b>- 53 -</b>
<b>Figura. 3.7</b> Solución saturada de agua destilada con muestra de tierra.....	<b>- 54 -</b>
<b>Figura. 3.8</b> Preparación de soluciones para análisis de cloruros. ....	<b>- 55 -</b>
<b>Figura. 3.9</b> Caja con muestra saturada de agua destilada. ....	<b>- 56 -</b>
<b>Figura. 3.10</b> Medición de la resistividad. ....	<b>- 56 -</b>
<b>Figura. 3.11</b> Instalaciones de DICOMSA. ....	<b>- 58 -</b>
<b>Figura. 3.12</b> Perforación longitudinal de varilla para colocación de contacto de cable eléctrico. ....	<b>- 63 -</b>
<b>Figura. 3.13</b> Colocación de cables de conexión en varillas. ....	<b>- 63 -</b>
<b>Figura. 3.14</b> Colocación de estribos para armado de especímenes. ....	<b>- 64 -</b>
<b>Figura. 3.15</b> Armado de acero, con protección de manguera, Sika 1a y tiplay 1/8" de cimbra. ....	<b>- 64 -</b>
<b>Figura. 3.16</b> Esquema de colocación de varillas de refuerzo en viga de concreto.....	<b>- 66 -</b>
<b>Figura. 3.17</b> Colocación de armado en cimbra metálica de viga. ....	<b>- 67 -</b>
<b>Figura. 3.18</b> Colocación de armado en cimbra metálica de viga y conexiones metálicas. ....	<b>- 67 -</b>
<b>Figura. 3.19</b> Operación de recolección de muestreo de concreto. ....	<b>- 69 -</b>
<b>Figura. 3.20</b> Análisis de temperatura de concreto fresco. ....	<b>- 70 -</b>
<b>Figura. 3.21</b> Prueba de revenimiento.....	<b>- 71 -</b>
<b>Figura. 3.22</b> Operación para determinar la masa unitaria. ....	<b>- 72 -</b>
<b>Figura. 3.23</b> Construcción de especímenes tipo viga y cilindros. ....	<b>- 74 -</b>
<b>Figura. 3.24</b> Especímenes de concreto recién construidos, con plástico para salvaguardar humedad. ....	<b>- 75 -</b>

<b>Figura. 3.25</b> Curado de Especímenes de concreto. ....	<b>- 76 -</b>
<b>Figura. 3.26</b> Numeración y especificación de a/c para identificación de especímenes. ....	<b>- 77 -</b>
<b>Figura. 3.27</b> Diagrama ubicación de especímenes en lugar de exposición en el subsuelo. ....	<b>- 77 -</b>
<b>Figura. 3.28</b> Ubicación de especímenes cilindros y vigas en lugar de exposición en el subsuelo. ....	<b>- 78 -</b>
<b>Figura. 3.29</b> Ubicación de especímenes cilíndricos en lugar de exposición en el subsuelo. ....	<b>- 79 -</b>
<b>Figura. 3.30</b> Prueba de resistencia a la compresión.....	<b>- 81 -</b>
<b>Figura. 3.31</b> Medición de diámetro de cilindro con vernier. ....	<b>- 82 -</b>
<b>Figura. 3.32</b> Inicio de prueba de resistencia a la compresión de cilindro a/c 0.49.....	<b>- 83 -</b>
<b>Figura. 3.33</b> Finalización de prueba de resistencia a la compresión de cilindro a/c 0.66.....	<b>- 84 -</b>
<b>Figura. 3.34</b> Corte transversal de cilindro de concreto. ....	<b>- 85 -</b>
<b>Figura. 3.35</b> Levantamiento del área carbonatada utilizando AutoCAD 2017...	<b>- 87 -</b>
<b>Figura. 3.36</b> Limpieza de varillas con cepillo de alambre.....	<b>- 89 -</b>
<b>Figura. 3.37</b> Viga de concreto a/c 0.49.....	<b>- 90 -</b>
<b>Figura. 3.38</b> Operación para medición de potencial de corrosión. ....	<b>- 90 -</b>
<b>Figura. 3.39</b> Protección de varillas expuestas.....	<b>- 91 -</b>
<b>Figura. 4.1</b> Grafica de contenido de metales varilla 3/8”.....	<b>- 94 -</b>
<b>Figura. 4.2</b> Grafica de contenido de metales varilla 1/4”.....	<b>- 95 -</b>
<b>Figura. 4.3</b> Grafica de la temperatura del concreto fresco a/c 0.49.....	<b>- 97 -</b>
<b>Figura. 4.4</b> Grafica de la temperatura del concreto fresco a/c 0.49.....	<b>- 98 -</b>
<b>Figura. 4.5</b> Grafica de la masa unitaria del concreto fresco a/c 0.49.....	<b>- 99 -</b>
<b>Figura. 4.6</b> Grafica de la temperatura del concreto fresco a/c 0.66. ....	<b>- 100 -</b>
<b>Figura. 4.7</b> Grafica del contenido de aire del concreto fresco a/c 0.66. ....	<b>- 101 -</b>
<b>Figura. 4.8</b> Grafica de la masa unitaria del concreto fresco a/c 0.66. ....	<b>- 102 -</b>
<b>Figura. 4.9</b> Grafica de resultados resistencia a la compresión del concreto a/c 0.66.....	<b>- 103 -</b>

<b>Figura. 4.10</b> Grafica de resultados resistencia a la compresión del concreto a/c 0.49.....	<b>- 105 -</b>
<b>Figura. 4.11</b> Grafica de resultados del potencial de corrosión del concreto a/c 0.66, por varilla. ....	<b>- 109 -</b>
<b>Figura. 4.12</b> Grafica de resultados del potencial de corrosión del concreto a/c 0.49, por varilla. ....	<b>- 110 -</b>
<b>Figura. 4.13</b> Grafica de resultados promedio del potencial de corrosión general.....	<b>- 111 -</b>
<b>Figura. 4.14</b> Espécimen de concreto, diseño de mezcla a/c 0.66, Agosto 2017.....	<b>- 113 -</b>
<b>Figura. 4.15</b> Espécimen de concreto, diseño de mezcla a/c 0.49, Agosto 2017.....	<b>- 113 -</b>
<b>Figura. 4.16</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.66, Septiembre 2017.....	<b>- 115 -</b>
<b>Figura. 4.17</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.49, Septiembre 2017.....	<b>- 116 -</b>
<b>Figura. 4.18</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.66, Octubre 2017.....	<b>- 117 -</b>
<b>Figura. 4.19</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.49, Octubre 2017.....	<b>- 118 -</b>
<b>Figura. 4.20</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.66, Noviembre 2017.....	<b>- 119 -</b>
<b>Figura. 4.21</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.49, Noviembre 2017.....	<b>- 120 -</b>
<b>Figura. 4.22</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.66, Diciembre 2017.....	<b>- 121 -</b>
<b>Figura. 4.23</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.49, Diciembre 2017.....	<b>- 122 -</b>

<b>Figura. 4.24</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.66, Febrero 2018.....	<b>- 123 -</b>
<b>Figura. 4.25</b> Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.49, Febrero 2018.....	<b>- 124 -</b>
<b>Figura 4.26</b> Grafica de resultados generales de carbonatación por cm <sup>2</sup> .....	<b>- 125 -</b>
<b>Figura 4.27</b> Grafica de resultados generales de profundidad promedio de carbonatación por periodos de prueba.....	<b>- 127 -</b>

### INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Función de los aditivos en el concreto.....	<b>- 38 -</b>
<b>Tabla. 3.1</b> Dosificación del Concreto a/c 0.66.....	<b>- 58 -</b>
<b>Tabla. 3.2</b> Dosificación del Concreto a/c 0.49.....	<b>- 59 -</b>
<b>Tabla 3.3</b> Análisis de agua.....	<b>- 60 -</b>
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados generales de análisis de subsuelo.....	<b>- 92 -</b>
<b>Tabla 4.2.</b> Análisis de varilla 3/8”.....	<b>- 93 -</b>
<b>Tabla 4.3.</b> Análisis de varilla 1/4” (alambrón).....	<b>- 94 -</b>
<b>Tabla 4.4.</b> Pruebas de acuerdo a la norma que la regula y el parámetro de la especificación.....	<b>- 96 -</b>
<b>Tabla 4.5.</b> Resultados de concreto en fresco A/C 0.49, f'c=400 Kg/cm <sup>2</sup> .....	<b>- 96 -</b>
<b>Tabla 4.6.</b> Resultados de concreto en fresco A/C 0.66, f'c= 250 Kg/cm <sup>2</sup> .....	<b>- 99 -</b>
<b>Tabla 4.7.</b> Resistencia a la compresión.....	<b>- 102 -</b>
<b>Tabla 4.8.</b> Resultados generales resistencia a la compresión especímenes a/c 0.66.....	<b>- 103 -</b>
<b>Tabla 4.9.</b> Resultados resistencia a la compresión especímenes a/c 0.49.....	<b>- 104 -</b>
<b>Tabla 4.10</b> Criterios de evaluación utilizados para interpretación de resultados en las pruebas de potenciales de media celda.....	<b>- 106 -</b>
<b>Tabla 4.11</b> Resultados generales obtenidos de las pruebas de potencial de corrosión de media celda.....	<b>- 109 -</b>
<b>Tabla 4.12</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación, prueba utilizando fenolftaleína 1% concreto a/c 0.66 , Agosto 2017 .....	<b>- 113 -</b>

<b>Tabla 4.13</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación, prueba utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Agosto 2017.....	<b>- 114 -</b>
<b>Tabla 4.14</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación, utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Septiembre 2017.....	<b>- 115 -</b>
<b>Tabla 4.15</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, mezcla a/c 0.49, Septiembre 2017.....	<b>- 116 -</b>
<b>Tabla 4.16.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Octubre 2017.....	<b>- 117 -</b>
<b>Tabla 4.17.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Octubre 2017.....	<b>- 118 -</b>
<b>Tabla 4.18.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Noviembre 2017.....	<b>- 119 -</b>
<b>Tabla 4.19.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Noviembre 2017.....	<b>- 120 -</b>
<b>Tabla 4.20.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Diciembre 2017.....	<b>- 121 -</b>
<b>Tabla 4.21.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Diciembre 2018.....	<b>- 122 -</b>
<b>Tabla 4.22.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Febrero 2018.....	<b>- 123 -</b>
<b>Tabla 4.23.</b> Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Febrero 2018.....	<b>- 124 -</b>
<b>Tabla 4.24</b> Resultados generales de profundidad de carbonatación y velocidad de carbonatación en los diferentes periodos.....	<b>- 126 -</b>

## CAPITULO 1

### RESUMEN

La investigación aplicada a la exposición del concreto armado en la ciudad de Mexicali, Baja California, en dos diferentes diseños de concreto con relación agua-cemento parcial ( $a/c$ ) de 0.66 con  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$  y  $a/c$  0.49 con  $f'c=420 \text{ kg/cm}^2$ , buscando obtener las características de calidad óptimas para su utilización en el subsuelo en elementos de cimentaciones. Se realizaron análisis en concreto fresco y el estudio de concreto endurecido se programó en periodos de análisis a los 30, 60, 91, 122 y 180 días con diferentes pruebas utilizando mediante la realización de probetas tipo cilindros para determinar la durabilidad del concreto tipo viga con armado para analizar la corrosión del refuerzo. Se presentaran las pruebas que se utilizaran como métodos para determinar las características y la calidad que presentara los dos diseños de mezclas expuestas en el subsuelo.

**Figura 1.1** Análisis de potencial de corrosión



## 1.1 INTRODUCCION

En nuestro país, es el Código Sísmico, que establece los requisitos mínimos para el análisis, diseño y construcción de estructuras sismo-resistentes. Entre sus suposiciones generales están que “los materiales estructurales cumplen con todos los requerimientos previamente especificados” y que “la estructura recibe un mantenimiento adecuado durante toda su vida útil”. En términos generales, las estructuras se diseñan para una vida útil de 50 años.

El buen acatamiento de la normativa mencionada permite garantizar la seguridad y funcionalidad de la estructura ante la ocurrencia de un sismo durante su vida útil. Entonces, se debe garantizar que durante su vida útil, la estructura conserve los requisitos de diseño sobre seguridad, funcionalidad y estética. Para ello, hay que garantizar que los materiales, componentes y otros, pueden comportarse adecuadamente durante ese período, sin acarrear un costo inesperado de mantenimiento.

La corrosión del acero de refuerzo consiste en la oxidación destructiva del acero debido al medio que lo rodea. Las consecuencias de la acción destructiva de la oxidación se presentan como una disminución de la sección de la varilla, fisuras en el concreto e incluso laminación del concreto, debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo y a la disminución o desaparición de la adherencia entre el refuerzo y el concreto. Se puede presentar una serie de factores que permite el desencadenamiento de la oxidación, la cual se exponen a continuación de manera resumida. Dosificación del concreto. El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso. Entre los aspectos que se deben garantizar para lograr las condiciones anteriores están: la manera de proporcionar los agregados y su calidad, de tal manera que se asegure el menor volumen de vacíos; la influencia del agua en la consistencia del concreto fresco, la influencia de la relación agua-cemento, el grado de hidratación del cemento y la incorporación de aditivos en el cemento. Compacidad y homogeneidad. Es quizás lo más importante en cuanto a resistencia del concreto a la penetración de los agentes agresivos externos. [1]

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más ampliamente usados, sin embargo las estructuras que los emplean tienen el inconveniente de ser susceptibles a la corrosión. El problema del deterioro de las estructuras de concreto debido a procesos de corrosión es serio y de implicaciones económicas mayores. La habilidad para evaluar la corrosión de las varillas de refuerzo en estructuras y poder estimar la vida en servicio remanente es tema de estudios en el ámbito mundial.

Los códigos buscan en general que las estructuras tengan una vida útil por encima de los 50 años, pero hay que tener en cuenta que algunas estructuras deben ser diseñadas para períodos aún más largos, digamos hasta 100 años, y otras para períodos de 25 años o menos.

El deterioro por corrosión de las estructuras de concreto armado es de gran magnitud debido a su impacto económico, 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. [1]

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura en los Estados Unidos de América. Así mismo, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión.

La corrosión del refuerzo metálico embebido es reconocida como uno de los mayores problemas en estructuras de concreto convirtiéndose en un tema que requiere la atención de los ingenieros de mantenimiento de estructuras de concreto, tales como carreteras y puentes. El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y

desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la integridad estructural.

Los problemas de durabilidad han afectado diversos tipos de estructuras, las cuales una vez que se presentan ya no son funcionales ni eficientes y están destinadas a no cumplir con su vida de servicio estimada. Los problemas de durabilidad no se limitan a su diseño inicial y construcción, tienen una fuerte intervención en la operación, ocasionan costos y pérdidas económicas para el propietario o inversionista, ya sea por reparación de las zonas afectadas, por la sustitución de elementos que se han deteriorado o por costos operativos imputables a remodelaciones o mantenimientos periódicos.

Por tal motivo, al hablar de durabilidad, se debe tener un enfoque holístico que integre los aspectos más relevantes para la construcción de estructuras de concreto con alta durabilidad. Es un tema actual que con el transcurrir del tiempo acaparará mayor atención en varios ámbitos: profesional, financiero y académico, provocado por el alto impacto socioeconómico que tiene en la infraestructura.

En México, se tienen áreas con medios agresivos al concreto, por lo que debido a la escasez de espacio o situaciones específicas es necesario construir importantes estructuras de infraestructura en esas áreas, razón por lo que es indispensable conocer y dominar el tema. [2]

### **1.3 HIPOTESIS**

El concreto que se utilizara tiene características para una buena durabilidad en la exposición al subsuelo; la impermeabilidad de estos dos diseños, se relaciona por su baja relación agua cemento, diseños utilizados para la elaboración de las probetas que serán expuestas en el subsuelo de la ciudad de Mexicali Baja California, y que debido a la baja humedad, concentración de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes como cloruros y sulfatos que se encuentran en la tierra:

- a) Baja probabilidad de que surja un problema drástico de carbonatación en el concreto.
- b) No se romperá la pasividad del acero de refuerzo durante los 180 días de exposición.

#### **1.4 OBJETIVOS.**

En este estudio se utilizarán probetas con dos diferentes mezclas de concretos relación agua-cemento de 0.49 y 0.66, esperando que por la diferencia de contenido de cemento las pruebas revelen la resistencia e impermeabilidad que brindaran una mejor protección y determinaran su durabilidad cuando este se encuentre en el subsuelo. De igual manera esta investigación es un aporte académico y científico para el desarrollo de la tecnología del concreto en nuestro campo de trabajo y una herramienta para el sector constructivo.

Se realizarán pruebas para evaluar el concreto fresco, analizando la consistencia y fraguado. Las propiedades de la mezcla se obtendrán realizando pruebas de análisis de los agregados, muestreo de concreto, temperatura, revenimiento, peso volumétrico contenido de aire, elaboración de cilindros de concreto y curado.

En estado endurecido se realizaran pruebas para determinar la resistencia a la compresión, carbonatación y potencial de corrosión.

La tierra del subsuelo será analizado el contenido de cloruros, resistividad, OCP, pH, para conocer el medio al que se pondrán en exposición los especímenes de concreto.

Se analizara el acero que se utilizara de refuerzo mediante el método de Espectroscopia de Inducción por Rompimiento Laser LIBS para saber la

composición del metal y obtener una conclusión más acertada sobre los efectos de corrosión que esté presente.

Las pruebas se aplicarán en los diferentes periodos como lo indica la metodología, para obtener resultados, analizando el avance del deterioro del concreto y corrosión del acero de refuerzo.

Con el fin de aportar información que ayude a la construcción de estructuras de concreto de buena calidad bajo las condiciones ambientales previstas, estas mantengan su seguridad, funcionalidad y durabilidad, durante un período de tiempo explícito o implícito, sin que se requieran costes elevados e inesperados de mantenimiento y reparación.

### **1.5 JUSTIFICACION.**

El acero en el concreto reforzado aporta las propiedades de resistencia a la tensión necesarias en el concreto estructural, lo que evita el daño en estas estructuras, sujetas a cualquier nivel de esfuerzo que se genere por acciones de posible ocurrencia. Sin embargo, cuando el acero de refuerzo se corroe, este óxido provoca la pérdida de adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto, produciéndose la exfoliación y la de-laminación, hecho que podría afectar la estabilidad de la estructura, al reducirse el área del acero en su sección transversal y consecuentemente su capacidad resistente. Esta situación es especialmente importante en cables de alto límite elástico de elementos presforzados. Las pérdidas económicas causadas por la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto se calculan en billones de dólares por año, únicamente en los Estados Unidos en que la Administración Federal de Caminos ha evaluado en 200 millones de dólares el costo anual de reparación de puentes en el sistema inter-estatal, monto que se cuadriplica al considerar todos los puentes existentes en el país.

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; gracias a este medio se han logrado tener

estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio; sin embargo, se han encontrado problemas relacionados con el medio ambiente en el que se encuentra la estructura. Era inminente la necesidad de investigar las razones del porqué del deterioro del concreto y solucionar problemas prácticos.

Los primeros problemas de durabilidad empezaron a surgir antes de la mitad del siglo XX, por lo que la problemática no es nueva; sin embargo, las obras que se han realizado en las décadas más recientes siguen presentando problemas de esta naturaleza, ya que no se ha difundido lo suficiente, por el rechazo al tema, dada su complejidad y también a que significa generalmente un costo inicial mayor. Un concreto barato puede ser resistente ante sus solicitaciones de carga, pero no necesariamente es un concreto durable, que a largo plazo, por el mantenimiento requerido, puede resultar en un mayor costo. Por su parte, un concreto resistente y durable puede implicar un costo inicial mayor, pero a futuro representa ahorros considerables.

Para estimar la vida útil de una estructura de concreto reforzado, es necesario conocer la velocidad con la cual se corroe el acero embebido en el concreto. La cinética electroquímica trata los mecanismos presentes en la corrosión metálica y su evolución en el tiempo. Se describe la importancia de los procesos de polarización por activación y por concentración así como las técnicas empleadas para conocer la cinética de los procesos de corrosión.

Debido al auge que el concreto ha adquirido la construcción y para racionalizar un poco la materia prima y el gasto de energía que conlleva la elaboración de concreto; el arquitecto e ingeniero civil se ha visto en la necesidad de realizar ajustes en las mezclas. Hoy en día se sabe que existen una gran variedad de aditivos o cementantes, estos materiales provienen de la naturaleza y destacan en principio por su cualidad de mejorar las propiedades del concreto, siendo capaz de proveer características; según sea la necesidad del caso, por lo cual se consideran algunas adiciones de fundamental importancia e influencia en la obtención de grandes y notables mejoras en el concreto estructural. [3]

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEORICO

#### 2.1 Definición de corrosión

La corrosión de la armadura de acero en el concreto es un proceso electroquímico, que requiere de una reacción de oxidación, otra de reducción y la circulación de iones a través del electrolito. De esta manera se presentan dos áreas sobre la superficie del metal, una de las cuales actúa como ánodo y la otra como cátodo. El concreto funciona como ion electrolito, dentro de un circuito cerrado. Este fenómeno se produce por procesos de carbonatación o penetración del ion cloruro.

Para que se produzca la corrosión se necesitan las siguientes condiciones:

- a) La presencia de un ánodo que produce los electrones;
- b) el cátodo en la superficie donde se efectúa la reducción;
- c) la disponibilidad de oxígeno en correspondencia con el cátodo;
- d) la disponibilidad de agua (humedad) en la ubicación del cátodo;
- e) una conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo que permita la transferencia de electrones.

En el concreto armado se retarda o impide la corrosión del acero, cuando el revestimiento es impermeable y de espesor suficiente, factores que debilitan la penetración de agentes externos. Los reglamentos de construcción especifican, según los casos, el espesor del recubrimiento, la relación agua cemento y la resistencia mínima del concreto.

En el interior del concreto las barras de refuerzo están protegidas por una capa microscópica de óxido, que se forma sobre la superficie e impide la disolución del

acero, imposibilitando el proceso corrosivo. Esta película, denominada capa pasiva, se genera por la alcalinidad del concreto, que alcanza valores de pH superiores a 12,5. La protección contra la corrosión se pierde si el valor del pH es 9 o menos. [4]

### **2.1.2 Características del concreto para evitar la corrosión.**

A continuación se presentaran algunos puntos que describen las características y especificaciones que debe tener el concreto para evitar la corrosión:

#### **a) Dosificación del concreto.**

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso. Entre los aspectos que se deben garantizar para lograr las condiciones anteriores están: la manera de proporcionar los agregados y su calidad, de tal manera que se asegure el menor volumen de vacíos; la influencia del agua en la consistencia del concreto fresco, la influencia de la relación agua-cemento, el grado de hidratación del cemento y la incorporación de aditivos en el cemento.

#### **b) Compacidad y homogeneidad.**

Es quizás lo más importante en cuanto a resistencia del concreto a la penetración de los agentes agresivos externos. Es inversamente proporcional a la porosidad, por lo que entre más alta sea la compacidad, mayor protección tendrá la armadura a la carbonatación y al ataque de los cloruros, que son los agentes más agresivos. La compacidad es función de la cantidad y calidad de los materiales y de su proporción. Aun así, cumpliendo con lo anterior, el transporte, la colocación y el mal mezclado afectan grandemente la homogeneidad del concreto.

#### **c) Espesor del recubrimiento.**

La protección que le brinde el concreto a la armadura dependerá del grado de impermeabilización que éste le proporcione, por lo que el espesor del recubrimiento es muy importante.

**d) Existencia de fisuras.**

Éstas constituyen un camino rápido para la llegada de los agentes agresivos a la armadura, por lo que su control es sumamente importante. En general, se limitan a las aberturas de entre 0,1 mm y 0,4 mm.

**e) Otros factores que influyen directamente son:**

Humedad ambiental, efecto del oxígeno, efecto de la temperatura, estado superficial del acero, los esfuerzos de tensión en el acero, las corrientes de interferencia, el contacto galvánico entre dos metales, iones despasivantes, cloruros, sulfatos, carbonatación y lixiviación. Se insta al lector a revisar la literatura especializada para ahondar sobre estos otros factores. [5]

**2.1.3 Degradación del concreto.**

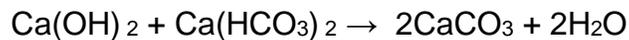
El deterioro del concreto es un problema a combatir y sus principales procesos de degradación del concreto pueden ser clasificados en tres grupos:

a) Procesos debido a la acción de aguas suaves, que han penetrado y humedecido el concreto, por lo que disuelven y lavan algunos componentes del cemento.

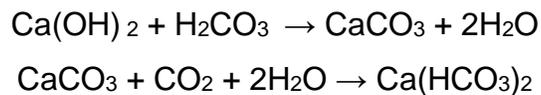
b) Procesos de degradación, debido a la acción de aguas que contienen compuestos mismos que reaccionan con los componentes del cemento. Los nuevos productos de estas reacciones químicas son compuestos solubles en agua o son productos que no tienen propiedades de unión. Este tipo de procesos son los que producen la corrosión del acero que forma parte del acero reforzado, por ejemplo, soluciones de ácidos y sales agresivas en la industria química.

c) Procesos de degradación debido a la cristalización de sales en los poros y capilaridades del concreto, lo que aumenta su volumen y como consecuencia surgen tensiones y grietas en el concreto.

