



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PROFESIONAL**

“Determinación del estado de durabilidad del tanque elevado de concreto armado, localizado en el campus de Ciudad Universitaria de la UMSNH, en Morelia, Michoacán”

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**JOSE GERARDO ANDRADE TINAJERO**

**ASESOR:**

**M.A. Ing. WILFRIDO MARTINEZ MOLINA**

**COASESOR:**

**Dra. ANGÉLICA DE LOURDES DEL VALLE MORENO**

**MORELIA, MICHOCÁN. DICIEMBRE DE 2011.**



## RESUMEN

En el presente estudio se analiza, desde el punto de vista de durabilidad, un tanque elevado de concreto armado tipo Intze (contenedor de agua) construido en la década de los 70's del siglo pasado, el cual actualmente se encuentra fuera de servicio, localizado en el campus de Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Morelia, Michoacán, con la finalidad de determinar el estado seguridad y condiciones de servicio presentes en el mismo, dada la incertidumbre de peligrosidad que representa ante los transeúntes. En primer lugar se analizan los daños visibles, posteriormente se realizan pruebas del concreto tanto en el sitio como en el laboratorio a través de muestras representativas, con la finalidad de evaluar su calidad; y en el acero de la estructura se efectuaron pruebas enfocadas a la determinación de la corrosión y la velocidad de la misma. Para el diagnóstico de la durabilidad de los materiales se usaron los criterios de evaluación que establece el Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado DURAR. Una vez determinado el estado, que desde la perspectiva de durabilidad tienen los materiales, y auxiliándose también con el análisis de resultados consultados en un estudio realizado en el tanque, sobre su comportamiento sísmico; se realizan dos propuestas para el probable cambio de uso en el tanque.

**(Palabras clave:** durabilidad, concreto armado, calidad, corrosión)



## DEDICATORIAS

A mi mamá **Elia Tinajero Sánchez** para quien las palabras son pocas al expresarle mi admiración y cariño, quien a pesar de las dificultades ha sabido impulsarme a seguir hacia adelante, siempre con su entusiasmo que contagia, porque sin su ayuda nada de esto fuera una realidad, te quiero mucho mamá.

A mi papá **Santiago Andrade Ramos** gran hombre ejemplar, de trabajo duro y constante para sacar adelante a sus hijos, de quien siempre aprendo algo nuevo gracias a sus sabios consejos, quien me ha enseñado valores y porque ha sabido ganarse mi admiración y respeto, a quien debo todo lo que soy, gracias papá.

A mi gran amor **Catalina Rivera Ramos** que siempre has estado conmigo en las buenas y en las malas, por tenerme tanta paciencia, por ser mi apoyo incondicional en momentos difíciles, por compartir momentos de felicidad, porque contigo la vida tiene sentido y todo es más sencillo, porque me has demostrado ternura y cariño, te amo Caty.

A mi viejo **Jacob Nicolás** quien ha traído a mi vida la emoción de ser padre, y ser ese rayito de luz que día a día me motiva a superarme, quien a su pequeña edad tiene un gran corazoncito, porque con su mirada tan tierna y dulce puede cambiar el mundo.

A mis hermanos **Carlos y Marcial**, a mí cuñada **Ma. del Rosario** y mi sobrinita **Joselyn** porque siempre ven hacia el futuro, porque me han sabido expresar su apoyo en momentos difíciles, por su gran esfuerzo de superación y el de los suyos, personas que admiro y quiero.

A mis suegros **Rodrigo Rivera Díaz y Teófila Ramos Vázquez** de quien siempre he recibido apoyo y cariño, gracias por tener una hija tan adorable.

Gracias por formar parte de mi vida.



## AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por permitirme estar en este lugar y en este tiempo, por rodearme de gente tan buena y sencilla, por darme una familia, por tener salud y amor, por darme esa fe en mí mismo y en los demás.

A mi asesor el **M.A. Wilfrido Martínez Molina** una persona seria, pero de trato amable, quien a pesar de sus diversas actividades me regalo parte de su tiempo, con quien quedo eternamente agradecido por su confianza y apoyo recibido, quien con sus ideas y ejemplos me ayudó a simplificar este trabajo.

A la **Dra. Angélica de Lourdes Del Valle Moreno** mujer de trabajo, gran talento y sentido común, persona de gran sencillez, amabilidad, amistad; quien siempre estuvo al pendiente de este trabajo en cada revisión que se requería, aportándome siempre nuevas ideas, gracias por proporcionarme parte de sus conocimientos en esta área del conocimiento

A la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán** persona de magníficas ideas, honradez, sencillez, sentido del humor, y sobre todo calidez humana, quien confió en mí al permitirme formar parte de esta gran familia en el laboratorio de materiales.

A la **M.I. Cindy Lara Gómez** mujer joven y muy capaz, quien siempre me facilitó las herramientas y equipo necesario para la realización de este trabajo.

Al Dr. **Hugo Luis Chávez García** por proporcionarme gran parte de sus conocimientos en el manejo de los equipos empleados.

Al maestro **Jesús Zauno Zamudio** por el apoyo brindado y la motivación, quien aportó ideas para la realización de las pruebas.

A mis compañeros y amigos: **Ing. Noel Díaz, Ing. J. Alberto Guzmán, Ing. Marco A. Mondragón, Miguel Ángel Villicaña, José Luis Rodríguez, Cipriano Bernabe, Eliud Azuara, Félix Tobón**, y a todos aquellos de quien recibí apoyo total y su amistad sincera.

Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” y a todo su personal por brindarme un espacio y apoyo para realizar este trabajo.

A todos y cada uno de ellos muchas gracias.



## ÍNDICE

RESUMEN.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE.....	iv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN ESTUDIO: ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN.....	2
II.1 Antecedentes.....	2
II.2 Clasificación de tanques.....	3
II.3 Descripción del tanque en estudio.....	6
III. FUNDAMENTOS GENERALES DE CORROSIÓN.....	8
III.1 Generalidades.....	8
III.2 Concreto reforzado.....	9
III.3 Corrosión en concreto reforzado.....	9
III.4 Tipos de corrosión.....	11
III.4.1 Corrosión localizada.....	12
III.4.1.1 Corrosión por picaduras.....	12
III.4.1.2 Corrosión en espacios confinados.....	12
III.4.1.3 Corrosión bajo tensión.....	13
III.4.1.4 Corrosión por corrientes de interferencia.....	13
III.4.2 Corrosión generalizada.....	14
III.4.3 Corrosión galvánica.....	14
III.4.4 Corrosión atmosférica.....	15



IV. FACTORES QUE AFECTAN Y DESENCADENAN LA CORROSIÓN DEL ACERO EN EL CONCRETO.....	16
IV.1 Dosificación del concreto. ....	16
IV.2 Compacidad y Homogeneidad. ....	17
IV.3 Espesor de recubrimiento del concreto.....	17
IV.4 Humedad ambiental.....	18
IV.5 Efecto del oxígeno.....	18
IV.6 Efecto de la temperatura. ....	19
IV.7 Estado superficial del acero.....	19
IV.8 Corrientes erráticas o de interferencia.....	20
IV.9 Contacto galvánico entre dos metales. ....	20
IV.10 Iones despasivantes. ....	20
IV.11 Carbonatación.....	22
V. CONCEPTOS BÁSICOS DE DURABILIDAD.....	24
V.1 Funcionalidad y Durabilidad. ....	24
V.2 Degradación.....	24
V.3 Vida útil y Vida residual.....	24
V.4 El modelo de Tutti. ....	25
VI. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN. ....	27
VI.1 Inspección preliminar.....	28
VI.2 Inspección detallada. ....	29
VII. DESCRIPCION DE MÉTODOS DE ENSAYO.....	33
VII.1 Toma de testigos.....	33
VII.1.1 Extracción de núcleos.....	33
VII.2 Profundidad de carbonatación.....	35



VII.3 Resistividad eléctrica. ....	39
VII.4 Velocidad de pulso ultrasónico. ....	42
VII.5 Frecuencia de resonancia. ....	46
VII.6 Esclerometría.....	48
VII.7 Resistencia a la compresión. ....	52
VII.8 Módulo de elasticidad estático .....	55
VII.9 Porosidad.....	56
VII.9.1 Absorción capilar.....	57
VII.9.2 Porosidad total. ....	59
VII.10 Determinación de la profundidad y Localización de la armadura. ....	61
VII.11 Medición de potenciales.....	63
VII.12 Velocidad de corrosión. ....	66
VIII. RESULTADOS. ....	69
VIII.1 Inspección visual general del tanque elevado.....	71
VIII.2 Profundidad de carbonatación. ....	83
VIII.3 Resistividad eléctrica .....	84
VIII.4 Velocidad de pulso ultrasónico.....	86
VIII.5 Frecuencia de resonancia. ....	87
VIII.6 Esclerometría. ....	88
VIII.7 Resistencia a la compresión.....	91
VIII.8 Módulo de elasticidad estático.....	91
VIII.9 Porosidad. ....	92
VIII.9.1 Absorción capilar. ....	92
VIII.9.2 Porosidad total.....	97
VIII.10 Profundidad de la armadura. ....	98



VIII.11	Medición de Potenciales.....	100
VIII.12	Velocidad de corrosión.....	105
IX.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	106
X.	PROPUESTAS DE USO.....	121
XI.	CONCLUSIONES.....	125
XII.	BIBLIOGRAFÍA.....	126



## I. INTRODUCCIÓN.

Durante mucho tiempo se pensó que el concreto armado como material de construcción, podría tener una duración casi ilimitada. Sin embargo, actualmente se reporta un número cada día mayor de estructuras prematuramente deterioradas debido a la corrosión del acero de refuerzo.

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, debido a la gran cantidad de estructuras que no alcanzan a prestar su servicio durante el periodo de tiempo para el que fueron diseñadas en su concepción, esto debido principalmente a problemas de corrosión en el acero de refuerzo.

Para varios de los países de que se dispone de datos, el costo de la corrosión representa aproximadamente entre un 2 y un 4% del Producto Nacional Bruto (PNB). Se sabe que entre un 20% y un 25% del costo total de la corrosión pudiera haberse evitado, mediante una mejor aplicación de las diferentes técnicas anti-corrosión existentes y con una mayor toma de conciencia de los riesgos que conlleva la corrosión.

Más allá de lo que representan los números, los problemas derivados de la corrosión se pueden expresar en tres vertientes:

- 1) Económica (pérdidas directas e indirectas)
- 2) Recursos (agotamiento de las reservas naturales)
- 3) Seguridad humana (fallos fatales en medios de transporte, estructuras, corrosión de bidones que contienen residuos radioactivos, escapes en tuberías de refrigeración de plantas nucleares, etc.) [1].

El presente estudio a realizar en el tanque elevado de concreto reforzado ubicado en Ciudad Universitaria, en Morelia, Michoacán; tiene como finalidad determinar el estado en que se encuentran los materiales componentes del mismo, por lo que en este trabajo de Tesis se realizará una investigación desde el punto de vista de durabilidad, para conocer las condiciones reales de la estructura, así mismo determinar con el apoyo de un análisis de comportamiento sísmico previamente realizado, una propuesta sobre el probable uso que se le pudiera dar a dicha estructura, en el caso de que los análisis resulten favorables; o en su defecto la justificación para que la estructura sea demolida.



## II. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN ESTUDIO: ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN.

### II.1 Antecedentes.

Todas las sociedades han necesitado situarse en lugares cercanos a cuerpos de agua, es así que en la antigüedad el factor determinante para un asentamiento humano era la existencia de una fuente de agua suficiente que permitiera el abastecimiento humano y otras actividades que requieren el valioso líquido.

Dado las necesidades que se tenían del agua en tiempos de sequía y los continuos sabotajes del enemigo, debían existir obras que almacenaran volúmenes de agua suficiente para abastecer la población, tal como lo hizo faraón Amenemhat III (1800 a.C.) en el Antiguo Egipto quien utilizó el lago natural de *El Fayum* como depósito para almacenar excedentes de agua para su uso durante las estaciones secas [2].

Otras civilizaciones tuvieron que construir obras de ingeniería para el almacenamiento del líquido vital, como es el caso de los Romanos quienes al final de cada acueducto construían una gran cisterna llamada *Piscina Limaria* donde el agua se decantaba, y posteriormente iba al *Castellum Aquae* que era una especie de distribuidor [3].

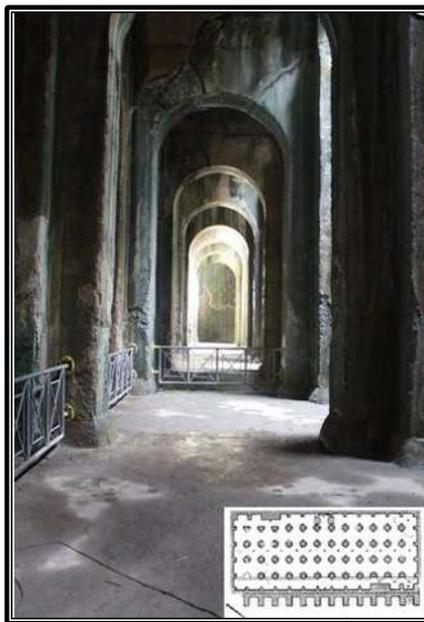


Figura II.1 Piscina de Mirabile [3].

En el México Antiguo también se construyeron obras para la captación del agua por ejemplo los mayas en la península de Yucatán, además del agua obtenida de los cenotes, tenían depósitos subterráneos llamados *Chultunes*, los cuales eran un sistema de captación y almacenamiento pluvial compuesto de una cámara subterránea en forma de botella con sus entradas rodeadas por canalizaciones que dirigían el agua de lluvia hacia el interior de ellos durante las estaciones lluviosas.

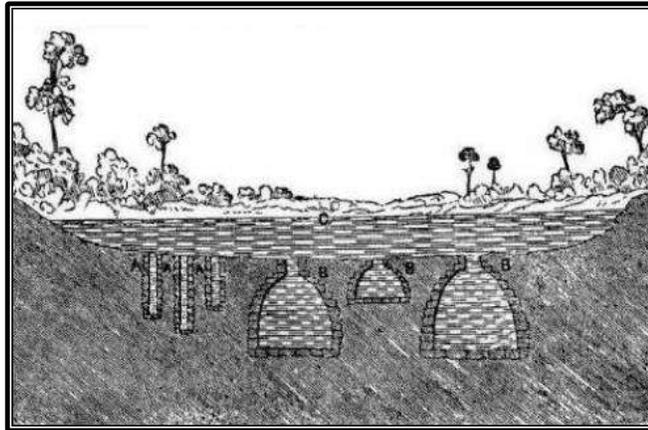


Figura II.2 Vestigios de tres antiguos chultunes y tres pozos ocultos en una aguada, Yucatán [4].

En lo que respecta a los depósitos pluviales a cielo abierto, destacan los jagüeyes, que fueron muy comunes en el centro y el sur de México, en especial en las zonas áridas y semiáridas donde el nivel freático estaba muy bajo o el suelo era rocoso y resultaba muy difícil alcanzarlo mediante la excavación de pozos [4].

En la actualidad el tanque de regulación es la parte del sistema de abastecimiento de agua potable que recibe un gasto desde la fuente de abastecimiento para satisfacer las demandas variables de la población a lo largo del día. Así se dispone de una cantidad como reserva con el objetivo de no suspender el servicio en caso de desperfectos en la captación o en la conducción.

## II.2 Clasificación de tanques.

- Tanques enterrados: Se construyen bajo el nivel del suelo. Se emplean preferentemente cuando existe terreno con un nivel adecuado para el funcionamiento de la red de distribución y de fácil excavación. Proteger el agua de las variaciones de temperatura y una perfecta adaptación al entorno.



- Tanques semienterrados: Se emplean generalmente cuando la altura topográfica respecto al punto de alimentación es suficiente y el terreno presenta dificultad de excavación.

- Tanques superficiales: La construcción de este tipo de tanques es común cuando el terreno es duro o conviene no perder altura y se tiene la topografía adecuada.

- Tanques elevados: Los tanques elevados son aquellos cuya base está por encima del nivel del suelo, y se sustenta a partir de una estructura. Generalmente son construidos en localidades con topografía plana donde no se dispone en su proximidad de elevaciones naturales con altimetría apropiada. Para tener un máximo beneficio, los tanques elevados, generalmente con torres de 10, 15 y 20 m de altura, se localizan cerca del centro de uso [5].

De acuerdo a los materiales de construcción los tanques se pueden dividir en:

- Mampostería
- Concreto armado
- Acero

El tanque motivo de esta Tesis se encuentra dentro de la clasificación de tanque elevado de concreto armado, y por sus características físicas es denominado “Tanque Intze”. Este tipo de tanque elevado se le adjudica a Otto Ludwing Adolf Intze (1843-1904) Ingeniero Civil Alemán. El modelo fue ideado debido a la necesidad de abastecer poblaciones localizadas en planicies, el diseño original consistía en dar cierta inclinación al fondo del contenedor con el objetivo de disminuir las fuerzas horizontales, además el tanque era almacenado en un anillo más estrecho, que a su vez hace que la torre de apoyo sea más delgada y por lo tanto más barata (figura II.3) [6].





Figura II.3 Torres de agua utilizando el principio de Intze  
[Izquierda] Salbke, Magdeburgo, Alemania (1985). [Derecha] Schweckhausen, Alemania (1904) [6].

En la actualidad se ha modificado el diseño original de Adolf Intze con el objetivo de hacer más eficiente la estructura tanto económica como estructuralmente.

Los tanques elevados de gran capacidad generalmente son de planta circular. Este tipo de estructuras tienen la ventaja que pueden ser provistas de un fondo abovedado que trabaje íntegramente a compresión, evitando el uso de losas planas para las cuales es indispensable colocar vigas de apoyo. En el fondo del tanque se coloca un cinturón armado, que absorbe el empuje lateral generado por la bóveda. Este tipo de tanques tienen diámetros de 12 a 14 m. con espesores de losa de hasta 15 cm. Si el tanque tiene diámetros mayores, se puede utilizar secciones como la mostrada en la figura II.4, de este modo el empuje generado por la bóveda interior es compensado por el empuje generado por el fondo exterior. La carga sobre el cinturón y el espesor del fuste son disminuidos con el consecuente ahorro en la cantidad de concreto [7].

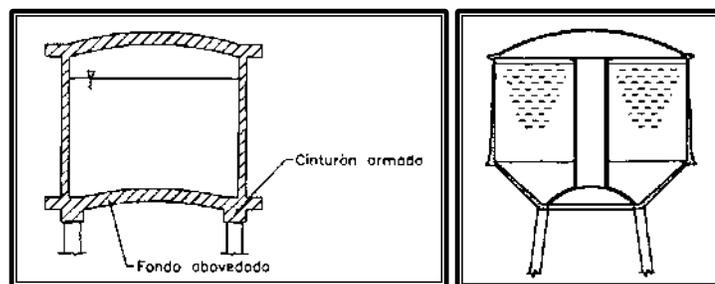


Figura II.4 Esquema de Tanque elevado tipo Intze [7].

En Yucatán, México, a mediados de la década de los 60's y 70's se construyeron algunos tanques elevados de este tipo, debido a los procedimientos constructivos de esa época y lo complicado de estas estructuras, no se podían controlar todos los parámetros para obtener un concreto de buena calidad; como lo es el vibrado, una cimbra adecuada, etc. (figura II.5).

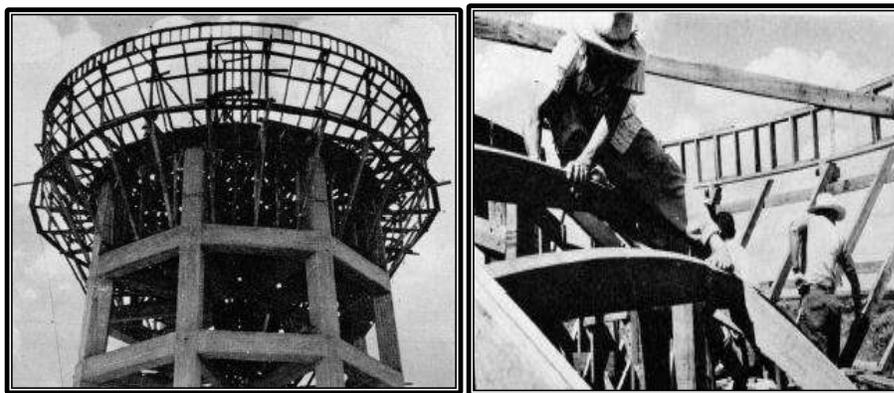


Figura II.5 Encofrado de tanques tipo Intze en la década de los 60's en Yucatán, México [8].

### II.3 Descripción del tanque en estudio.

El tanque elevado se encuentra ubicado en el Campus de Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán. Tiene las coordenadas 19° 41' 24.3" N, 101° 12' 15.8" W.

Se trata de un tanque con fondo troncocónico, el cual consta de dos partes principales: el tanque de almacenamiento o contenedor y la estructura de soporte.

El contenedor está formado por un cascarón esférico como domo, un cuerpo cilíndrico, una parte cónica como transición y un fondo esférico. La tapa de fondo del contenedor es de 10 cm de espesor, y todas las demás partes del cascarón que forman el contenedor son de 15 cm de espesor. El diámetro interno es de 12.9 m y su altura interna es de 7.25 m.