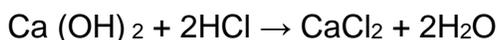
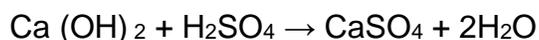
La degradación del concreto debido a la acción de aguas suaves se condiciona al hecho de que todos los componentes del cemento, y especialmente el hidróxido del calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), se disuelven con diferente grado de solubilidad en agua. Durante una acción más prolongada del agua en el concreto, el  $\text{Ca(OH)}_2$ , puede ser disuelto y arrastrado completamente del agua, acompañado por perturbación estructural del concreto y disminución de su resistencia mecánica. En la presencia de sales de bicarbonato de calcio y de magnesio, disueltas en el agua, la solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$ , baja. En la presencia de aguas duras se pueden formar carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), según la siguiente reacción:



Lo que incrementa la densidad del concreto: el  $\text{CaCO}_3$  es la composición de la roca caliza. El Proceso de destrucción del concreto es intenso en medios ácidos. Los productos resultantes de las reacciones químicas ente el concreto y el medio ambiente en este caso, son compuestos solubles en agua, que se lavan y son arrastrados por esta, o se forman masa amorfas. Más conocida es la degradación de concreto en ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que forma parte de muchas aguas naturales. Este acido reacciona con el cemento formándose bicarbonato de calcio ( $\text{Ca(HCO}_3)_2$ ) que es soluble en agua:

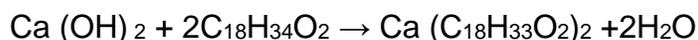
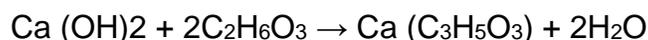
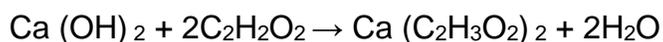


Los ácidos minerales como el clorhídrico, sulfúrico o nítrico son especialmente agresivos y peligroso para el concreto. Al reaccionar con el cemento, parte del concreto se convierte en sus respectivas sales de calcio, o masas amorfas compuestas por el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al(OH)}_3$  y  $\text{Fe(OH)}_2$ , con propiedades de unión muy malas. Por ejemplo, los ácidos clorhídrico y sulfúrico reaccionan con el  $\text{Ca(OH)}_2$  del concreto, produciendo sales de calcio solubles en agua:

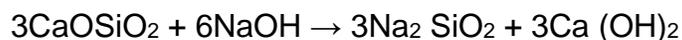


De una manera análoga reaccionan con el concreto algunas sales (por ejemplo, sulfatos de aluminio y de amonio), que hidrolizan en soluciones acuosas formando ácidos.

Los concretos se degradan también por ácidos orgánicos muy reactivos, como el ácido acético ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ), láctico ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ) y algunos ácidos grasos como el oleico ( $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ ), esteárico y palmítico, que se encuentran en productos alimenticios, grasas animales y vegetales, medios industriales con procesos tecnológicos de síntesis orgánica. Durante la reacción entre el  $\text{Ca (OH)}_2$  del concreto y los ácidos orgánicos, se forman las respectivas sales de calcio:

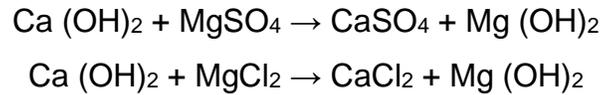


Las soluciones alcalinas concentradas en contacto con el concreto pueden ocasionar una degradación muy intensa que está relacionada con la destrucción de sus componentes ácidos. Como por ejemplo:



Formando compuestos solubles en agua, que se lavan y son arrastrados afuera del concreto. La degradación del concreto es especialmente intensa en soluciones concentradas de bases calientes.

Las sales de magnesio ( $\text{MgCl}_2$  y  $\text{MgSO}_4$ ), que forman parte de aguas subterráneas y aguas residuales, pueden también reaccionar con el  $\text{Ca (OH)}_2$  del concreto:



Y el hidróxido de magnesio ( $\text{Mg (OH)}_2$ ) obtenido es soluble en agua, con malas propiedades de unión para el concreto. La degradación de concreto bajo la acción de sales de magnesio es muy significativa si su contenido en agua es mayor que 0.5 a 1 %.

El concreto se degrada en ambientes con presencia de sulfatos que son frecuentemente parte de las aguas residuales de la industria. En concentraciones altas de ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), que se deposita en los poros y capilares del concreto aumentando su volumen.

La degradación del concreto en medios de gases agresivos es también de naturaleza química. Las construcciones de concreto prácticamente no sufren de destrucción en un ambiente de aire puro y seco. Sin embargo, cuando se aumenta la humedad, varios gases agresivos como el dióxido de azufre y el ácido sulfhídrico ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) del aire forman ácidos minerales, que deterioran el concreto según el mecanismo anteriormente descrito.

Al describir las características de degradación del concreto en un ambiente húmedo y agresivo, hay que tener en cuenta la posibilidad del desarrollo de corrosión de los aceros al carbono o aceros de baja aleación, utilizados como estructura metálica de refuerzo. Los aspectos de naturaleza del proceso de corrosión, en un concreto húmedo la estructura metálica pueden desarrollar una corrosión electroquímica muy intensa, cuyo carácter depende de los agentes corrosivos presentes en el ambiente interno y externo. Por otra parte, existe la posibilidad de que estos agentes llenen a la superficie del metal a través de los capilares y microgrietas en la capa del concreto. [6]

## **2.2 Concreto reforzado**

Definimos al concreto reforzado como la unión entre concreto y acero, 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. 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 ( $\text{Ca (OH)}_2$ ) que se forma durante la hidratación de los silicatos ( $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ ) 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. [5]

## **2.3 Impacto ambiental y conservación de los recursos empleados en la fabricación del concreto.**

Los tiempos actuales conllevan a la economía de recursos a maximizar su beneficio y optimizar su desempeño. La poca durabilidad del concreto es de interés público; la falla de estructuras daña a la infraestructura y a la industria. A continuación se exponen algunos puntos importantes de afectaciones o impactos que pueden reducirse con un diseño correcto del concreto.

### **a) Impacto ambiental del concreto**

La producción mundial de concreto al año es de 1600 millones de toneladas, que contabiliza aproximadamente el 7% de la carga global del dióxido de carbono en la atmósfera. El cemento Portland no sólo es uno de los materiales más empleados en la construcción, es el responsable de una gran cantidad de gases de invernadero. La producción de una tonelada de cemento requiere aproximadamente de 4 GJ de energía y la manufactura del clinker de cemento Portland descarga aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera. La extracción de materias primas de las arcillas y calizas, así como combustible como carbón, frecuentemente resultan en una deforestación excesiva y pérdida de suelos. Se estima que globalmente al año se consumen  $10^{10}$  toneladas de arena, grava y roca triturada. El concreto también requiere grandes cantidades de agua, se estima que el agua de mezclado requerida asciende anualmente a  $10^9$  metros cúbicos.

La escasez de materiales durables también tiene consecuencias ambientales serias. El incrementar la vida de servicio de los productos es una solución sencilla y a largo plazo para preservar los recursos naturales de la tierra. Las estructuras de concreto normalmente se diseñan con una vida de servicio de 50 años, pero la experiencia ha mostrado que en ambientes urbanos o marinos algunas estructuras se deterioran a los 20 años. Freyermuth (2001), ha sugerido que la vida de diseño de las estructuras se incremente hasta 100 o 120 años, y para puentes urbanos, al menos a 150 años de vida de servicio. La tendencia hacia el diseño de la infraestructura basada en el costo del ciclo de vida no sólo maximiza el regreso del capital disponible, sino también los recursos naturales disponibles. El impacto ambiental de la industria del concreto puede reducirse si se incrementa la productividad del recurso mediante la conservación de materiales y energía para elaborar el concreto.

La conservación del cemento es el primer paso en la reducción del consumo de energía y emisiones de gases de invernadero. Para incrementar la productividad del recurso se requiere minimizar el consumo de cemento, mientras se debaten las demandas futuras para más concreto. Ello debe ser la prioridad para una industria

de concreto viable. A excepción de los cementos Portland mezclados que contienen aditivos minerales, ningún otro cemento hidráulico parece satisfacer la colocación, endurecimiento y características de durabilidad de los productos basados en cemento Portland.

El consumo mundial de cemento para el 2010 se estima que alcance los 2 mil millones de toneladas, además de existir suministros adecuados de subproductos cementantes y puzolánicos que puedan emplearse como substitutos del cemento para eliminar la necesidad de la producción de más clinker de cemento Portland.

La industria mexicana del cemento ha implementado medidas para la reducción del dióxido de carbono descargado a la atmósfera; sin embargo, la filosofía debe ser disminuir la descarga al máximo.

#### **b) Conservación del agregado**

En Norteamérica, Europa y Japón, cerca de dos tercios de desperdicios de construcción y demoliciones consisten de mampostería y escombros de concreto viejo, hecho que representa una oportunidad para mejorar la productividad del recurso mediante el uso de agregado grueso, derivado de desperdicios de demolición y construcción. En algunas partes del mundo, las arenas dragadas pueden ser procesadas como agregados finos. El reciclaje de los desperdicios en lugar del proceso de materiales vírgenes está siendo particularmente económico en los países donde la tierra es escasa y los costos de disposición de los desperdicios son muy altos.

El agregado de concreto reciclado, particularmente los agregados de mampostería reciclados, tienen una porosidad más alta que el agregado natural. Por consiguiente, para una determinada consistencia, los requerimientos de agua para elaborar concreto fresco tienden a ser más altas y las propiedades mecánicas del concreto endurecido se ven afectadas. El problema puede resolverse empleando mezclas de agregado natural y reciclado o por el uso de aditivos reductores de agua y ceniza volante en el concreto.

### **c) Conservación de agua**

El concreto premezclado emplea mucha agua para limpiar las ollas o tracto camiones del concreto premezclado. La mayoría del agua industrial reciclada puede usarse para elaborar concreto, al menos que se indique lo contrario en las especificaciones de proyecto o pruebas.

El agua tratada también se puede usar para agua de curado y lavado de implementos. Se pueden tener ahorros considerables si en el curado con agua se emplean compuestos tex tiles con un tejido absorbente de agua en el interior y una membrana impermeable en el exterior o con curadores diseñados para este fin.

Incuestionablemente, el desafío que la industria del concreto encara para el siglo XXI es lograr un modelo sustentable de crecimiento. La tarea es formidable, pero las ideas y ejemplos de esta sección muestran que pueden lograrse mediante un cambio de paradigma de la cultura de una construcción acelerada a una cultura de conservación de energía y materiales. [7]

### **2.4 Corrosión en el acero de refuerzo**

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto ocurre por la destrucción de la capa pasivante formada naturalmente sobre el acero embebido en concreto. Esta tiene dos causas principales:

La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (añadidos durante la fabricación del concreto o por la penetración del exterior u otros iones despasivantes en contacto con el refuerzo. La disminución de la alcalinidad del concreto cuando este reacciona con sustancias acidas del medio ambiente. Los iones despacivantes provocan una corrosión de tipo localizado, mientras que la reducción de la alcalinidad del concreto permite la disolución completa de la capa pasivante y por lo tanto, ocasiona una corrosión de tipo general.

La corrosión de la armadura de acero en el concreto es un proceso electroquímico, que requiere de una reacción de oxidación, otra de reducción y la circulación de

iones a través del electrolito. De esta manera se presentan dos áreas sobre la superficie del metal, una de las cuales actúa como ánodo y la otra como cátodo. El concreto funciona como ion electrolito, dentro de un circuito cerrado. Este fenómeno se produce por procesos de carbonatación o penetración del ion cloruro.

Para que se produzca la corrosión se necesitan las siguientes condiciones:

- a) La presencia de un ánodo que produce los electrones.
- b) El cátodo en la superficie donde se efectúa la reducción.
- c) La disponibilidad de oxígeno en correspondencia con el cátodo.
- d) La disponibilidad de agua (humedad) en la ubicación del cátodo.
- e) Una conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo que permita la transferencia de electrones.

Consecuentemente la corrosión no se produce en el concreto seco, pues está impedido el proceso electrolítico, tampoco ocurre en el concreto saturado de agua debido a la falta de oxígeno.

La corrosión por la carbonatación del concreto se inicia con la combinación de la portlandita u hidróxido de calcio del cemento con el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, que reduce la alcalinidad del concreto y disminuye su eficacia en la protección del refuerzo, este tipo de corrosión se potencializa en concretos con poros llenos de aire.

La corrosión por cloruros, típica de los ambientes marinos, se debe al ion cloruro presente en el agua o en la niebla marina, que actúa como un catalizador para la oxidación, tomando parte activa en la reacción. Al oxidar al acero para formar el ion complejo cloruro férrico,  $(\text{FeCl}_3)^-$ , arrastra este ion inestable en la solución, donde reacciona con los iones hidroxilo disponibles para formar hidróxido de hierro,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  que libera iones cloruro y consume iones hidroxilo como se esquematiza en las siguientes reacciones:



Los electrones liberados en la reacción de oxidación fluyen a través del acero hasta la superficie catódica. De este proceso resulta una concentración de ion cloruro y una reducción del pH que favorece la ruptura continua de la película de óxido pasivante.

En el concreto armado se retarda o impide la corrosión del acero, cuando el revestimiento es impermeable y de espesor suficiente, factores que debilitan la penetración de agentes externos. Los reglamentos de construcción especifican, según los casos, el espesor del recubrimiento, la relación agua cemento y la resistencia mínima del concreto.

En el interior del concreto las barras de refuerzo están protegidas por una capa microscópica de óxido, que se forma sobre la superficie e impide la disolución del acero, imposibilitando el proceso corrosivo. Esta película, denominada capa pasiva, se genera por la alcalinidad del concreto, que alcanza valores de pH superiores a 12,5. La protección contra la corrosión se pierde si el valor del pH es 9 o menos.

Actividad del ion cloruro. Los cloruros se encuentran inicialmente en el concreto como parte de sus constituyentes. En previsión de esta ocurrencia, los reglamentos de construcción establecen máximos permisibles del ion cloruro para el conjunto del cemento, agregados, agua de mezcla y aditivos según el grado de exposición de la estructura.

En el medio marino la corrosión se debe a los iones cloruros provenientes del agua de mar y la brisa marina que ingresan y se difunden a través de la estructura capilar del concreto.

En el concreto el ion cloruro se encuentra combinado químicamente, adsorbido físicamente o en estado libre. Únicamente la parte de cloruro no combinado es la

responsable de la corrosión del refuerzo. Se estima que aproximadamente el 0,4% del cloruro, con respecto al peso del cemento puede llegar a combinarse.

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto ocurre por la destrucción de la capa pasivante formada naturalmente sobre el acero embebido en concreto. Esta tiene dos causas principales:

La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (añadidos durante la fabricación del concreto o por la penetración del exterior u otros iones despasivantes en contacto con el refuerzo.

La disminución de la alcalinidad del concreto cuando este reacciona con sustancias acidas del medio ambiente.

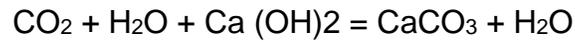
Los iones despasivantes provocan una corrosión de tipo localizado, mientras que la reducción de la alcalinidad del concreto permite la disolución completa de la capa pasivante y por lo tanto, ocasiona una corrosión de tipo general. Causas de la corrosión del acero de refuerzo en concreto: [8, 9]

## **2.5 Deterioro por carbonatación y corrosión.**

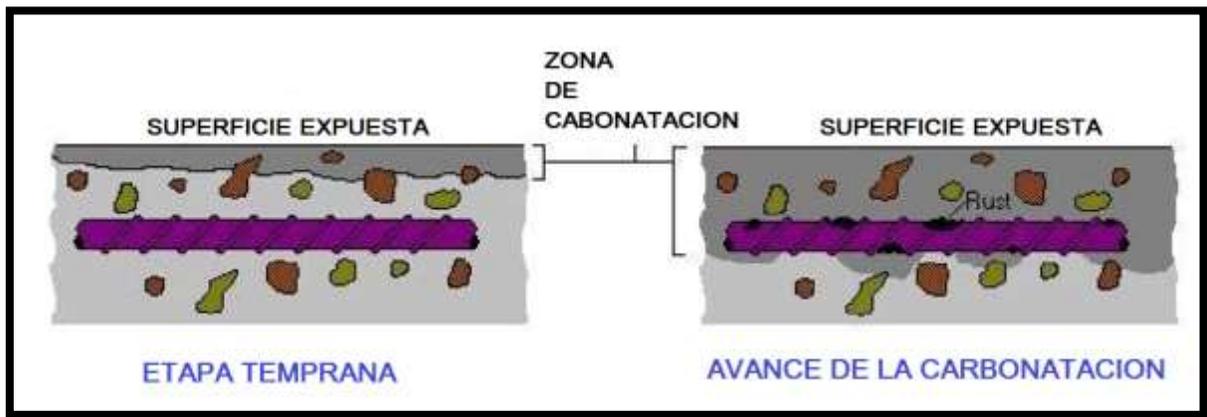
La carbonatación se presenta comúnmente en medios rurales y con mayor incidencia en zonas urbanas, en las que se alcanzan grandes concentraciones de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que son combinados con el agua de la humedad ambiental formando los respectivos ácidos sulfurosos y nitrosos. En zonas de alta contaminación ambiental y altas precipitaciones pluviales, el pH llega a tomar valores cercanos a 4, lo que se conoce como lluvia ácida, que afecta las estructuras de concreto de la misma forma que la carbonatación.

La carbonatación del concreto es la reacción entre los gases ácidos del aire, la humedad y la pasta de cemento alcalino. El dióxido de carbono y otros gases ácidos

se difunden en el hormigón en condiciones húmedas. Reacciona con cemento hidratado para formar carbonato de calcio y reduce el pH.



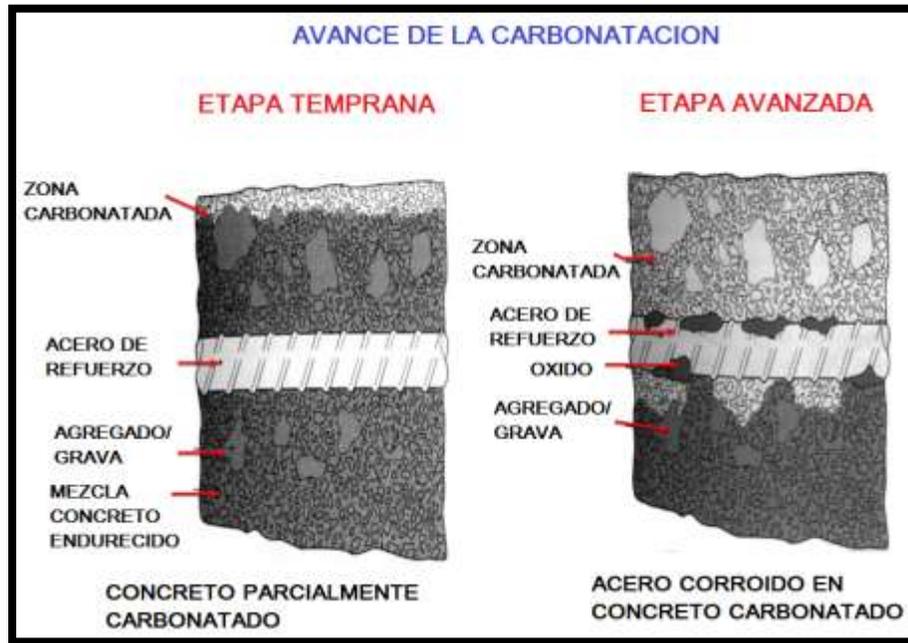
**Figura 2.1** Etapa temprana y avance de la carbonatación en el concreto armado.



El dióxido de carbono y otros gases ácidos se difunden en el hormigón en condiciones húmedas. Reacciona con cemento hidratado para formar carbonato de calcio y reduce el pH.



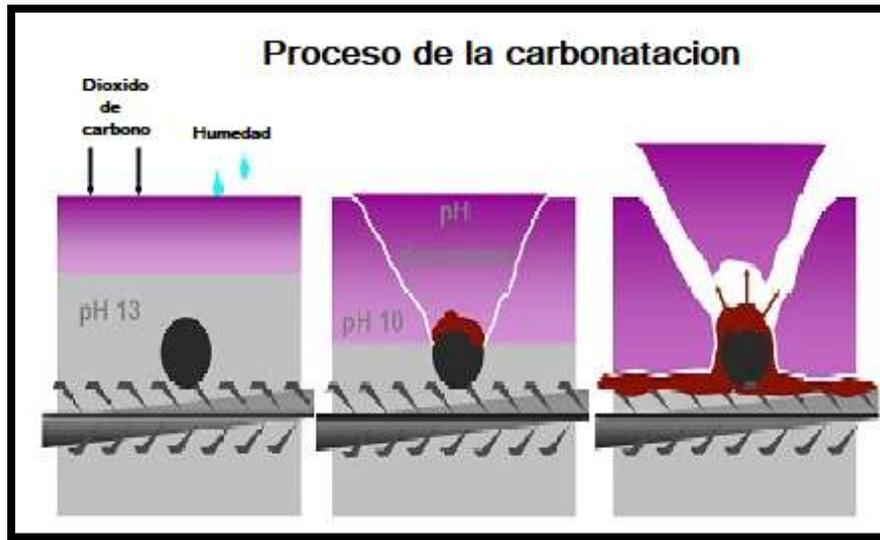
**Figura 2.2** Corrosión del acero causado por carbonatación.



El pH del concreto puede cambiar por el ingreso de diversas sustancias desde el medio ambiente. Estas sustancias son principalmente el  $\text{CO}_2$  que se encuentra de manera natural en el aire y el  $\text{SO}_3$  que se produce de la combustión de combustibles fósiles. De estos, el  $\text{CO}_2$  en el aire es de mayor importancia, de ahí el nombre de carbonatación.

Aunque la porción de mezcla externa del concreto se carbonata rápidamente, el  $\text{CO}_2$  continúa su ingreso a mayor profundidad y cuando el pH alrededor del acero de refuerzo es cercano a 9, la capa de óxido protector pierde su estabilidad termodinámica, dando paso a la corrosión del acero.

**Figura 2.3** Agente causantes de la carbonatación, pH en el concreto y aumento en el diámetro del acero por corrosión.



En la figura 2.3 muestra el proceso de la carbonatación en tres imágenes, en la primera muestra un concreto armado sano con pH 13, en presencia de humedad y dióxido de carbono. En la segunda y tercera imagen muestra la corrosión del acero, simbolizando en color rojo la corrosión y el aumento de volumen en el acero provocando rompimiento en el recubrimiento y una exposición del acero. [7]

## 2.6 Corrosión en suelos

El suelo por su contenido variable de humedad, sales y materia orgánica en descomposición es el electrolito más complejo de todos los que se pueden encontrar.

Por necesidades mecánicas, económicas y de seguridad, la industria tiene que apoyar sobre él y enterrar numerosas y muy variadas estructuras de acero, las cuales se ven sometidas a un proceso de corrosión que en algunos casos puede ser complicado.

Para tener un buen control de la corrosión de estas estructuras se han de combinar los dos tipos de protección a nuestro alcance: un buen recubrimiento pasivo, complementado por un sistema de protección catódica adecuado. Confiar la protección anticorrosiva de una estructura enterrada solamente a la protección catódica, puede hacerse, pero será siempre antieconómico si la estructura no es de dimensiones pequeñas.

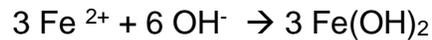
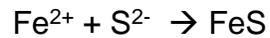
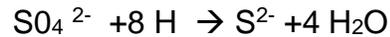
El suelo generalmente es un medio heterogéneo en donde se dan muchas variaciones en la velocidad de corrosión de los metales. Un suelo natural contiene los siguientes elementos: arena, arcilla, cal y humus. Estos componentes pueden estar mezclados en el suelo en diferentes proporciones que darán lugar a distintos grados de agresividad.

Por lo general, los suelos arenosos, margo-arenosos, margo-calcáreos y calcáreos no son agresivos; los suelos arcillosos en algunas condiciones son agresivos. Los que son agresivos de por sí son las turbas, los humus libres de cal y también los suelos cenagosos y de aluvión.

Los suelos artificiales, esto es los formados por escorias y basuras, elementos en putrefacción y residuos humanos e industriales también son agresivos.

Si el oxígeno atmosférico no puede penetrar el suelo, es frecuente el caso en suelos arcillosos o turbosos, el hidrógeno producido a consecuencia de la reacción catódica en la estructura enterrada puede llegar a ser eliminado (oxidado) por una acción microbiana. Este proceso es el resultado de la actividad metabólica de un microorganismo (la bacteria *Sporovibrio desulfuricans*) que se desarrolla en ausencia completa de oxígeno libre (condiciones anaerobias).

Para oxidar el hidrógeno de estos medios nutritivos orgánicos, esta bacteria no utiliza el oxígeno libre, sino el ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), reduciéndolo a sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ). Uno de los mecanismos más comúnmente aceptados para explicar lo anterior es el siguiente:



PRODUCTOS DE  
CORROSIÓN

El resultado neto es que la corrosión continúa y se denomina corrosión anaerobia. Los síntomas característicos en las conducciones metálicas enterradas son el ennegrecimiento local del suelo por la formación del sulfuro de hierro y a veces el olor a ácido sulfhídrico. [10]

## 2.7 Diseño de mezclas

Es un proceso que consiste en calcular las proporciones de los elementos que forman el concreto, con el fin de obtener los mejores resultados. Existen diferentes métodos de Diseños de Mezcla; algunos pueden ser muy complejos como consecuencia a la existencia de múltiples variables de las que dependen los resultados de dichos métodos, aun así, se desconoce el método que ofrezca resultados perfectos, sin embargo, existe la posibilidad de seleccionar alguno según sea la ocasión. Las propiedades del concreto se comprueban prácticamente y pueden hacerse después de los ajustes necesarios para obtener las mezclas de proporciones adecuadas que de la calidad deseada. [11]

### 2.7.1 Cemento

Es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclarlo con arena, grava y otros materiales tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que una vez endurecido desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad. La resistencia mecánica de este material debe de completarse a los 28 días.

Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con agua para formar una pasta (cemento y agua) se agrega a los agregados (arena y grava, piedra triturada u otro material granular) actúa como adhesivo y une a todas las partículas de agregados para formar así al concreto, el material de construcción ms versátil y de mayor uso en el mundo. [11]

### **2.7.2 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 o también, resultantes de un proceso industrial que al ser mezclados con cementantes permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros. [12]

### **2.7.3 Agua**

La norma NMX-C-122 da a conocer la necesidad de los parámetros ideales que deben cumplir las aguas naturales y contaminadas para emplearse en la elaboración o curado del concreto hidráulico, así mismo da a conocer la acción agresiva de los diferentes tipos

El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica. [13]

#### 4.7.4 Aditivos

Se entiende por aditivos aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento. En el concreto armado o pretensados no podrán utilizarse como aditivos el cloruro cálcico, ni en general, productos en cuya composición intervengan cloruros, sulfuros, sulfitos u otros componentes químicos que puedan ocasionar o favorecer la corrosión de las armaduras. [14]

**Tabla 2.1** Función de los aditivos en el concreto.

<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Función principal</b>
<b>Reductores de agua / Plastificantes</b>	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
<b>Reductores de agua de alta actividad / Súper plastificantes</b>	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
<b>Modificadores de fraguado / Aceleradores retardadores</b>	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas para mejorar su comportamiento frente a las heladas.
<b>Multifuncionales</b>	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad.

## **2.8 Análisis de la composición del acero**

Pruebas realizadas para verificar el porcentaje composición del acero que se empleó en la armado del concreto era Acero en su totalidad por fines de calidad.

## **2.9 Análisis de tierra**

Las pruebas que se realizaron para evaluar la agresividad de la tierra o suelo que fue el ambiente de exposición para las probetas, son las siguientes:

- Análisis de OCP, pH
- Análisis de Resistividad
- Análisis de Cloruros

Se presentan unos índices que permiten determinar las características agresivas de un suelo basándose en el contenido de aniones del mismo, cloruros, sulfatos y sulfuros, pH, potencial rédox y resistividad. Este tipo de información resulta de interés para predecir la agresividad de un suelo, por ejemplo, una tubería enterrada y con base en esto, evaluar la corrosión y la protección correspondiente.

**2.4 Figura.** Índices de Resistividad, Potencial redox, pH, Cloruros, Sulfatos y Cloruros. [10]

		INDICE
Resistividad, $\rho$ ( $\Omega$ -cm)	> 12 000	0
	12 000 - 5 000	-1
	5 000 - 2 000	-2
Potencial redox, $E_{redox}$ (mV vs. enl)	< 2 000	-4
	> + 400	+2
	400 - 200	0
pH	200 - 0	-2
	< 0	-4
	> 5	0
Cloruros, $Cl^-$ (mg/kg)	< 5	-1
	< 100	0
	100 - 1000	-1
Sulfatos, $SO_4^{2-}$ (mg/kg)	> 1000	-4
	< 200	0
	200 - 300	-1
Sulfuros, $S^{2-}$ (mg/kg)	> 300	-2
	0	0
	0 - 0.5	-2
	> 0.5	-4
<i>Características del suelo</i>		<i>Suma</i>
No agresivo		0
Débilmente agresivo		-1 a -8
Medianamente agresivo		-8 a -10
Sumamente agresivo		< -10

**2.9.1 Análisis de PH del suelo**

En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos (pH <5.5) pueden motivar una rápida corrosión del metal desnudo, y la agresividad del suelo aumenta con el incremento de la acidez (disminución del pH), pero estos valores de pH no son normales. La mayor parte de los suelos tienen pH comprendidos entre 5.0 y 8.0, en cuyo caso la corrosión depende de otros factores. En suelos alcalinos parece existir una cierta correlación entre conductividad y agresividad.

En un medio anaerobio es posible predecir la corrosión midiendo el pH y el potencial redox. Estas medidas permiten establecer las condiciones que favorecen la actividad microbiológica responsable de la corrosión anaerobia. El pH más favorable es entre 5.5 y 8.5 (neutro). En estas condiciones, la medida del potencial redox efectuada con un electrodo de platino, permite establecer si un terreno está predispuesto al crecimiento de bacterias sulfato-reductoras. [10]

### **2.9.2 Análisis de Resistividad**

La resistividad de un terreno depende, en particular, de su estructura, de las dimensiones de sus partículas constituyentes, de su porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y de su contenido de iones.

Por ejemplo, en lo que se refiere a un suelo arcilloso, con un 5% de humedad, dicho suelo puede presentar una resistividad de 10 000 ohm-m, en cambio, con un 20% de humedad, la resistividad disminuye hasta 100 ohm-m.

Es obvio, por tanto, que la resistividad de un terreno y especialmente la de los estratos superiores, puede variar notablemente con las estaciones del año, la precipitación pluvial, la actividad agrícola e industrial, etcétera.

En cambio, la temperatura no ejerce una influencia tan marcada, a menos que supere el punto de congelación, después de lo cual hay un aumento significativo de la resistividad. [10]

### **2.9.3 Los Cloruros**

La corrosión inducida por cloruro se presenta en nuestro país en estructuras expuestas al medio marino. Los iones cloruro están presentes en el agua de mar, pero es posible que también los desplace el viento de la brisa marina a la zona costera y los deposite en estructuras de concreto cercanas a la línea de mar. Otra fuente de cloruros es en el agua de amasado, lo cual aumenta el alto riesgo de corrosión. [15]

De acuerdo al modelo de vida útil, también es necesario que los iones cloruro avancen desde el exterior hasta llegar al nivel de la varilla. Una vez que llegan al acero, se acumulan hasta alcanzar una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de romper la estabilidad de la película pasiva y dar inicio al proceso de corrosión.

Los iones cloruro pueden estar presentes en el concreto de tres maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros, lo que constituye la disolución poro.

Los iones cloruro que son dañinos para el acero de refuerzo son los que se hallan disueltos o libres, pero debido a los equilibrios que se presentan es posible que los que están adsorbidos se incorporen a la disolución y se tornen peligrosos.

Cuando se utiliza agua de amasado con cloruros, cierta cantidad reacciona con los compuestos hidratados del concreto para formar las sales de Friedel, otra cantidad se adsorbe en la superficie de las paredes de los poros y sólo una parte queda disuelta. Esta distribución depende del tipo y la cantidad de cemento con que se dosifique al concreto.

En el caso de una fuente externa de iones cloruro, el acceso es a través de los poros del concreto. Al avanzar al interior una cantidad reacciona, otra se adsorbe y otra fracción queda disuelta. El medio de exposición es determinante para el ingreso de los iones cloruro. En una estructura sumergida en agua de mar, el mecanismo lo determina la diferencia de concentración entre el exterior y el interior del concreto, es decir, se favorece un proceso difusivo.

En obras que se hallan a la intemperie, durante el día, por efecto de la humedad relativa del ambiente, se evapora una cierta cantidad de agua contenida en los poros, quedando parcialmente llenos. Si la brisa marina deposita sal sobre su área superficial, el ingreso del ion es por succión capilar, o sea cuando que la humedad relativa permite la formación de una película superficial de agua (punto de rocío) que es succionada por los poros capilares para llenarse nuevamente. En la succión, la sal que se depositó durante el día es arrastrada por el agua condensada y penetra al interior del concreto. Una combinación de las dos formas de ingreso de cloruro se observa en la zona de variación de marea, en la que los poros eliminan agua durante marea baja y se saturan en marea alta.

Barras de refuerzo de acero embebido en concreto despasivar cuando una cierta cantidad de cloruros se construye en su entorno, siendo el riesgo de corrosión de la armadura en relación con el contenido de cloruro en el concreto.

Por lo tanto, el análisis de cloruro fiable en el hormigón endurecido se convierte en un parámetro clave en la evaluación de las estructuras existentes y en la predicción de la futura vida de servicio.

El procedimiento para el análisis de cloruro total se ha dividido en dos pasos:

1. extracción
2. cuantificación

Siendo capaz de discriminar la fiabilidad del procedimiento seguido en cada uno de ellos.

Dos métodos diferentes de extracción de cloruro total de la muestra sólida, así como seis formas diferentes de análisis de los líquidos resultantes han sido probados.

También se decidió que otros métodos también podrían utilizarse para la elección de cada laboratorio. [16]

## **2.10 Pruebas realizadas al concreto: fresco y fraguado**

Para verificar que el concreto fabricado tuviera condiciones óptimas de calidad se realizaron pruebas en fresco y después de su fraguado de 28 días fue sometido a otras pruebas a lo largo de su periodo de exposición en el subsuelo.

### **2.10.1 Pruebas al concreto fresco**

Se realizaron evaluaciones al concreto en fresco para verificar que cumpliera con los estándares de calidad bajo las normas mexicanas NMX y ASTM, las pruebas fueron las siguientes:

- \* Temperatura
- \* Revenimiento

- \* Masa Unitaria
- \* Contenido de aire
- \* Elaboración de probetas y curado

#### **2.10.1.1 Temperatura**

La temperatura se obtiene al tomar la muestra de concreto fresco, colocando un termómetro dentro de la mezcla, si el concreto se encuentra arriba de los 32 °C o debajo de los 10 °C estará dentro de los parámetros de temperatura necesarios para mantener la calidad del concreto desde un inicio. [17]

#### **2.10.1.2 Revenimiento**

Es la medida de la consistencia del concreto fresco, esta prueba se realiza con el objetivo de determinar la medida de fluidez o movilidad relativa de la mezcla del concreto. Esta prueba se realizara bajo las especificaciones de la NMX -156-ONNCCE [18] y como lo recomienda ASTM-C 143/C 143M-08. [19]

#### **2.10.1.3 Masa unitaria**

Es aquel concreto hidráulico que su masa normal en estado fresco está dentro del rango de 1,900 kg/cm<sup>3</sup> hasta 2,400 kg/m<sup>3</sup>. Esta prueba se realizara bajo las especificaciones de la NMX -162-ONNCCE [20] y como lo recomienda ASTM-C 138/C 138M-08. [21]

#### **2.10.1.4 Contenido de Aire**

Este método de prueba se puede usar para determinar el contenido de aire de los concretos normal y pesado, determinará la cantidad de vacíos de aire en el concreto, tanto incluido como atrapado. Los vacíos microscópicos de aire incluido aportan una fuente de alivio a la presión interna dentro del concreto para acomodar las presiones que se desarrollan cuando se forman los cristales de hielo en los poros y en los capilares del concreto. Sin el contenido de aire apropiado en el mortero del concreto, el concreto normal que está expuesto a ciclos de congelación y deshielo, se escamará y/o astillará, dando como resultado una falla en su durabilidad. Por ejemplo, un concreto proporcionado para 5% de aire será aproximadamente de 15 al 25% menor en resistencia si el contenido de aire se eleva al 10%. Esta prueba se realizara bajo las especificaciones de la NMX -157-ONNCCE [22] y como lo establece ASTM-C 231-08b. [23]

#### **2.10.1.5 Elaboración de especímenes y curado**

El curado es el proceso mediante el cual se favorece la hidratación del cemento o de los materiales cementantes en la mezcla, en un ambiente específico de humedad y temperatura. Este proceso ayuda a que el concreto madure y desarrolle sus propiedades mecánicas típicas del material en estado endurecido, en este lapso se desarrollan las reacciones químicas del concreto, tiempo en el cual el concreto debe permanecer en condiciones favorable de humedad y temperatura. [24] En el caso de los cilindros de concreto de este estudio el curado fue en piletas de agua con cal, pero en la construcción se realiza curado aplicando agua, curacreto y plásticos para conservar su humedad y que no exista una deshidratación. Esta prueba se realizara bajo las especificaciones de la NMX -159-ONNCCE [25], NMX -160-ONNCCE [24] y como lo establece ASTM-C 231-08b. [26]

### **2.11.1 Pruebas de concreto endurecido**

Se realizaron evaluaciones al concreto endurecido para verificar que cumpliera con los estándares de calidad bajo las normas mexicanas y ASTM, las pruebas fueron las siguientes:

- Resistencia al compresión
- Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ )
- Análisis de carbonatación por indicador de Fenolftaleina

#### **2.11.1.1 Prueba de resistencia a la compresión**

Análisis para medir la capacidad de carga por unidad de área del concreto hidráulico, medida en ensayos de especímenes elaborados, curados y ensayados en las condiciones estándar especificadas en este caso por las NMX, se expresan en MPa ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). [27]

#### **2.11.1.2 Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ )**

El potencial electroquímico es un parámetro muy importante desde el punto de vista termodinámico, ya que permite conocer qué metal se comporta como ánodo y cuál como cátodo. Aún en situaciones en donde un metal presenta diferencias de potencial debido a heterogeneidades superficiales, algunas veces es posible determinar qué zona se encuentra actuando como cátodo y cuál como ánodo.

Esto es debido a que las zonas que actúan catódicamente presentan un potencial más positivo de acuerdo a la serie electromotriz y las zonas que actúan anódicamente muestran un potencial más negativo. Consecuentemente, el potencial puede ser medido continuamente para detectar si el metal se corroe de acuerdo a la diferencia de potencial entre ambas zonas.

La medición del potencial es sensible a cambios que acontezcan en un proceso de corrosión. Un cambio brusco puede indicar el paso de un estado activo a condiciones de pasividad y viceversa. Así mismo, adquiere valores característicos para diferentes situaciones de temperatura, agitación, etc.

No obstante que la medición del potencial es un indicativo de la actividad electroquímica del refuerzo, no es posible saber con precisión la velocidad a la que se está corroyendo, para ello es necesario estudiar la cinética del sistema concreto-metal. [28]

Esta medición informa si la corrosión está presente o no y, en caso de hallarse presente, de su severidad; sin embargo, no proporciona una medida de la velocidad de la corrosión.

El monitoreo de potencial es una técnica termodinámica en la cual se relaciona el estado de corrosión y el potencial de corrosión de un metal, como una medida del inicio o de la severidad de la corrosión. Un estado pasivo (tipificado por una velocidad de corrosión baja) se refleja en un potencial de corrosión noble, mientras el mismo material en un estado activo (tipificado por una velocidad de corrosión más alta), tiene un potencial menos noble consecuentemente el potencial puede ser monitoreado para mostrar si el material se corroe lenta o rápidamente.

El método es convenientemente aplicado para materiales (por ejemplo aceros inoxidables, aleaciones base níquel titanio, acero de refuerzo, entre otros) que deben su resistencia a la corrosión a la presencia y conservación de una película superficial protectora, la cual los hace pasivos en muchos medios. Cuando la pasividad se pierde, su potencial cambia drásticamente. El cambio es suficientemente grande (0.5 Volts) para ser medido y para enmascarar cambios de potencial más pequeños que tienen origen en fluctuaciones de Temperatura y pH, entre otros parámetros. Uno de las ventajas de este método es que mide la condición de la estructura misma, más que de la probeta con la que se busca

representar condiciones de planta y esto permite monitorear condiciones diferentes a las de corrosión generalizada. [29]

### **2.11.1.3 Análisis de carbonatación por indicador de Fenolftaleína**

El método consiste en determinar la profundidad de la capa carbonatada en la superficie de concreto endurecido por medio de un indicador. Este método se puede llevar a cabo, utilizando muestras realizadas en el laboratorio, en muestras tomadas de las estructuras terminadas (especímenes sitio), y se utilizará para las pruebas en el lugar.

Se utiliza una solución de 1 % de fenolftaleína en 70 % de alcohol etílico es adecuada para determinar la profundidad de carbonatación. Fenolftaleína no carbonatada se indica en color rojo en el concreto, y permanece incolora en concreto carbonatado.

Este método indicador no hace que sea posible, sin embargo, para determinar si la reducción del valor de pH puede haber resultado de influencias distintas a la absorción de CO<sub>2</sub> (por ejemplo, SO<sub>2</sub>, HCl u otros gases ácidos).

Las pruebas en las muestras de laboratorio se utilizan generalmente para comparar la velocidad de carbonatación en probetas de hormigón con diferentes mezclas, en condiciones definidas. Las pruebas en el lugar o con especímenes sitio son necesarias, en general, para dar información sobre el estado de una estructura o elemento estructural en un determinado momento en el tiempo, en las condiciones en el lugar. [30]

## CAPITULO 3

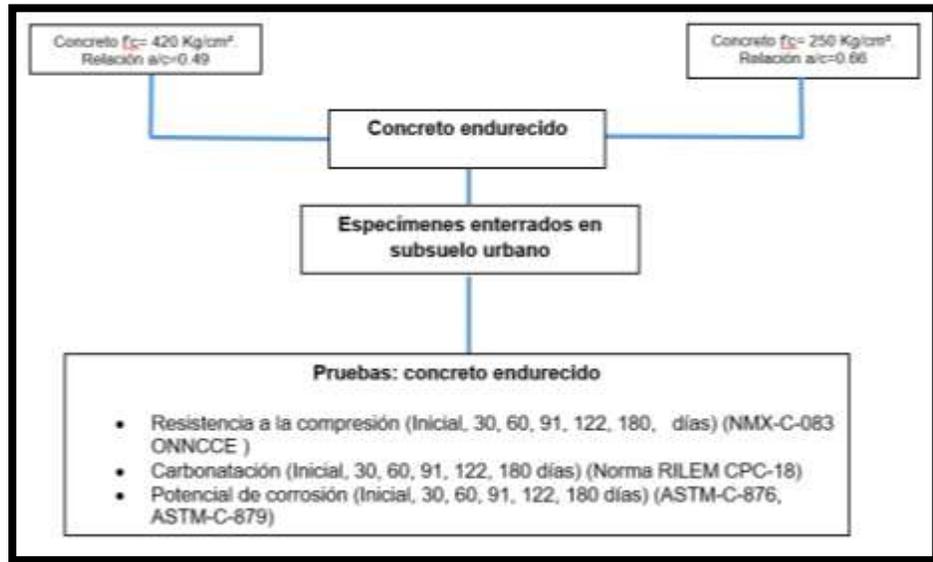
### METODOLOGIA

A continuación se presentan dos diagramas que exponen el plan de trabajo para las evaluaciones, simplificándolo en dos partes, la primera tabla contiene la fase de los análisis del ambiente en el que fueron expuestos los especímenes: subsuelo urbano industrial de la ciudad de Mexicali, estudios de composición de los aceros de refuerzo, pruebas de concreto fresco y elaboración de los especímenes y la segunda las pruebas en el concreto endurecido.

**Figura. 3.1** Diagrama de elaboración de muestras y pruebas de concreto fresco



**Figura. 3.2** Exposición de los especímenes y pruebas de concreto endurecido.



Buscando que se presenten las características de calidad óptimas para su utilización en el subsuelo. En la segunda etapa, se realizarán pruebas en el concreto endurecido mediante los cilindros, para determinar la durabilidad del concreto y probetas tipo viga de concreto armado para analizar la corrosión del refuerzo.

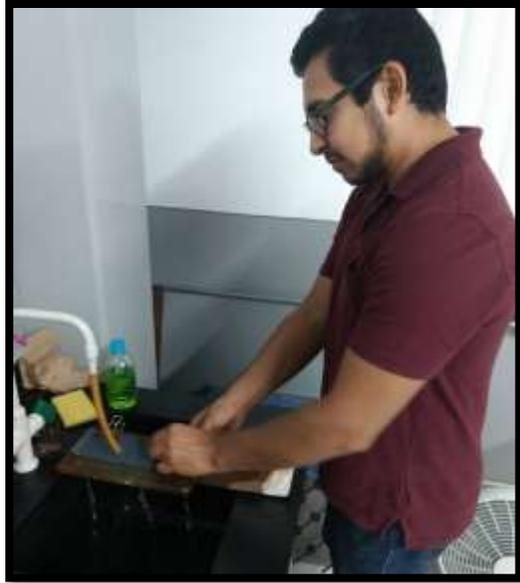
En los siguientes temas se presentarán los métodos que se aplicarán como pruebas para determinar las características y la calidad que presentaron el acero de refuerzo, la tierra a la que fueron expuestos los especímenes, el concreto fresco y el concreto endurecido en sus periodos de prueba durante su exposición al ambiente.

### **3.1. Análisis del acero de refuerzo por Espectroscopia de Inducción por rompimiento laser LIBS.**

Se analizaron dos muestras de acero al carbono, utilizado como armado en los especímenes tipo viga, para el estudio de la corrosión. El armado está estructurado por varilla 3/8" que reforzara los especímenes de forma longitudinal y varilla 1/4" (alambrón) utilizada para los estribos del armado.

Se analizara la composición del acero varilla 3/8" y varilla 1/4" (alambrón) antes de la exposición al subsuelo. Utilizando la Espectroscopia de Inducción por rompimiento laser LIBS, se determinara las aleaciones que constituyen las varillas para determinar la calidad de la composición del acero con el que se trabajara.

**Figura. 3.3** Pulido de muestras de acero

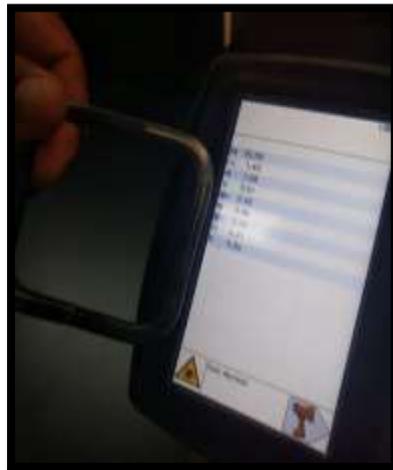


Se pulieron las dos muestras con lija para acero No. 180 y No. 400, para obtener una superficie lista que fue analizada por medio de los rayos infrarrojos para tener como resultados la composición de la muestra. Estos fueron los elementos que componen el acero de refuerzo que se utilizó:

**Figura. 3.4** Análisis de varilla corrugada 3/8" por medio de Espectroscopia de Inducción por rompimiento laser LIBS.



**Figura. 3.5** Análisis de varilla 1/4" (alambrón) por medio de Espectroscopia de Inducción por rompimiento laser LIBS.



### **3.2 Análisis del ambiente de exposición: subsuelo**

Se recolectaron muestras de tierra del subsuelo a 0.50 y 1.00 m profundidad, donde fueron expuestos los especímenes, realizando los siguientes análisis:

- \* Análisis de pH.
- \* Análisis de OCP.
- \* Prueba de Resistividad.
- \* Análisis de Contenidos de Cloruros.

#### **3.2.1 Análisis de pH, OCP, resistividad y contenido cloruros de la tierra.**

**Figura. 3.6** Recolección de muestras de tierra



Se extrajeron dos muestras de tierra a 0.50 m y 1.00 m de profundidad del área de terreno en donde se enterraron los especímenes, se realizó la prueba de resistividad, prueba del pH, el contenido de sólidos disueltos totales y contenido de cloruros.

**Figura. 3.7** Solución saturada de agua destilada con muestra de tierra.



Se realizarán dos mezclas una de porción de tierra con agua destilada a 0.50 m y 1.00 m de profundidad del área de terreno donde enterraran los especímenes de concreto. En proporción se agregarán 1.30 lt de agua por 187 g de tierra. La mezcla se hará con el fin de obtener los iones de las mismas, en una solución acuosa que se procederá a medir la cantidad de solidos disueltos totales.

#### **3.2.1.1 Análisis de pH Y OCP.**

El pH y OCP se obtendrán utilizando un equipo con capacidad de realizar ambas mediciones. La cantidad de solidos disueltos se realizará con un equipo especial que indica la cantidad en PPM. Estas mediciones se realizarán al extracto de la tierra que se obtuvo del área de exposición de los especímenes.

### 3.2.1.2 Análisis de cloruros.

**Figura. 3.8** Preparación de soluciones para análisis de cloruros.

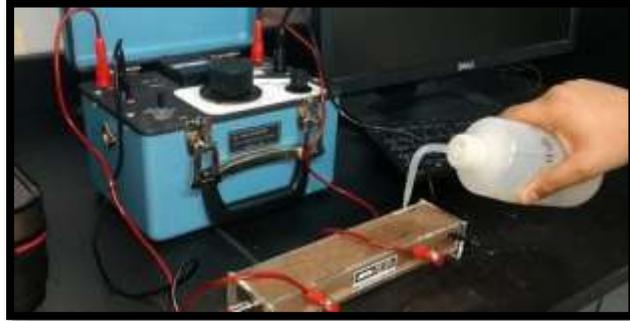


Para realizar la medición de cloruros se prepararon dos soluciones, en la primera se utilizó 0.8542 g de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) con 100 ml de agua y en la segunda se utilizó dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) 5.005 g en una solución con 500 ml de agua. La valoración se realiza agregando 1mL del indicador, agregando  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  a 25 mL del extracto de la tierra, se agregan gotas de  $\text{AgNO}_3$  y termina cuando la solución con indicador se torna de color marrón. Se registra la cantidad de  $\text{AgNO}_3$  utilizado.

### 3.2.1.3 Análisis de resistividad

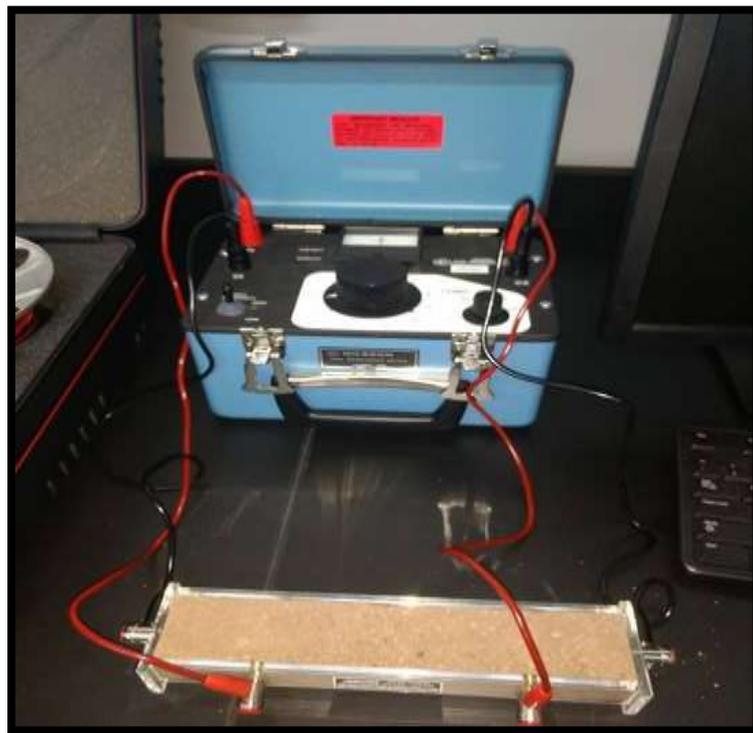
Se realizará una mezcla de una porción de tierra con agua destilada. En proporción se agregarán 1.30 lt de agua por 187 g de tierra. La mezcla se hará con el fin de obtener los iones de las mismas, en una solución acuosa que se procederá a medir la cantidad de solidos disueltos totales.