La altura total de la estructura de soporte es de 14.8 m y está formada por una serie de vigas y columnas que forman un anillo. Tiene ocho columnas cuadradas con sección transversal de 60x60 cm, cada una ubicada en la esquina que forma un octágono. Las columnas están unidas con travesaños con sección transversal rectangular de 56 x 60 cm, formando el anillo del octágono y distribuidas en cuatro niveles con altura de 3.75 m,



excepto el primer nivel que tiene una altura de 2.95 m a partir del piso. Además, en cada nivel de trabes, a partir de cada columna y hacia el centro del círculo que da origen al octágono, se extienden de forma radial trabes rectangulares que llegan a un anillo central, a través del cual pasa una escalera marinera para dar mantenimiento al contenedor (figura II.6).

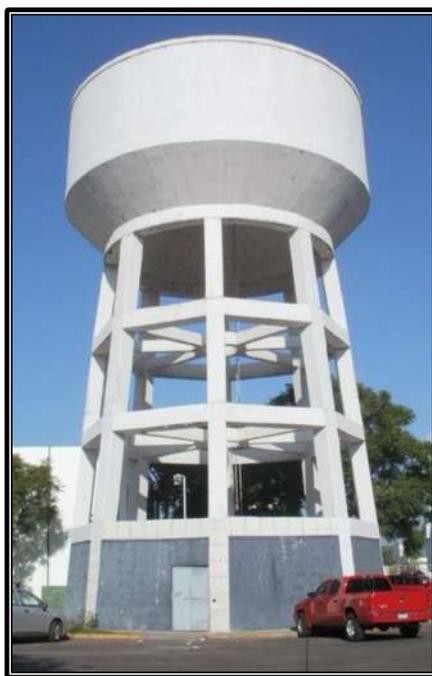


Figura II.6 Tanque elevado Tipo Intze localizado en C.U. Morelia, Michoacán.

Se recomienda que la resistencia del concreto en el contenedor este comprendida entre 25 y 30 MPa y de 30 a 35 MPa en la estructura de soporte y la fluidez debe ser seco-plástica, así también un diámetro máximo del agregado grueso de 20 mm [9].

Existe escasa información documentada respecto a este tanque, solo se sabe por algunas personas que fue construido hace 36 años con recursos de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos.

### III. FUNDAMENTOS GENERALES DE CORROSIÓN.

#### III.1 Generalidades.

La corrosión puede definirse como la reacción de un metal o una aleación con el medio o ambientes reactivos teniendo como consecuencia su deterioro o destrucción. Como consecuencia de este fenómeno los metales pierden su estado elemental y retornan a su estado combinado de origen, no obstante que otros materiales, además de los metales (madera, plásticos, etc.) pueden corroerse, el término se emplea especialmente al deterioro de metales [10].

Los metales, en su mayoría, no existen como tales en naturaleza, sino combinados con otros elementos químicos formando los minerales, como los óxidos, sulfuros, carbonatos, etc.

La energía en forma de calor que se requiere para extraer los metales de sus compuestos químicos naturales se almacena en el propio metal; por lo que el proceso de corrosión se da cuando se inicia el periodo de retorno a su estado natural. La velocidad de regreso de metal a su estado natural como mineral, es directamente proporcional a la cantidad de energía almacenada por él mismo. La cantidad de energía requerida y almacenada varía de un metal a otro, es relativamente alta para metales como el magnesio, el aluminio y el hierro y relativamente baja para el cobre, oro y la plata [1].

El concreto concede al acero una protección doble: por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del concreto es un electrolito que puede formar un óxido protector (pasivación) de forma duradera. Esta solución acuosa está constituida principalmente por iones  $\text{OH}^-$ , a los que se debe la alta alcalinidad. La cantidad relativa de cada uno de esos iones depende fundamentalmente de la composición y características del cemento, del grado de hidratación y de la relación agua/cemento [11].

Con esta elevada alcalinidad y con el contenido de  $\text{O}_2$  normal del ambiente en las estructuras aéreas, el acero se recubre de una capa pasiva (de óxidos muy adherentes) compacta e invisible, que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión, mientras el concreto sea de buena calidad y no cambie sus características físico-químicas por acción del medio exterior. Por otra parte, en ausencia de oxígeno, el acero de refuerzo



se oxidaría muy lentamente sin causar problemas de corrosión, como es el caso de las estructuras sumergidas, donde el hormigón no se encuentra agrietado [11].

### **III.2 Concreto reforzado**

Se define como concreto reforzado la unión entre concreto y acero; el concreto está compuesto básicamente por el agregado (arena y grava), cemento, agua y en algunos casos, aditivos; 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: acero al carbón o de refuerzo [12].

### **III.3 Corrosión en concreto reforzado.**

Este fenómeno se observa frecuentemente en concretos reforzados de baja calidad elaborados con altas relaciones agua/cemento y por consiguiente presentan elevada porosidad, también se presenta en componentes estructurales afectados por humedad o ciclos de mojado, así como por atmósferas altamente corrosivas [13].

La corrosión de la armadura del concreto reforzado consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que lo rodea. De esta manera, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste de cuatro elementos principales:

- Un ánodo, donde ocurre la oxidación.
- Un cátodo, donde ocurre la reducción.
- Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- Un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso (figura III.1).



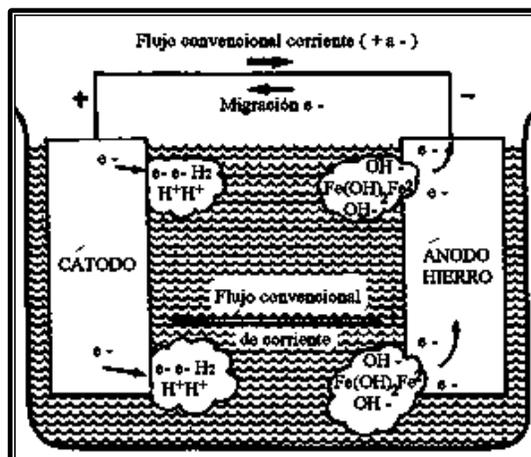


Figura III.1 Celda de corrosión.

En el ánodo al perder electrones, quedan iones hierro cargados positivamente,  $Fe^{2+}$ , los cuales pueden combinarse con iones cargados negativamente,  $OH^-$ , que se encuentran en las inmediaciones del ánodo, pudiéndose formar por ejemplo: hidróxido ferroso,  $Fe(OH)_2$ , el cual puede reaccionar con posterioridad para formar hidróxido férrico,  $Fe(OH)_3$ , la conocida herrumbre [1].

Para iniciar el proceso de corrosión, son necesarias reacciones capaces de modificar el medio que rodea al acero de refuerzo y romper la capa superficial de protección (pasivación). Los dos procesos más comunes encontrados antes de que se origine la corrosión del acero de refuerzo, son la carbonatación del concreto y la penetración de iones cloruro.

La elevada alcalinidad del concreto (pH entre 12.5 y 13.5) y alta resistividad eléctrica (en concreto sano de 100  $k\Omega \cdot cm$  o mayor) proporcionan condiciones ideales para la pasivación (protección) del acero. Así la corrosión del acero de refuerzo no se presenta, a menos que un agente externo al medio ( $Cl^-$ ,  $SO_4$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ) modifique el estado pasivo normal del medio alcalino [14].

Es así como la corrosión del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad del acero, contacto entre metales menos activos, así como de las heterogeneidades del concreto que rodea al acero.

Es importante mencionar que sin la presencia simultánea en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión. Ambos factores tienen un



carácter ambivalente, pues cuando el acero esta pasivado, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante, pero cuando las armaduras se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. En su ausencia, lo detienen completamente [11].

A continuación se muestran dos cuadros con algunas condiciones para que exista o no corrosión del acero en el concreto [11].

<b>PARA QUE HAYA CORROSIÓN</b>	
pH < 8	pH > 8
Oxígeno	Oxígeno
Agua	Agua
	Cloruros

Tabla III.1 Condiciones para que exista corrosión del acero en el concreto.

<b>PARA QUE NO HAYA CORROSIÓN</b>	
Mantenga fuera del concreto alguno de los siguientes:	Coloque en el concreto alguna de las siguientes opciones:
	Iones hidroxilos
Oxígeno	Potenciales negativos sobre el acero
Agua	Iones ferrosos
Cloruros	Inhibidor

Tabla III.2 Condiciones para que no exista corrosión del acero en el concreto.

#### **III.4 Tipos de corrosión.**

La corrosión puede clasificarse de acuerdo a gran variedad de criterios. Por la morfología de ataque: corrosión uniforme, corrosión localizada, etc. Por el medio atacante: corrosión por ácidos, corrosión aerobia, corrosión atmosférica, corrosión de estructuras enterradas, etc. Por las acciones físicas que junto con las químicas desarrollan la corrosión del metal: corrosión bajo tensión, corrosión por fatiga, corrosión por cavitación, corrosión por corrientes vagabundas [10].

Debido a lo extenso que sería describir cada una de las anteriores, solamente se explicaran los tipos de corrosión más importantes que se presentan en las armaduras de concreto armado.



De acuerdo a su forma física se dividen en dos, lo que las separa en corrosión generalizada cuando ocurre en la mayor parte del acero de refuerzo y corrosión localizada cuando ocurre sólo en ciertos puntos del mismo (figura III.2).

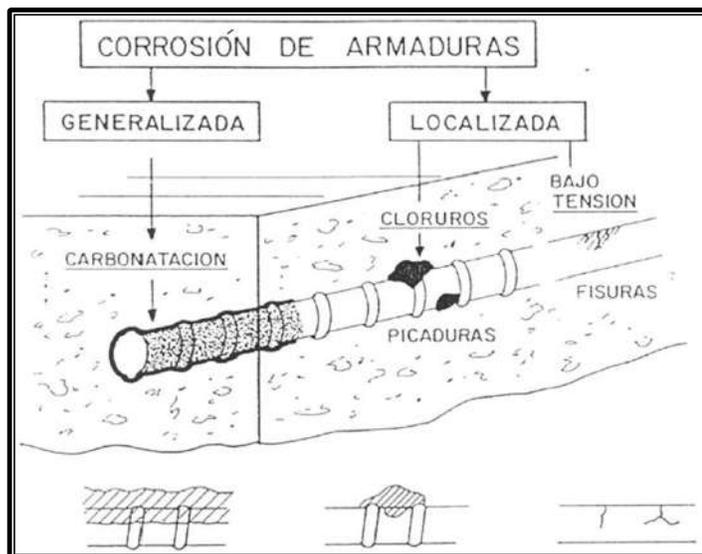


Figura III.2 Tipos de corrosión en acero de refuerzo [11].

### III.4.1 Corrosión localizada.

#### III.4.1.1 Corrosión por picaduras.

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva esto como resultado del ingreso de iones de cloruro al medio, bien sea por que provienen del medio exterior o por que fueron incorporados en la mezcla de concreto.

Esto ayuda a que se forme una celda de corrosión en la cual se encuentra una zona pasiva intacta, que actúa como cátodo, en ésta área se reduce el oxígeno y otra zona en la que se ha perdido la película, que actúa como ánodo [11].

#### III.4.1.2 Corrosión en espacios confinados.

Este tipo de corrosión ocurre cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo de oxígeno a esa zona, creándose celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión del acero.

Puede darse también, en el acero de refuerzo con revestimientos, como por ejemplo en el caso de uso de epóxicos, cuando la adhesión entre éste y el acero se ha disminuido. Aunado a esto, si hay iones cloruro en el concreto, estos se pueden acumular en

el espacio que se forma entre el recubrimiento y el acero. Esto provoca que el pH que se encuentra en esta zona disminuya y contribuya a la aceleración de la corrosión del acero por un proceso autocatalítico, similar al de la corrosión por picadura, todo esto ayuda a perder la adherencia [15].

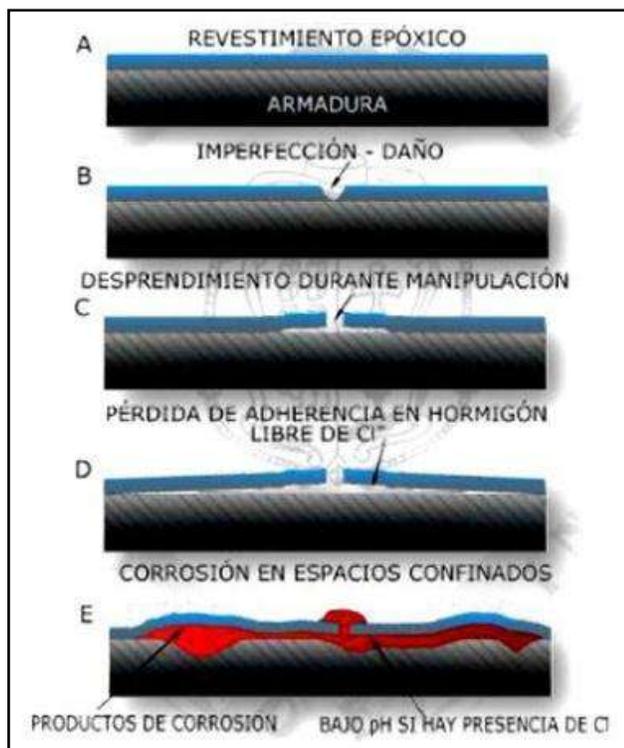


Figura III.3 Representación esquemática de la corrosión por espacios confinados [16].

#### III.4.1.3 Corrosión bajo tensión.

Ocurre cuando se presentan de manera simultánea dos fenómenos: Los esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo. Esto ocurre generalmente en acero pre o postensado, en donde se utiliza acero de alta resistencia. Este tipo de corrosión se debe a la difusión de hidrógeno atómico a través del metal [16].

#### III.4.1.4 Corrosión por corrientes de interferencia.

Las corrientes de interferencia, llamadas también vagabundas, erráticas o de fuga, pueden ser definidas como las corrientes que fluyen por una estructura y que no forman parte del circuito o celda electroquímica específica. Para que ocurra esta corrosión debe existir un intercambio de corrientes entre una estructura metálica y un medio electrolítico. La corriente continua es la que tiene el efecto más pronunciado sobre la corrosión, ya que

esta fluye continuamente en un solo sentido. Por el contrario la corriente alterna, que invierte su dirección alrededor de una centena de veces por segundo, puede causar un efecto mucho menos pronunciado.

Es importante mencionar que si el acero se encuentra pasivado en un concreto no contaminado por cloruros, esta corriente de interferencia no producirá la corrosión del refuerzo, ya que lo podría mantener pasivo o llevar a la zona de inmunidad; por el contrario si el concreto contiene cloruros, la corrosión del refuerzo se vería acelerada drásticamente por el efecto de estas corrientes [11].

### III.4.2 Corrosión generalizada.

Este tipo de corrosión es resultado de la pérdida generalizada de la película pasiva resultante de la carbonatación del concreto y/o a la presencia excesiva de iones cloruro. También se puede dar debido a la lixiviación del concreto, que a su vez, es producto de la percolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas [11]. La figura III.4 muestra un ejemplo específico de corrosión generalizada: Carbonatación.

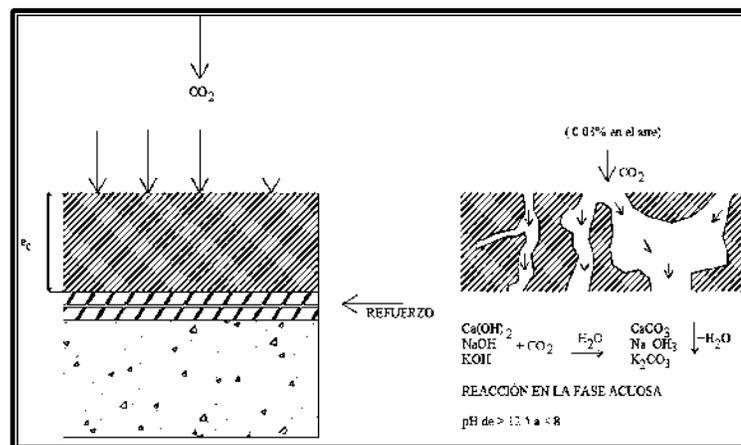


Figura III.4 Mecanismo de corrosión uniforme (Carbonatación de la Armadura en Concreto) [11].

### III.4.3 Corrosión galvánica.

Se da cuando existen dos tipos de metales en el medio electrolítico. En lo que respecta al acero embebido en el concreto, este proceso se da cuando en alguna zona se daña o no se forme la capa pasiva que rodea al acero. Esta zona actuará como un ánodo frente al resto del material, donde permanece la pasivación, el cual actuará como cátodo.

Otra forma en la que se puede presentar este proceso es cuando el refuerzo se encuentra en contacto con otros conductores más nobles. En general, esto se asocia al funcionamiento de una macrocelda. Como ejemplo se puede decir que un caso típico es cuando las armaduras exteriores se corroen cuando los cloruros ingresan en ellas, mientras que las armaduras interiores permanecen pasivas [11].

#### III.4.4 Corrosión atmosférica.

Este tipo de corrosión resulta de la interacción entre una atmósfera natural y un material metálico expuesta a la misma. Los factores que afectan a los materiales desde el punto de vista de su exposición a la atmósfera son los climáticos y químicos. Dentro de los factores climáticos intervienen precipitación pluvial, viento, humedad relativa, etc. Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>. Los agentes inorgánicos son generados por vehículos y las industrias; los orgánicos por los basureros.

Para efectos prácticos, la agresividad de la atmósfera se divide en cinco categorías de acuerdo al nivel de corrosividad, tal como se presenta en la tabla III.3 [10].

CATEGORIA	Pérdida de masa del ACERO	CORROSIVIDAD
	µm/año	
C1	≤ 1.3	MUY BAJA
C2	> 1.3 - ≤ 25	BAJA
C3	> 25 - ≤ 50	MEDIA
C4	> 50 - ≤ 80	ALTA
C5	> 80 - ≤ 200	MUY ALTA

Tabla III.3 Categorías de la agresividad de la atmósfera [10].



#### **IV. FACTORES QUE AFECTAN Y DESENCADENAN LA CORROSIÓN DEL ACERO EN EL CONCRETO.**

Se denomina así al conjunto de agentes o circunstancias que provocan la despasivación del acero en el concreto. Es decir son factores todos aquellos que den lugar a la neutralización del medio alcalino propio del concreto, o bien, que intervengan en la ausencia de contacto entre el acero y el concreto.

Existen diversos factores que afectan, desencadenan o producen ambos efectos, se puede destacar: la dosificación, la compacidad y la homogeneidad del concreto, así como el espesor de recubrimiento del concreto, el estado superficial de la armadura y la humedad ambiental son los factores que afectan este proceso. Por otro lado los factores desencadenantes que con más frecuencia dan lugar a la corrosión de la armadura son: presencia de cangrejeras en contacto con la armadura, altas tensiones mecánicas en el acero, corrientes erráticas o de interferencia, contacto galvánico entre dos metales, iones despasivantes (Cl; SO<sub>4</sub>, etc.), CO<sub>2</sub> atmosférico o cualquier líquido que neutralice la alcalinidad, lixiviación por aguas blandas y las fisuras [17].

##### **IV.1 Dosificación del concreto.**

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y con poca porosidad, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura a las acciones agresivas de los agentes externos.

El concreto que rodea las barras de acero de una armadura debe cumplir una doble función protectora: primero, como barrera física que se opone a la penetración de los agentes agresivos externos, y segundo, creando una capa que mantiene pasiva la corrosión sobre el acero (en virtud de su alcalinidad) que lo protege durante un tiempo indefinido. Considerando estas dos funciones del concreto como recubrimiento del acero, es determinante dosificarlo por métodos que proporcionen su máxima compacidad, lo que significa garantizar su mínima porosidad [11].

La porosidad de la masa del concreto la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de transferencia de los elementos agresivos externos, razón por la cual la relación agua-cemento, el grado de



hidratación y la cantidad de pasta son factores determinantes en la cantidad y tipos de poros en el hormigón [11].

#### **IV.2 Compacidad y Homogeneidad.**

La compacidad del concreto es la propiedad más importante para los efectos de la resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Es inversamente proporcional a la porosidad y mientras más alta sea la primera, es mayor el grado de protección del acero contra los ataques de los agentes agresivos. Se mide como la relación entre la suma de los volúmenes absolutos de materias sólidas (grava, arena y pasta de cemento endurecida) contenidas en un metro cúbico de concreto, referido al volumen aparente del mismo. La compacidad puede afectarse por un mezclado insuficiente y un mal transporte que influyen sobre la homogeneidad del concreto y propician la segregación de los materiales, la cual se produce por un procedimiento deficiente en la colocación del concreto y/o inadecuado proceso de compactación.

Por otra parte, la homogeneidad del concreto es la cualidad por la cual los distintos componentes del mismo aparecen igualmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la estructura fabricada con el mismo concreto, resulten prácticamente iguales. El concreto, por su origen, es un material heterogéneo y se puede lograr su homogeneidad mediante un adecuado proceso de producción, transporte, colocación, compactación y curado; de tal forma que un concreto que tenga una adecuada compactación y homogeneidad garantizaría la protección de la armadura en el ambiente específico para el cual fue diseñado. En la práctica, para obtener ésto se debe cumplir con una serie de actividades secuenciales, las cuales se encuentran íntimamente ligadas entre sí. Estas actividades son: buena selección y manejo de los materiales, buena operación de mezclado y buena calidad en la ejecución de los procedimientos de transporte, colocación, compactación y curado [11].