**Figura. 3.9** Caja con muestra saturada de agua destilada.



Las pruebas de resistividad se harán utilizando una caja para contener una muestra de tierra seca, midiendo su resistencia y después saturándola con agua destilada, esto en cada profundidad.

**Figura. 3.10** Medición de la resistividad



### **3.3 Construcción de especímenes de concreto.**

Los especímenes de concreto para pruebas, son muy importantes en la industria de la construcción, para verificar que cumpla con la resistencia que fue ofrecida y con las exigencias del proyecto. La sección 17 de la ASTM C 94: Especímenes estándar para el concreto premezclado, establece que cuando se usa la resistencia como base para la aceptación del concreto, los especímenes estándar deberán de elaborarse de acuerdo con el Método C 31/C 31M. En este sentido, los especímenes para prueba de resistencia del concreto deben de elaborarse de acuerdo con el Método C 31 por dos razones:

- 1) Para que los resultados sean confiables.
- 2) Para que las prueba pueda ser reproducida por alguien más con el mismo concreto, siguiendo el mismo procedimiento y obteniendo casi o los mismo resultados.

La construcción de especímenes constó del diseño dos tipos diferentes de volúmenes que sirvieron para el estudio planteado en esta tesis, Se construyeron de dos tipos de mezclas y total fue necesario la fabricación de 24 piezas tipo cilíndricos en el caso de análisis de la calidad del concreto y 2 piezas tipo viga para el estudio del acero de refuerzo.

#### **3.3.1 Diseño de la mezcla.**

El concreto que fue sometido a las pruebas de esta tesis fue de la concreteira DICOMSA, en donde se suministraron dos tipos de mezclas de alta calidad, siendo estas de diferentes relación agua-cemento y resistencia, impermeabilidad y variaciones en sus agregados y aditivos, las mezclas fueron sometidas a exposición para realizar una comparación de calidad y durabilidad en el subsuelo de la ciudad de Mexicali. Cumpliendo con las especificaciones de la norma NMX-155-ONNCCE-2014. [31]

### 3.11 Figura. Instalaciones de DICOMSA.



A continuación se presenta la dosificación de los agregados que fueron utilizados en el diseño de la mezcla  $f'c$  420  $kg/cm^2$   $a/c$  0.49 y  $f'c$  250  $kg/cm^2$   $a/c$  0.66.

**Tabla. 3.1** Dosificación del Concreto  $f'c$  250  $kg/cm^2$   $a/c$  0.66

<b>Material</b>	<b>Diseño original por <math>m^3</math></b>	<b>Carga total dosificada (7 <math>m^3</math>)</b>
Cemento	300	2100
Grava 1	688	4815
Grava 2	500	3485
Arena 1	680	4740
Agua	199	1487
<b>Masa de los materiales (kg)</b>	2367	16627

**Tabla. 3.2** Dosificación del Concreto f'c 420 kg/cm<sup>2</sup> a/c 0.49

<b>Material</b>	<b>Diseño original por m<sup>3</sup></b>	<b>Carga total dosificada (7 m<sup>3</sup>)</b>
Cemento	430	3006
Grava 1	920	6425
Arena 1	830	5845
Agua	212	1568
Aditivo	3	21
<b>Masa de los materiales (kg)</b>	2395	16627

### **3.3.2 Características y propiedades de los materiales utilizados.**

Por cuestiones de calidad dentro de la empresa DICOMSA, se realizaron análisis para determinar el estado de pureza y calidad del agua y cemento que se utilizaron para la elaboración del concreto que se utilizó en la elaboración de los especímenes de este estudio.

#### **3.3.2.1 Cemento.**

Para la fabricación del concreto de f'c 420 kg/cm<sup>2</sup> a/c 0.49 y f'c 250 kg/cm<sup>2</sup> con a/c0.66, se utilizó un Cemento Portland Compuesto Clase 40 (CPC 40), aceptable bajo la norma que mediante las pruebas que realizó el proveedor Holcim, se determinó que de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCCE [32], el límite de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) permitido puede excederse expansiones obtenidas en el ensaye de barras sumergidas en agua durante 14 días, el resultado obtenido fue de 0.002% a 0.004, determinada conforme a la norma NMX-C-185ONNCCE [33], son menores al 0.020% máximo estipulado.

### 3.3.2.2 Agregados pétreos: arena y agua.

Se utilizaron agregados que son aprobados por la Norma ASTM C 33 [34], como también aprueba la Norma NMX C-111- ONNCCE-2014 [12], los tipos de agregados finos y gruesos que fueron utilizados para la fabricación del concreto y brindando la calidad necesaria en agregados pétreos para el diseño de la mezcla.

### 3.3.2.3 Agua.

La Norma NMX C-122 ONNCCE [13], avala el agua utilizada para la fabricación de los tipos de mezclas con agua tratada abasteciéndose de la red de agua de la ciudad de Mexicali, con los siguientes resultados realizados por análisis de laboratorio:

**Tabla. 3.3** Análisis de agua.

<b>Parámetro:</b>	<b>Resultados:</b>
pH (u de pH)	7.03
Solidos suspendidos (mg/l)	No detectable
Cloruros (mg/l)	124.2
Sulfatos (mg/l)	380
Magnesio como mg (mg/l)	24
Carbonatos como CaCO <sub>3</sub> (mg/l)	0
Dióxido de carbono (mg/l)	0
Álcalis totales como sodio (mg/l)	140
Grasas y aceites (mg/l)	No detectable
Total de impurezas en solución (mg/l)	987
Materia Orgánica	No detectable

### 3.3.2.4 Aditivo.

Los aditivos utilizados fueron *Plastiment 915* y *Sikaviscoflow 8100* para el concreto 0.49 a/c de la marca *Sika*.

#### a) Aditivo *Plastiment 915*.

Aditivo líquido multipropósito, reductor de agua de rango medio y retardante de fraguado para concreto. No contiene cloruros. Cumple con la norma ASTM C 494 Tipo D.

Se utiliza principalmente en la elaboración de concretos para todo tipo de estructuras, especialmente diseñado para emplearse como reductor de agua o reductor de agua retardante con sólo variar la dosificación. Permite el transporte del concreto a largas distancias o por tiempos prolongados sin pérdida de trabajabilidad.

\*Aumenta la trabajabilidad y plasticidad del concreto.

\* Permite reducir entre el 5% al 10% del agua de mezclado.

\*Permite la optimización de los diseños de concreto.

\*Permite el transporte de concretos a largas distancias o por tiempos prolongados.

[35]

#### b) Aditivo *Sikaviscoflow 8100*.

Es un aditivo para concreto específicamente desarrollado para incrementar el tiempo de trabajabilidad. Está diseñado para producir concretos que necesitan mantener la fluidez por varias horas. Cumple con la norma ASTM-C-494 tipo F a las edades de 3, 7 y 28 días y con la norma ASTM-C-1017 tipo I.

Basa su accionar en una combinación de efectos: de adsorción y de repulsión estérica, de tal manera que las partículas sólidas son efectivamente dispersadas y un alto nivel de fluidificación puede mantenerse en el tiempo con menor contenido

de agua. Es un reductor de agua de alto rango por lo que no es necesario utilizar fluidificantes adicionales y permite la producción de concretos de alto desempeño. Efectividad en concretos con un amplio rango de relaciones agua/cemento (a/c) y temperaturas. Provee concretos de mayor estabilidad y tiempo de trabajabilidad que aquellos elaborados con dispersantes y reductores de agua convencionales. Compatibilidad con otros aditivos Sika. Retiene la trabajabilidad por más tiempo manteniendo el desarrollo de las resistencias iniciales. Se puede aplicar a cementos de alta reactividad, los cuales pueden conducir a una elevada rigidez inicial. No es necesario recurrir a un acelerante para activar la hidratación ya que no modifica sustancialmente el desarrollo del fraguado (una vez que pasa el efecto de retención de trabajabilidad). [36]

#### **3.4 Preparación del acero de refuerzo.**

El acero fue utilizado para la fabricación de especímenes de concreto armado tipo viga, en los cuales se colocaron cuatro varillas de una longitud de 70.00 cm y diámetro de 3/8".

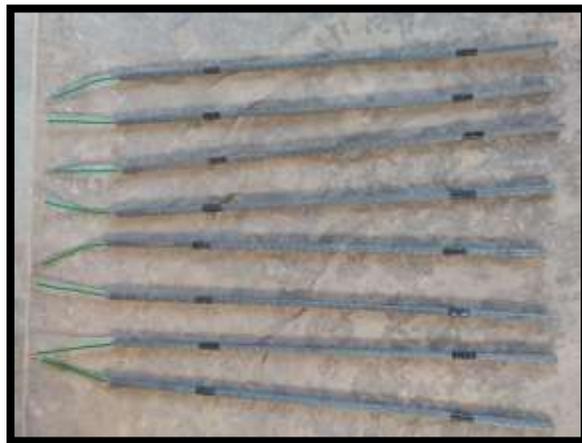
La varilla fue apoyada en un prensa para mantenerla estática, perforada con taladro y broca para metal de 7/64" de diámetro a una profundidad de 1.50 cm, apoyando la varilla en una prensa.

**Figura. 3.12** Perforación longitudinal de varilla para colocación de contacto de cable eléctrico.



Después se procedió a realizar la conexión en el orificio utilizando como adherente epóxico, introduciendo el cable eléctrico No. 12 en el orificio. Se colocó cinta adhesiva para cubrir con pintura anticorrosiva el área de la varilla que quedaría fuera del espécimen de concreto, y el área de que estaría embebida en concreto sin protección.

**Figura. 3.13** Colocación de cables de conexión en varillas.



Se colocaron estribos de alambión de  $\frac{1}{4}$ " de 5.50 cm x 5.50 cm con una separación de 10.00 cm, soldados con soldadura 6011, protegiendo el área de soldadura con pintura anticorrosiva.

**Figura. 3.14** Colocación de estribos para armado de especímenes.



#### **3.4.1 Protección parte de varilla expuesta en el espécimen**

Fue necesario la utilización de un envolvente que protegiera totalmente el área de la varilla que se encontraría fuera del cuerpo del concreto, funcionando como aislante en la conexión del cable con el acero. Se procedió a colocar manguera transparente de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro para cubrir el área y sirviera como reten para poder inyectar Sikaflex 1<sup>a</sup> dentro de la manguera.

#### **3.4.2 Colocación de cables de conexión al acero de refuerzo**

Los cables de conexión eléctrica No. 12 utilizados para la medición de Potencial de corrosión, fueron conectados en las varillas como también en cada uno de los estribos de alambión que serían embebidos en el concreto, el cable se adaptó para

que sobresaliera del cuerpo del concreto 10.00 cm y poder realizar conexiones necesarias para la prueba.

Posteriormente al curado de los especímenes, los cables ya se encontraban instalados en el armado, en varillas longitudinales y estribos, estos sufrieron corrosión y quedaron inutilizados para el estudio, por lo que se optó por retirarlos del acero y realizar el contacto eléctrico para conectar el voltímetro por medio de caimanes.

**Figura. 3.15** Armado de acero, con protección de manguera, sika 1a y tiplay 1/8" de cimbra.

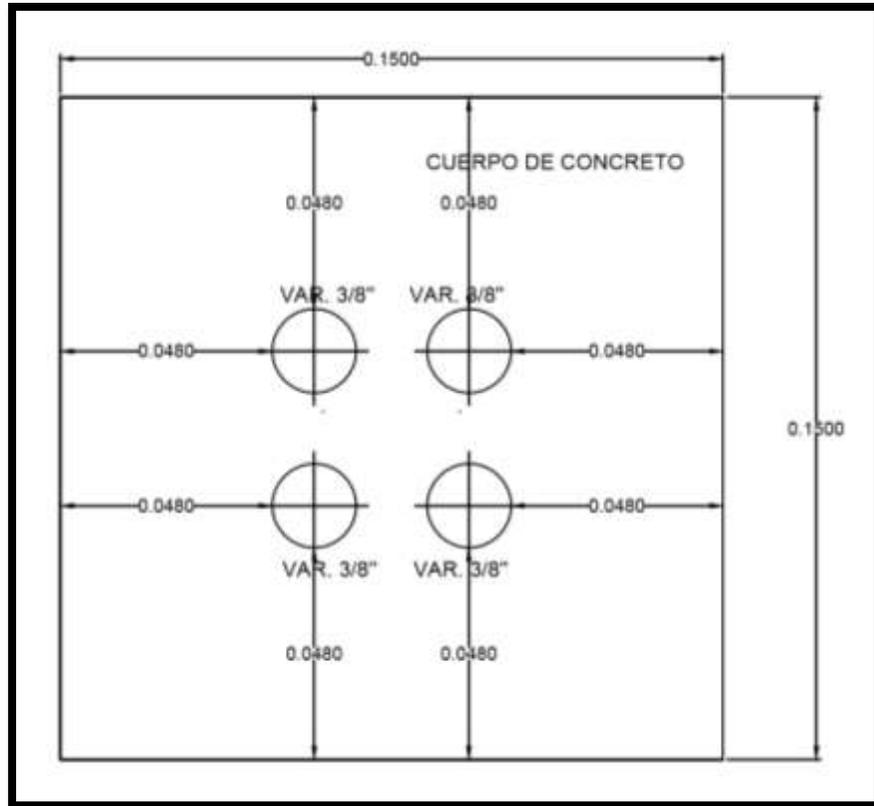


### 3.4.3 Plantillas para espécimen

Se diseñaron plantillas de acuerdo a las dimensiones del molde metálico que funciona como cimbra para elaborar los especímenes tipo viga con un alto de 15.00 cm y el ancho de 15.00 cm en triplay de 1/4" de espesor, para la colocación del armado en el molde de la viga de concreto. Fueron ranurados cuatro orificios con

taladro y broca de 1/2" para madera en el centro de la plantilla con una separación a eje de 3.50 cm, permitiendo un recubrimiento por varilla de 4.80 cm.

**Figura. 3.16** Esquema de colocación de varillas de refuerzo en viga de concreto.



En la siguiente figura se puede observar la colocación del acero de refuerzo en el molde para la fabricación del espécimen tipo viga, con plantilla en los extremos longitudinales del que será el cuerpo de concreto, sosteniendo el acero de refuerzo y brindando el recubrimiento necesario de extremo a extremo.

**Figura. 3.17** Colocación de armado en cimbra metálica de viga.



En cada extremo de las vigas las varillas longitudinales y los cables de conexión cuentan con protección del envolvente, siendo estas secciones las que quedaran fuera del cuerpo de la viga.

**Figura. 3.18** Colocación de armado en cimbra metálica de viga y conexiones metálicas.



### **3.5 Pruebas Realizadas al concreto fresco**

Estas pruebas fueron realizadas en las instalaciones de los laboratorios de Concretera DICOMSA, siguiendo las recomendaciones y requerimientos en el proceso de las normas ASTM Y NMX-C, así como se enlista a continuación, junto con las normas que fueron usadas:

- a) Concreto fresco muestreo: Norma ASTM C172-08 [37] y la Norma NMX-C 161-ONNCCE-1997. [38]
  
- b) Determinar la temperatura del concreto fresco: Norma ASTM C1064/C 1064M-08 [17] y Norma NMX-C-435-ONNCCE-2010. [39]
  
- c) Determinación del revenimiento en el concreto fresco: Norma ASTM C143/C 143M-08 [17] y Norma NMX-C-156-ONNCCE-2010. [18]
  
- d) Determinación de la masa unitaria: Norma ASTM C138/C 138M-08 [20] y Norma NMX-C-162-ONNCCE-2010. [21]
  
- e) Contenido de aire del concreto recién mezclado: Norma ASTM C231-08 [23] y Norma NMX-C-157-ONNCCE-2006. [22]
  
- f) Curado de Especímenes: Norma ASTM C31/C 31M-09 [26] y Norma NMX-C 159-ONNCCE-2004 [25] y la Norma NMX-C-160-ONNCCE-2004. [34]

### 3.5.1 Concreto fresco muestreo:

El muestreo del concreto se basó en las especificaciones de las normas ASTM C172-08 y la Norma NMX-C161-ONNCCE-199.

**Figura. 3.19** Operación de recolección de muestreo de concreto.



### 3.5.2 Determinar la temperatura del concreto fresco.

La temperatura en el concreto se mide por medio de un termómetro sumergido al menos 3 pulgadas, presionando suavemente el concreto alrededor del dispositivo para medir la temperatura, y la del aire ambiente no influya en la temperatura media. Se deja el dispositivo para medir la temperatura del concreto por un mínimo de 2 minutos, o hasta que la lectura se estabilice. Registrar de temperatura del concreto al 1°F [0.5°C] más próximo mientras que el dispositivo para medir la temperatura está en el concreto. Se completara la medición de la temperatura cinco minutos después de obtener la muestra de concreto. [17] [39]

**Figura. 3.20** Análisis de temperatura de concreto fresco.



### **3.5.3 Determinación del revenimiento en el concreto fresco.**

La prueba de revenimiento se ejecutó para determinar la consistencia del concreto, recién dada su fabricación, ya que de esta se realizó una medición para saber su fluidez.

Se usó cono de revenimiento, iniciando con la humidificación del interior y colocándolo en una superficie plana, mojada, no absorbente y rígida, sosteniendo el molde en tres capas, cada una debe ser la tercera parte de la altura del cono y se picó con varilla 25 veces en forma de espiral hacia el centro. Una vez llegado al tope del cono, se enrazara a nivel del cono, levantando inmediatamente cono en dirección vertical, se midió inmediatamente el revenimiento en una forma vertical entre la parte superior del cono y el centro original desplazado en la parte superior de la superficie del espécimen. [18]

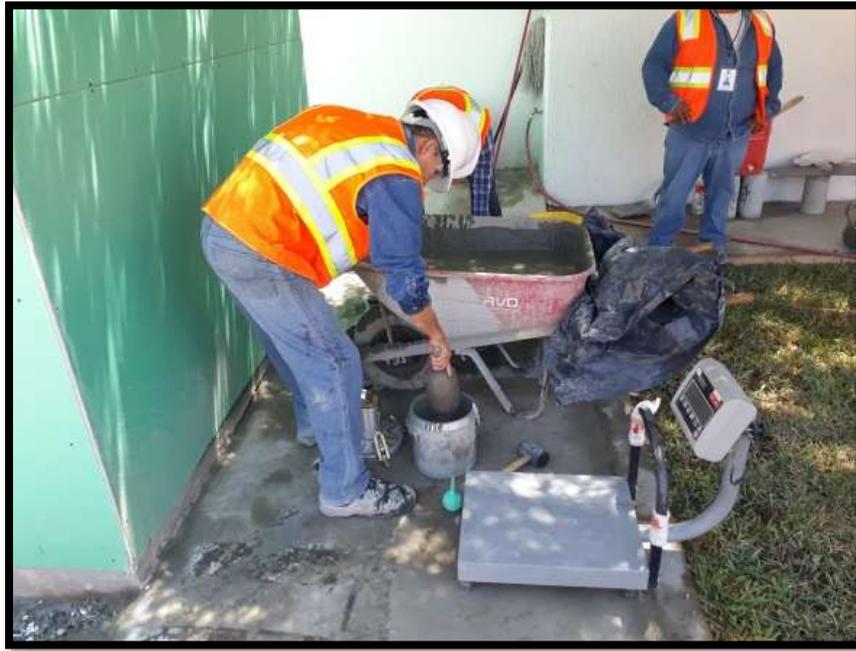
**Figura. 3.21** Prueba de revenimiento.



### **3.5.4 Determinación de la masa unitaria.**

Se determinó el peso del recipiente cilindro vacío (en kg) que después se usó colocar el concreto en el recipiente en tres capas aproximadamente de igual volumen, y varillando cada capa 25 veces sin golpear con fuerza el fondo del recipiente y golpeando ligeramente la parte exterior del recipiente de 10 a 15 veces con el martillo para cerrar los huecos dejados por la varilla. Al terminar la tercera capa, enrase la parte superior del concreto, dejando el recipiente lleno justo al nivel. Una vez lleno el recipiente y enrazado se determinó la masa (kg) del recipiente y la densidad (masa unitaria) del concreto en el recipiente. Esto se calculó dividiendo el peso neto de concreto fresco entre el volumen del recipiente que lo contiene registrando el resultado en  $\text{kg/m}^3$ . [20] [21]

**Figura. 3.22** Operación para determinar la masa unitaria.



### **3.5.5 Contenido de aire del concreto recién mezclado.**

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

En concretos diseñados para alcanzar 200 a 350 Kg/cm<sup>2</sup>, 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.

Esta prueba se realiza como lo indica la NMX-C-157-ONNCCE [22] y como lo recomienda la ASTM-C231-08b. [23] Para realizar esta prueba se humedeció el recipiente, colocando sobre una plana, nivelada y firme, llenando el mismo en 3

capas, donde cada una ocupe la tercera parte del recipiente y se varille 25 veces en todo su espesor, sin tocar el fondo del recipiente 25 mm arriba de este, distribuyendo el varillado en todas las secciones transversales, después se golpeó el exterior del recipiente de 10 a 15 veces con el martillo de hule, se repite el mismo procedimiento en las siguientes 2 capas hasta llenar el recipiente, usando la placa para nivelar la superficie con movimientos aserrado con presión hacia abajo. Hasta conseguir una superficie lisa. Usando la regla para enrazar, se utilizó a través del borde del recipiente de medición con un movimiento aserrado hasta que el recipiente este lleno a nivel, al final se sujetó la tapa al recipiente asegurando un llenado con gran presión.

Se cerraron las válvulas de aire entre la cámara de aire y recipiente y abriendo las dos llaves de purga en la tapa. Se inyectó agua a través de una llave de purga hasta que el agua emerja de la llave de purga del lado opuesto, golpeando el medidor ligeramente hasta que el aire sea expelido, se cerró la válvula de alivio y bombeando aire adentro de la cámara hasta que la manecilla en la caratula del manómetro este sobre la línea de la presión inicial. Se Estabilizo las manecillas del manómetro en la línea de presión, después se cierran ambas llaves de purga. Golpeando vigorosamente los lados del recipiente con el martillo de hule y ligeramente el manómetro con la mano para estabilizarlo, y al final poder tomar lectura del porcentaje de aire.

### 3.5.6 Curado de Especímenes.

**Figura. 3.23** Construcción de especímenes tipo viga y cilindros.



El llenado de los moldes cilíndricos y del tipo viga fue directo sin realizar ninguna operación de varillado o martilleo para eliminar el contenido de aire ya que este concreto es auto compactable y su agregados se estabilizan por si solos. Al ser llenado se enrazo con varilla de enrase, se les identifico con una etiqueta y se les coloco plástico para el proceso de curado.

**Figura. 3.24** Especímenes de concreto recién contruidos, con plástico para salvaguardar humedad.



El curado de los especímenes se realizó sumergiendo en su totalidad los especímenes en piletas de agua con cal durante 28 días, tiempo en el que se espera que el concreto alcance su curado y cumpla con la resistencia para el que fue diseñado.

**Figura. 3.25** Curado de Especímenes de concreto.



### **3.5.7 Descimbrado e Identificación de los especímenes**

El descimbrado de los especímenes se refiere al retiro del cuerpo de concreto del molde metálico que fue utilizado para su fabricación, después de esto y antes del curado se identificó cada espécimen con número y relación agua-cemento de su composición.

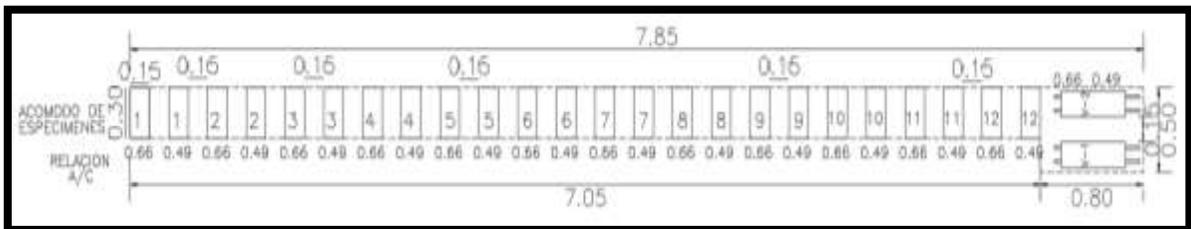
**Figura. 3.26** Numeración y especificación de a/c para identificación de especímenes



### 3.6 Estación de campo, entierro de los especímenes en subsuelo

Se eligió un terreno natural ubicado en la zona sur de la ciudad para realizar la exposición de los especímenes de concreto, para ello se realizó un plano de ubicación. Para los cilindros se excavó una zanja de 30 cm por 7.05 m y para las vigas una de 0.80 por 50 cm.

**Figura. 3.27** Diagrama ubicación de especímenes en lugar de exposición en el subsuelo.



Se enterraron a una profundidad de 50 cm, con una separación de 15 cm entre cada cilindro y viga, los especímenes se colocaron con la secuencia de los números con el que se identificó a cada uno y conjunto con el plano facilitar la extracción de los especímenes del área de exposición.

**Figura. 3.28** Ubicación de especímenes cilindros y vigas en lugar de exposición en el subsuelo.



El orden fue expuesto de modo que el cilindro #1 de relación agua-cemento 0.66 y el #1 a/c 0.49, quedaran como especímenes vecinos y así consecutivamente hasta los cilindros #12 de los tipos de concreto. Las varillas se colocaron en los extremos de la zanja para identificar el sitio donde se encontraban los siguiente cilindros a analizar.

**Figura. 3.29** Ubicación de especímenes cilíndricos en lugar de exposición en el subsuelo.



Una vez acomodados los cilindros se procedió a rellenar la zanja con la misma tierra que se había retirado, y aproximadamente cada 15 cm se compacto con pisón metálico hasta alcanzar el nivel natural del terreno.