#### **IV.3 Espesor de recubrimiento del concreto.**

El grado de protección que el concreto puede impartir a las barras de acero de la estructura de concreto armado, no está necesariamente en función del espesor de la capa de concreto, sino de su impermeabilidad.



El espesor de recubrimiento dependerá del ambiente al cual va estar expuesta la estructura. Sin embargo, estructuralmente se recomienda que este sea el mínimo indispensable, ya que por ser una zona desprovista de armadura, pudiera verse afectada por fisuración, particularmente si el elemento está sometido a esfuerzos de tracción. Por tal motivo, las normas recomiendan que en ambientes agresivos debe utilizarse una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación de a/c, garantizando de esta forma que espesores de 2 a 3” (5.0 -7.5cm) permitan alta durabilidad de la estructura [11].

#### IV.4 Humedad ambiental.

La presencia del agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos pues interviene en el proceso catódico de reducción de oxígeno. Además el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrólito. En el concreto seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en la ausencia de la capa pasivante sobre el acero; solo la existencia de una cantidad mínima de humedad en los poros del concreto permitirá el desarrollo del proceso de corrosión.

El contenido del agua de los poros es función, en situaciones de no inmersión o no saturación, de la humedad relativa (HR) del ambiente (figura IV.1) [11].

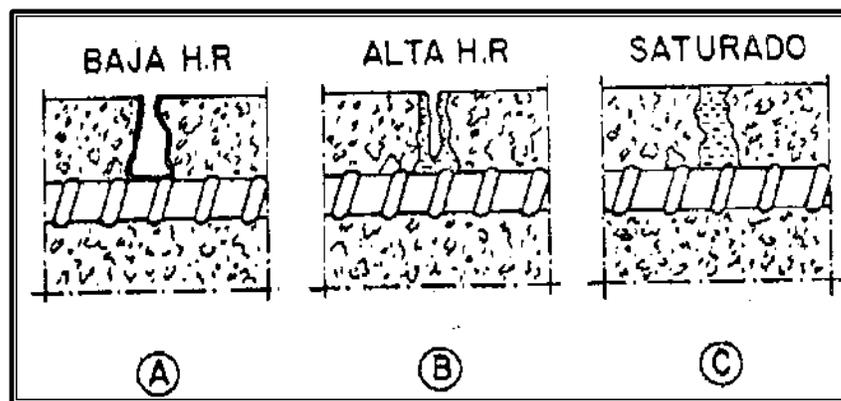


Figura IV.1 Efecto del contenido de humedad en los poros del concreto, en la corrosión de la armadura.

#### IV.5 Efecto del oxígeno.

No es posible que el proceso de corrosión se desarrolle sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta la armadura, es decir, es necesaria una cierta “aireación” de las mismas.

Durante muchos años se consideró que el acceso de flujo de oxígeno era el factor determinante de la velocidad de corrosión. Debido esto se pensaba a menudo que el espesor del recubrimiento influía mucho en el acceso de oxígeno y se realizaron múltiples trabajos para medir la permeabilidad del concreto al oxígeno, al aire o a los gases. Pero en la actualidad se descartó esta hipótesis.

Si el flujo de oxígeno fuera el factor determinante de la velocidad de corrosión, sin duda esta debería ser mayor en un concreto seco (figura IV.1 caso A), conservando por ejemplo en una atmósfera de 50% de H.R. que en un concreto húmedo donde el flujo de oxígeno es menor, ya que este tiene que disolverse previamente en el agua contenida en los mismos. Sin embargo, la evidencia experimental muestra claramente que la velocidad de corrosión es máxima cuando los poros tienen suficiente agua, sin llegar a saturarse (figura IV.1 caso B), como para facilitar los procesos de corrosión [11].

En la práctica, una aproximación amplia, pero suficiente y no sofisticada para conocer la mayor o menor bondad de un concreto en relación a su permeabilidad al oxígeno es medir su porosidad o índice de huecos accesibles.

#### **IV.6 Efecto de la temperatura.**

La temperatura juega un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura. Existe un efecto opuesto entre humedad y temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora la humedad y cuando desciende, condensa el agua líquida en los capilares [11].

#### **IV.7 Estado superficial del acero.**

Siendo la superficie del acero la primera interface con el medio, es lógico pensar que su estado superficial afectarán las reacciones que tendrán lugar en contacto con él. El acero en cuya superficie posee la cubierta de óxidos provenientes del proceso conformado (“mil scale”) se presenta menos reactivo que aquel cuya superficie está libre de dicha capa. No obstante, la presencia de productos, de oxidación producidos por la corrosión atmosférica no necesariamente muestran igual comportamiento, siendo incluso altamente



probable que de estar contaminados con agentes agresivos como el ion cloruro, se propicie la corrosión.

Adicionalmente, los productos de corrosión presentes en forma masiva, no adherentes deben ser eliminados, ya que ocasionan problemas de adherencia o condiciones propicias para la corrosión del acero de refuerzo [11].

#### **IV.8 Corrientes erráticas o de interferencia.**

En el caso de estructuras de concreto armado se ha demostrado que el efecto de las corrientes erráticas es importante para acelerar un proceso de corrosión ya iniciado por otros factores. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta este efecto en estructuras enterradas o sumergidas que son lugares potencialmente factibles para que existan corrientes capaces de acelerar la corrosión de las armaduras.

#### **IV.9 Contacto galvánico entre dos metales.**

El contacto del acero de refuerzo con otros metales no suele ocasionar corrosión en ausencia de agentes desencadenantes. Sin embargo, deberá evitarse este contacto, pues podrían existir determinadas circunstancias que sitúen el acero en condiciones más favorables para la despasivación, si otros metales lo polarizan hacia potenciales más anódicos.

#### **IV.10 Iones despasivantes.**

Los iones despasivantes provocan una corrosión localizada (generalmente la corrosión por picaduras), mientras que la reducción de alcalinidad del concreto permite una corrosión generalizada [16].

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio produciéndose así su corrosión.

##### **a. Cloruros.**

La corrosión inducida por cloruros se presenta en nuestro país en estructuras expuestas al medio marino. Los iones de 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 del mar.



Los iones de cloruro pueden estar presentes en tres formas: enlazados, absorbidos y disueltos en el agua que se conserva dentro de los poros, lo que constituye la disolución poro. La figura IV.2 ilustra los tres casos, e indica los equilibrios que se establecen para los cloruros en el concreto [18].

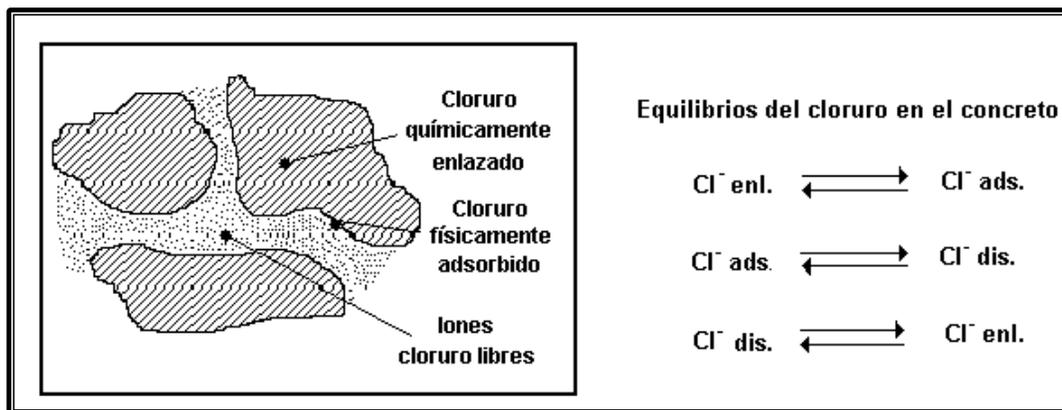


Figura IV.2 Equilibrios del ion cloruro en el concreto.

Los iones cloruro que son dañinos para el acero de refuerzo son los que se encuentran 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 [18].

#### b. Sulfatos.

El ion sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) puede estar presente en las aguas residuales industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico; en las aguas del subsuelo, pocas veces aparece el sulfato en forma iónica, siendo mucho más frecuentes sus sales, es decir, los sulfatos.

El ion sulfato forma sales. Los sulfatos perjudiciales para el concreto se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Portland

son los amónicos, cálcicos, magnésicos y sódicos; los sulfatos potásico, cúprico y alumínico son menos peligrosos, mientras que los sulfatos báricos y el de plomo son insolubles y, por lo tanto, inofensivos para el concreto.

La presencia de sulfatos en un agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte el desarrollo de la degradación del concreto por lixiviación, por otro lado, la degradación del concreto por reacción de cambio iónico. En ciertas circunstancias puede ocurrir, que la presencia de los sulfatos dé lugar a una degradación por expansión debido a la formación de otros componentes estables en la masa endurecida del cemento [11].

#### IV.11 Carbonatación.

Se le denomina así al proceso en el que el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera y el  $\text{SO}_2$  que se produce de la ignición de combustibles fósiles reaccionan con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y da lugar a una neutralización de todo el material. De estos, el  $\text{CO}_2$  en el aire es de mayor importancia, de ahí el nombre de carbonatación.

La figura IV.3 muestra el cambio abrupto de pH que se produce en el interior del concreto y que es el que da lugar a la aparición de un “frente carbonatado”, que se revela muy bien con el indicador de fenolftaleína.

Cuando este frente llega hasta el acero de refuerzo, este se despasiva de forma generalizada como consecuencia de la disminución del pH [11].

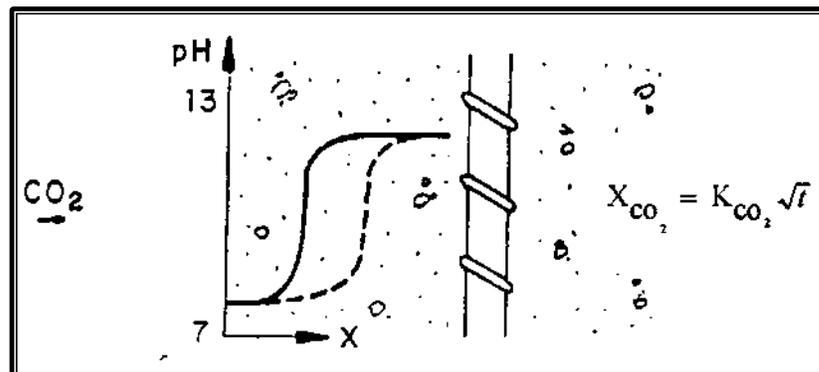


Figura IV.3 Variación del pH en el concreto debido a la carbonatación.

La velocidad con que avanza este frente carbonatado es también de vital importancia para calcular el tiempo que tardará este en llegar hasta la armadura. Esta velocidad está en función principalmente de: el contenido de humedad en el concreto, su porosidad (relación agua/cemento) y su contenido en materia alcalina carbonatable.

Los factores que afectan durante la carbonatación son: el contenido de humedad; el contenido de  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$  en el ambiente atmosférico; y la permeabilidad del concreto. El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, se da con mayor rapidez en el intervalo de 50-70% aproximadamente; a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono (tabla IV.1).

<b>Humedad Relativa % (HR)</b>	<b>Proceso de Carbonatación</b>
HR > 70%	Evita el ingreso de $\text{CO}_2$
50 % < HR < 70 %	Avanza rápidamente
HR < 50 %	No hay suficiente agua para que se disuelva el $\text{CO}_2$

Tabla IV.1 Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa [12].



## **V. CONCEPTOS BÁSICOS DE DURABILIDAD.**

### **V.1 Funcionalidad y Durabilidad.**

La funcionalidad es una cantidad cuantificable que depende de la capacidad de carga de la estructura. Cuando el concepto tiempo entra en juego en la evaluación de la funcionalidad de una estructura, varios factores externos o factores de degradación resultan en un primer plano. La durabilidad se puede definir como la habilidad de mantener la funcionalidad requerida [19].

### **V.2 Degradación.**

El concepto de degradación, es por definición, el decremento gradual de la funcionalidad de la estructura con el tiempo, esta se puede cuantificar como el inverso de la funcionalidad [19].

### **V.3 Vida útil y Vida residual.**

En la etapa de proyecto se definen los requisitos de seguridad y funcionalidad con los que se va a dotar a una determinada estructura. Estas decisiones están basadas en las solicitudes de tipo mecánico que van actuar sobre la estructura.

Se entiende como vida útil, el periodo en el que la estructura conserva los requisitos de proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento. Es decir si la estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades (seguridad, funcionalidad y estética), ésta ya sobrepasó el periodo de su vida útil. En el diseño de estructuras por durabilidad el requerimiento de la vida útil de la estructura puede ser definido de antemano por el proyectista, también es conocido como vida útil de servicio, TVU [19].

Se entiende por vida residual el tiempo a partir del momento que la estructura alcanza el anterior límite aceptable (fin de la vida útil). Durante este período es el tiempo en el que la estructura requiere reparación, remodelación o completa renovación para que regrese a su estado de servicio original.

Es así que la acepción de “Residual” es aplicable mientras que la estructura no sea intervenida, e implica la idea de que la estructura se degrada progresivamente a una determinada velocidad.



En pocas palabras, la etapa de vida residual es el tiempo que tiene el responsable de la estructura, o elemento estructural, para repararla antes que la degradación avance hasta el límite de posible colapso [11].

#### V.4 El modelo de Tutti.

El modelo en el cual se basan la mayoría de los modelos ya existentes, fue originalmente propuesto por Tutti. Torres Acosta señala que la vida útil de una estructura (TVU) se puede representar de la siguiente forma:  $TVU = T_1 + T_2$ . En este modelo, se denomina  $T_1$  al período de iniciación del fenómeno, y se define como el lapso de tiempo que tardan los agentes externos en atravesar el recubrimiento, alcanzar al acero de refuerzo y provocar su despasivación. Se denomina  $T_2$  al período de propagación, que se refiere al periodo entre la pérdida de protección pasiva y la manifestación externa de los daños por corrosión (manchas de óxido, agrietamientos, o desprendimientos de la cobertura del concreto) [19].

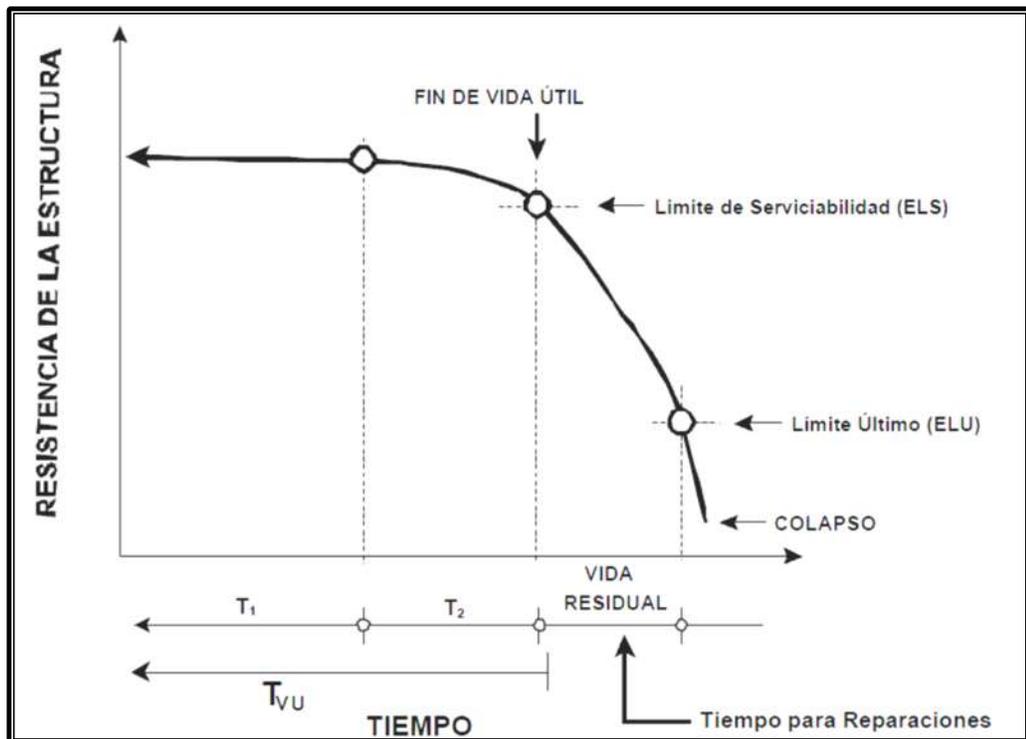


Figura V.1 Modelo de Durabilidad propuesto Tutti.

La etapa T2, finaliza con la formación de pequeñas grietas (con anchos menores de 0.1 mm) ó manchas de óxido. Si en la estructura se observan otros tipos de degradaciones como grietas más anchas de 0.1 mm, delaminaciones, desconchamientos, acero de refuerzo expuesto con corrosión visible, etc., dicha estructura se encontrará más allá de su vida útil, o sea, en el periodo de su vida residual. El periodo de la vida residual finaliza hasta un límite inaceptable de durabilidad el cual se podría expresar en función de la capacidad de carga del elemento estructural [19].



## **VI. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN.**

El conocimiento de las diferentes manifestaciones apreciables a simple vista, ó no, originadas como resultado de los fenómenos corrosivos, es fundamental para su detección y para la elaboración del diagnóstico de las fallas. Por ello, la inspección de las estructura existentes de concreto reforzado, constituye una etapa muy importante en la evaluación y posterior diseño de la reparación de las estructuras dañadas por corrosión, ya que a través de esta inspección se obtiene directa ó indirectamente la información requerida para la solución del problema.

En términos generales, las inspecciones en obra de las estructuras existentes de concreto reforzado, deberán contener las siguientes etapas:

- 1.- Elaboración de una ficha de antecedentes de la estructura y del medio ambiente (con base en la información documentada y/o visita previa).
- 2.- Examen visual general de la estructura.
- 3.- Levantamiento de daños.
- 4.- Selección de zonas para examen visual detallado y elaboración de plan de muestreo.
- 5.- Selección de las técnicas de ensayo, medición y análisis más apropiadas.
- 6.- Selección de zonas para la realización de ensayos, mediciones y análisis físico-químicos en el concreto, acero de refuerzo y en el medio ambiente circundante.
- 7.- Ejecución de mediciones, ensayos y análisis físico-químicos en el concreto y/o en el acero de refuerzo.
- 8.- Evaluación, diagnóstico y propuesta de rehabilitación [13].

De acuerdo al tipo y magnitud de la información que se desee obtener se puede hablar de una inspección preliminar y de una inspección detallada. La inspección preliminar permitirá básicamente tener una idea general del contexto que rodea a la estructura en cuestión.

La necesidad de un análisis más profundo marcará la pauta para la realización de actividades de preparación, es decir, para la llamada inspección detallada. Así mientras los puntos 1 y 2 constituyen pasos obligados en una inspección preliminar, las actividades de 3



a 6 sólo si se decide que es necesaria una inspección pormenorizada, para la elaboración del diagnóstico y/o con miras a una futura reparación de la estructura [13].

### **VI.1 Inspección preliminar**

Como ya se ha mencionado, con base en la información obtenida mediante esta etapa, es posible ya determinar la naturaleza y el origen del problema, o bien constituir sólo la etapa previa a un estudio más detallado [13].

Las actividades propias de esta etapa son las que se explican en forma breve a continuación.

#### **Elaboración de una ficha de antecedentes de la estructura y del medio.**

a. Estructura: Recoger la mayor información posible referente a la edad o tiempo en servicio, naturaleza y procedencia de los materiales del concreto, dosificación y resistencia característica del concreto, tecnología de fabricación del concreto, edad de inicio de los problemas, diagnósticos y/o reparaciones anteriores, niveles de tensiones de trabajo de los elementos o componentes estructurales, eventuales cambio de uso, etc.

b. Medio: Información que permita caracterizar su agresividad. Es fundamental señalar la forma de interacción entre el medio y la estructura afectada; en este sentido, posteriormente corresponderá al criterio y experiencia del evaluador el determinar y calificar la intensidad de dicha interacción de acuerdo a sus efectos, por ejemplo: tipo de atmósfera, tipo de aguas, naturaleza del terreno ó suelo, presencia de corrientes de interferencia, presencia de agentes químicos, entre los más importantes [16].

#### **Examen visual general de la estructura.**

Este proceso debe permitir determinar si el problema se presenta por igual en todos los elementos de las mismas características, o si existen diferencias por causas locales (puntuales). Para ello, debe realizarse un examen diferenciado por elementos, registrando los signos aparentes de corrosión (manchas de óxido: color, extensión y curso; fisuras: ubicación, dirección y dimensiones; zonas de desprendimiento del recubrimiento de concreto con/sin exposición de la acero de refuerzo), degradación del concreto, así como cualquier otra seña particular que pudiera constituir un indicativo de algún agente externo. En la tabla IV.1 (propuesta por el American Concrete Institute) se presenta un ejemplo de



cómo puede realizarse la tipificación de los daños y una clasificación según códigos e información relevante [11].

Es importante elaborar un registro fotográfico amplio que acompañe las observaciones generales de la estructura como de las zonas de difícil acceso en donde no es posible una observación directa o sencilla.

Tal como se señaló antes, si el problema no es complejo y los evaluadores son experimentados, puede ser suficiente la información hasta aquí obtenida para dictaminar la(s) causa(s) y elaborar el pre-diagnóstico. Se procederá entonces a la elaboración de croquis/planos con el levantamiento de daños, para proceder a la evaluación de la estructura (ver figura VI.1).

## **VI.2 Inspección detallada.**

Como ya se comentó anteriormente, esta inspección se realiza cuando existe una fuerte posibilidad de que la estructura de concreto presente daños por carbonatación ó corrosión; por lo que se llevarán a cabo los ensayos necesarios al concreto y al acero de refuerzo de la estructura, en las zonas dañadas o con más urgencia de evaluación, se debe recordar que cualquier elemento de concreto que esté seriamente dañado, pone en riesgo la durabilidad de toda la estructura [16].

### **Plan de trabajo.**

La concepción del plan de trabajo requiere de la evaluación de la información básica obtenida previamente (ficha de antecedentes, examen visual general y, resultados de los ensayos y/o mediciones de campo a pie de obra que conducen al prediagnóstico) y resultados de los ensayos y/o mediciones de campo a pie de obra. En general, incluye las siguientes actividades:

- a) Elaboración de fichas, croquis para el levantamiento de daños, plan de muestreo, tabla de tipificación de daños.
- b) Selección de zonas, técnicas y número de ensayos /medición/análisis.
- c) Planificación del uso de Materiales y Equipamiento para los diferentes ensayos.



CODIGO	DAÑO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	DETALLES QUE DEBEN SER DADOS POR LA INSPECCION
A1	Craquelas o fisuras profundas	Rotura del hormigón, superficial o profunda.	Sobrecargas, contracción, corrosión.	Dirección, ancho, longitud y profundidad.
A2	Red de grietas	Grietas estrechas y cortas formando una red.	Cambio diferencial de volumen de hormigón superficial e interno.	Ancho de grietas; tamaño de red y superficie afectada.
B1	Gal de oxidación	Gel viscoso saliendo a través de los poros del hormigón.	Reacción alcali-agregado.	Superficie afectada, cantidad de depósito.
B2	Esfotescencia	Cuarta blanca en la superficie del hormigón.	Lixiviación de hidróxidos con o sin formación de carbonatos.	Superficie afectada, cantidad de depósito.
B3	Manchas de óxido	Manchas de color marrón-rojizo.	Corrosión de la armadura, del alambre de amarre.	Localización, intensidad, posible daño asociado.
B4	Manchas de humedad	Zona superficial del hormigón con indicios de humedad.	Escurecimiento externo o interno, condensación.	Superficie afectada.
C1	Proyección ("Pop-Out")	Daño localizado superficial.	Desarrollo de una presión interna local o expansión de partículas de agregado.	Localización, profundidad.
C2	Concreto fofó	Sonido hueco al golpe del martillo.	Corrosión del acero de refuerzo, o cangrejeras.	Superficie afectada, grietas asociadas.
C3	Delaminación	Fragmento de hormigón separado de la masa.	Presión interna por corrosión de la armadura, o por una fuerza externa aplicada.	Superficie afectada, profundidad.
C4	Intemperismo	Desgaste de la superficie del hormigón, lavado de la pasta de cemento.	Acción del medio ambiente que produce desgaste en la superficie.	Superficie afectada, profundidad.
D2	Nidos de abeja (Cangrejeras)	Vacios entre los agregados gruesos.	Falta de homogeneidad durante el vaciado del concreto.	Superficie afectada, profundidad, intensidad.
E1	Junta de construcción	Demarcación en la superficie del hormigón, porosa o no.	Junta entre dos colados.	Localización y posible daño asociado.
E2	Junta de dilatación	Línea formada por la unión de dos planos de hormigón.	Espacio dejado para pequeños movimientos rotatorios.	Aberturas, obstrucciones y cualquier asociado a su deterioro.

**OBSERVACION:** Para cualquier daño reportado se deberá evaluar además el grado de deterioro del acero de refuerzo si está a la vista, estimando la pérdida de diámetro del refuerzo y el recubrimiento. En el caso de cabillas salientes de la superficie del hormigón sin daños aparentes en éste, se deberá además cuantificar el número de puntos.

LEYENDAS:	
	DELAMINACIÓN ACERO EXPUERTO
	PARCHO DE REPARACIÓN
	CIBRATA
	MANCHAS DE HUMEDAD
	MANCHAS DE ÓXIDO
	CONCRETO FOFÓ
	CANGREJERA
	NUCLEO EXTRAÑO
	PROTUBERANCIA
	PROYECCION CON ACERO EXPUERTO
	INTEMPERISMO

Tabla VI.1 Inspección visual y Clasificación simplificada de daños.

### **Elaboración del plan de muestreo.**

Una vez reconocida la estructura a través de la inspección preliminar debe hacerse una división de ella en zonas, clasificadas de acuerdo a ciertas características y/o condiciones, que sean representativas dentro del conjunto de la estructura. Luego, los puntos de muestreo serán identificados con cada una de estas zonas, de manera que la evaluación considere y enmarque cada situación particular. La clasificación de las zonas debe estar basada en los objetivos de la inspección y orientada a facilitar la determinación de las causas que han originado los daños por corrosión en las armaduras usando criterios como:

- Diferenciar zonas con distintas exigencias estructurales/mecánicas.
- Identificar las características originales (al ser puesto en obra) del concreto.
- Diferenciar las zonas sometidas a distintos medios agresivos.
- Establecer grados de deterioro en el concreto y en el acero de refuerzo.

Los croquis y/o planos de la estructura elaborados para el levantamiento de daños deben resumir esquemáticamente y de manera simple y clara los criterios de identificación aplicados y, lo mismo que en las tablas de tipificación de daños, deberá utilizarse términos (normalizados o previamente definidos en un glosario) que describan inequívocamente la situación que se desea reflejar [11].

### **Selección de zonas, técnicas y número de ensayo/mediciones/análisis.**

Realizada la división de la estructura según los criterios arriba mencionados debe estimarse en esta etapa, qué tipo de ensayos, mediciones y/o análisis deberán ser llevados a cabo en la inspección detallada, y en qué (y en cuántos) puntos de muestreo serán realizados.

### **Planificación de materiales y equipamiento.**

Con base en los resultados del examen visual general de la estructura y la inspección preliminar, se deberán tomar las previsiones en cuanto a la preparación de los equipos, materiales y reactivos a utilizar durante la inspección detallada. Se reitera la necesidad de realizar un registro fotográfico extenso y tomar en cuenta que eventualmente sea necesario el uso de binoculares o de una cámara de vídeo, para poder tener una evaluación detallada de la estructura [14].



### **Ejecución de la inspección detallada.**

El examen visual detallado debe considerar la inspección minuciosa, tanto del concreto como del estado del acero de refuerzo. La inspección debe abarcar todos y cada uno de los elementos, registrándose las anomalías observadas por medio de fichas de antecedentes, planos/croquis de levantamiento de daños, tipificación de daños, etc. [11].

La inspección debe considerar la clasificación de las manchas de óxido (color, aspecto, extensión) y la morfología del ataque (uniforme o localizado, profundidad y extensión de picaduras, etc.).

Es claro ver que se necesitará del equipo multidisciplinario para determinar la durabilidad de la estructura, pues los resultados de la inspección detallada conciernen tanto al especialista en estructuras como al de corrosión y al de técnicas de construcción, quienes diseñarán el programa de conservación, rehabilitación ó tomar la decisión de la reconstrucción de la estructura, por fuerte que esto parezca; buscando siempre la estabilidad y vida útil de la estructura de concreto [16].



## **VII. DESCRIPCION DE MÉTODOS DE ENSAYO**

### **VII.1 Toma de testigos**

La elección del tipo de testigo a extraer está condicionada principalmente por el ensayo a que se destina el mismo, así como en evitar en lo mínimo algún daño estructural, pero también a la mayor o menor accesibilidad de los equipos al sitio donde será tomado ese testigo, también por el ámbito de autorización concedido por los responsables de la estructura.

Conviene también hacer hincapié que una buena regla de acción, consiste en reparar los sitios donde extrajeron los testigos utilizando mortero de reparación con baja retracción.

Los tipos de testigos más normales que pueden ser extraídos son:

- Núcleos
- Porciones de material en polvo.
- Porciones de concreto.

Con base en lo anterior, y considerando la opción más adecuada se optó por extraer núcleos, ya que con eso es suficiente para realizar los ensayos requeridos.

#### **VII.1.1 Extracción de núcleos.**

##### **Objetivo.**

Extracción y preparación de especímenes cilíndricos de concreto endurecido, para los ensayos requeridos.

##### **Equipos y materiales.**

- Agua para la refrigeración del taladro
- Energía eléctrica o fuente de energía tipo diesel o gasolina
- Pacómetro u otro equipo capaz de identificar la posición del acero de refuerzo en el elemento.
- Taladro eléctrico o a gasolina, con broca y copa.

##### **Procedimiento.**

La norma NMX-C-169-ONNCCE-2009 establece el procedimiento adecuado a realizarse para esta actividad.



Primeramente se debe elegir las zonas donde se realizarán las extracciones y posteriormente con el pacómetro identificar el armado para evitar extraer o cortar el acero de las armaduras

La extracción de núcleos se efectúa con el equipo adecuado, el cual debe poseer fijación por vacío lo que facilita y reduce el tiempo de extracción de núcleos. La fijación del equipo deberá hacerse teniendo en cuenta que las muestras deberán hacerse perpendicularmente a la superficie del elemento (figura VII.1).

Las dimensiones de los núcleos dependen del tipo de ensayo a que se destina y deberán tener en cuenta las dimensiones máximas del agregado grueso.



Figura VII.1 Equipo empleado para la extracción de núcleos.

La exigencia dimensional es más importante si se pretende efectuar ensayos de resistencia a la compresión, permeabilidad o absorción del agua. Si los testigos se destinan a ensayos químicos (como determinación de cloruros ó carbonatación) puede optarse por la extracción de muestras de menor dimensión. Este procedimiento tiene muchas ventajas en zonas donde la extracción de testigos es de difícil acceso o en zonas de gran densidad de acero de refuerzo [20].

Para finalizar conviene llenar los agujeros de los testigos con concreto, mortero autonivelante ó morteros de resistencia compatible con la resistencia del concreto original, y además deberá tener buena adherencia.

## **VII.2 Profundidad de carbonatación.**

### **Objetivo.**

Determinar el avance de la carbonatación en el concreto por el método de vía húmeda con solución de indicador ácido-base.

### **Definiciones.**

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal, es decir, pH entre 12 y 14 del concreto por efecto del CO<sub>2</sub> que difunde desde el ambiente que lo rodea. En presencia de humedad el CO<sub>2</sub> reacciona con los álcalis que comúnmente son: hidróxidos de calcio, sodio y potasio, neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10.

### **Equipos y materiales.**

- Instrumentos de medición de longitud: escala milimétrica, vernier.
- Herramienta para extracción de muestras.
- Material para limpieza superficial: brocha, franela.
- Solución indicadora ácido-base: fenolftaleína (1 g fenolftaleína + 49 g alcohol + 50 g Agua) o timolftaleína (1 g timolftaleína + 99 g agua)

### **Procedimiento.**

Para la realización de esta prueba primero se debe hacer la toma de probetas, la sección será un corte transversal donde un extremo corresponderá a la superficie expuesta a la atmósfera. La probeta puede ser cilíndrica o una porción extraída. El tiempo de exposición de la superficie a evaluar no podrá ser mayor de 15 minutos.

Una vez seleccionada la probeta y estando su superficie libre de polvo, se aplicará por atomización el indicador ácido-base en forma uniforme.





VII.2 Aplicación del indicador ácido-base.

Luego de la aplicación y antes de transcurridos 15 minutos, se efectuará la medición de la longitud de la zona incolora desde la superficie, determinándose con precisión los valores máximos y mínimos del frente incoloro y la media aritmética, de un mínimo de mediciones, en función del tamaño de la probeta (figura VII.3). El procedimiento no debe tardar más de 20 minutos.



Figura VII.3 Medición de la profundidad de carbonatación.

Deberá levantarse un registro preciso sobre la ubicación de las probetas, tonalidad visualizada, profundidad de carbonatación medida e indicar explícitamente el tipo de indicador utilizado. Igualmente se efectuará un registro fotográfico donde sea pertinente.

Cálculo de la velocidad de carbonatación. Uno de los modelos más sencillos que permite predecir la velocidad de carbonatación del concreto armado es el que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición.

$$X_{CO_2} = (K_{CO_2})(\sqrt{t})$$

Donde:

$X_{CO_2}$  = Profundidad de carbonatación, mm

$K_{CO_2}$  = Constante de carbonatación, mm/año<sup>-0.5</sup>

t = tiempo en años

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

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}} ; t = \left( \frac{e_c}{K_{CO_2}} \right)^2$$

Se calcula la constante  $K_{CO_2}$  de la primera determinación y el tiempo en que ocurrió la carbonatación. Se utiliza esa constante junto con la profundidad de la armadura  $e_c$  y se determina en cuánto tiempo la carbonatación alcanzará la armadura.

La representación gráfica de estos cálculos se muestran en la figura VII.4.

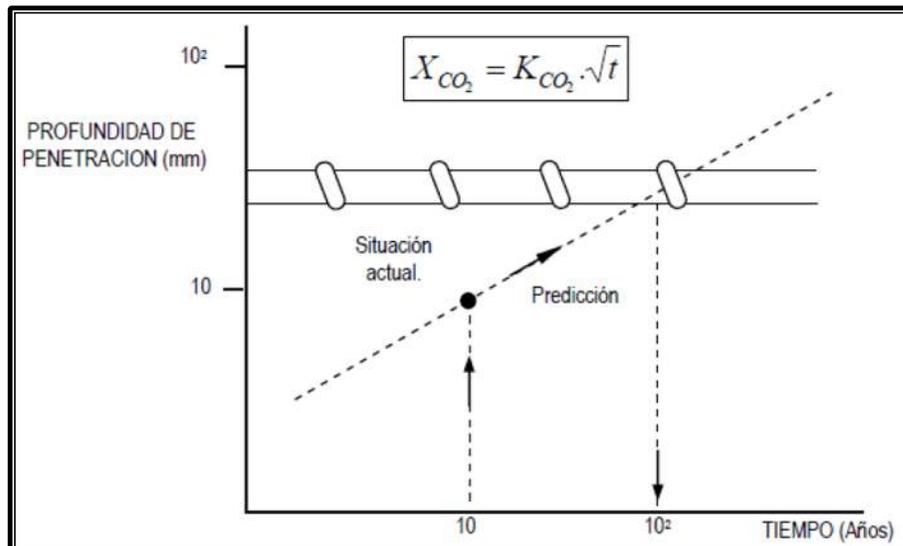


Figura VII.4 Determinación del tiempo para que la carbonatación alcance al acero de refuerzo.

Este modelo no debe ser aplicado directamente a estructuras con menos de 3 años de vida, en cuyo caso se recomiendan dos o más medidas con un intervalo mínimo de 6 meses. Siempre es recomendable hacer más de una evaluación para aumentar la certeza de la información obtenida para poder predecir el comportamiento de la carbonatación, con un desfase de al menos 6 meses.

#### **Criterios de evaluación.**

- Nivel de pH. En función del indicador ácido-base seleccionado se establecerá el pH del frente incoloro en la muestra.

La fenolftaleína es el indicador más comúnmente utilizado y su rango se encuentra entre pH 8.2 y pH 9.8. Varía su tonalidad de incoloro a violeta rojizo.

La timolftaleína es otro indicador que podría utilizarse, ya que su rango está entre pH 9.3 y pH 10.5 con tonalidades de incolora a azul.

La figura VII.5 muestra los indicadores, su rango de viraje, el pH y las especies predominantes.

Se considera que valores de  $K_{CO_2} \leq 3 \text{ mm/año}^{0.5}$  indican concreto de buena calidad;  $3 \text{ mm/año}^{0.5} \geq K_{CO_2} \leq 6 \text{ mm/año}^{0.5}$  pueden ser considerados concretos de moderada calidad, mientras que valores de  $K_{CO_2} > 6 \text{ mm/año}^{0.5}$  indican concretos de muy baja calidad [11].



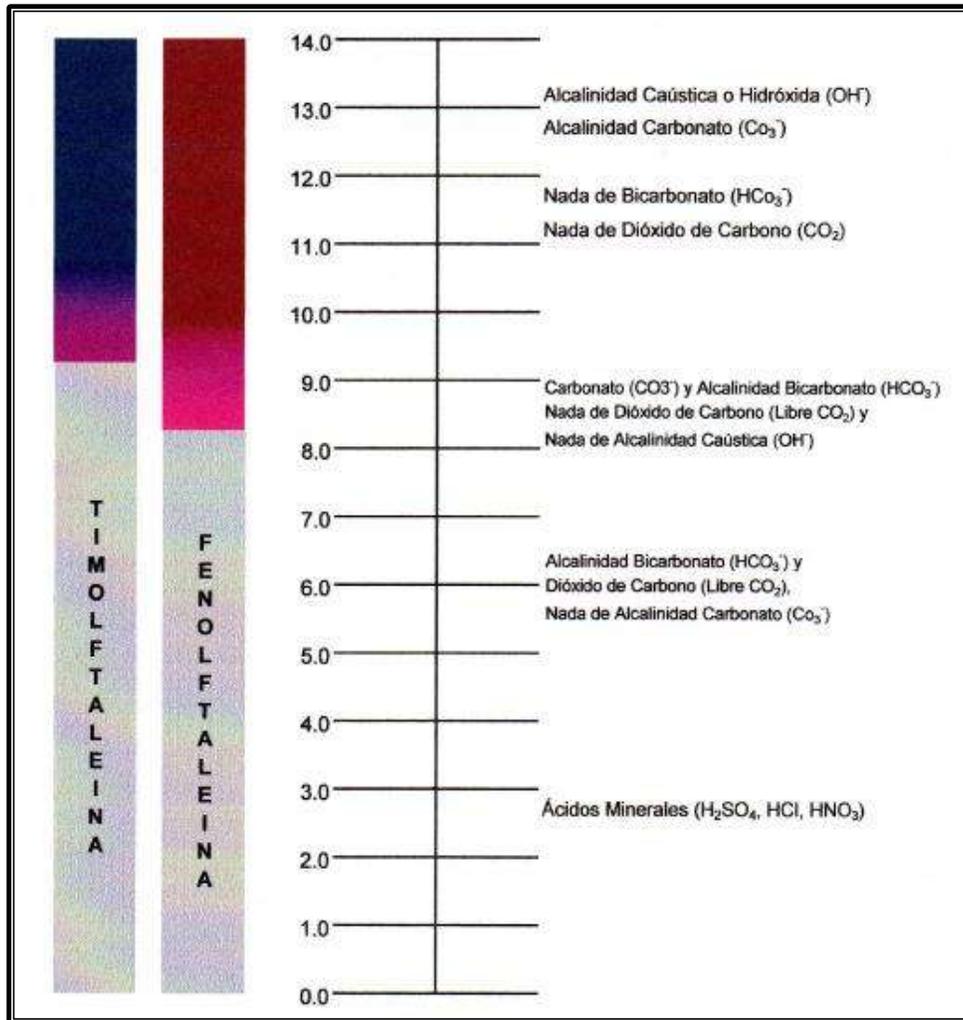


Figura VII.5 Escala de pH, muestra los constituyentes existentes y el rango de los indicadores en concreto hidráulico [11].

### VII.3 Resistividad eléctrica.

#### Objetivo.

El objetivo de este ensayo es la determinación de la resistividad eléctrica del concreto en el laboratorio, para evaluar el riesgo de corrosión, mediante el uso del resistómetro.

#### Definiciones.

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material que mide la capacidad del material a oponerse a un flujo de corriente eléctrica, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran proporción

del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras [11].

#### **Equipos y materiales.**

- Equipo para la toma de núcleos
- Medidor de resistividad eléctrica
- Equipo para medir dimensiones (con precisión de décimas).

Este ensayo fue realizado en el laboratorio con un equipo especializado en resistencia eléctrica en suelos y materiales porosos marca Nilsson 400 (figura VII.6).



Figura VII.6 Equipo utilizado para realizar lecturas de resistencia.

#### **Procedimiento.**

Los cilindros deberán mantenerse saturados y así evitar que su humedad se pierda.

No se realizará la prueba sobre la capa carbonatada de la muestra ni en la armadura, ya que falsea el resultado de estas. Se deben tomar la dimensiones de la muestra, área (A) y longitud (L).

La prueba se realizará colocando las caras laterales del espécimen entre esponjas húmedas y dos placas de acero inoxidable. A las placas de acero se le conectarán pinzas del mismo material para así poder conectar la fuente, y someterlos a una corriente dada (I) para regular el voltaje (E) (figura VII.7).



Figura VII.7 Cilindro colocado para la realización del ensayo.

La resistencia eléctrica ( $R_e$ ) se calcula como  $E/I$ , y se expresa en ohm.

De este modo, la resistividad eléctrica está dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = R_e \left( \frac{A}{L} \right)$$

Donde:

$\rho$  = resistividad eléctrica en  $k\Omega.cm$ .

$R_e$  = resistencia eléctrica

$A$  = área transversal del espécimen

$L$  = longitud del espécimen.