### **3.6.1 Monitoreo de la estación de campo**

Cada periodo de prueba se desenterraba dos especímenes cilíndricos para someterlos a prueba de resistencia a la compresión, una vez ensayados se desechaban. Para la prueba de carbonatación se desenterraban los cilindros #1 de cada tipo de concreto y se realizaba el corte para generar la pastilla que se utilizaría para la prueba y se volvían a enterrar los cilindros. De igual manera los tipo viga se desenterraban para realizar el análisis de potencial de corrosión y se colocaban de nuevo al área de exposición bajo tierra.

### **3.7 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto endurecido**

Las mediciones que se realizaron a los especímenes son:

- \* Resistencia a la compresión
- \* Profundidad de carbonatación
- \* Potencial de corrosión de media celda

#### **3.7.1 Procedimiento de medición de la resistencia a la compresión**

Esta prueba consistió en determinar la resistencia a compresión de los especímenes cilíndricos. Se registró la medida de los especímenes de concreto antes de realizar la prueba de resistencia a la compresión, con la finalidad de conocer sus dimensiones reales en altura y diámetro.

Se utilizó una prensa hidráulica marca HUMBOLD, con prensa eléctrica con tablero digital para comunicar el resultado de la prueba, con bombas de válvulas regulables de aplicación de carga y un alcance de medición de 120, 000 kg. Maquina certificada y regulada por la ASTM C 39

Se Inicia colocando las almohadillas de neopreno y se coloca en la prensa de compresión, aplicando una carga axial en pequeñas cantidades de compresión a la base del cilindro utilizando, hasta el momento en que el espécimen falle. Terminada la prueba se dividió la carga máxima soportada durante la prueba y el área de la sección transversal del cilindro. Procedimientos basados en la NMX-C-083 ONNCCE. [40]

**Figura. 3.30** Prueba de resistencia a la compresión.



### 3.7.1.1 Medición de los especímenes

Se tomaron medidas para registrar altura y diámetro de los cilindros de concreto antes de cabecearse. Medidas necesarias para realizar el cálculo y poder determinar la resistencia que tiene cada uno de los especímenes.

**Figura. 3.31** Medición de diámetro de cilindro con vernier.



### 3.7.1.2 Cabeceo de los especímenes.

Se prepararon las cabezas de los cilindros de concreto con almohadillas de neopreno, área donde se recibiría la carga de la prensa de compresión, con el fin

de conseguir una distribución uniforme. Basado en la ASTM C 617 [41] Industria de y NMX-C-109-ONNCCE. [42]

### 3.7.1.3 Prueba de resistencia a la compresión de los especímenes.

Posteriormente de colocar las almohadillas de neopreno, se ensaya el espécimen en la prensa de compresión para determinar la resistencia del concreto, utilizando como muestra un espécimen de cada diseño de concreto por periodo

**Figura. 3.32** Inicio de prueba de resistencia a la compresión de cilindro a/c 0.49.



**Figura. 3.33** Finalización de prueba de resistencia a la compresión de cilindro a/c 0.66.



#### 3.7.1.4 Determinación de la resistencia a la compresión

La siguiente formula nos muestra la relación de la carga máxima alcanzada por el espécimen dividido entre el área de la superficie donde se aplicó la carga que nos dio como resultado la resistencia a compresión de los espécimen puesto a prueba.

$$RC = \text{Carga} / \text{Área}$$

Donde:

RC= Resistencia a la compresión del concreto, en Kg/cm<sup>2</sup>

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

Área= Área del espécimen, en cm<sup>2</sup>

Se obtuvo un registro de información de cada cilindro de concreto para calcular la resistencia a la compresión de la muestra.

### 3.8.1 Corte del espécimen

Se utilizará como herramienta una cortadora de metal de 14" marca MAKITA de 15 AMP y un disco diamante de 14" para concreto, así como también un indicador (1% de fenolftaleína en 70 % de alcohol etílico). Para realizar el corte del espécimen, se marcó una línea transversal en el cuerpo cilíndrico del espécimen, para generar pastillas de 3 cm de grueso, obteniendo una sección transversal del diámetro total del cuerpo del cilindro, cuidando que el corte se realice correctamente generando el mínimo de bordes.

**Figura. 3.34** Corte transversal de cilindro de concreto.



### **3.8.2 Aplicación del indicador en el corte del espécimen**

Se limpiara la cara interior de la pastilla de 3 cm de grueso con una brocha de 2" para eliminar el polvo generado por el corte y se aplicara el indicador de fenolftaleína al 1% sobre la cara, esperar a que este sea absorbido para que adquiriera la tonalidad adecuada que indicara el estado de alcalinidad en el que se encuentra el concreto.

### **3.8.3 Medición de la profundidad de carbonatación en el espécimen**

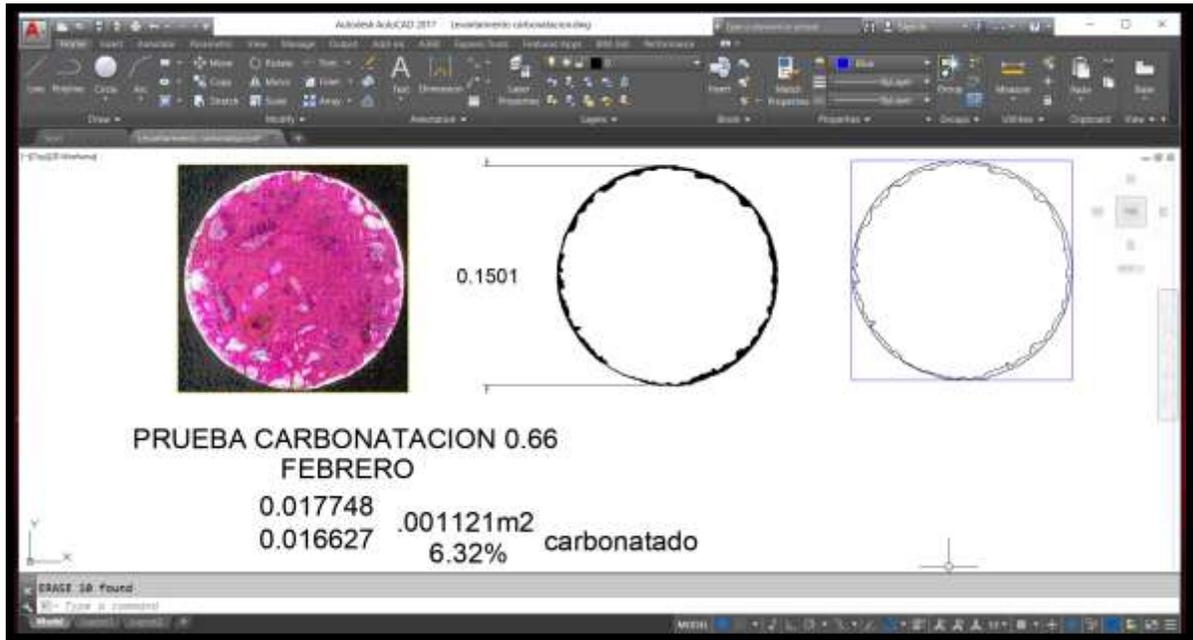
Se Determinara el comportamiento del concreto ante la Carbonatación acelerada mediante la verificación de resultados con la Norma RILEM CPC-18; considerando el diseño del concreto con relación al tiempo de exposición en el subsuelo.

Los especímenes se someterán al análisis de carbonatación aplicación el indicador de fenolftaleína sobre el concreto. Las áreas carbonatadas no cambiaran de color mientras que las áreas con un PH mayor a 9 tomaran un color rosado. Este cambio de color mostrara cual es la profundidad de carbonatación dentro de la masa del concreto. [30]

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.

**Figura. 3.35** Levantamiento del área carbonatada utilizando AutoCAD 2017. [43]



Después de la aplicación del indicador en la pastilla cortada del espécimen de concreto, se registró una fotografía paralela a la cara analizada, con cámara de 16 megapíxeles y exportando la fotografía a AutoCAD [43]. En el programa se escaló la fotografía con las dimensiones registradas con el vernier y se dibujó con comando *Poliline* el perímetro del cilindro y el área carbonatada, posteriormente con comando *Gradient* se coloreo de tono oscuro el área carbonatada.

Ya dibujada el área carbonatada, se buscó el centro generado por el contorno exterior y con comando *Line* y *Array* se trazaron las líneas para generar la distancia de penetración del perímetro a cada vértice interior de la línea de carbonatación. El programa brinda la distancia del total de las líneas para calcular un promedio de penetración.

### **3.8.5 Determinación de la velocidad de la 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.

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

Donde:

KC= Coeficiente de carbonatación, mm/año<sup>1/2</sup>.

X= Profundidad de carbonatación mm.

t= Tiempo en años.

De cada espécimen se obtuvo un registro y cálculo de la velocidad de Carbonatación. [30].

### **3.8.6 Pruebas realizadas a los especímenes de concreto tipo viga con acero**

Estos especímenes fueron diseñados con un armado de acero con el fin de ser destinados a una única prueba de potencial de corrosión en sus diferentes periodos de análisis, inicial, 30, 60, 91, 122 y 180 días.

### **3.9 Procedimiento de medición de potencial de corrosión**

Esta técnica se realiza conectando una terminal de un voltímetro, al acero de refuerzo (varilla corrugada) que es el electrodo de trabajo y la otra terminal, al electrodo de referencia posicionado sobre el Concreto. Procedimiento basado en la norma ASTM-C-876 [28].

El equipo y material empleado es el siguiente:

- \*Voltímetro de Alta impedancia
- \*Electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>
- \*Caimanes
- \*Esponja [10]

Se retiran el material utilizado para impermeabilizar las puntas de las varillas expuestas fuera del cuerpo de la viga, utilizar un cepillo de alambre para retirar el sika 1<sup>a</sup> y tener un buen contacto eléctrico con el cableado del voltímetro.

**Figura. 3.36** Limpieza de varillas con cepillo de alambre.



Mojar el cuerpo de concreto de la viga con agua destilada, hasta observar que el concreto este absorbiendo el líquido electrolito, seguir mojando consecutivamente.

**Figura. 3.37** Viga de concreto a/c 0.49.



Se utilizó un tripie para sostener el electrodo de (CuSO<sub>4</sub>) calomelanos, sobre una esponja mojada con el agua destilada, colocado en el centro de una de sus caras longitudinales, conectando el positivo en la varilla a evaluar y el negativo al contacto del electrodo. Esperar unos minutos a que establezca la numeración que nos indicara la cantidad de mV que emite el acero.

**Figura. 3.38** Operación para medición de potencial de corrosión.



### 3.9.1 Protección del armado del espécimen.

Las varillas que conforman la estructura interna del armado de la viga, salen del cuerpo del espécimen y como se comentó en el tema 5.4.1 donde se describió la protección de la varilla, protegida con manguera transparente y Sika 1a. Las puntas que quedan descubiertas para hacer el contacto con el cableado de conexión de multímetro se protegen y se descubren cada que se realiza una prueba de potencial de corrosión, por lo que se protegen envolviendo con tape negro aislante, acoplamientos de PVC de 3/4" rellenos con Sika 1a, impermeabilizando totalmente la sección de la varilla para volver la exposición en el subsuelo.

**Figura. 3.39** Protección de varillas expuestas.



## CAPITULO 4

### RESULTADOS

#### 4.1 Resultados del análisis de ambiente de exposición: subsuelo

De la medición de resistividad se encontró que el grado de agresividad cuando se encuentra seca la tierra es escaso, cuando se encuentra húmedo es discreto y muy similar en ambos casos, la diferencia más importante se encuentra cuando la tierra está seca, podríamos deducir que la superficie se encontraba más húmeda que a 1 m de profundidad.

**Tabla 4.1.** Resultados generales de análisis de subsuelo.

RESULTADOS PROFUNDIDAD	RESISTIVIDAD TIERRA SECA	RESISTIVIDAD TIERRA HUMEDA	PH	ORP, mV (electrodo de platino)	SOLIDOS DISUELTOS TOTALES (ppm)	CONTENIDO DE CLORUROS (ppm)
0.5 m	235	23	7.32	188.9	590	806
1.0 m	720	24	7.11	185.9	482	100

Se obtuvo la característica del suelo con los datos antes medidos, esto para determinar la agresividad del suelo según el índice de cada característica individual medida. La suma de los índices fue de -3, es decir débilmente agresivo.

La importancia de la caracterización del suelo de trabajo radica en ser la primera parte en el diseño e instalación de sistemas, equipo, infraestructura, determina el tipo de material a utilizar, o en su caso la necesidad de instalar un sistema de protección catódica u otro sistema de protección, como el uso de recubrimientos orgánicos o inorgánicos.

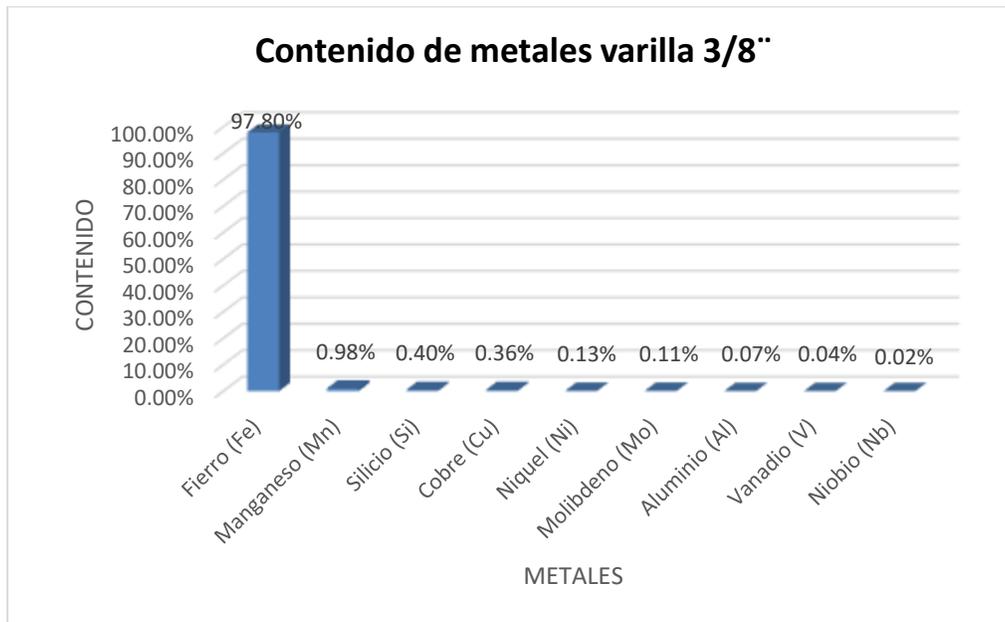
#### 4.2. Resultados de análisis de acero de refuerzo: método de Espectroscopia de Inducción por Rompimiento Laser LIBS para determinar la composición del acero.

Los resultados obtenidos para conocer la composición de los diversos metales que contiene el armado de varilla 3/8" y varilla 1/4" utilizados para el acero de refuerzo de las vigas que se expondrán a exposición fueron los siguientes:

**Tabla 4.2.** Análisis de varilla 3/8"

<b>TIPO DE ELEMENTO PRESENTE</b>	<b>PORCENTAJE DE ELEMENTO PRESENTE</b>
Fierro (Fe)	97.80%
Manganeso (Mn)	0.98%
Silicio (Si)	0.40%
Cobre (Cu)	0.36%
Níquel (Ni)	0.13%
Molibdeno (Mo)	0.11%
Aluminio (Al)	0.07%
Vanadio (V)	0.04%
Niobio (Nb)	0.02%

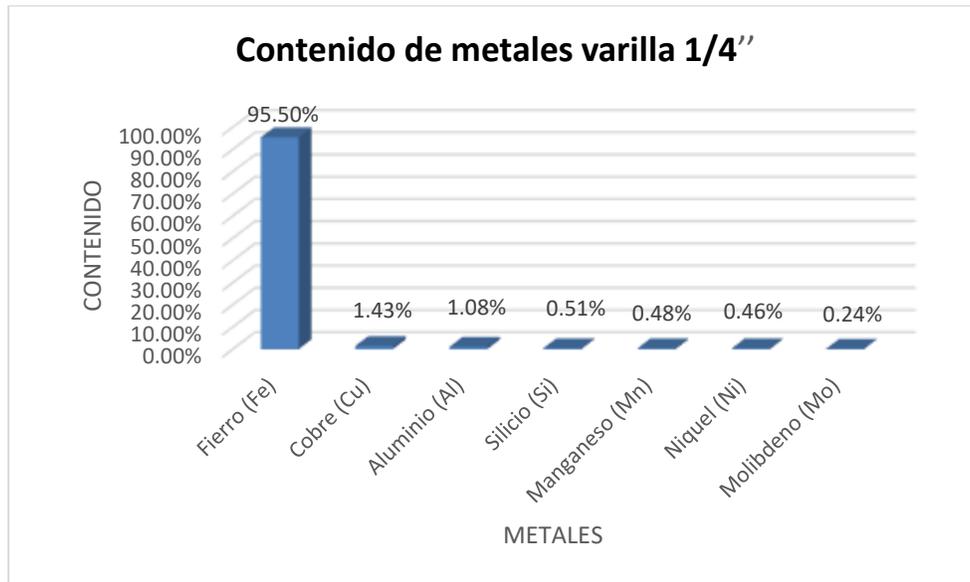
**Figura. 4.1** Grafica de contenido de metales varilla 3/8''



**Tabla 4.3.** Análisis de varilla 1/4'' (alambrón)

Tipo de elemento presente	Porcentaje de elemento presente
Fierro (Fe)	95.50%
Cobre (Cu)	1.43%
Aluminio (Al)	1.08%
Silicio (Si)	0.51%
Manganeso (Mn)	0.48%
Níquel (Ni)	0.46%
Molibdeno (Mo)	0.24%
Cromo (Cr)	0.21%
Vanadio (V)	0.06%

**Figura. 4.2** Grafica de contenido de metales varilla 1/4''



Como resultado se obtuvo que la mayor concentración de contenido se encuentra en el elemento Fierro (Fe) con un porcentaje de concentración de 97.80% en varilla 3/8'' y 95.50% varilla 1/4''. Otros metales como Cobre (Cu), Aluminio (Al), Silicio (Si), Manganeso (Mn), Níquel (Ni) y Molibdeno (Mo) se encuentran en aleación para prevenir la corrosión y estos actúen anódicamente en la estructura de la varilla.

### 4.3. Resultados pruebas de concreto fresco

Con los resultados obtenidos en las pruebas de concreto fresco, se compararon con los datos establecidos dentro de los parámetros de las especificaciones de las NMX (Normas Mexicanas) que describen las características óptimas de un concreto antes del fraguado.

**Tabla 4.4.** Pruebas de acuerdo a la norma que la regula y el parámetro de la especificación:

<b>Prueba</b>	<b>Especificaciones</b>
Temperatura (NMX-C-435-ONNCCE-2010)	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
Contenido de aire (NMX-C-157-ONNCCE-2006)	Entre 1 y 3%
Masa unitaria (NMX-C-162-ONNCCE-2014)	Entre 1900 kg/m <sup>3</sup> y 2400 kg/m <sup>3</sup>

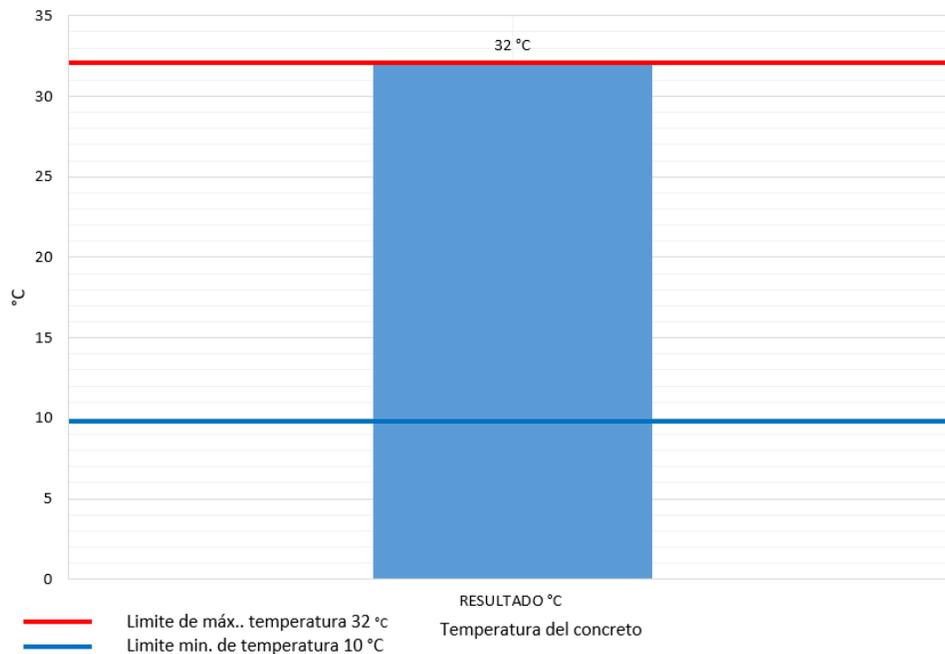
**Tabla 4.5.** Resultados de concreto en fresco A/C 0.49, f'c= 400 Kg/cm<sup>2</sup>.

<b>PRUEBA</b>	<b>RESULTADO</b>
Temperatura del concreto	32°C
Revenimiento	26 cm
Contenido de aire	0.6 %
Masa unitaria	2360 kg/m <sup>3</sup>
Masa por m <sup>3</sup>	2409 kg/m <sup>3</sup>

#### **4.3.1 Análisis de Temperatura, concreto a/c 0.49.**

De acuerdo con los resultados obtenidos de la prueba registrada con el termómetro sumergido en la mezcla de concreto a/c 0.49, realizando la operación como lo indica la (NMX-C-435-ONNCCE-2010), se obtuvo que los 32°C es una temperatura elevada dentro del rango, pero se encuentra dentro los parámetros de aceptación.

**Figura. 4.3** Grafica de la temperatura del concreto fresco a/c 0.49.



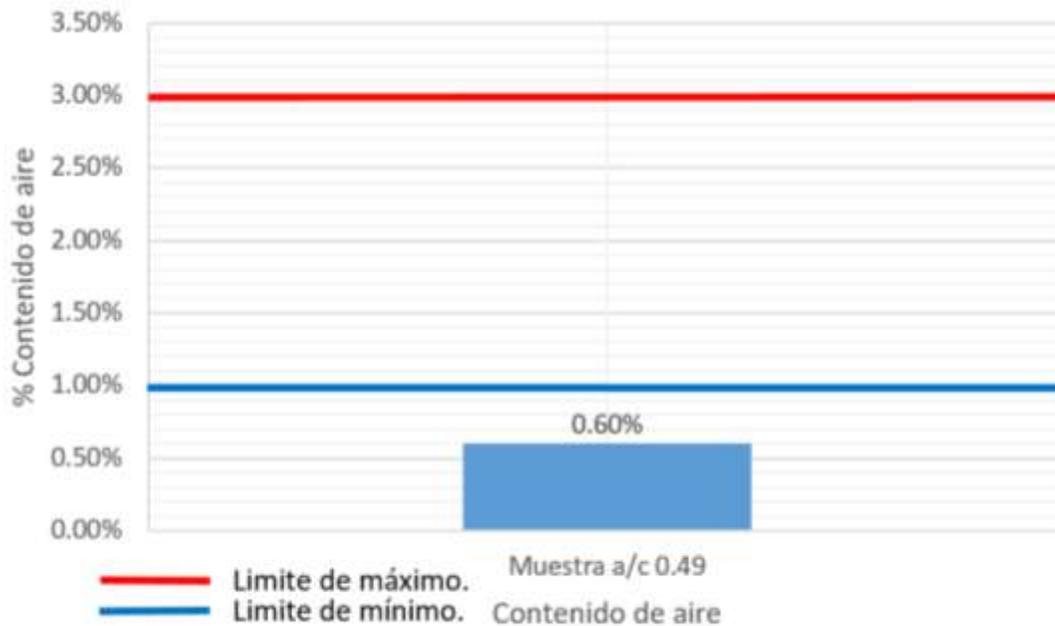
#### **4.3.2 Análisis de revenimiento, concreto a/c 0.49.**

Con lo obtenido en esta prueba y según lo que indica la (NMX-C-156-ONNCCE-2010) la muestra de concreto a/c 0.49 obtuvo un resultado reglamentario en extensibilidad de 26 cm.

#### **4.3.3 Análisis de contenido de aire, concreto a/c 0.49**

La (NMX-C-157-ONNCCE-2006) indica que el aire contenido en esta muestra está bajo el parámetro del 1%, pero muy cercano, con 0.6%, por lo que se considera un concreto sin aire incluido. Esto debido a su aditivo de fluidez añadido al diseño, el cual genera auto compactación del concreto y la expulsión de gran cantidad de aire contenido.