#### **Criterios de evaluación.**

No existe un acuerdo general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general los datos que se muestran en la tabla VII.1 [11].

<b>Intervalo</b>	<b>Criterio</b>
$\rho > 200 k\Omega.cm$	Poco riesgo
$200 k\Omega.cm > \rho > 10 k\Omega.cm$	Riesgo moderado
$\rho < 10 k\Omega.cm$	Alto riesgo

Tabla VII.1 Riesgo de corrosión en función de la resistividad [11].

Se deberá tener en cuenta que la resistividad es sólo uno de los parámetros que evalúa la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, por tanto, no podrá considerarse como único criterio para definir o prever un posible daño sobre la estructura [11].

#### **VII.4 Velocidad de pulso ultrasónico.**

##### **Objetivo.**

Este es un ensayo no destructivo que tiene como objetivos principales los siguientes puntos:

- Verificar la homogeneidad, es decir, la uniformidad y calidad relativa del concreto.
- Detectar las fallas internas, es decir, la presencia de vacíos, introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras, y otras imperfecciones.
- Monitorear las variaciones de las propiedades del concreto a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

##### **Definiciones.**

La velocidad de pulso ultrasónico se define como la relación que existe entre la distancia de viaje, a través del concreto, de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del concreto, hasta que es detectado por el receptor. Aquí, el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividida entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de onda.

##### **Equipos y materiales.**

- Acoplante (vaselina o gel).
- Equipo comercial de ultrasonido.
- Circuito generador-receptor (aparato de pulso ultrasónico de baja frecuencia ultrasónica).



- Transductor-emisor (aparato que posibilita la transformación del pulso eléctrico en onda de choque en una banda de 24 kHz hasta 500 kHz).

- Circuito medidor de tiempo (aparato que permite medir el tiempo recorrido desde la emisión de onda hasta su recepción).

- Cables coaxiales que deben permitir la conexión perfecta de los transductores al circuito generador-receptor.

- Barra de referencia. Pieza que permite la calibración del equipo de ultrasonido, cuya superficie tiene un acabado pulido y el tiempo de recorrido grabado.

### **Procedimiento.**

Previo a la realización de la prueba de pulso ultrasónico, se deberá verificar que los especímenes de concreto a ser ensayados, tengan la superficie plana, lisa, exenta de suciedad y carbonatación.

En el caso de que la superficie no sea suficientemente lisa deberá regularizarse a través de procedimientos mecánicos, o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con un espesor mínimo para no interferir la medida, y facilitar el acoplamiento de los transductores.

Para comenzar la prueba, se deberá tener calibrado el aparato usando la barra de referencia, o dispositivo equivalente del equipo. Posteriormente, los transductores se deberán posicionar como se indica a continuación:

- Transmisión directa, con los transductores en las caras opuestas del material.

- Transmisión indirecta, con los transductores en la misma cara.

- Transmisión semidirecta, con los transductores en las caras adyacentes.

Se colocan y presionan las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, considerándose satisfactorios cuando sea obtenido un valor mínimo de lectura como variación de +1%. Para esta prueba se realizó la medición por transmisión directa.

Una vez verificada la barra de patrón se procede con los especímenes utilizando el mismo procedimiento. Se coloca en ambas caras del cilindro, un poco de gel para ubicar y presionar las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, a fin de tener un buen contacto de estos con el concreto. Ya colocados se enciende el equipo empleado para esta medición, y se registra el valor obtenido [21].



Una vez obtenidos los valores a partir del aparato de medición, se procede a calcular la velocidad de propagación de ondas conforme a la siguiente fórmula:

$$v = L/t$$

Donde:

v = velocidad de propagación (m/s)

L = distancia entre los puntos de acoplamiento

t = tiempo recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción.

En la figura VII.8 se muestra el procedimiento para la correcta ubicación de los transductores en los cilindros, así como el aparato de ultrasonido empleado para la realización de esta prueba, la cual fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, modelo 58-E0049/B, marca CONTROLS.



Figura VII.8 Equipo empleado en la prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Con el equipo empleado para esta prueba, también es posible realizar una prueba combinada de esclerometría con ultrasonido, con la finalidad de estimar la resistencia a la compresión.

Para lograr que el espécimen se encuentre fijo al momento de realizar la prueba con el esclerómetro, es necesario aplicarle una precarga con una prensa, se ha comprobado (Chávez García H.L., 2011) que precargas del 15% del esfuerzo de ruptura esperado no dañan el espécimen.

Por otro lado, es necesario el manejo de un factor de experiencia que debe ser introducido en el equipo al momento de hacer la prueba. Este factor puede variar de 0.1 a 1.99 y para determinarlo se realizan tomas de lecturas con todas las variaciones posibles del factor y posteriormente los cilindros se sometieron a la prueba de compresión para obtener así dicho factor.

#### **Procedimiento prueba combinada.**

Se aplica una precarga del 15 % de la carga de falla al cilindro, para no dañar a los especímenes se emplea una placa de neopreno.

Se dibujan 3 líneas verticales con una separación de 120° entre cada una, se hacen 7 lecturas con el esclerómetro adosado al equipo de ultrasonido en cada línea, contra la superficie lateral y en el tercio medio de la altura. Tratando de evitar los ensayos en el mismo punto dos veces. El equipo por sí solo determina un promedio de las lecturas tomadas para obtener un rebote final, el cual se guarda en el equipo con un número de prueba. Se libera el cilindro de la precarga para tomar las lecturas de velocidad de pulso ultrasónico, en el menú del equipo se busca el número de prueba en el que se guardaron los rebotes y se abre el archivo para proceder a tomar las lecturas de velocidad de pulso descrita anteriormente. Se toman las lecturas de velocidad de pulso y con estas lecturas, además de los rebotes guardados, se obtiene directamente del equipo una resistencia a la compresión del cilindro.



Figura VII.9 Toma de lecturas con esclerómetro en prueba de pulso ultrasónico combinada.

### **Criterios de evaluación.**

Es posible expresar la homogeneidad y calidad del mortero en forma de parámetros estadísticos tales como la desviación estándar o el coeficiente de variación de las medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el concreto, hechas en varios puntos de la estructura o elemento estructural por separado. Tales parámetros, sólo pueden ser usados para comparar variaciones en la composición de concretos similares, debiendo considerarse los siguientes factores: distancia entre las superficies de contacto de los transductores, posición de la armadura, en el sentido de la propagación de onda, densidad del concreto, dependiendo esta del trazo de las condiciones de fabricación, tipo de cemento, grado de hidratación y edad del concreto. La tabla VII.2 muestra los criterios de evaluación de la calidad del concreto en función de la velocidad del pulso ultrasónico.

<b>Velocidad de propagación</b>	<b>Calidad del concreto</b>
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

Tabla VII.2 Criterios de evaluación en pulso ultrasónico [11].

### **VII.5 Frecuencia de resonancia.**

#### **Objetivo.**

Poder determinar el módulo de elasticidad dinámico mediante la frecuencia de vibración natural, esto como prueba no destructiva.

#### **Definiciones.**

La frecuencia natural de vibración es una propiedad dinámica de un sistema elástico y se relaciona sobre todo con el Módulo de Elasticidad Dinámico, el método de resonancia ha sido usado desde hace 55 años. Sin embargo, en los últimos años, los métodos de frecuencias de resonancia han sido usados casi exclusivamente en estudios de laboratorio.

#### **Equipos y materiales.**

- Equipo para la toma de núcleos cilíndricos.
- Equipo medidor de frecuencia de resonancia.
- Equipo para medir dimensiones



- Grasa

Este equipo ha sido diseñado por varias organizaciones comerciales y consiste principalmente de dos secciones una genera vibraciones mecánicas y la otra detecta estas vibraciones.

En la generación de vibraciones la principal parte es un oscilador electrónico de audio frecuencia, el cual genera voltajes eléctricos de audiofrecuencia. Las vibraciones mecánicas son detectadas por un transductor piezoeléctrico. El transductor está contenido en una unidad separada y convierte las vibraciones mecánicas en voltaje eléctrico de corriente alterna de las mismas frecuencias. Estos voltajes son amplificados para la operación de panel medidor el cual indica la amplitud del transductor de salida. Como la frecuencia de la unidad de manejo de oscilador es variada, un máximo en la aguja del medidor indica cuando se alcanza la resonancia [23].

**Procedimiento.**

Encender el equipo para que este se caliente. Poner el control de voltaje de salida y ganancia de amplificador totalmente a la izquierda. Poner a 1 seg, el output – input poner en output, poner en manual el botón de manual-auto. Prender el instrumento y dejarlo por 10min para que se estabilice térmicamente.

La frecuencia de resonancia fundamental longitudinal esta en un punto nodal al centro del largo de un prisma o cilindro y el espécimen debe colocarse en el centro de apoyo de la cama de pruebas en el punto nodal. La muestra puede ser simplemente apoyada o sujetadas por la barra.

Poner grasa en los extremos del vibrador y en el pick-up en las barras de contacto. Para los extremos de los especímenes para que estén libres a la vibración en una dirección longitudinal es esencial que un mínimo de restricción sea impuesta en los extremos. Ambas barras del vibrador y del pick-up son libres a moverse en el montaje y es necesario solamente el movimiento de los apoyos del vibrador y del pick-up a lo largo de los rieles hasta que las barras hagan contacto con el centro de los extremos del espécimen. Los apoyos deben asegurarse usando el tornillo de sujeción (figura VII.10).





Figura VII.10 Sonómetro comercial utilizado para determinar Frecuencias de resonancia.

Seleccionar el rango de frecuencia de interés, para especímenes de concreto este estará generalmente en un rango de 1 KHz a 10 KHz dependiendo de las dimensiones del espécimen. Ajustar el control del voltaje de salida para una lectura de alrededor de 4V y aumentar ligeramente la ganancia del amplificador partiendo de cero.

Comenzando del final de bajas frecuencias del rango rotar el anillo interno del control de frecuencia y al mismo tiempo ir observando el medidor de entrada. En la frecuencia fundamental de resonancia el desplazamiento de los extremos del espécimen será un máximo indicado por un pico del medidor, con esto se determina el valor de la frecuencia.

### **Criterios de evaluación**

Se ha comprobado (Chávez García H.L., 2011) que en especímenes cilíndricos esta prueba no es muy precisa, sin embargo en el caso de vigas los resultados presentan un mejor comportamiento. Es así que la geometría juega un papel de suma importancia en la determinación de la frecuencia de resonancia fundamental del concreto hidráulico, sin embargo influyen otros factores como por ejemplo el tipo de agregados, la relación agua cemento, el tipo de cemento, las condiciones de humedad del concreto, la edad del concreto [22].

### **VII.6 Esclerometría.**

#### **Objetivo.**

Evaluar la dureza superficial del concreto mediante el uso del esclerómetro de reflexión.



### **Definiciones.**

El ensayo esclerométrico es un método no destructivo que mide la dureza superficial del concreto, se basa en el principio de que el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie contra la cual afecta la masa, proporcionando directamente por medio del aparato, el número de rebote.

Según la norma NMX-C-192-ONNCCE-2006 Este método no debe ser usado para conocer la resistencia a la compresión, sino para evaluar la uniformidad del concreto.

### **Equipos y materiales.**

- Esclerómetro de reflexión
- cincel, disco o piedra abrasiva de carburo; para remover la capa superficial de muy poco espesor, es decir,  $\approx 2$  mm. La cual es la capa más dura y por lo tanto no sería representativa del resto del concreto. También se pueden utilizar para desbastar pequeñas protuberancias del elemento.

### **Campo de aplicación.**

El método esclerométrico no debe ser considerado sustituto de otros métodos, sino como un método preliminar, para formarse una idea de la calidad del concreto.

Este método proporciona además una buena medida de la dureza superficial del concreto. Las correlaciones con las demás propiedades del concreto son determinadas empíricamente o verificadas a través de otros ensayos específicos.

Los métodos esclerométricos deben ser empleados en las siguientes circunstancias:

- Determinación de la uniformidad de la dureza superficial del concreto.
- Comparación de concretos como una referencia, en los casos en los que se desea comparar la calidad de las piezas del concreto y como un recurso más del control de calidad de piezas prefabricadas.
- Estimación de la resistencia a la compresión del concreto; el fabricante del aparato proporciona junto con el instrumento, una gráfica correlacionando la resistencia a la compresión con especímenes contra el índice esclerométrico (IE).

### **Procedimiento.**

El esclerómetro debe ser verificado antes de su utilización o cada 300 impactos realizados en una misma inspección, siguiendo las instrucciones del fabricante del equipo para la utilización del Yunque de calibración.



Las superficies del concreto deben estar secas, limpias y preferencialmente planas, evitándose superficies húmedas y carbonatadas.

Las áreas de ensayo deben estar:

- Localizadas preferentemente en las caras verticales
- Alejadas de regiones afectadas por segregación, exudación, concentración excesiva de armadura, juntas.

- Alejadas por lo menos 60 mm de las aristas de los elementos
- Tener una superficie entre  $800 \text{ mm}^2$  y  $40.000 \text{ mm}^2$

Frecuentemente el número de impactos está limitado por la separación de las barras de refuerzo. Sin embargo es recomendable:

- Efectuar un mínimo de 9 impactos en cada área de ensayo.
- Evitar impactos sobre agregados, armaduras.
- No se debe permitir más de un impacto sobre un mismo punto.
- Distancia mínima entre impactos de 30 mm.



Figura VII.11 Esclerómetro digital.

Utilización del esclerómetro:

- El esclerómetro debe usarse siempre ortogonalmente sobre el área de ensayo.
- La barra de percusión debe ser presionada contra un punto del área de ensayo, previamente delimitada, y antes de que dicha barra desaparezca completamente en el cuerpo del esclerómetro, el martillo debe ser liberado.
- La liberación del martillo debe ser efectuada a través de un aumento gradual de presión en el cuerpo del aparato.

- Después del impacto, la pantalla del esclerómetro proporciona el índice esclerométrico, este es borrado de la pantalla una vez liberado el martillo, pero es guardado automáticamente en la memoria interna del aparato; identificándose con un número de ensayo previamente seleccionado.

- El esclerómetro debe ser aplicado preferiblemente en posición horizontal y consecuentemente sobre superficies verticales. Cuando sea necesario aplicarlo en posiciones diversas se deberá indicar en el esclerómetro, previamente al ensayo, el ángulo para que el índice esclerométrico sea corregido automáticamente.

#### Limitaciones:

- La suavidad de la superficie. El esclerómetro tiene que ser usado contra una superficie lisa

- Tamaño, forma y rigidez del espécimen. Si el concreto no forma parte de una gran masa cualquier movimiento causado por el impacto del martillo se traducirá en una reducción en el número de rebote.

- Edad del espécimen. Cuando se va a probar concreto viejo en una estructura es necesaria una correlación directa entre los números de rebote y resistencia a la compresión de la extracción de muestras de la estructura.

- Condiciones de humedad internas y superficiales del espécimen. Las lecturas de los rebotes son menores para especímenes curados al aire que las lecturas obtenidas para los mismos especímenes sumergidos en agua y superficialmente secos.

- Tipo de agregado grueso. A pesar de que el mismo tipo de agregado sea empleado en la mezcla de concreto, las curvas de correlación pueden ser diferentes si la fuente de los áridos es diferente.

- Tipo de cemento. El cemento con alta alúmina puede tener una resistencia a la compresión 100 % superior a la resistencia estimada utilizando una curva de correlación basada en cemento Portland.

-Carbonatación de la superficie del concreto. En concreto viejo la profundidad de carbonatación puede ser de varios milímetros de espesor y, en casos extremos, hasta 20mm de espesor. En tales casos, el índice esclerométrico (IE) puede ser hasta un 50% superior a los obtenidos en una superficie de concreto no carbonatada [22].



## **VII.7 Resistencia a la compresión.**

### **Objetivo.**

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la compresión del concreto de la estructura a través de la extracción de testigos. La resistencia a la compresión puede ser considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad, como de la capacidad de resistencia mecánica.

### **Definiciones.**

La resistencia a la compresión del concreto corresponde a la carga máxima de compresión axial, que puede soportar un testigo cilíndrico de diámetro igual o mayor a tres veces el Tamaño Máximo (T.M.) del agregado grueso. La relación entre la altura ( $h$ ) y el diámetro ( $\phi$ ) del testigo deberá ser  $h/\phi = 2$  y es deseable que nunca sea  $h/\phi < 1$ .

### **Equipos y materiales.**

- Cortadora de concreto
- Prensa para ensayo de compresión axial

### **Procedimiento.**

La norma NMX-C-083-2002-ONNCCE, establece los métodos de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto.

La extracción deberá realizarse de acuerdo al apartado VII.1.1 Extracción de núcleos y como se mencionó anteriormente el diámetro del testigo deberá ser igual o mayor a 3 veces el Tamaño Máximo (T.M.) del agregado grueso y la relación entre la  $h/\phi$  deberá ser igual 2, además se debe tener en cuenta la separación entre un acero y otro, para evitar que sea cortado. No considerar para la prueba testigos con grietas o fallas, es decir, todos los testigos empleados para evaluar la resistencia a la compresión del concreto deben ser íntegros.

En cuanto a la preparación de los especímenes, primeramente se deberán cortar con un disco de corte los topes de los testigos a manera de obtener una superficie completamente plana y ortogonal a la generatriz del cilindro.



Se procederá al cabeceo de cilindros, con la finalidad de obtener una superficie plana y lograr así una distribución uniforme de la carga conforme a la norma NMX-C-109-ONNCCE-2004.

Una vez medido el diámetro del espécimen, éste se coloca en la máquina limpiando perfectamente las placas de apoyo en la máquina y centrando el eje vertical del espécimen en el centro de la placa de apoyo. Se le aplica carga, la cual debe de ser aplicada con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. Se continúa la carga del espécimen hasta la falla registrándola y observando su tipo de falla y la apariencia del material.

Para calcular el esfuerzo real que resiste el concreto, se divide la carga resistente entre el área de la sección transversal.

$$S = \frac{P}{A}$$

Donde:

P= Carga de ruptura (kg).

A= Área de la sección transversal del espécimen (cm<sup>2</sup>).

S= Esfuerzo a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>).

La resistencia a la compresión del concreto  $f'_c$ , depende de la dimensión del testigo y deberá de aplicarse una modificación con base en su relación de esbeltez (tablaVII.3).



<b>Relación Altura/Diámetro</b>	<b>Coefficiente de corrección aplicado a la tensión directa</b>
2	1
1.75	0.98
1.5	0.96
1.25	0.9
1	0.89

Tabla VII.3 Coeficientes de corrección por esbeltez [11].

La resistencia característica estimada del concreto a la compresión deberá ser calculada por:

$$f_{ck,est} \geq \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n * 0.9} \quad \text{ó} \quad f_{ck,est} \geq \frac{f_{c1}}{0.80}$$

Donde se debe considerar el mayor de los resultados con los siguientes significados:

$f_{ck,est}$  = Resistencia característica estimada del concreto a la edad del ensayo, en MPa.

$f_{ci}$  = Resistencia a la compresión de cada testigo de la muestra, en MPa.

$f_{c1}$  = Mínima resistencia a la compresión entre los testigos de la muestra, en MPa.

$n$  = Número total de testigos de una muestra, o tamaño de la muestra [11].

#### **Criterios de evaluación.**

a. Con bases en el diseño estructural:  $f_{ck,est}$  debe ser mayor o igual a la resistencia a la compresión característica del concreto, especificada en el diseño estructural, o sea,  $f_{ck,est} > f_{ck}$ .

Con base en la durabilidad: El valor de la resistencia mecánica, por sí sólo, no es indicativo de la durabilidad del concreto, ya que dependerá de varios factores entre los cuales se puede mencionar: la relación a/c, la dosificación, el tipo de cemento, el espesor de recubrimiento de la acero de refuerzo, etc. Sin embargo, en general se acepta que concretos de elevada resistencia (> 45.0 MPa) son durables y que concretos por debajo de 20.0 MPa son de baja durabilidad [11].



## **VII.8 Módulo de elasticidad estático**

### **Objetivo.**

Determinar el módulo de elasticidad estático (Módulo de Young), como prueba destructiva, el cual es una medida de la rigidez del concreto.

### **Definiciones.**

El módulo de elasticidad estático es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial, al someter al concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación unitaria, dentro de la zona elástica.

### **Equipos y materiales.**

- Máquina de prueba
- Micrómetro
- Anillo metálico

### **Procedimiento.**

La Norma Mexicana NMX-C-128-1997-ONNCCE establece los equipos y procedimiento a seguir.

Se preparan los especímenes cortando los topes con una cortadora con disco de diamante con la finalidad de obtener una superficie completamente plana y ortogonal a la generatriz del cilindro.

Se determinan las dimensiones del cilindro; y al igual que en la prueba de compresión simple se cabecean los núcleos, en esta ocasión el cabeceado se hace con azufre. Posteriormente se monta el cilindro centrado dentro del anillo, el cual permite fijar el micrómetro y así determinar las lecturas de las deformaciones.

Se determina del 10% al 15% de la carga máxima de falla para aplicar una precarga al cilindro dentro de este rango de carga. En la precarga se debe revisar que el micrómetro regrese a ceros.

Se comienza a aplicar carga a velocidad constante hasta el 60% de la carga de falla. Se registran las deformaciones y la carga correspondiente.