**Figura. 4.4** Grafica de la temperatura del concreto fresco a/c 0.49.

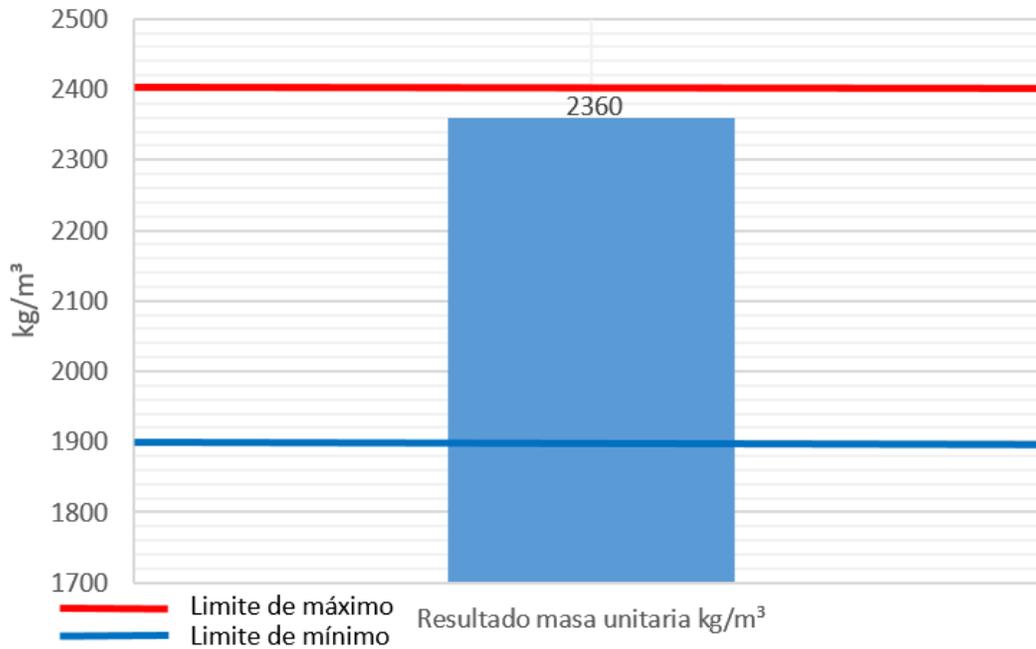


La (NMX-C-157-ONNCCE-2006) indica que el aire contenido en esta muestra está bajo el parámetro del 1%, pero muy cercano, con 0.6%, por lo que se considera un concreto sin aire incluido. Esto debido a su aditivo de fluidez añadido al diseño, el cual genera auto compactación del concreto y la expulsión de gran cantidad de aire contenido.

#### **4.3.4 Análisis de masa unitaria, concreto a/c 0.49**

En esta prueba se obtuvo un resultado de 2360 kg/m<sup>3</sup>, estando dentro de los parámetros de acuerdo a la (NMX-C-162-ONNCCE-2014) que indican que los rangos son entre 1900 kg/m<sup>3</sup> y 2400 kg/m<sup>3</sup> como máximo.

**Figura. 4.5** Grafica de la masa unitaria del concreto fresco a/c 0.49



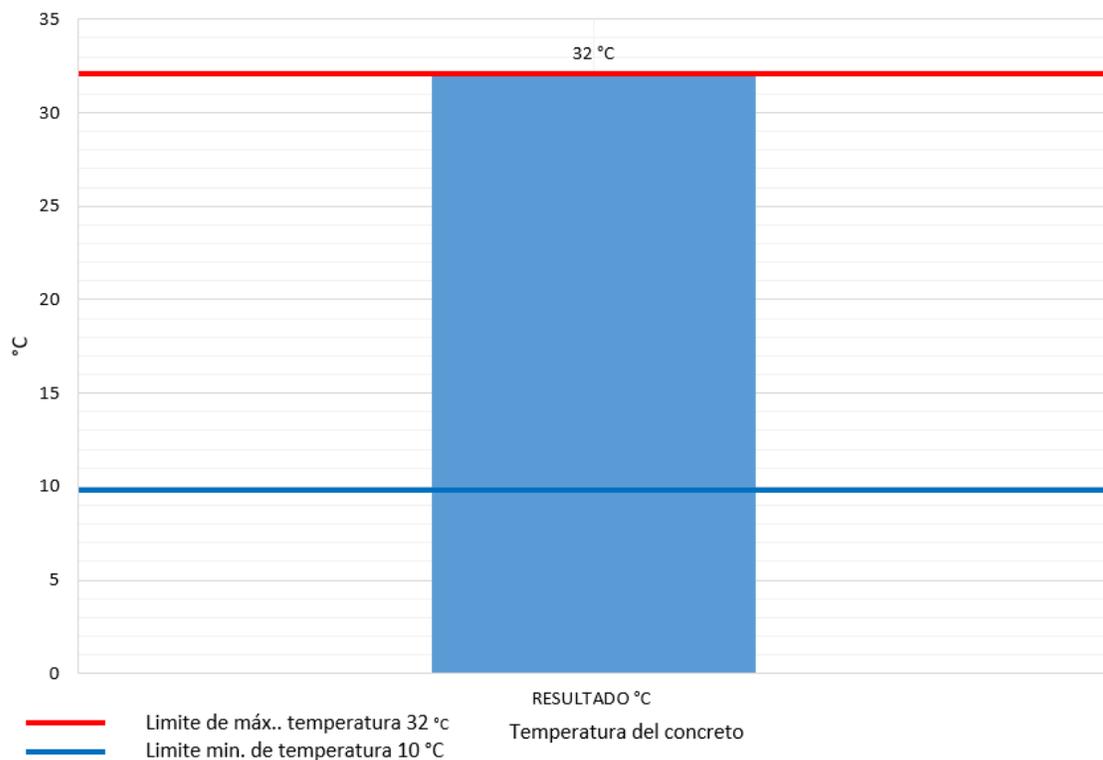
**Tabla 4.6.** Resultados de concreto en fresco A/C 0.66, f'c= 250 Kg/cm<sup>2</sup>.

PRUEBA	RESULTADO
Temperatura del concreto	32°C
Revenimiento	13 cm
Contenido de aire	0.7 %
Masa unitaria	2325 kg/m <sup>3</sup>
Masa por m <sup>3</sup>	2375 kg/m <sup>3</sup>

#### 4.4.1 Análisis de Temperatura, concreto a/c 0.66.

De acuerdo con los resultados obtenidos con la prueba registrada con el termómetro sumergido en la mezcla de concreto a/c 0.66, realizando la operación como lo indica la (NMX-C-435-ONNCCE-2010), se obtuvo que los 32°C es una temperatura elevada dentro del rango, pero se encuentra dentro los parámetros de aceptación.

**Figura. 4.6** Grafica de la temperatura del concreto fresco a/c 0.66.



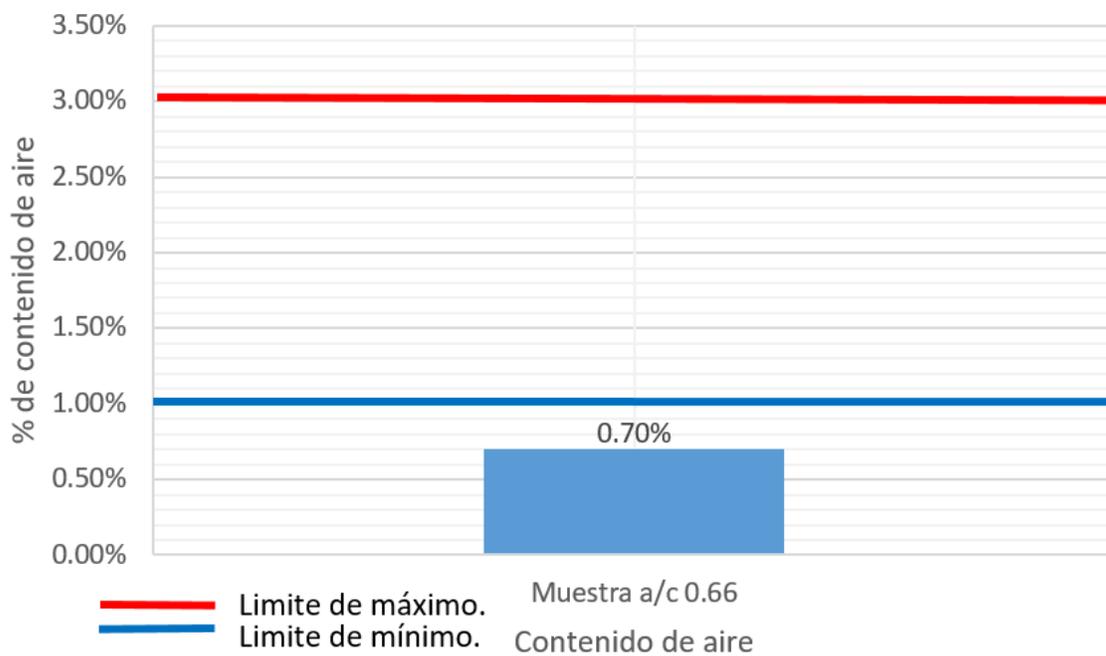
#### 4.4.2 Análisis de Revenimiento, concreto a/c 0.66.

Con lo obtenido en esta prueba y según lo que indica la (NMX-C-156-ONNCCE-2010) la muestra de concreto a/c 0.66 obtuvo un resultado reglamentario de 13 cm

#### 4.4.3 Análisis de contenido de aire, concreto a/c 0.66

La (NMX-C-157-ONNCCE-2006) indica que el aire contenido en esta muestra está bajo el parámetro del 1%, pero muy cercano, con 0.7%, por lo que se considera un concreto sin aire incluido.

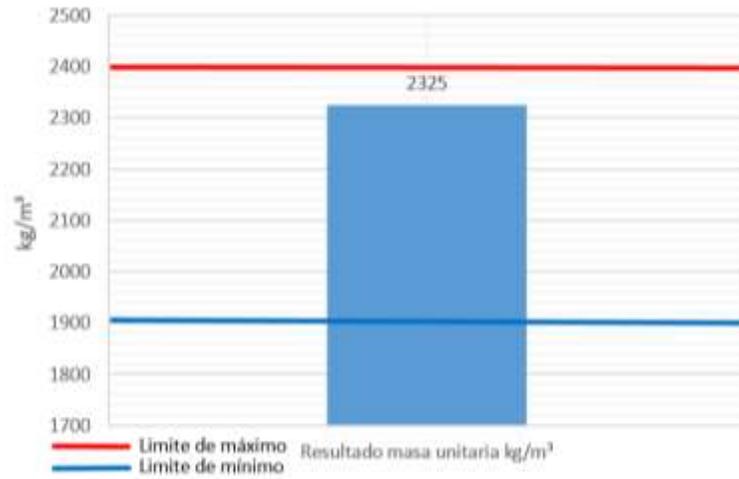
**Figura. 4.7** Grafica del contenido de aire del concreto fresco a/c 0.66.



#### 4.4.4 Análisis de masa unitaria, concreto a/c 0.66.

En esta prueba se obtuvo un resultado de 2325 kg/m<sup>3</sup>, estando dentro de los parámetros de acuerdo a la (NMX-C-162-ONNCCE-2014) que indican que los rangos son entre 1900 kg/m<sup>3</sup> y 2400 kg/m<sup>3</sup> como máximo.

**Figura. 4.8** Grafica de la masa unitaria del concreto fresco a/c 0.66.



#### 4.5. Resultados resistencia a compresión.

De acuerdo a la prueba realizada los especímenes de concreto puestos a prueba respondieron lo que por teoría se esperaba, logrando la resistencia por la que fueron diseñados, sobrepasando las expectativas a los 28 días de curado y los periodos de exposición no generaron un deterioro en su resistencia.

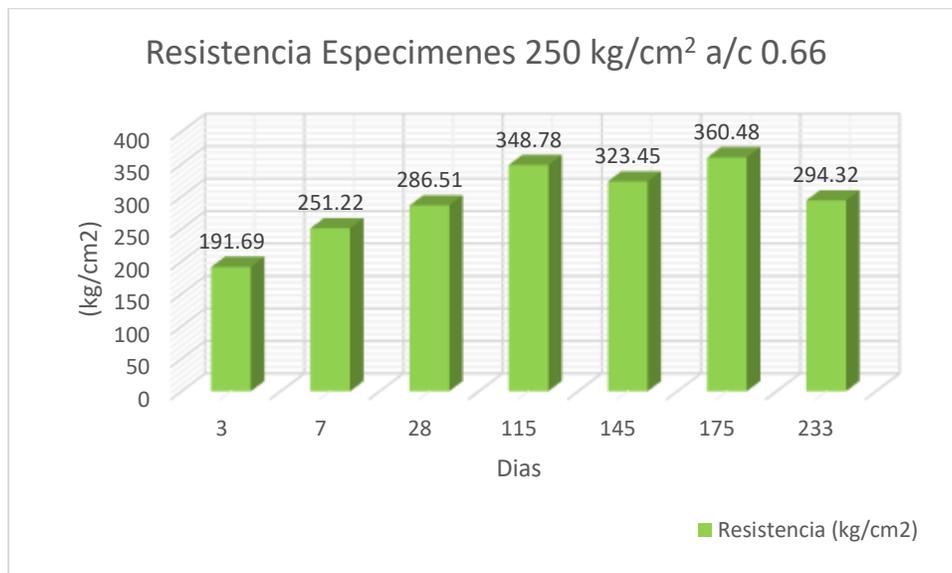
**Tabla 4.7.** Resistencia a la compresión. [40]

PRUEBA	ESPECIFICACIONES
<b>Resistencia a la compresión</b> (NMX-C-083-ONNCCE-2002)	El concreto debe alcanzar la Resistencia especificada a la edad de 28 días.

**Tabla 4.8.** Resultados generales resistencia a la compresión especímenes a/c 0.66

No. Espécimen	Edad (días)	Peso (kg)	Altura Prom. (cm)	Diámetro Prom. (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga Expuesta (kg)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
2 - 0.66	3	12.30	29.90	14.90	174.30	33,411.00	191.69
3 - 0.66	7	12.30	29.80	14.80	172.00	43,209.00	251.22
4 - 0.66	28	12.40	29.80	14.80	172.00	49,280.00	286.51
5 - 0.66	115	12.40	29.80	14.80	172.00	59,991.00	348.78
6 - 0.66	145	12.30	29.80	14.80	177.20	57,315.00	323.45
7 - 0.66	175	12.21	29.90	15.00	176.70	63,697.00	360.48
8 - 0.66	233	12.11	29.90	15.00	176.20	52,008.00	294.32

**Figura. 4.9** Grafica de resultados resistencia a la compresión del concreto a/c 0.66.

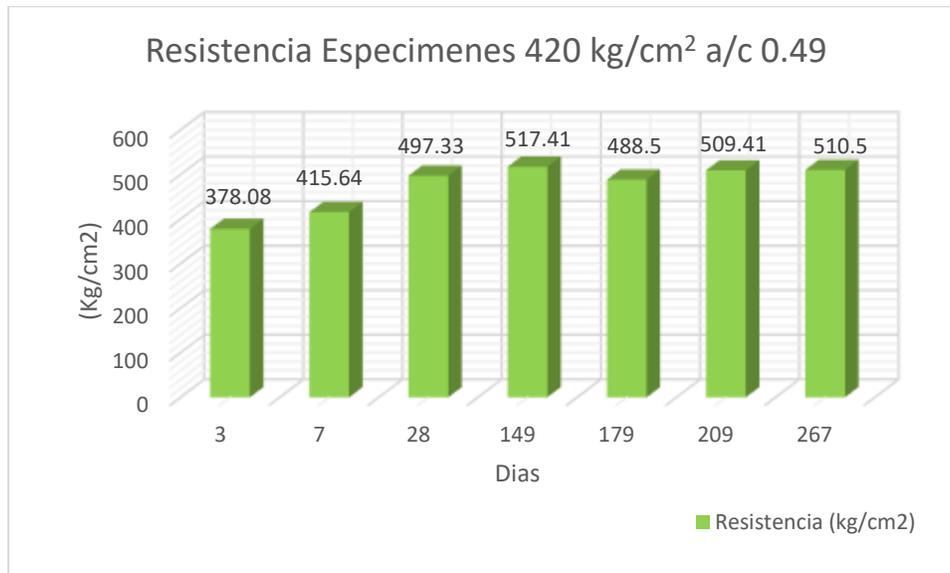


- Se realizaron dos pruebas, a los 3 y 7 días para determinar el avance de la resistencia del concreto a/c 0.66. A los 7 días el concreto ya había alcanzado la resistencia requerida, sobrepasando apenas los 250 kg/cm<sup>2</sup>, con 251.22 kg/cm<sup>2</sup> a edad temprana antes de los 28 días.
- Después de los 28 días de curado del concreto, al alcanzar la madures, siguió teniendo incrementos en su resistencia, alcanzando a los 175 días los 360.48 kg/cm<sup>2</sup> como máximo registrado en la prensa hidráulica.
- A partir de la prueba de los 115 días, por seguridad del buen funcionamiento de la prensa hidráulica, se optó por aplicar compresión en los cilindros de prueba, como limite la resistencia al que se había diseñado el concreto, (250 kg/cm<sup>2</sup>), cumpliendo con el objetivo de asegurar la calidad de la resistencia.

**Tabla 4.9.** Resultados resistencia a la compresión especímenes a/c 0.49

No. Espécimen	Edad (días)	Peso (kg)	Altura Prom. (cm)	Diámetro Prom. (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga Expuesta (kg)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
2 - 0.49	3	12.30	29.70	14.70	169.70	64, 160.00	378.08
3 - 0.49	7	12.40	29.80	14.80	172.00	71, 490.00	415.64
4 - 0.49	28	12.40	29.70	14.80	172.00	85, 540.00	497.33
5 - 0.49	149	12.40	29.80	14.80	172.00	88, 994.00	517.41
6 - 0.49	179	12.40	29.70	14.80	177.20	86, 554.00	488.50
7 - 0.49	209	12.10	29.80	14.90	174.30	88, 790.00	509.41
8 - 0.49	267	12.24	29.80	14.80	172.00	86, 309.00	501.79

**Figura. 4.10** Grafica de resultados resistencia a la compresión del concreto a/c 0.49.



- Se realizaron dos pruebas, a los 3 y 7 días para determinar el avance de la resistencia del concreto a/c 0.49. A los 28 días el concreto ya había alcanzado la resistencia requerida, sobrepasando los 420 kg/cm<sup>2</sup>, con 497.33 kg/cm<sup>2</sup>.
- Después de los 28 días de curado del concreto, al alcanzar la madures siguió teniendo incrementos en su resistencia, alcanzando a los 149 días los 517.41 kg/cm<sup>2</sup> como máximo registrado en la prensa hidráulica.
- Desde la primera prueba realizada a los 3 días, por seguridad del buen funcionamiento de la prensa hidráulica, se optó por aplicar compresión en los cilindros de prueba con límite, la resistencia al que se había diseñado el concreto. (420 kg/cm<sup>2</sup>), cumpliendo con el objetivo de asegurar de haber alcanzado la calidad de la resistencia a la que fue diseñado.

#### 4.6. Resultados del análisis de potencial de corrosión.

Los análisis de Potencial de Corrosión realizado los especímenes de concreto armado tipo viga, fueron basados en la Norma ASTM C 879. Se aplicaron al armado de acero de las dos vigas, las cuales están en contacto eléctrico dentro del volumen de concreto por estribos. Se tomaron los datos en mV para verificar la homogeneidad, y los resultados fueron los siguientes.

**Tabla 4.10** Criterios de evaluación utilizados para interpretación de resultados en las pruebas de potenciales de media celda: [28]

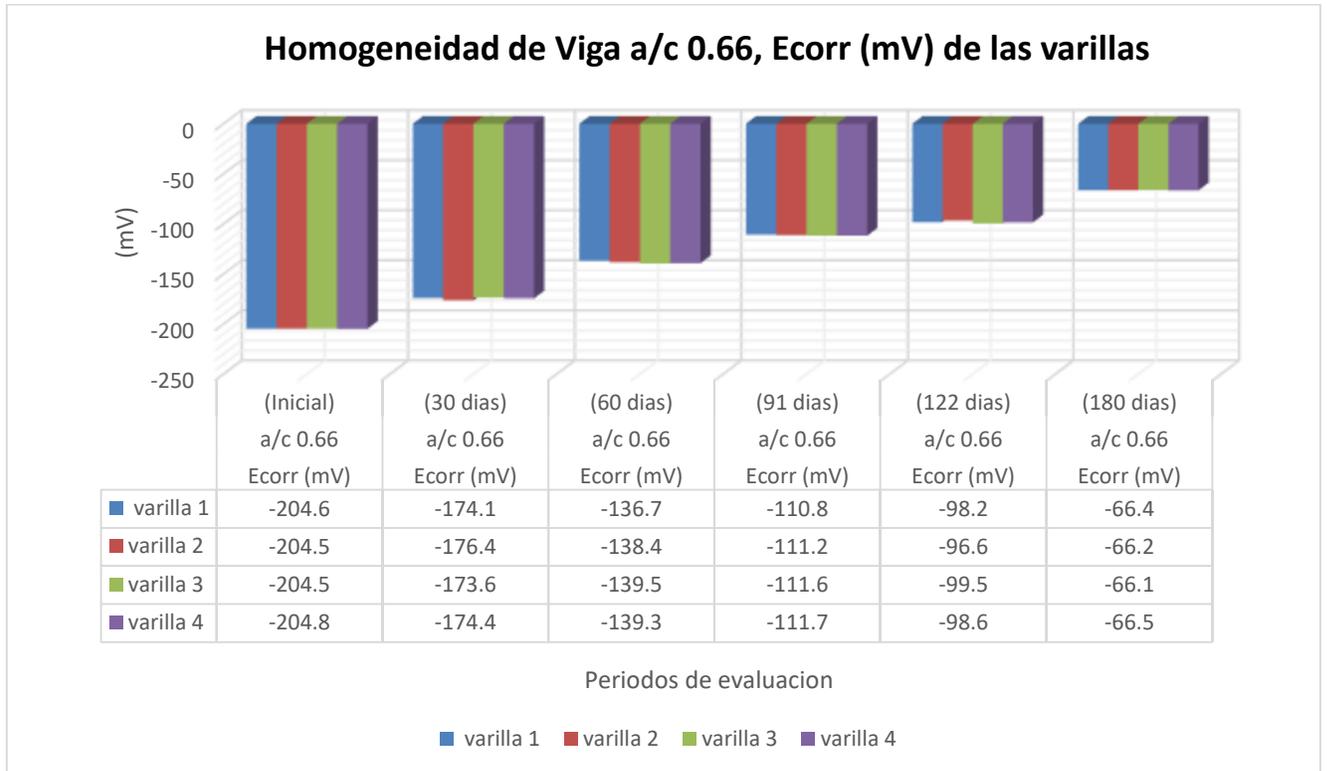
<b>Potencial de corrosión (E<sub>corr</sub> Cu/CuSO<sub>4</sub>)</b>	<b>Probabilidad de corrosión</b>
Más negativo de -350 mV	Mayor del 95%
Rango de -200 a -350 mV	Aproximadamente 50%
Más positivo que -200 mV	Menor del 5%

**Tabla 4.11** Resultados generales obtenidos de las pruebas de potencial de corrosión de media celda:

Medición	Fecha de medición	Espécimen y relación agua/cemento	Días	Temperatura Laboratorio (F)	No. Varilla	Potencial de corrosión Ecorr (mV)
1	25/08/2017	VIGA a/c 0.66	Inicial	76	# 1 # 2 # 3 # 4	- 204.6 -204.5 -204.5 -204.8
1	25/08/2017	VIGA a/c 0.49	Inicial	76	# 1 # 2 # 3 # 4	-129 -130 -129.5 -124.1
2	25/09/2017	VIGA a/c 0.66	30	76	# 1 # 2 # 3 # 4	-174.1 -176.4 -173.6 -174.4
2	25/09/2017	VIGA a/c 0.49	30	76	# 1 # 2 # 3 # 4	-123.8 -124.9 -123.4 -123.5
3	25/10/2017	VIGA a/c 0.66	60	76	#1 #2 #3 #4	-136.7 -138.4 -139.5 -139.3
3	25/10/2017	VIGA a/c 0.49	60	76	#1 #2 #3 #4	-112.8 -112.4 -113.8 -113.4
4	25/11/2017	VIGA a/c 0.66	91	70	#1 #2 #3 #4	-110.8 -111.2 -111.6 -111.7
4	25/11/2017	VIGA a/c 0.49	91	70	#1 #2	-68.6 -67.6

					#3	-70.1
					#4	-66.5
5	26/12/2017	VIGA a/c 0.66	122	65	#1	-98.2
					#2	-96.6
					#3	-99.5
					#4	-98.6
5	26/12/2017	VIGA a/c 0.49	122	65	#1	-71.4
					#2	-71.1
					#3	-72.8
					#4	-72.3
6	22/02/2018	VIGA a/c 0.66	180	68	#1	-66.4
					#2	-66.2
					#3	-66.1
					#4	-66.5
6	22/02/2018	VIGA a/c 0.49	180	68	#1	-38.1
					#2	-39.1
					#3	-37.4
					#4	-37.8

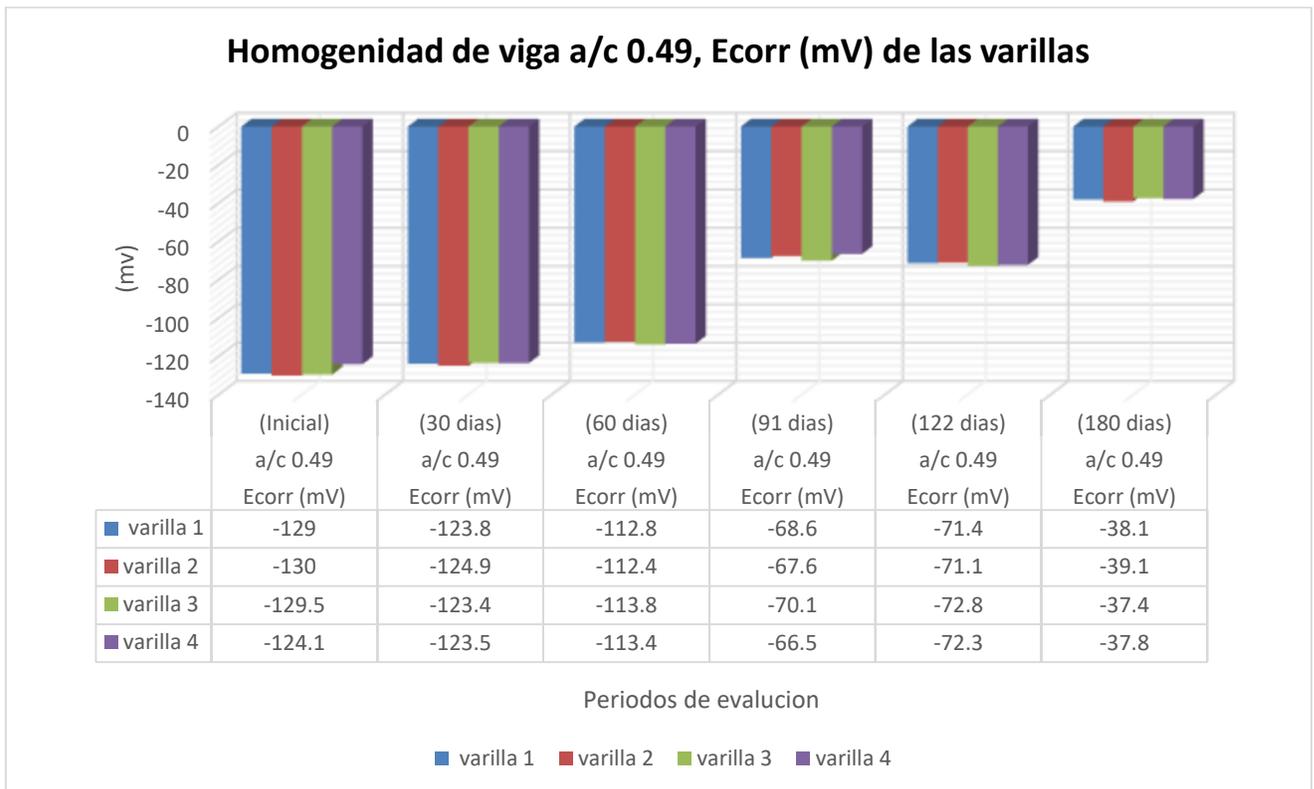
**Figura. 4.11** Grafica de resultados del potencial de corrosión del concreto a/c 0.66, por varilla.