Por último se determina el Módulo de elasticidad estático aplicando la siguiente ecuación:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad estático

S<sub>2</sub> = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga máxima

S<sub>1</sub> = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal  $\varepsilon_1$

$\varepsilon_2$  = Deformación longitudinal producida por el S<sub>2</sub>

### **VII.9 Porosidad.**

#### **Objetivo.**

Determinar la absorción capilar y la porosidad de concretos como una medida de compacidad.

#### **Definiciones.**

Por porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan dentro de la masa del concreto y mortero, a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación.

Los poros, dependiendo de su tamaño y características, se subdividen en:

*Poros de gel:* son de tamaño considerablemente pequeño, menor a 15-25 Å, y corresponden a espacios intersticiales del gel de cemento. Estos poros sólo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades menores a 20 % HR.

*Poros capilares:* son de forma variable, y su tamaño es del orden de entre 2 nm y 1 µm. Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta endurecida de cemento, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para la durabilidad de las pastas.



*Poros de aire:* son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, durante la manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre si y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores a 0,05 mm. Aunque afectan la resistencia mecánica en cuanto a la durabilidad pueden según el caso, inducir efectos benéficos.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua líquida. El ensayo de absorción capilar se basa en la metodología propuesta por Fagerlund y es base de la normativa sueca que describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos [16].

#### **Equipos y materiales.**

- Horno con termostato digital.
- Cubeta con fondo plano y tapa.
- Desecador.
- Esponja.
- Balanza digital.
- Parafina para cubrir los laterales de los especímenes.
- Especímenes de ensayo

#### **VII.9.1 Absorción capilar**

El ensayo se realiza sobre especímenes de espesor  $H < 50$  mm (recomendándose de 20 a 30 mm para concretos especiales), luego de un pre-acondicionamiento de secado a 50°C por 48 hrs., para asegurar un peso constante y posterior enfriamiento en desecador por quince días (figura VII.14).





Figura VII.12 Probetas en el desecador y cubeta de fondo plano.

Después de registrar su peso inicial ( $W_0$ ), la muestra se coloca sobre una esponja húmeda en el interior de una cubeta de fondo plano teniendo cuidado de que el agua llegue solamente a 3 mm por encima de la parte inferior de la probeta de ensayo. Previamente, los cilindros son cubiertos con resina o parafina en las áreas laterales curvas del espécimen y la cara plana superior debe estar cubierta con una película plástica. A lo largo del ensayo se mantiene cubierto el recipiente para evitar la evaporación. Posteriormente y con la medición de tiempo en un reloj, determinar el peso total ( $W_t$ ), de la probeta de acuerdo a los criterios descritos en la tabla VII.4.

<b>Tiempo</b>	60 s	5 min	20 min	30 min	60 min	Cada hora hasta 6 h
<b>Tolerancias</b>	2 s	10 s	2 min	2 min	2min	5 min
<b>Tiempo</b>	Una vez al día por 3 días		Días 4 a 7		Día 7 a 9	
			3 mediciones cada 24 h		Una medición	
<b>Tolerancias</b>	2 h		2 h		2 h	

Tabla VII.4 Tiempos y tolerancias para el programa de medidas [24].

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones [24]:

$$I = \frac{m_t}{a * d}$$

Donde:



$I$  = Absorción (mm).

$m_t$  = Incremento de Peso conforme al tiempo (g).

$a$  = Área expuesta del espécimen ( $\text{mm}^2$ ).

$d$  = Densidad del Agua ( $\text{g}/\text{mm}^3$ ).

$$S = \frac{(I_f - I_i)}{(T_f^{1/2} - T_i^{1/2})}$$

Donde:

$S_p$  = Absorción Primaria ( $\text{mm}/\text{s}^{1/2}$ )

$I_f$  = Absorción en el punto final de la pendiente primaria (mm).

$I_i$  = Absorción en el punto inicial de la pendiente primaria (mm).

$T_f^{1/2}$  = Tiempo en el punto final de la pendiente primaria ( $\text{s}^{1/2}$ ).

$T_i^{1/2}$  = Tiempo en el punto inicial de la pendiente primaria ( $\text{s}^{1/2}$ ).

$S_s$  = Absorción Secundaria ( $\text{mm}/\text{s}^{1/2}$ )

$I_f$  = Absorción en el punto final de la pendiente secundaria (mm).

$I_i$  = Absorción en el punto inicial de la pendiente secundaria (mm).

$T_f^{1/2}$  = Tiempo en el punto final de la pendiente secundaria ( $\text{s}^{1/2}$ ).

$T_i^{1/2}$  = Tiempo en el punto inicial de la pendiente secundaria ( $\text{s}^{1/2}$ ).

### **Criterios de evaluación.**

Para un espesor de recubrimiento de 30 mm, con base en las características de su medio ambiente, recomendamos los siguientes valores de absorción capilar:

Ambientes severos, concretos con absorción capilar  $S < 3.0 \text{ mm}/\text{h}^{1/2}$  ( $5.10^{-5} \text{ m}/\text{s}^{1/2}$ ).

Ambientes menos severos, puede tenerse hasta  $6.0 \text{ mm}/\text{h}^{1/2}$  ( $10^{-4} \text{ m}/\text{s}^{1/2}$ ).

Si el espesor de recubrimiento se incrementa, la absorción capilar puede modificarse proporcionalmente [11].

### **VII.9.2 Porosidad total.**

Este ensayo se puede efectuar en especímenes separados, o en probetas utilizadas en el ensayo anterior. En cualquiera de los casos, luego de un preacondicionado del espécimen, este se sumerge en agua totalmente durante 24 horas como mínimo, al cabo de



este tiempo se registra su peso fuera (saturado y superficialmente seco) y dentro de agua (sumergido en agua). Este último peso se determina con la ayuda de una balanza hidrostática. (figura VII.15). Finalmente, el espécimen se seca a 105 °C hasta su peso constante y se registra su peso. La porosidad total se expresa en porcentaje con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105\text{ }^{\circ}\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}} \times 100$$



Figura VII.13 Determinación del peso sumergido.

Este valor de la porosidad no contiene más que una mínima parte de los poros de aire. Por lo tanto, si se desea obtener la porosidad total se debe saturar totalmente el espécimen, hervir éste varias horas y luego proceder a enfriarlo lentamente antes de registrar su peso saturado o, bien hacer vacío en la cámara donde se tiene sumergida la probeta [11].

#### **Criterios de evaluación.**

En la tabla VII.5 se presentan los criterios de evaluación descritos en el Manual de la Red Durar.

<b>Porosidad</b>	<b>Calidad</b>
≤ 10%	Concreto de buena calidad y compacidad
10% a 15%	Concreto de moderada calidad
> 15 %	Concreto de durabilidad inadecuada

Tabla VII.5 Calidad del concreto en función del porcentaje de porosidad.

## VII.10 Determinación de la profundidad y Localización de la armadura.

### Objetivo.

Definir la ubicación de la armadura embebida en concreto armado y determinar la profundidad de ésta desde la cara exterior del elemento.

### Definiciones.

El recubrimiento, estructuralmente, se refiere al espesor del concreto medido desde la superficie más externa de la armadura principal hasta la cara externa del elemento.

### Equipos y materiales.

- Pacómetro (digital o analógico)
- Regla metálica de 2 m.
- Marcador indeleble.
- Formatos para información en campo.

Para la realización de esta prueba se utilizó un pacómetro digital de la marca CONTROLS (figura VII.16).



Figura VII.14 Equipo utilizado para localización y determinación de la profundidad de la armadura.

### **Procedimiento.**

Antes de iniciar la actividad de campo se debe disponer de los planos definitivos de la estructura, donde se indique con precisión la ubicación de la armadura, los diámetros de las varillas y el espesor del recubrimiento. También es necesario conocer la posición y características de otros elementos metálicos embebidos en el concreto.

*Localización de la armadura.* Se procede a localizar la armadura realizando un barrido rápido con el sensor del pacómetro en sentido perpendicular a la dirección tentativa de la armadura, de manera que el eje mayor del sensor sea paralela a la armadura hasta observar un pivoteo en el indicador del pacómetro.

Después se invierte lentamente el barrido en la misma dirección, hasta encontrar la máxima deflexión de la aguja que indicará la posición del acero. Luego, para la ubicación definitiva de la armadura se hará girar el sensor pivoteándolo con centro en alguno de los extremos, hasta encontrar la deflexión máxima de la aguja, que indicara la dirección correcta de la armadura en el eje del lado mayor del sensor; este deberá marcarse sobre la cara del elemento con un marcador indeleble.

*Determinación de la profundidad de la armadura.* Es importante colocar, previo ajuste del dial, el sensor sobre la barra elegida en los tramos que no interfieran con otros aceros, para concentrar la respuesta magnética sólo en la varilla que se desea determinar su profundidad.

Cada vez que el operador observe que se ha desviado la posición de ajuste, deberá posicionar el pacómetro en posición cero del dial, manteniendo alejado el sensor de la interferencia de cualquier material metálico.

Levantamiento de la información. Cada determinación será registrada en formatos preparados previamente al trabajo de campo, donde se registren todos los parámetros relacionados con la determinación, como por ejemplo;

- Diagrama esquemático del elemento en cuestión, detallando la ubicación de las armaduras.
- Profundidad de la armadura en cada uno de los sitios seleccionados.



El uso de cuadrículas, referenciando como ejes a los aceros, permite el rápido y seguro almacenamiento de información cuando se trata de amplias superficies de trabajo. Este método resulta muy útil cuando se deben realizar mediciones electroquímicas y de toma muestras posteriores.

### **VII.11 Medición de potenciales.**

#### **Objetivo.**

Medir el potencial de la armadura del concreto mediante el uso de electrodos de referencia.

#### **Definiciones.**

Potencial electroquímico. Es el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto.

Mapa de potenciales. Son líneas de isopotencial que se dibujan sobre la superficie con la finalidad de establecer el área de cambio de potencial.

#### **Equipos y materiales.**

- Brocha, cepillo, lima y herramientas para la limpieza de la superficie.
- Cables y conectores.
- Esponja plana, agua potable para humedecer la superficie, etc.
- Electrodo de referencia apropiado Ej:  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$
- Voltímetro de alta impedancia.

#### **Procedimiento.**

Seleccionada la superficie a evaluar debe tenerse libre acceso a una sección del acero de refuerzo del concreto. En caso de no existir, deberá perforarse la estructura hasta descubrir el acero de refuerzo, una vez localizado. Deberá haber garantía de continuidad eléctrica del acero al momento de efectuar las mediciones.

Se deberá limpiar la superficie seleccionada, así como la superficie del acero expuesto. Una vez localizada la distribución del acero de refuerzo, trazar sobre la superficie del concreto unas cuadrículas múltiples con espaciamiento entre nodos uniformes. El espaciamiento seleccionado dependerá de la rigurosidad de la inspección y de la ubicación del refuerzo.



Efectuar la conexión del electrodo de referencia (Ej:  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), al negativo del voltímetro. El acero de refuerzo se conecta al positivo del voltímetro, como se indica en la figura VII.17.

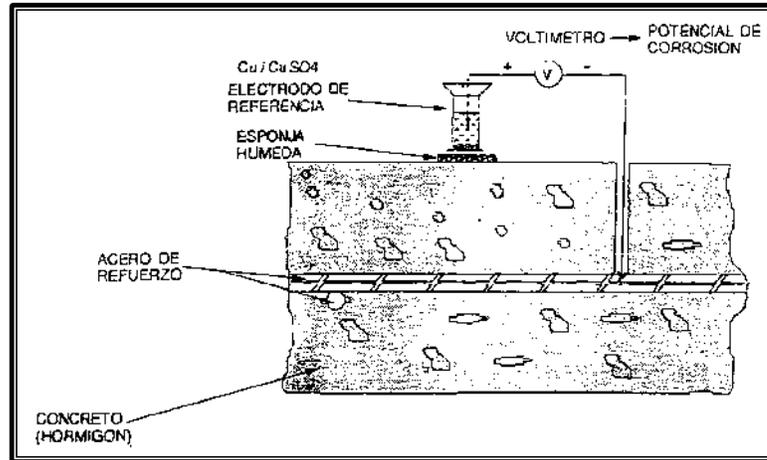


Figura VII.15 Esquema de la medición de potenciales de la armadura [11].

Los nodos de la cuadrícula serán los puntos de referencia para la ubicación del electrodo para realizar la medición. En estos puntos se colocará sobre la superficie del concreto una esponja delgada, previamente humedecida para mejorar el contacto electrodo-concreto. Colocar el electrodo sobre la esponja y registrar la medida.

Para dicha medición se utilizó un voltímetro de alta impedancia interna, modelo Miller LC-4, así como un electrodo de referencia del tipo  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  (figura VII.18).

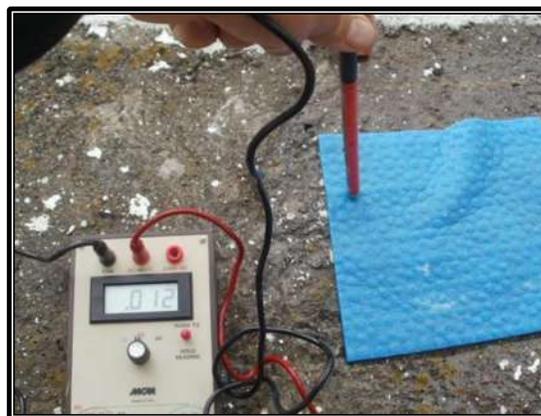


Figura VII.16 Equipo utilizado para la medición de potenciales

### Criterios de evaluación.

Las medidas de potencial informan sobre la probabilidad de corrosión de la acero de refuerzo de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados a la luz de la información disponible sobre las condiciones de humedad, contaminación, calidad del concreto, etc [11].

La Norma ASTM C-876-91 (Reapproved 1999); Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in concrete; ofrece las condiciones y riesgos asociados a valores de potencial tomando en cuenta el uso de un electrodo de referencia del tipo Cu/CuSO<sub>4</sub> (cobre, sulfato de cobre), y son los siguientes:

- Si los potenciales sobre un área son más positivos que -0.20 V, existe una probabilidad mayor al 90 % de que no existe corrosión del acero de refuerzo en esa área al momento de la medición de potenciales.
- Si los potenciales sobre un área son más negativos que -0.35 V, existe una probabilidad mayor al 90 % de que existe corrosión del acero de refuerzo en esa área al momento de la medición de potenciales.

El manual de la Red Durar tomando en cuenta el uso de un electrodo de referencia del tipo Cu/CuSO<sub>4</sub>, nos ofrece el criterio de evaluación mostrado en la tabla VII.6.

CONDICIÓN	POTENCIAL (E)	OBSERVACIONES	RIESGO DE DAÑO
Estado pasivo	+ 0,200 a - 0,200	Ausencia de Cl <sup>-</sup> pH > 12,5 H <sub>2</sub> O (HR↑)	Despreciable
Corrosión Localizada	- 0,200 a - 0,600	Cl <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (HR↑)	Alto
Corrosión Uniforme	-0,150 a - 0,600	Carbonatado O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Moderado Alto
	+ 0,200 a - 0,150  -0,400 a - 0,600	Carbonatado O <sub>2</sub> , Seco, (HR↓)  Cl <sup>-</sup> Elevado, H <sub>2</sub> O ó Carbonatado H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Bajo Alto
Corrosión Uniforme	< - 0,600	↑ Cl <sup>-</sup> , ↑ H <sub>2</sub> O (sin O <sub>2</sub> )	Despreciable

Tabla VII.6 Criterio de valoración de potenciales del acero en concreto vs Cu/CuSO<sub>4</sub>.



## VII.12 Velocidad de corrosión.

### Objetivo.

Determinar la velocidad a la cual la armadura pierde sección, por corrosión de la misma.

### Definiciones.

Se llama velocidad o intensidad de corrosión ( $i_{corr}$ ) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son  $g/cm^2$  día, aunque la forma usual de definirla a partir de medidas de tipo electroquímico es en  $\mu A/cm^2$  o, transformando este dato a partir de la densidad del metal, en unidades de penetración (mm/año) mediante la ley de Faraday [11].

$$\frac{\mu A}{cm^2} = \frac{M}{\delta n \cdot F} * \frac{\mu A}{cm^2} = 11.58 \frac{\mu m}{año}$$

Donde:

M = Masa atómica del metal

N= No. De electrones transferidos

F = Constante de Faraday (96,500 coulombios)

$\delta$  = Densidad del metal.

### Equipos y materiales.

- Potenciostato / galvanostato
- Computador
- Sensor conteniendo electrodos
- Esponjas, cables, agua, electrodos

Para esta prueba se utilizó el equipo GECOR 8 (figura VII.19) el cual usa un sensor que contiene un electrodo de guarda monitorizando, este procedimiento confina el campo eléctrico de una determinada superficie (figura VII.20).





Figura VII.17 Equipo utilizado durante la prueba de medición de velocidad de corrosión.

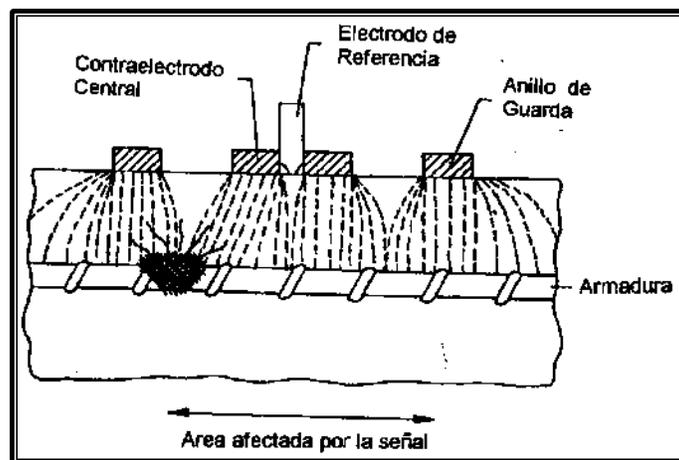


Figura VII.18 Campo eléctrico confinado.

### Procedimiento.

En el área seleccionada, se realiza una perforación para hacer contacto con la armadura y se sitúa el sensor sobre la superficie del concreto a través de una esponja y otro medio que asegure un buen contacto (figura VII.21). Debido a la variabilidad propia de las medidas de corrosión, se deben adoptar criterios estadísticos de muestreo para tener un valor medio, o al menos detectar las zonas de mayor corrosión. Los criterios de muestreo se adoptan de forma similar a otros tipos de ensayo, después de haber efectuado el levantamiento de daños de la estructura y la localización correspondiente de la armadura. Como además la  $i_{corr}$  varía con el grado de humedad del concreto y la temperatura, es conveniente realizar, al menos tres medidas a lo largo de un año, con el fin de caracterizar la influencia de las distintas variaciones estacionales.



Figura VII.19 Colocación del equipo necesario para la medida de velocidad de corrosión.

### Criterios de evaluación.

Una clasificación de los valores de  $i_{\text{corr}}$  en términos de nivel de corrosión es la que se presenta en la tabla VII.7.

$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 a 0.5	Moderado
0.5 a 1.0	Elevada
> 1.0	Muy elevada

Tabla VII.7 Clasificación de los valores de  $i_{\text{corr}}$ .

Armaduras que se corroen a  $0.1 - 0.2 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  produciendo óxidos expansivos provocarán en 10-20 años la fisuración del recubrimiento. Valores de  $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , la producirán en 1-2 años. Todos estos valores se basan en considerar corrosión generalizada. Cuando la corrosión es localizada se calcula la penetración local máxima del ataque, multiplicando por 10 el valor medido. Así, para un valor de  $i_{\text{corr}}$  de  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ( $3\mu\text{m}/\text{año}$  de penetración homogénea) se puede calcular que en caso de ataque localizado, la máxima profundidad de picaduras será de  $30 \mu\text{m}/\text{año}$ .

Los valores de velocidad de corrosión se pueden utilizar también para estimar la pérdida de capacidad portante estructural [11].

### VIII. RESULTADOS.

Las pruebas realizadas ya se han descrito, en el presente capítulo se muestran: en primer instancia los elementos y el lugar donde se efectuaron las pruebas y posteriormente se muestran los resultados obtenidos.

Para la mejor interpretación de resultados es necesaria la identificación de los elementos en estudio mediante nomenclatura sencilla, en las figuras VIII.1 a VIII.4 y la tabla VIII.1 se presenta la nomenclatura utilizada para el presente estudio.

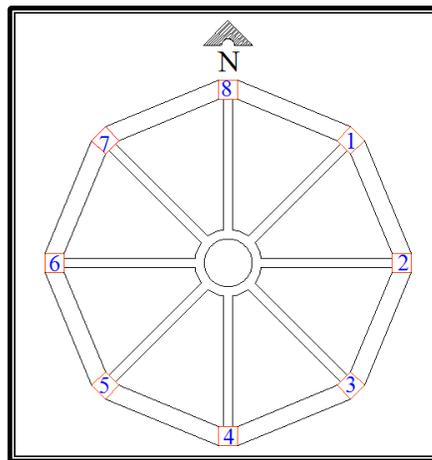


Figura VIII.1 Croquis de la estructura (vista en planta). Nomenclatura de columnas (1,2...8) y traveses (1-2, 2-3...8-1).

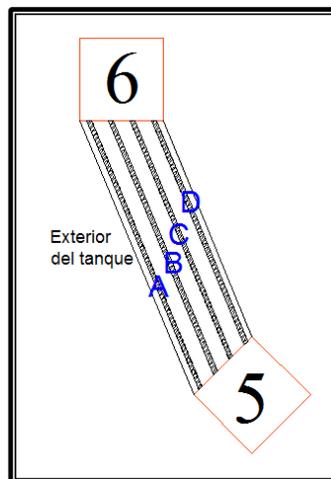


Figura VIII.2 Nomenclatura utilizada para las varillas en traveses

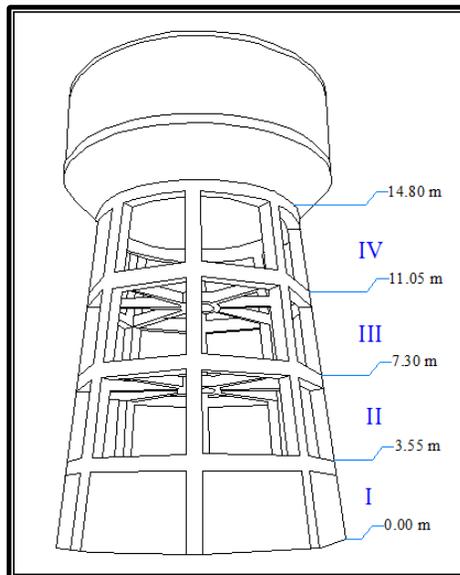


Figura VIII.3 Croquis de la estructura (vista de perfil). Nomenclatura de niveles en trabes y columnas.

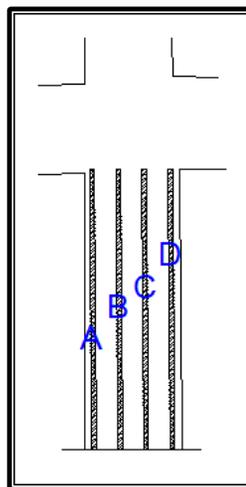


Figura VIII.4 Nomenclatura utilizada para las varillas en columnas.

ESPÉCIMEN	ELEMENTO
1	COLUMNA 7-I
2	COLUMNA 3-I
3	COLUMNA 2-I
4	COLUMNA 8-I
5	COLUMNA 6-I

Tabla VIII.1 Nomenclatura de núcleos extraídos.

### VIII.1 Inspección visual general del tanque elevado.

Fue la primera de las actividades realizadas y se efectuó en toda la estructura, tiene la finalidad de identificar las zonas con mayores daños asimismo el daño más frecuente.

Para la tipificación de daños se usó la nomenclatura de acuerdo a la tabla VIII.2.

CODIGO	DAÑO
A1	Grietas o fisuras
A2	Red de grietas
B3	Manchas de óxido
B4	Manchas de humedad
C2	Concreto fofo
C3	Delaminación
C4	Intemperismo
D2	Nidos de abeja (Cangrejera)
E1	Junta de construcción
F1	Cimbra muy marcada, sin acero espuesto

Tabla VIII.2 Clasificación simplificada de daños.

A continuación se presenta el registro fotográfico con la tipificación de daños de los elementos en el lado exterior de la estructura.

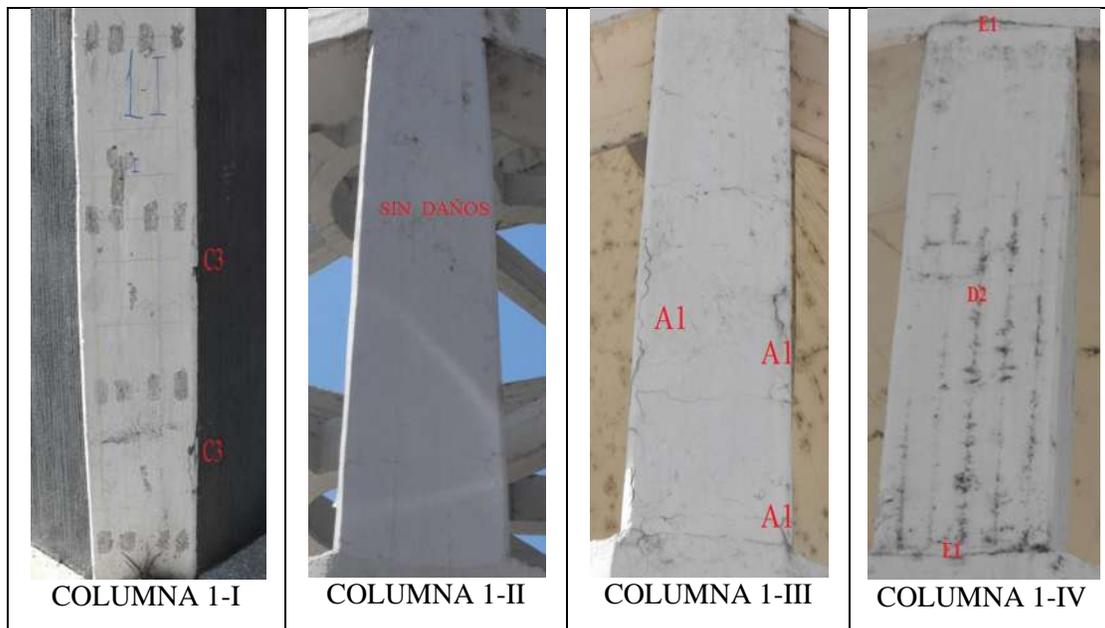


Tabla VIII.3 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 1.

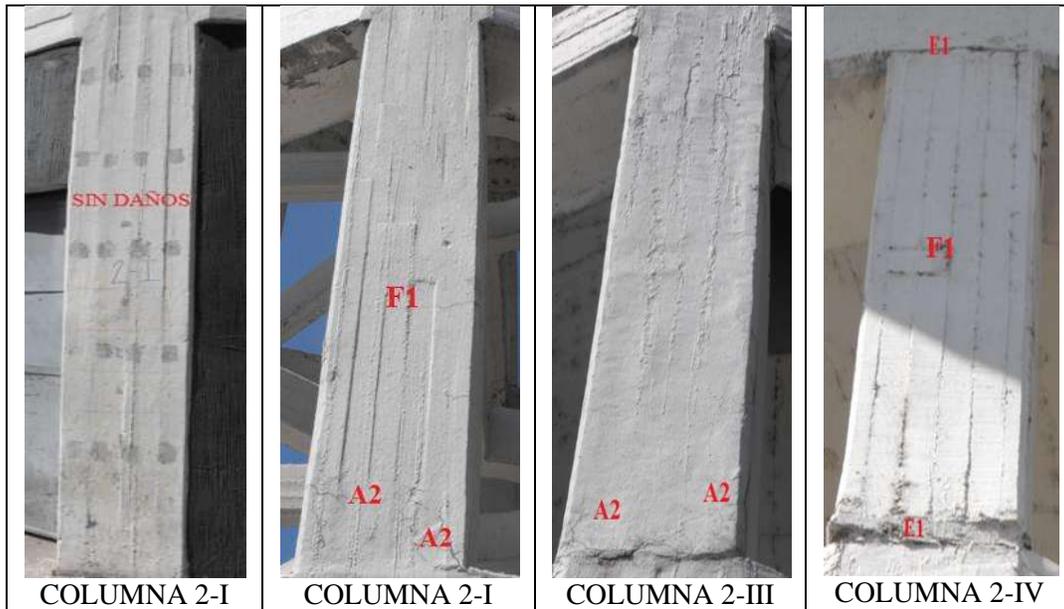


Tabla VIII.4 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 2.

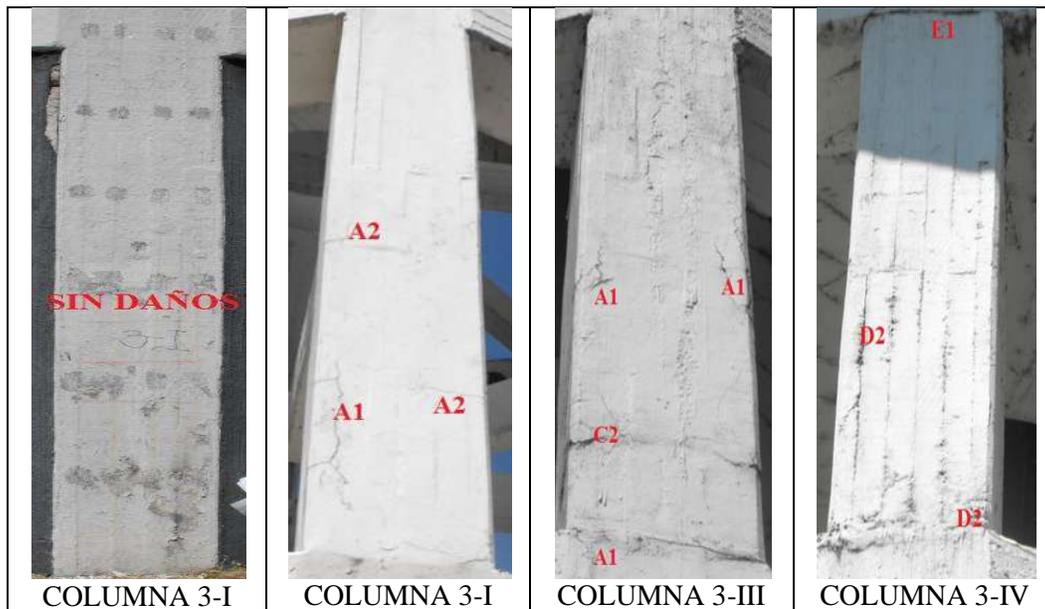


Tabla VIII.5 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 3.

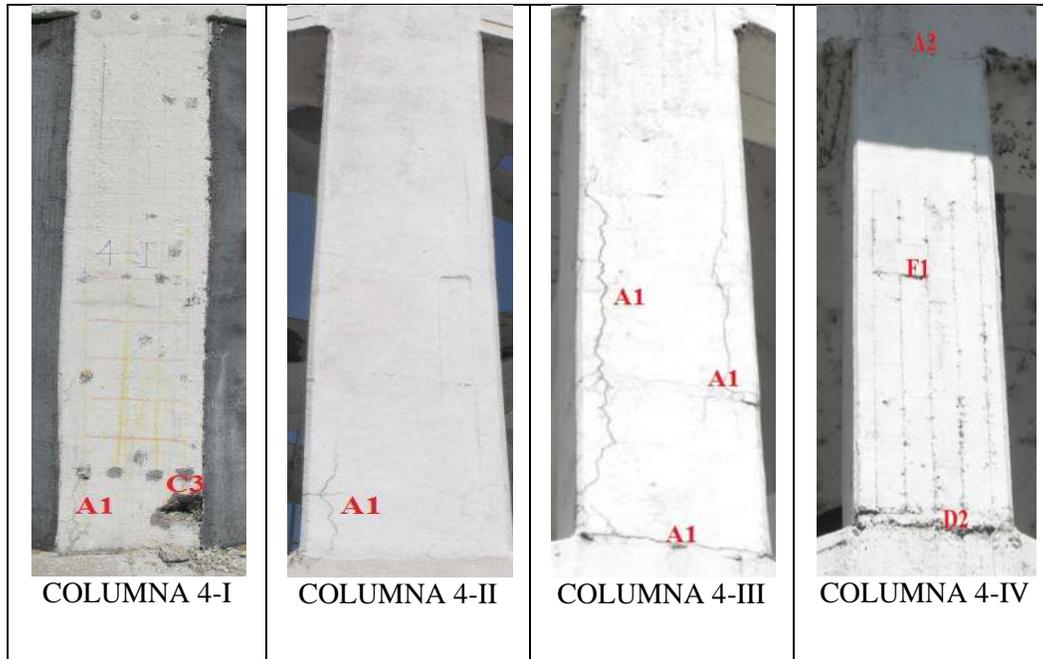


Tabla VIII.6 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 4.

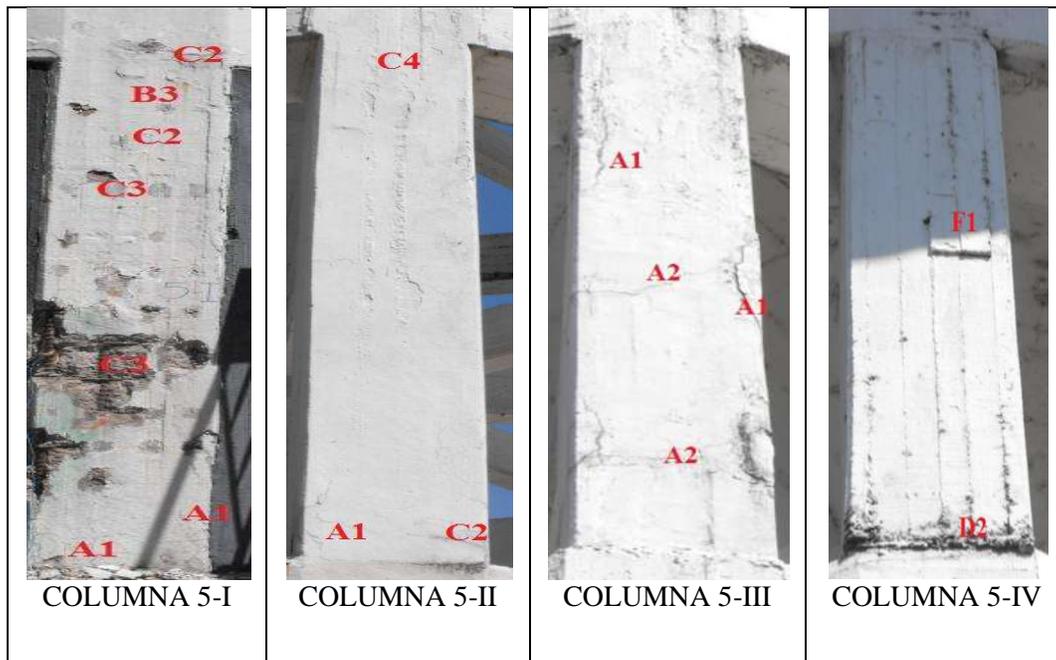


Tabla VIII.7 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 5.

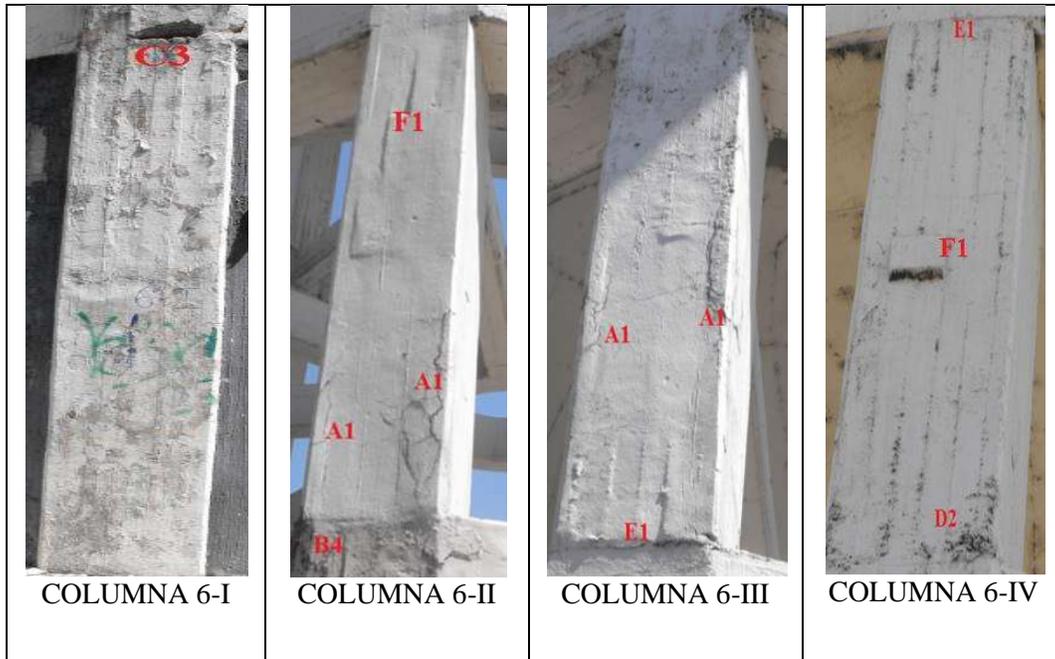


Tabla VIII.8 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 6.

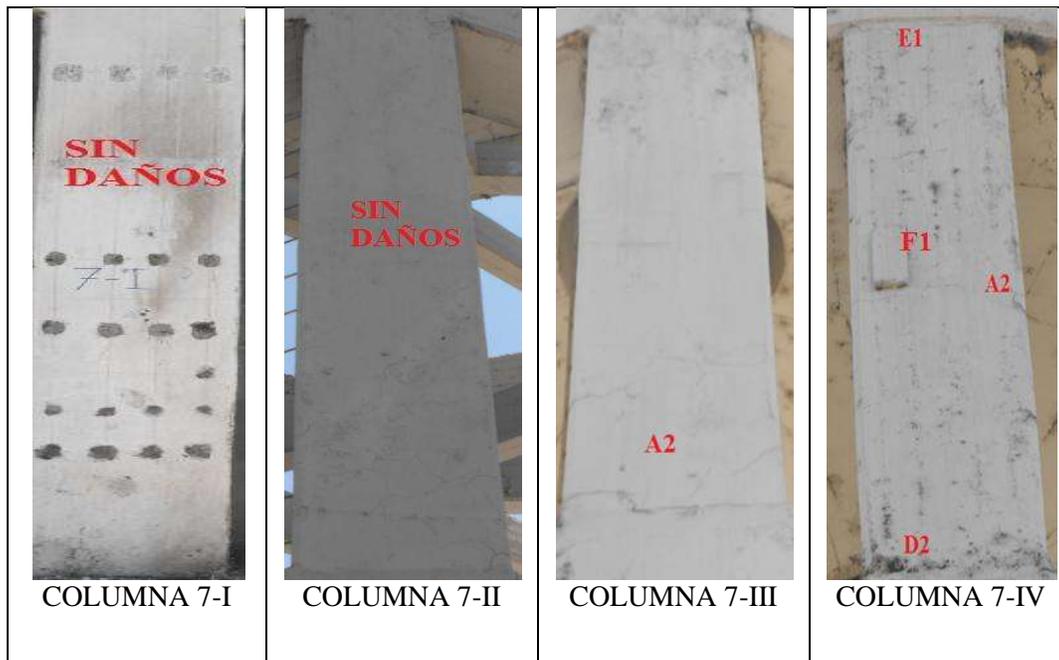


Tabla VIII.9 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 7.

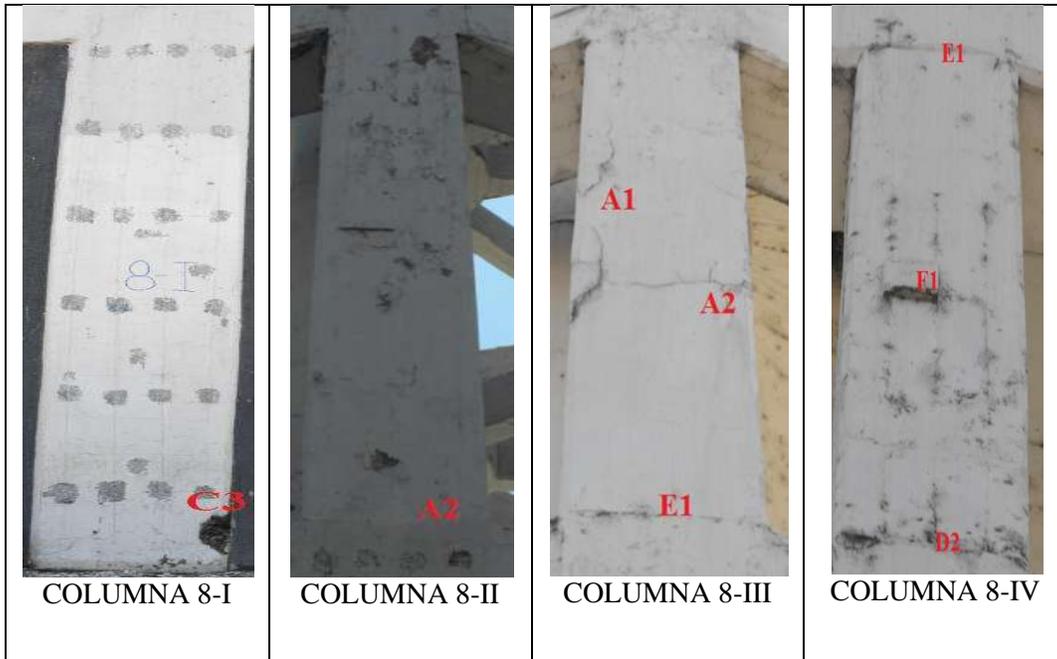


Tabla VIII.10 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la columna 8.