- La varilla 1 presentó rangos de -204.6 mV inicial hasta -66.4 mV a los 180 días de exposición.
- La varilla 2 presentó rangos de -204.5 mV inicial hasta -66.2 mV a los 180 días de exposición.
- La varilla 3 presentó rangos de -204 mV inicial hasta -66.1 mV a los 180 días de exposición.
- La varilla 4 presentó rangos de -204.8 mV inicial hasta -66.5 mV a los 180 días de exposición.
- La homogeneidad de la estructura resulto con índices de variaciones iniciales -0.3 mV, 2.3 mV a los 30 días, -2.8 mV a los 60 días, -0.9 mV a los 91 días, -2.9 mV a los 122 días, -0.4 mV a los 180 días.

- Las 4 varillas presentaron tendencias catódicas durante su periodo de evaluación.

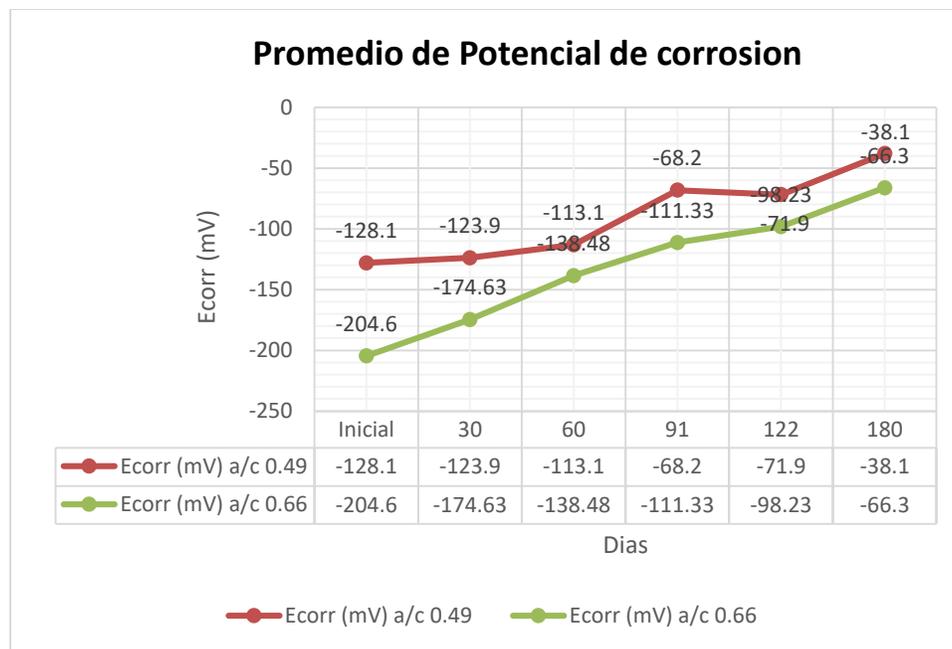
**Figura. 4.12** Grafica de resultados del potencial de corrosión del concreto a/c 0.49, por varilla.



- La varilla 1 presentó rangos de -129 mV inicial hasta -38.1 mV a los 180 días de exposición.
- La varilla 2 presentó rangos de -130 mV inicial hasta -39.1 mV a los 180 días de exposición.
- La varilla 3 presentó rangos de -129.5 mV inicial hasta -37.4 mV a los 180 días de exposición.
- La varilla 4 presentó rangos de -124.1 mV inicial hasta -37.8 mV a los 180 días de exposición.

- La homogeneidad de la estructura resultó con índices de variaciones iniciales de -4.9 mV, -1.5 mV a los 30 días, -1.4 mV a los 60 días, -3.6 mV a los 91 días, -1.7 mV a los 122 días, -1.7 mV a los 180 días.
- Las 4 varillas presentaron tendencias catódicas durante su periodo de evaluación.

**Figura. 4.13** Grafica de resultados promedio del potencial de corrosión general.



- Los resultados de potenciales promedio en la evaluación inicial es de -128.1 mV viga a/c 0.49 y -204.6 mV viga a/c 0.66, esto quiere decir que de entrada, esta última tiene más riesgo a la corrosión que la primera viga (potenciales alcanzados a los 28 días de curado en piletas).
- La diferencia de potenciales promedio en la evaluación inicial de la viga a/c 0.49 es de 90 mV.
- La diferencia de potenciales promedio en la evaluación inicial de la viga a/c 0.66 es de 138.3

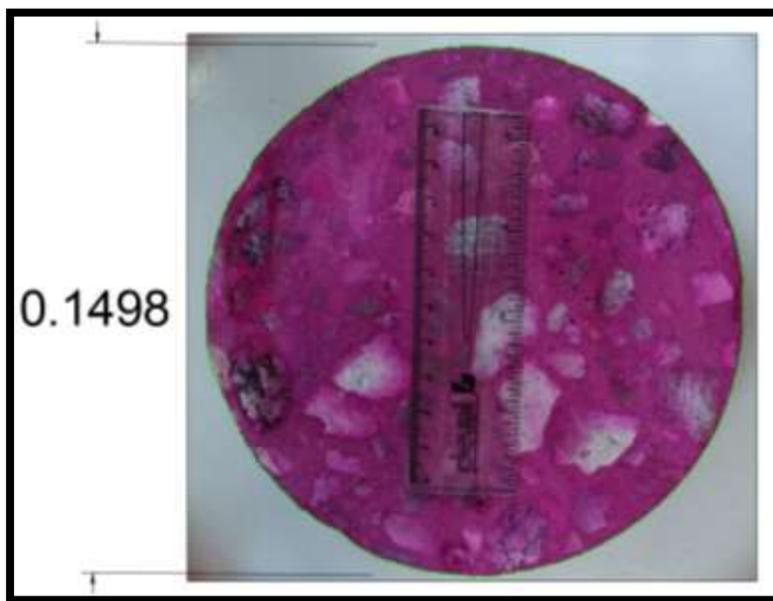
mV.

- El resultado inicial de la viga a/c 0.66 fue de -204.6 mV se encontró cerca al valor más positivo de acuerdo a los rangos de ASTM C 879. (Valores de -200 a -350 mV) este presentaba en su momento una posibilidad de aproximadamente 50% de corrosión.
- Las estructuras del armado de las dos vigas presento tendencia catódica durante su avance de los periodos de evaluación.
- Los resultados finales indican que tanto las vigas a/c 0.49 con -38.1 mV y a/c 0.66 con -66.3 mV y de acuerdo a los rangos de ASTM C 879 (más positivo que -200 mV) tienen un índice de tener una probabilidad menor a 5% de corrosión.
- De acuerdo a los resultados finales, se concluye que la varilla obtuvieron progresivamente tendencias positivas en sus potenciales ya que están entrando en un estado pasivo.
- El tiempo de exposición en el subsuelo fue nulo para poder presenciar un ataque de corrosión en el acero de refuerzo.

#### **4.7. Resultados de análisis de carbonatación en especímenes de concreto.**

A continuación se presentaran las pastillas realizadas en los cortes del espécimen puesto a exposición en el subsuelo, analizado con la aplicación del indicador fenolftaleína, un levantamiento fotográfico y el dibujo a computadora del área carbonatada representado como un anillo ennegrecido en los perímetros de las pastillas:

**Figura. 4.14** Espécimen de concreto, diseño de mezcla a/c 0.66, Agosto 2017



**Tabla 4.12** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación, prueba utilizando fenolftaleína 1% concreto a/c 0.66 , Agosto 2017

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
178.50	178.50	Indetectable	Indetectable

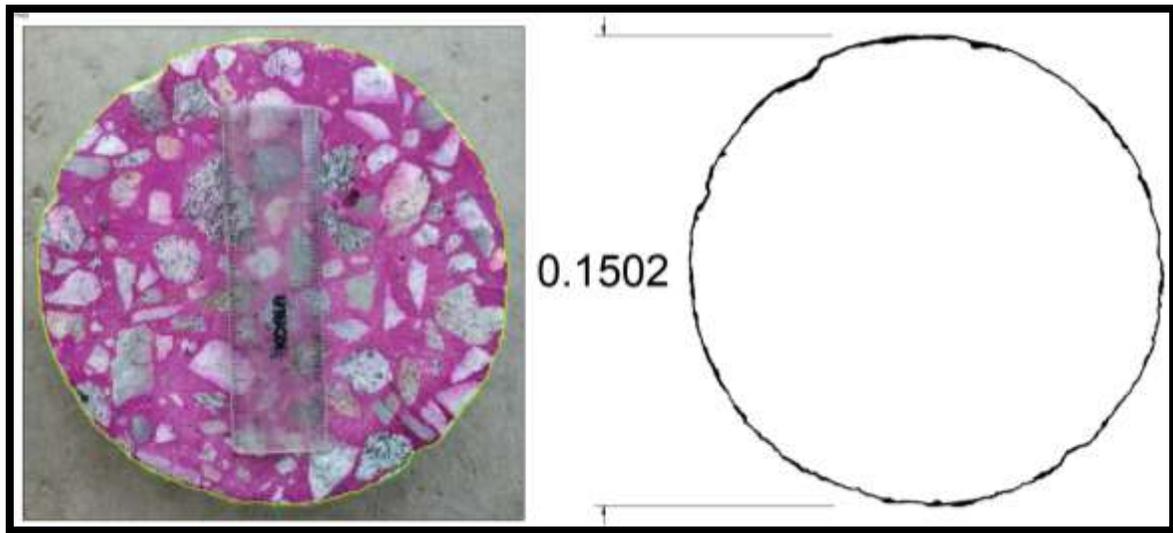
**Figura. 4.15** Espécimen de concreto, diseño de mezcla a/c 0.49, Agosto 2017.



**Tabla 4.13** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación, prueba utilizando fenolftaleína 1%, mezcla a/c 0.49, Agosto 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
178.10	178.10	Indetectable	Indetectable

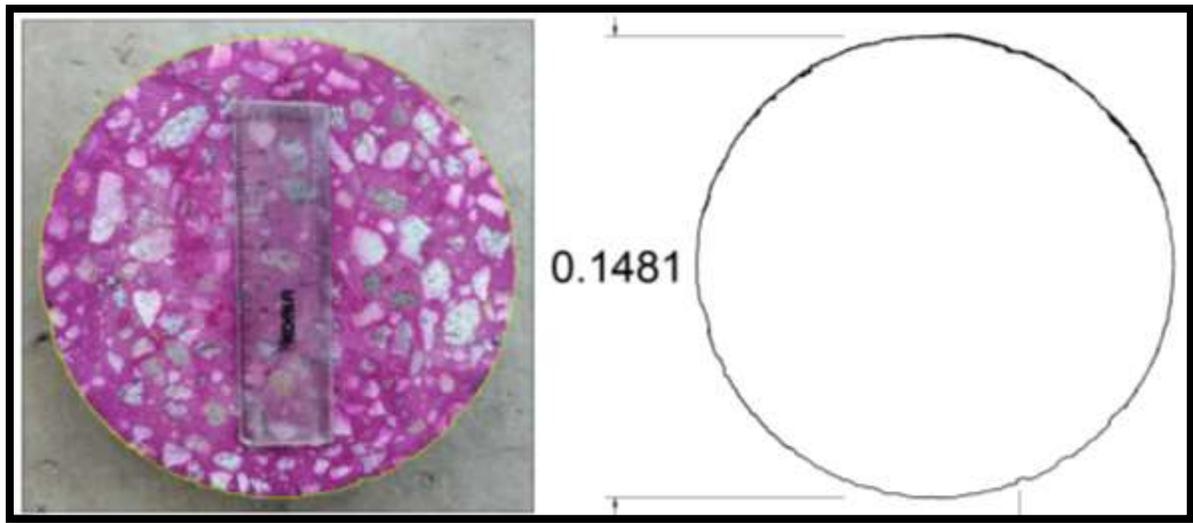
**Figura. 4.16** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.66, Septiembre 2017.



**Tabla 4.14** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación, utilizando fenolftaleína 1%, mezcla a/c 0.66, Septiembre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONA. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
178.1	175.2	2.9	1.62%

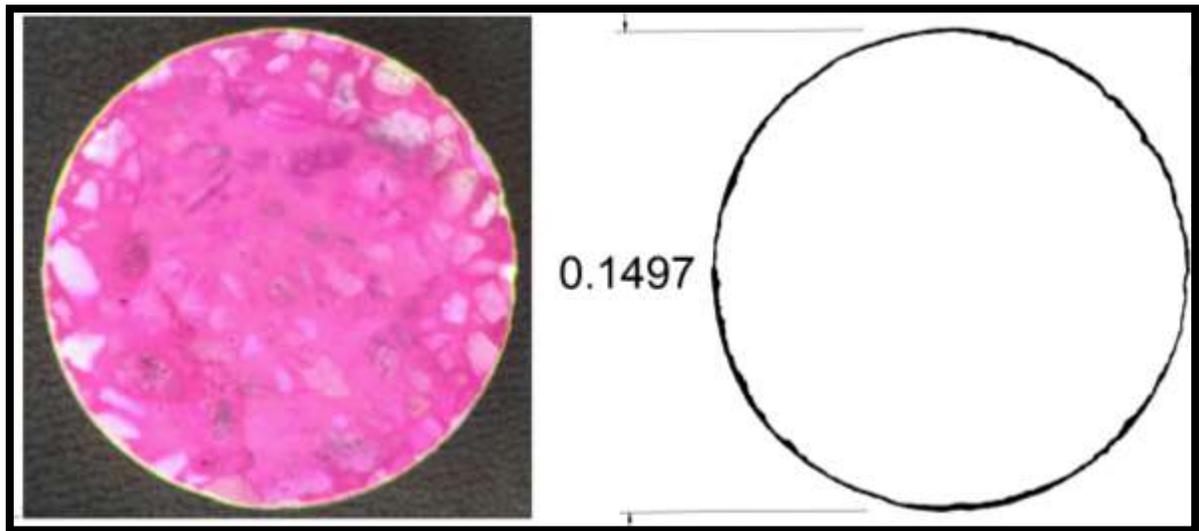
**Figura. 4.17** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.49, Septiembre 2017.



**Tabla 4.15** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, mezcla a/c 0.49, Septiembre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
177.2	176.1	1.1	0.62%

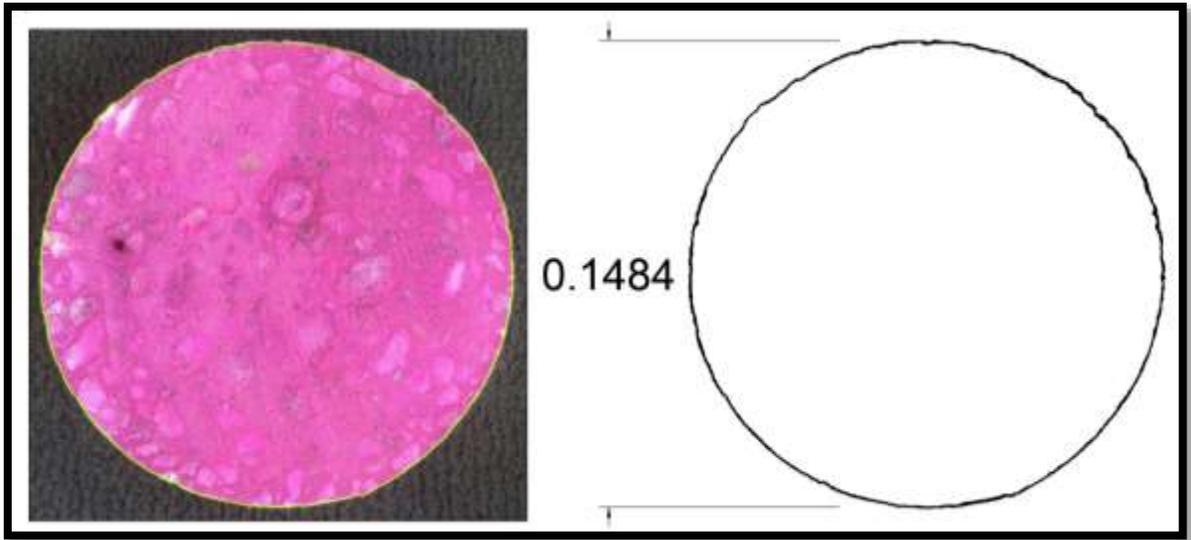
**4.18 Figura.** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de mezcla a/c 0.66, Octubre 2017.



**Tabla 4.16** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación, utilizando fenolftaleína 1%, mezcla a/c 0.66, Octubre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
174.3	169.3	5.0	2.87%

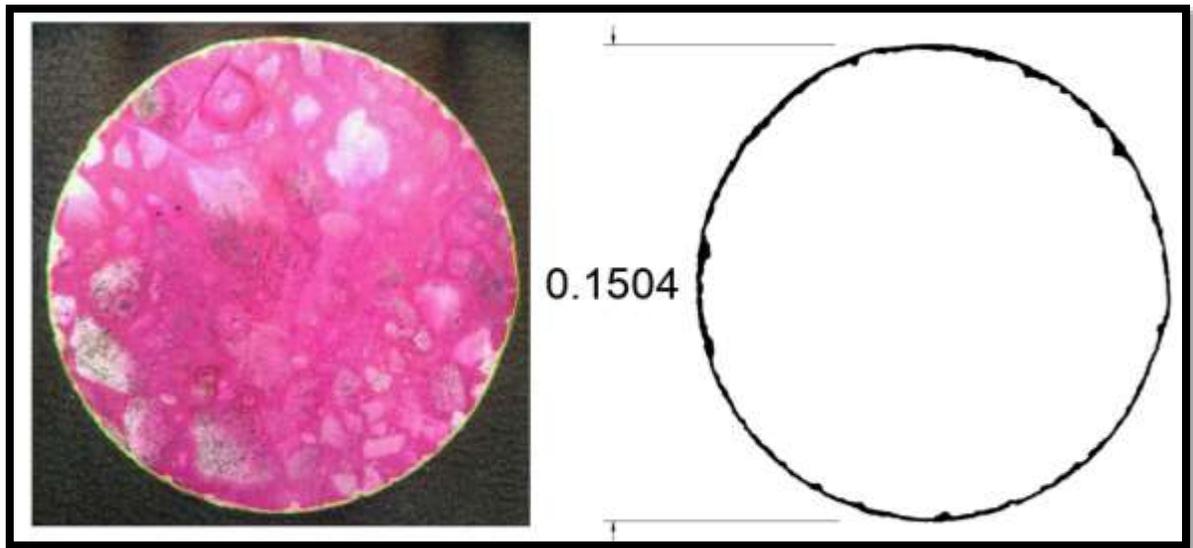
**Figura. 4.19** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de concreto a/c 0.49, Octubre 2017.



**Tabla 4.17** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Octubre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
176.41	173.91	2.50	1.42%

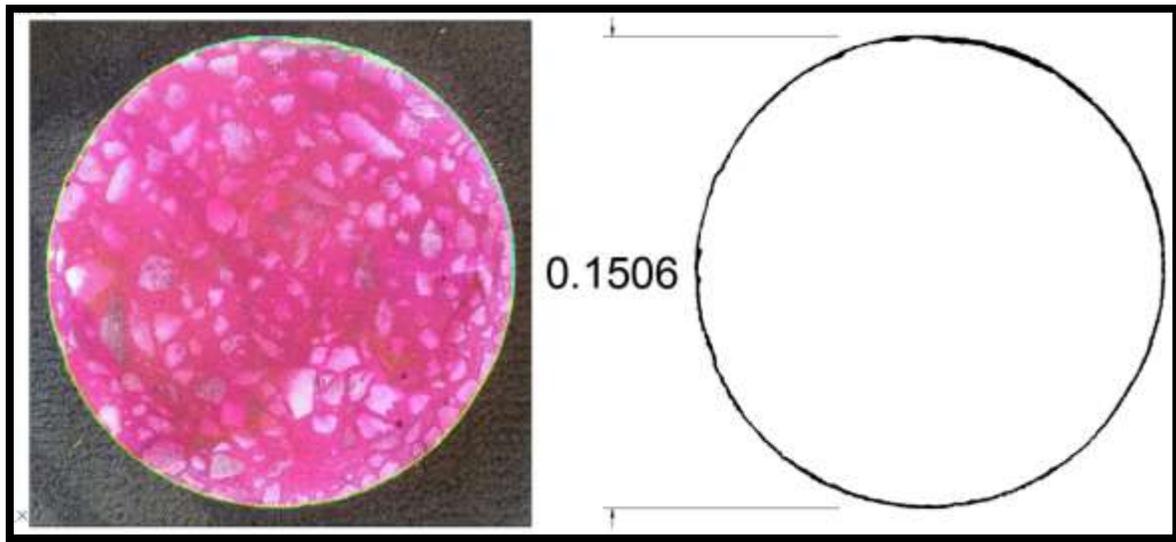
**Figura. 4.20** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de concreto a/c 0.66, Noviembre 2017.



**Tabla 4.18** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Noviembre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
174.00	168.97	5.03	2.89%

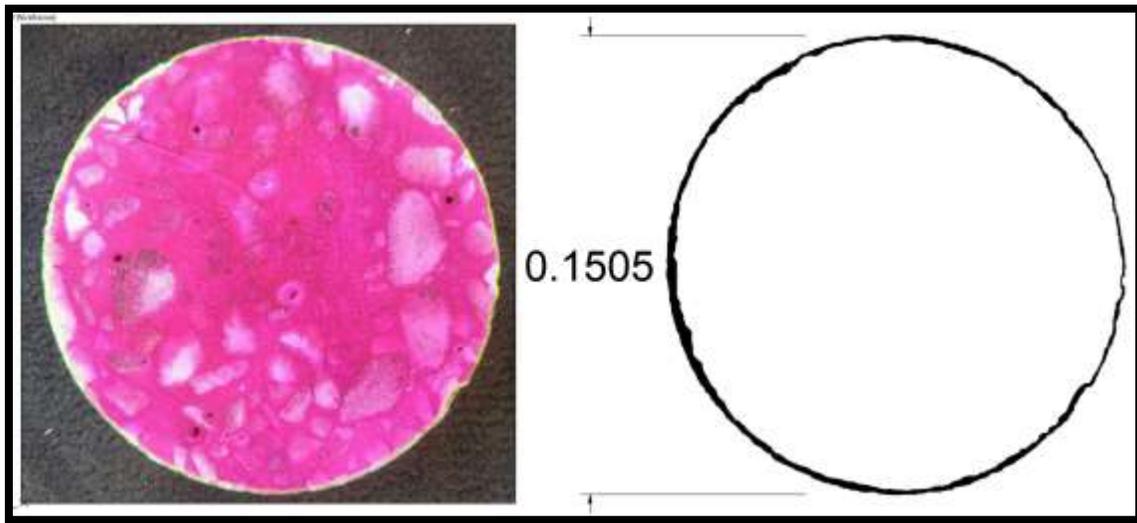
**Figura. 4.21** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de concreto a/c 0.49, Noviembre 2017.



**Tabla 4.19** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Noviembre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
176.87	173.40	2.50	1.98%

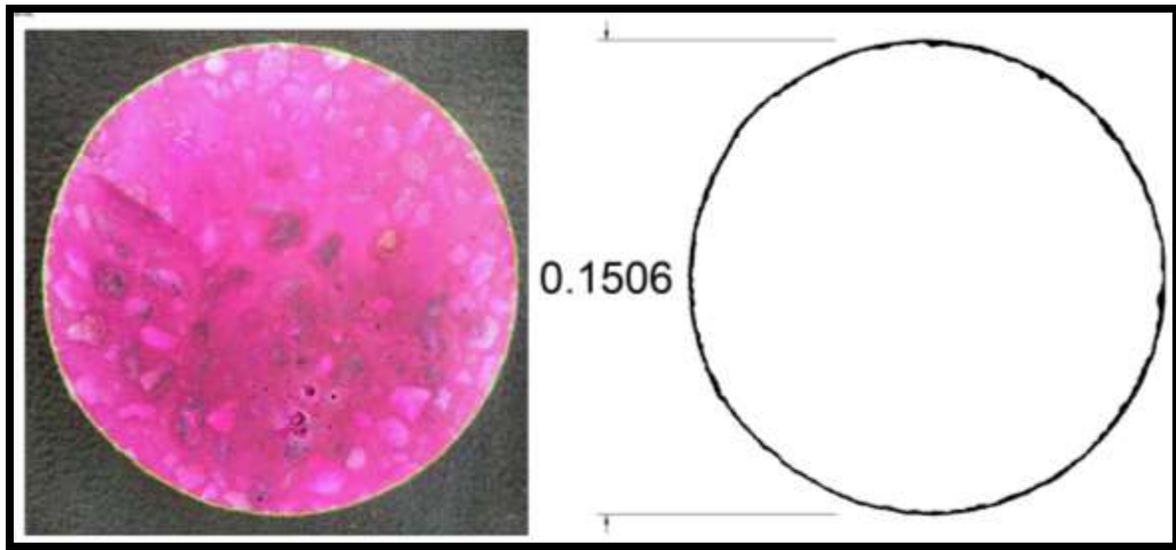
**Figura. 4.22** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de concreto a/c 0.66, Diciembre 2017.



**Tabla 4.20** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Diciembre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
177.10	169.90	7.20	4.07%

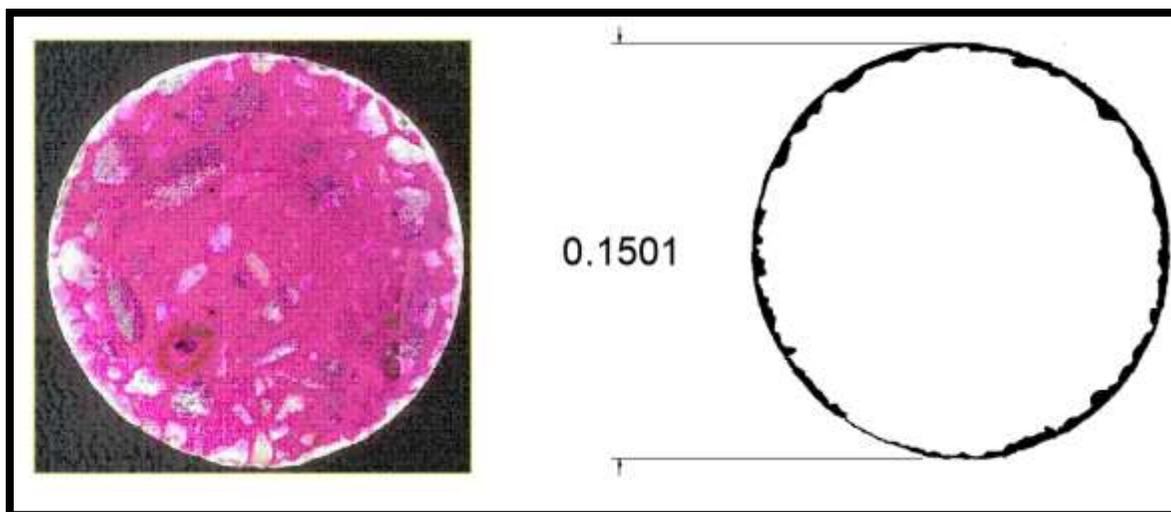
**Figura. 4.23** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de concreto a/c 0.49, Diciembre 2017.



**Tabla 4.21** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Diciembre 2017.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
178.00	174.00	4.00	2.25%

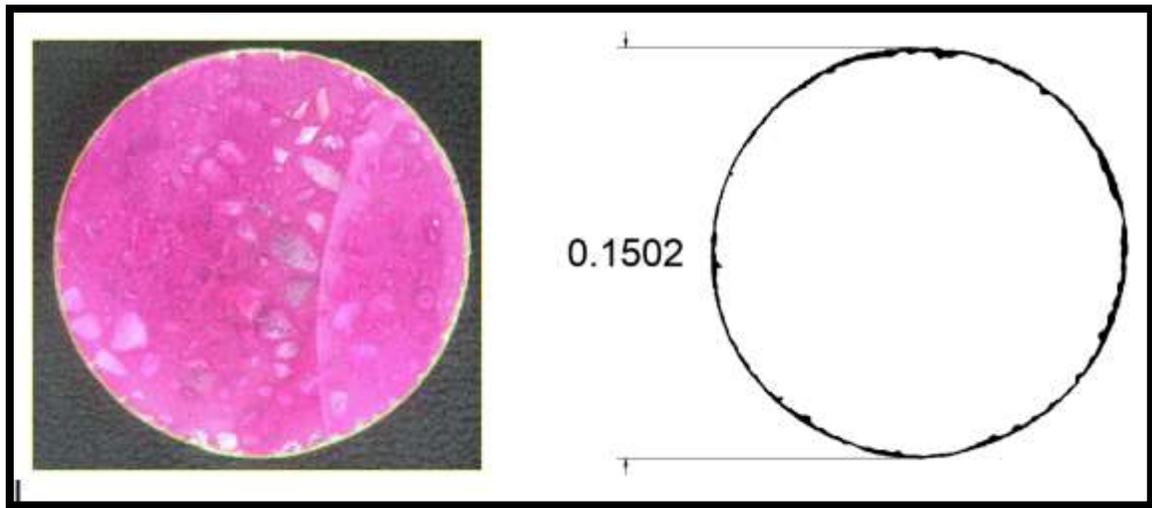
**Figura. 4.24** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de concreto a/c 0.66, Febrero 2018.



**Tabla 4.22.** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.66, Febrero 2018.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
177.48	166.27	11.21	6.32%

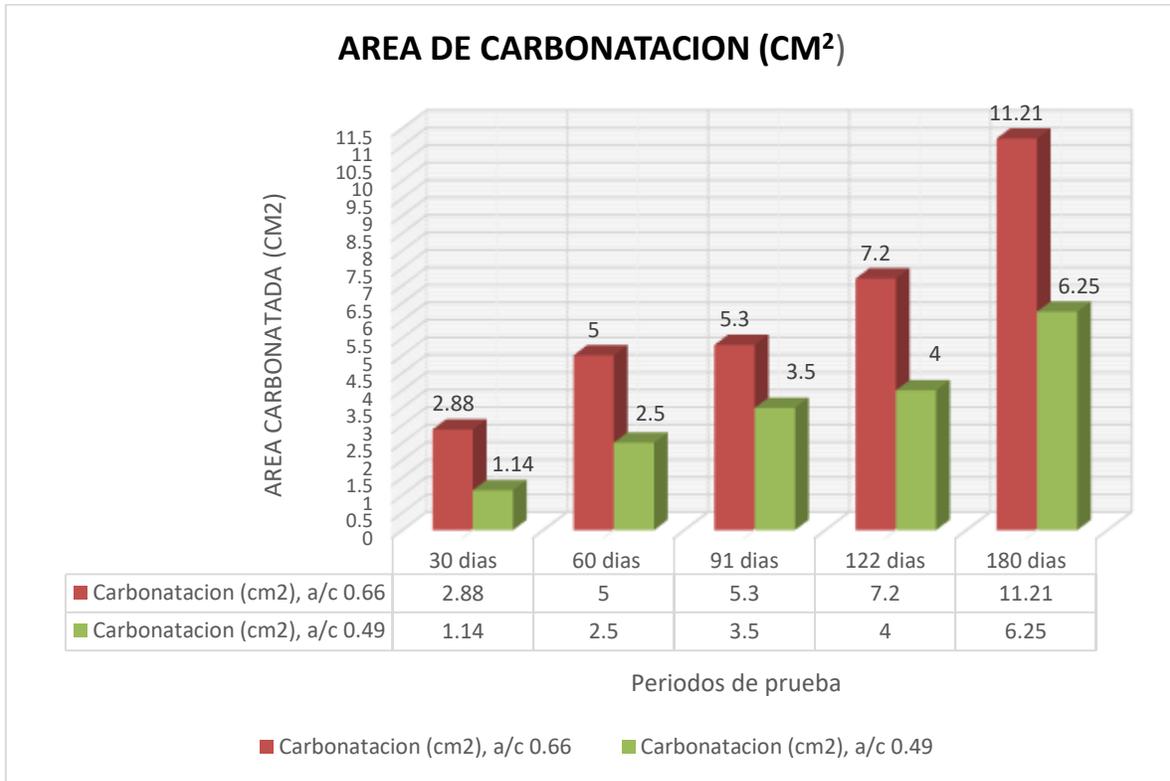
**Figura. 4.25** Espécimen de concreto, el perímetro ennegrecido representa la carbonatación, diseño de concreto a/c 0.49, Febrero 2018.



**Tabla 4.23** Resultados generales obtenidos del análisis de Carbonatación utilizando fenolftaleína 1%, concreto a/c 0.49, Febrero 2018.

AREA TOTAL DE ANALISIS (cm <sup>2</sup> )	AREA DE LIBRE DE EFECTOS CARBONATACIÓN. (cm <sup>2</sup> )	AREA DE CARBONATACION (cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE CARBONATACION
178.61	172.36	6.25	3.50%

**Figura 4.26** Grafica de resultados generales de carbonatación por  $\text{cm}^2$



Los cilindros de concreto elaborados con a/c 0.66, siendo el más permeable de los diseños, presentaron una mayor área carbonatada, incrementándose conforme avanzaron los periodos de prueba.

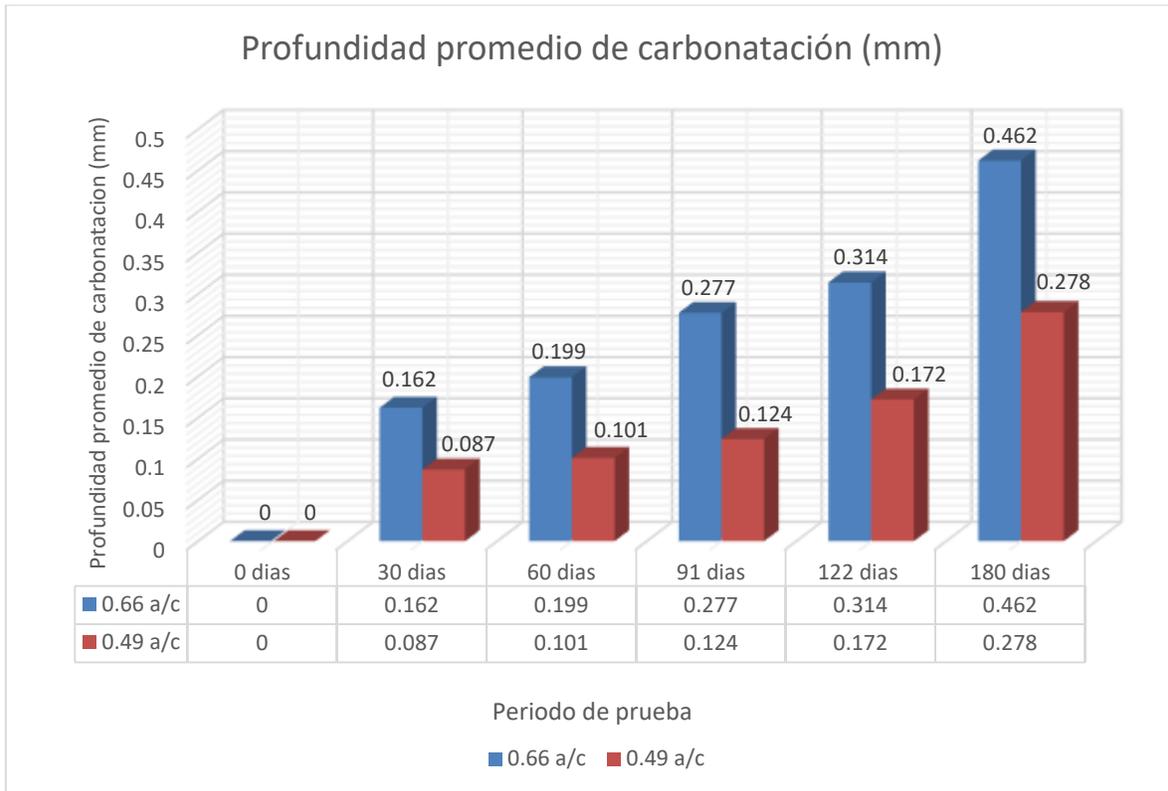
Los especímenes elaborados con a/c 0.49, presentaron el área más pequeña de penetración de las dos tipos de mezclas ya que es un diseño de concreto considerado con alta impermeabilidad, resistente a la penetración agentes externos como  $\text{CO}_2$ , cloruros y sulfatos.

**Tabla 4.24** Resultados generales de profundidad de carbonatación y velocidad de carbonatación en los diferentes periodos.

No. De Especimen	Relación a/c	Fecha de exposición	Fecha de corte	Días	Tiempo en años	No de corte	Área Carb. Cm2	Profundi. De carb. Promedio (mm) X	Velocidad de carbona. (Kc)
E1	0.66	04/07/2017	25/08/2017	0	0	1	0	0	0
E1	0.49	08/08/2017	25/08/2017	0	0	1	0	0	0
E1	0.66	25/08/2017	25/09/2017	30	0.082	2	2.9	0.162	0.57
E1	0.49	25/08/2017	25/09/2017	30	0.082	2	1.1	0.087	0.304
E1	0.66	25/09/2017	25/10/2017	60	0.164	3	5	0.199	0.491
E1	0.49	25/09/2017	25/10/2017	60	0.164	3	2.5	0.101	0.249
E1	0.66	25/10/2017	25/11/2017	91	0.259	4	5.03	0.277	0.544
E1	0.49	25/10/2017	25/11/2017	91	0.259	4	2.5	0.124	0.244
E1	0.66	25/11/2017	25/12/2017	122	0.334	5	7.2	0.314	0.543
E1	0.49	25/11/2017	25/12/2017	122	0.334	5	4	0.172	0.298
E7	0.66	25/12/2017	25/02/2018	180	0.493	6	11.21	0.462	0.658
E7	0.49	25/12/2017	25/02/2018	180	0.493	6	6.25	0.278	0.396

Con los resultados generales registrados basados en RILEM CPC 18, de la prueba de profundidad de carbonatación realizada a los cilindros de concreto expuesto al subsuelo urbano de la ciudad de Mexicali, se realizó la tabla 4.23, que contiene los datos para calcular la velocidad de carbonatación: La identificación de cada espécimen, los días de exposición que lleva el espécimen y la proporción en años, la profundidad promedio de carbonatación de cada espécimen.

**Figura 4.27** Grafica de resultados generales de profundidad promedio de carbonatación por periodos de prueba.



\* Los especímenes con a/c 0.66 y 0.49 resultaron en el análisis inicial con una carbonatación indetectable mediante el procedimiento ya descrito, presentaron un incremento en su profundidad de carbonatación en cada periodo de prueba.

\* Durante los periodos de prueba los especímenes a/c 0.49 presentaron una penetración promedio inferior a los de a/c 0.66, debido a su condiciones de impermeabilidad ya mencionadas.

\* Finalizando las pruebas a los 180 días, ningún análisis resulto por arriba del milímetro de penetración máxima ni promedio, de acuerdo a RILEM CPC 18 que indica registrar las penetraciones de carbonatación a 0.5 milímetros hasta las

penetración máxima, en este caso solo se tuvieron penetraciones por arriba del medio milímetro en los especímenes con a/c 0.66 de Febrero con 0.462 mm que fue la profundidad máxima promedio registrada. Las demás medidas fueron tomadas en cuenta para conocer el área y profundidad promedio de carbonatación real.

## CONCLUSIÓN

El deterioro del concreto y corrosión del acero de refuerzo, por causa del medio ambiente urbano como el de la ciudad de Mexicali, puede ser controlado realizando diseños de concretos con durabilidad de acuerdo a la necesidad del proyecto de acuerdo al medio donde será construido.

De acuerdo a los estudios obtenidos se comprobó la interacción del concreto en el medio que lo rodeaba, con la exposición de los especímenes en el subsuelo y las pruebas registradas previo al estudio de resistencia, deterioro y corrosión mediante análisis iniciales realizados de composición del acero de refuerzo, tierra del subsuelo, cemento y agua que se usaron para elaborar el concreto, pruebas en el concreto fresco, fueron datos fundamentales e introductorios para conocer los materiales que se implementarían en la fabricación de especímenes de concreto armado y el medio de exposición que se enfrentaba.

El deterioro del concreto se evaluó con las pruebas de carbonatación, resistencia a compresión de los cilindros de concreto y la corrosión mediante potencial de corrosión del acero de refuerzo de las vigas de concreto, por un periodo total de 180 días, que por los resultados obtenidos en estas pruebas podemos concluir:

\* El estudio del suelo arrojó que de acuerdo a los índices que obtuvo fue -3, es decir débilmente agresivo.

\* Los resultados del análisis del cemento utilizado para la fabricación del concreto mostraron que el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) presente fue de 0.002% a 0.004, determinada conforme a la norma NMX-C-185ONNCCE que son menores al 0.020% máximo estipulado.

\* El agua utilizada para la fabricación del concreto, obtenida de la red de agua de la ciudad, fue sometida a análisis de contaminantes y según los parámetros de

contenido de minerales, sólidos disueltos, grasas, impurezas y otros elementos expuestos en la tabla 3.3, los resultados se encuentran en regla de acuerdo a NMX C-122 ONNCCE.

\* El análisis de composición a través de rayos LIBS realizado al acero, indica que la mayor concentración de contenido se encuentra en el elemento Hierro (Fe) con un porcentaje de concentración de 97.80% en varilla 3/8" y 95.50% varilla 1/4". Otros metales como Cobre (Cu), Aluminio (Al), Silicio (Si), Manganeso (Mn), Níquel (Ni) y Molibdeno (Mo) se encuentran en aleación para prevenir la corrosión y estos actúan anódicamente en la estructura de la varilla.

\* Los análisis realizados al concreto fresco de las dos diferentes muestras utilizadas, 420 kg/cm<sup>2</sup> con a/c 0.49 y 250 kg/cm<sup>2</sup> con a/c 0.66 para la elaboración de los especímenes, dieron resultados satisfactorios, con todas las especificaciones que indica la NMX-C-155-ONNCCE 2014.

\* En los resultados de las pruebas de resistencia a compresión del concreto 250 kg/cm<sup>2</sup> 0.66 a/c, indican que a los 7 días, hablando de una temprana edad, el concreto ya había sobrepasado la resistencia total especificada en su calidad con 251.22 kg/cm<sup>2</sup> y la máxima carga de compresión aplicada en el espécimen fue a los 175 días con 360.48 kg/cm<sup>2</sup> superando la resistencia a la que fue diseñado.

En el concreto 420 kg/cm<sup>2</sup> con 0.49 a/c los resultados de resistencia arrojan que a los 28 días ya había sobrepasado su resistencia total especificada en su diseño con 497.33 kg/cm<sup>2</sup>, y la máxima carga de compresión aplicada en el espécimen fue a los 149 días con 517.41 kg/cm<sup>2</sup> superando la resistencia a la que fue diseñado.

Resultados obtenidos cumpliendo satisfactoriamente según la NMX-C-083-ONNCCE-2002. Cabe resaltar que se optó por aplicar como límite la resistencia de la compresión en los cilindros de prueba al que se había establecido en el diseño de cada concreto, cumpliendo con el objetivo de asegurar la calidad de la

resistencia al que habían sido diseñados y de no forzar la prensa hidráulica por indicaciones de la empresa.

\*De acuerdo a la corrosión del acero, los resultados de potencial de corrosión de los dos especímenes tipo viga de concreto armado 420 kg/cm<sup>2</sup> 0.49 a/c con -38.1 mV y 250 kg/cm<sup>2</sup> 0.66 a/c con -66.3 mV a los 180 días de prueba en el último análisis, el acero se encontró en un estado de pasivo, y como lo indican los parámetros de corrosión de la norma ASTM C 876, el porcentaje de probabilidad de corrosión de las dos vigas fue del 5%, indicaron que al acero de refuerzo colocado a exposición, se encuentra fuera de peligro de corrosión.

Los resultados de las pruebas de carbonatación y de acuerdo a las hipótesis planteadas, existió concordancia entre ellas, ya que el concreto de mayor a/c que es el de 0.66 y fue el que mayor penetración promedio de carbonatación presentó en los resultados, con áreas de carbonatación más elevadas en todos sus periodos de prueba por cuestiones de permeabilidad a comparación de los especímenes de 0.49 a/c, gracias a su diseño que le permite ser más impermeable por su alto contenido de cemento en relación al agua, resistiendo más a la penetración de la carbonatación.

Después de todos los resultados obtenidos en las pruebas, se concluyó que para conseguir una mejor calidad en la construcción de estructuras de concreto armado, se deben considerar los aspectos de durabilidad en el concreto, que cumpla con las expectativas de calidad esperadas en la edificación, realizando diseños de concretos que sean los indicados para cada proyecto, tomando en cuenta necesidades y características del medio donde estará expuesto para prevenir su deterioro.

El concreto es también un medio altamente alcalino y envolvente que protege de agentes externos al acero, el cual si cumple con los parámetros de aceptación de las especificaciones de las normas ya mencionadas junto con la selección de un

concreto correctamente diseñado, el acero permanecerá protegido de la corrosión, logrando así una mejor inversión en la construcción con estructuras mantendrán una vida útil por mayor tiempo.

Es importante concientizar que las estructuras de concreto armado no son eternas y llegara un punto en el que necesitaran reparaciones para continuar con un funcionamiento seguro y durable, por lo que es importante considerar pruebas que evalúen el estado de la edificación para lograr tomar una decisión correcta respecto al futuro de la estructura.

## **BIBLIOGRAFIAS:**

- [1] 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.
- [2] ACI-Comite211. (1991). Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete. American Society Institute. EUA.
- [3] Neville A. (1988). "Tecnología del Concreto", tomo 1, Limusa, México.
- [4] Vazquez Delgado, R. (Octubre de 2008). 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.
- [5] Rojo Moya, Gustavo (2008) Evaluación de estructuras de concreto por corrosión, Vol. 21, N.º 4, Octubre - Diciembre 2008.
- [6] Raicho Raichev, Luicien Veleva, Benjamin Valdez, Corrosion de metales y degradación de materiales, Julio del 2009.
- [7] Francois , R., & Arliguie, G. (1994). Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment ACI SP-145. EUA: American Concrete Institute.
- [8] J. A. Gonzales Fernandez. Control del corrosión, estudio y medidas por técnicas electroquímicas C.S.I.C. , Madrid, España, (1989).
- [9] S. Feliu, C. Andrade. Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras C.N.I.M. , Madrid, España, (1989).

- [10] Avila, Javier. Causas de corrosión en tuberías enterradas. Estudio de la agresividad del suelo. Corrosión anaerobia.  
[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec\\_12.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_12.htm)
- [11] NMX-C-414. (2014). Industria de la construcción, cementantes hidráulicos, especificaciones y métodos de ensayo. ONNCCE. México.
- [12] NMX-C-111. (2014). Industria de la construcción, agregados para concreto hidráulico, especificaciones y métodos de ensayo. ONNCCE. México.
- [13] NMX-C-122. (2004). Industria de la construcción, agua para concreto especificaciones. ONNCCE. México.
- [14] Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto (Primera Edición ed.). EE.UU.: Portland Cement Association.
- [15] RILEM (1998) CTC-178 Analisis de contenido total de cloruros en el hormigon
- [16] Castellote, M. and Andrade (2001) Round-robin test on chloride analysis in concrete - Part I: Analysis of total chloride content.
- [17] ASTM-C1064/C1064M-08. (2011). Método de ensaye estándar para la medición de temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado. En Certificación del ACI-Grado 1
- [18] NMX-C-156. (2010). Industria de la construcción, concreto hidráulico, determinación del revenimiento en el concreto fresco. ONNCCE. México.

[19] ASTM-C143/C143M-08. (2011). Método de ensaye estándar para la determinación del revenimiento en el concreto a base de cemento hidráulico. En Certificación del ACI-Grado 1 (págs. 25-34).

[20] 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.

[21] 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

[22] 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.

[23] 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).

[24] NMX-C-160. (2004). Industria de la construcción, concreto, elaboración y curado en obra de especímenes de concreto. ONNCCE. México.

[25] NMX-C-159. (2004). Industria de la construcción, concreto hidráulico, elaboración y curado de especímenes den laboratorio. ONNCCE. México.

[26] 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).

[27] IMCYC. (Junio de 2006). El concreto en obra- problemas, causas y soluciones. Pruebas de resistencia a la compresión del concreto. México.

[28] ASTM-C-876. (1999). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. American Society for Testing and Materials. EUA.

[29] 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.

[30] RILEM. (1998). CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. Materials and Structures, Volumen 21 (Numero 126).

[31] NMX-C-155. (2014). Industria de la construcción, concreto hidráulico, dosificación de masa, especificaciones y métodos de ensayo. ONNCCE. México.

[32] NMX-C-414-ONNCCE (2017) Industria de la construcción, concreto hidráulico, dosificación de masa, especificaciones y métodos de ensayo. ONNCCE. México.

[33] NMX-C-185-NNCCE (2015) Industria de la construcción, concreto hidráulico, dosificación de masa, especificaciones y métodos de ensayo. ONNCCE. México.

[34]ASTM-C-33. (2002). Standard specification for concrete aggregates. American Society for Testing and Materials. EUA.

[35] Plastiment-915 (2015), Aditivo reductor de agua y retardante de fraguado. México.

[36] Sika ViscoFlow 8100 (2015), Aditivo súper-plastificante de alto desempeño y retenedor de trabajabilidad para concreto. México.

[37] ASTM-C172-08. (2011). Práctica Normalizada para Muestreo de Concreto Recién Mezclado. En Certificación del ACI-Grado 1 (págs. 17-24).

[38] NMX-C-161. (1997). Industria de la construcción, concreto fresco, muestreo. ONNCCE. México.

[39] NMX-C-435. (2010). Industria de la construcción, concreto hidráulico, determinación de la temperatura del concreto fresco. ONNCCE. México.

[40] NMX-C-083. (2014). Industria de la construcción, concreto, determinación de la resistencia a la compresión de especímenes, métodos de ensayo. En ONNCCE. México.

[41] ASTM-C-617. (2003). Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials. EUA.

[42] NMX-C-109. (2013). Industria de la construcción, concreto hidráulico, cabeceo de especímenes. En ONNCCE. México.

[43] AutoCAD 2017