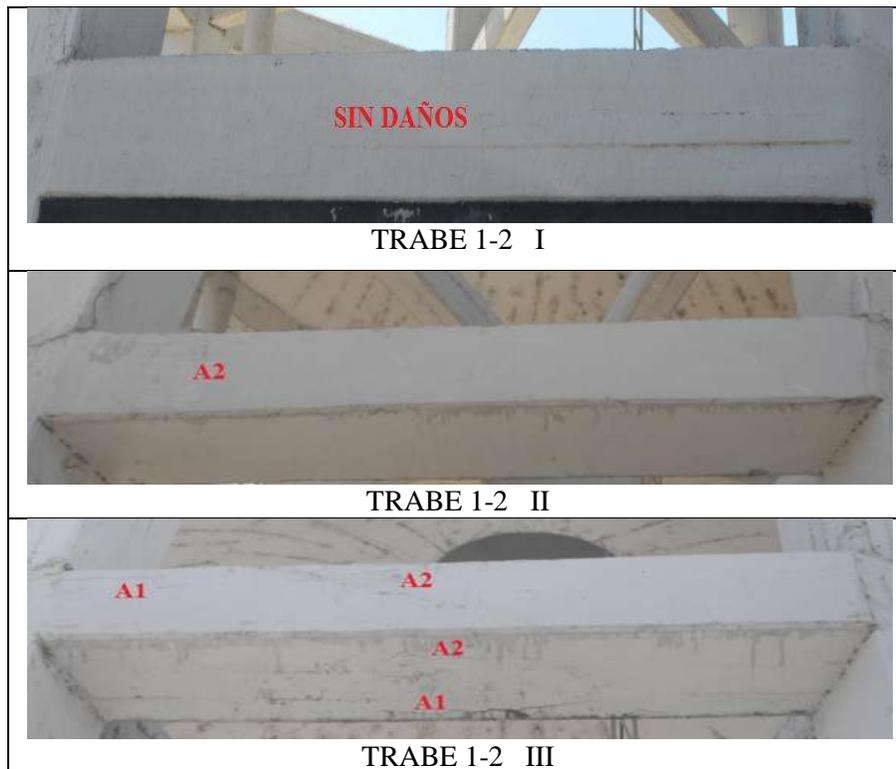




Tabla VIII.11 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 1-2

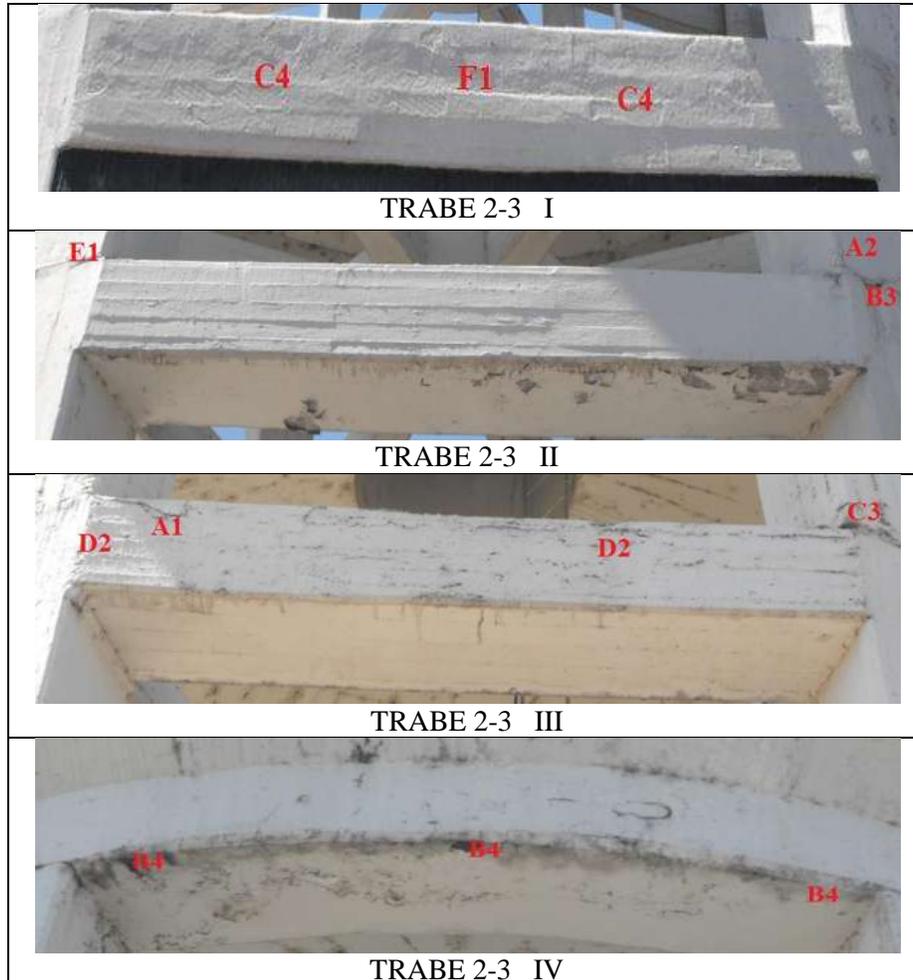


Tabla VIII.12 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 2-3.

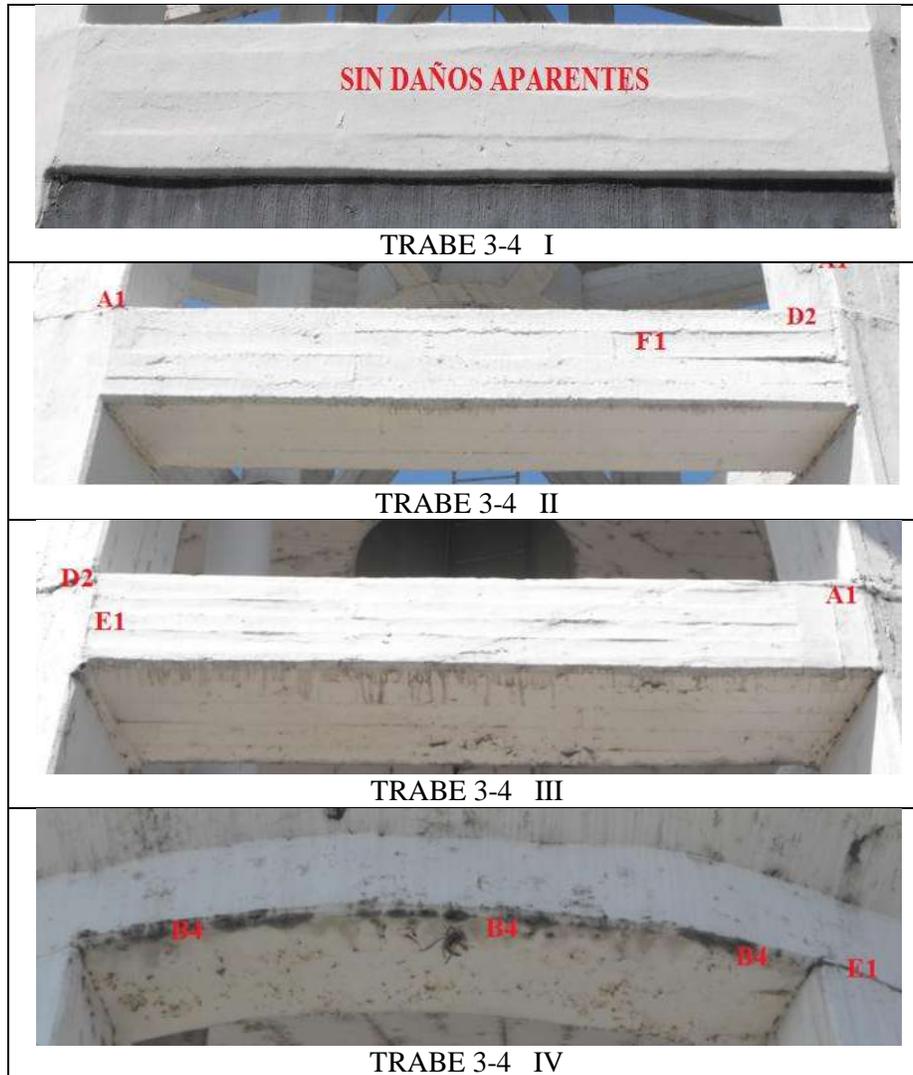


Tabla VIII.13 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 3-4.



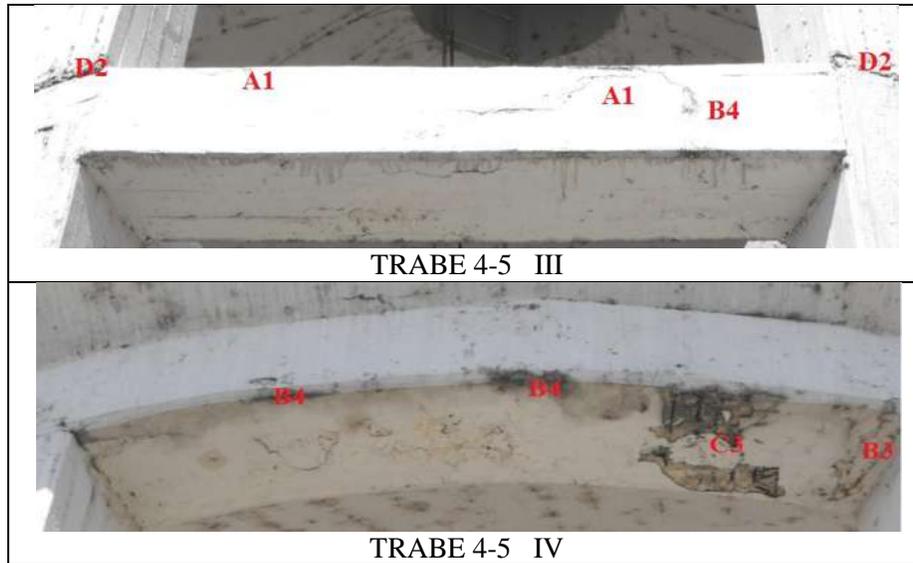


Tabla VIII.14 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 4-5.

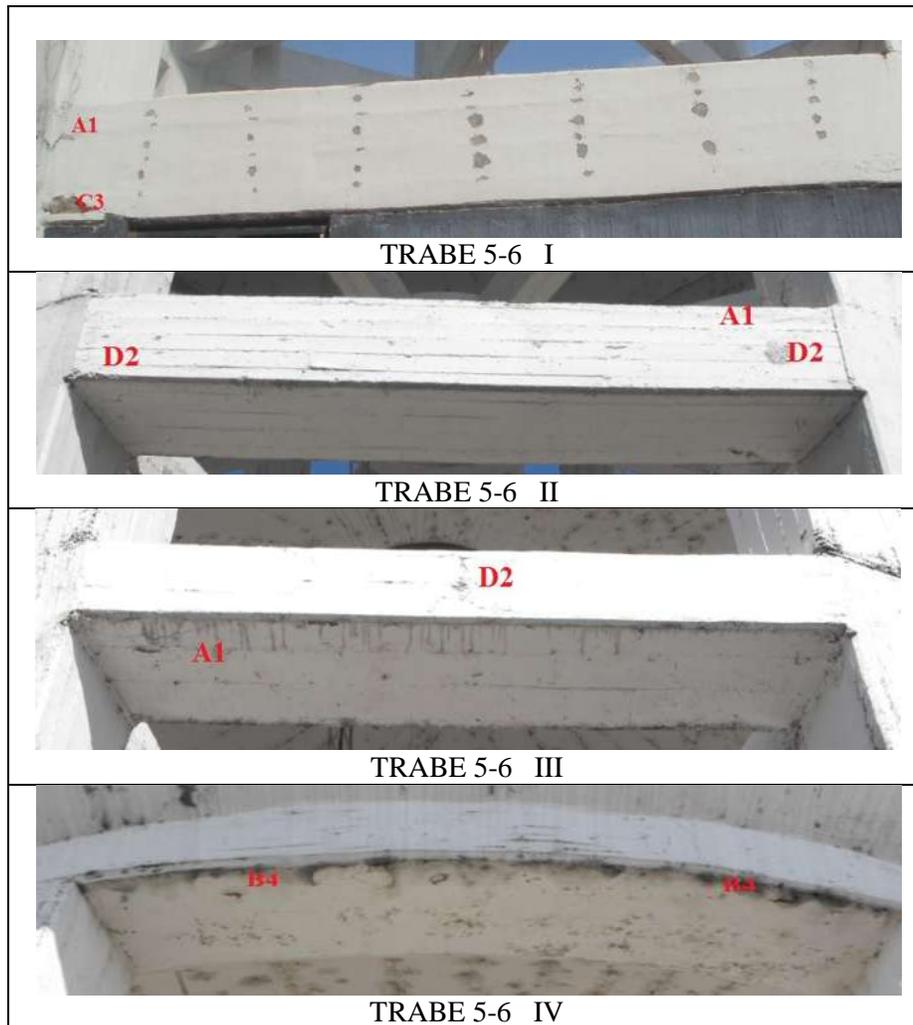


Tabla VIII.15 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 5-6.

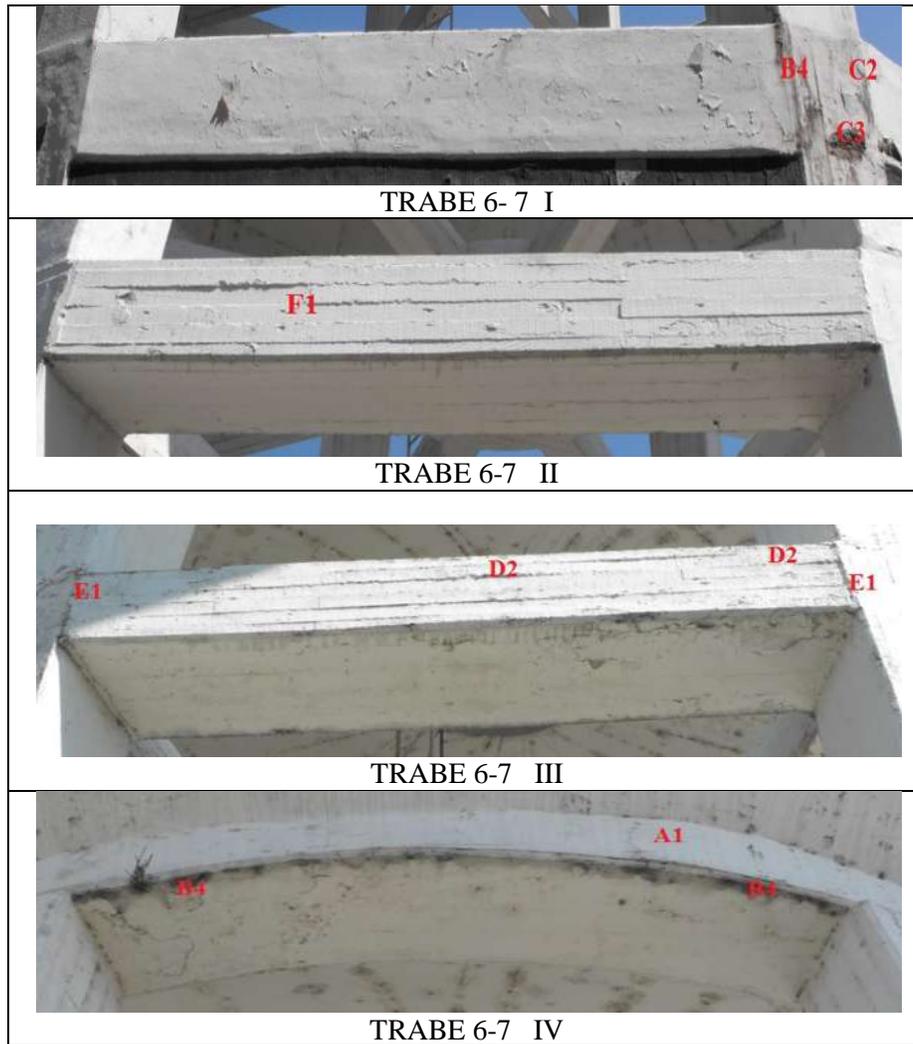
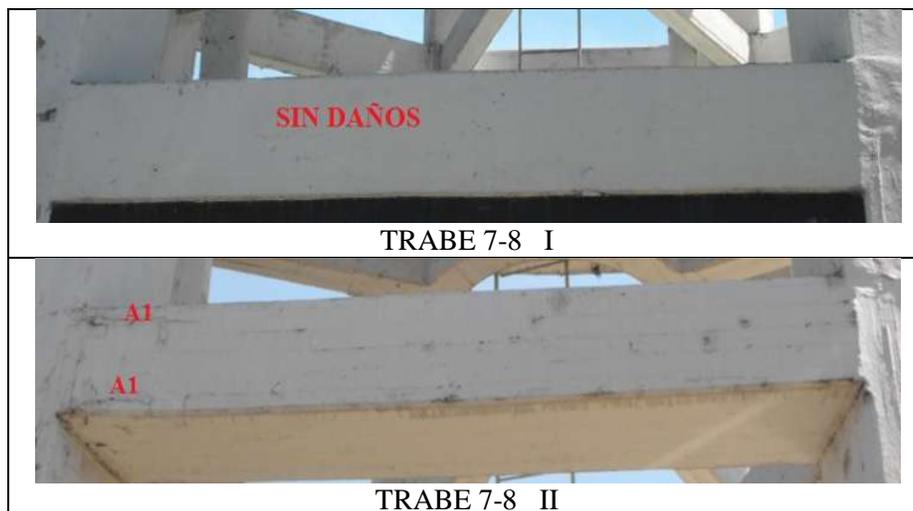


Tabla VIII.16 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 6-7.



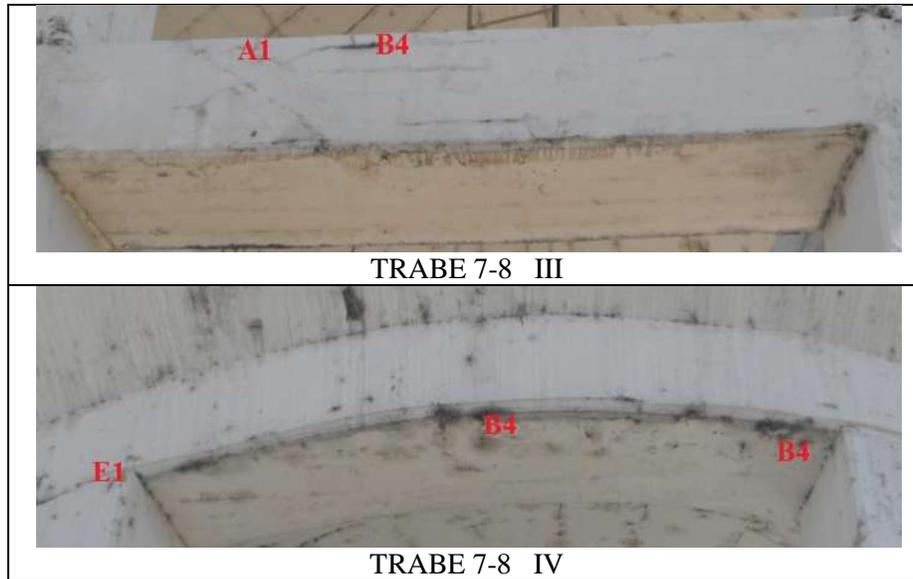
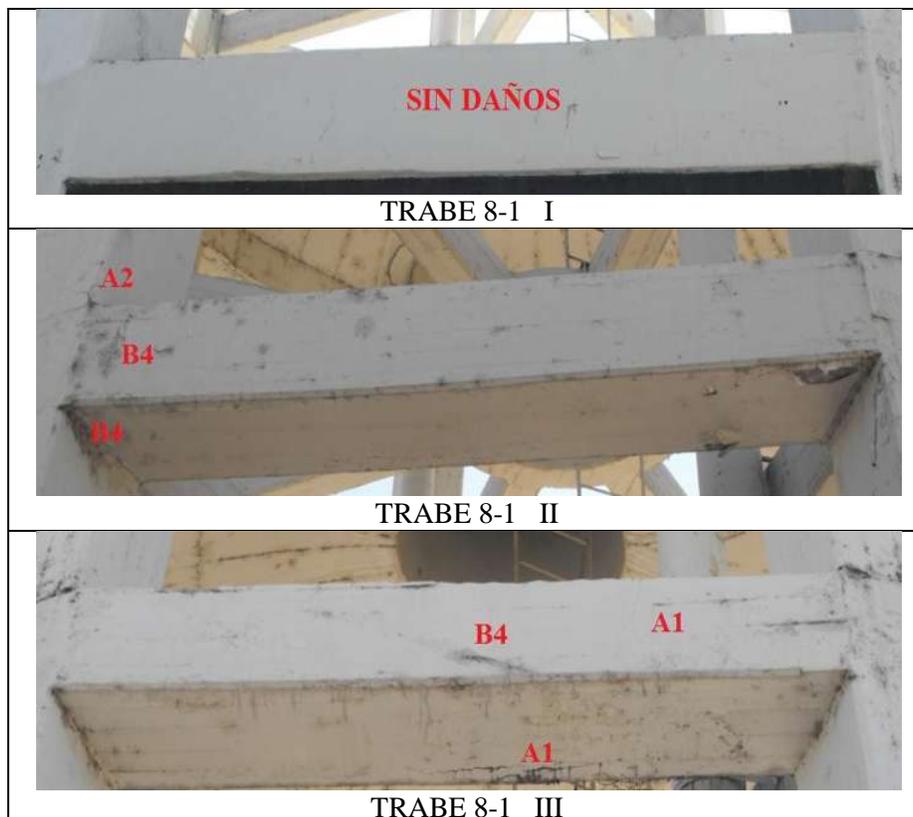


Tabla VIII.17 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 7-8.



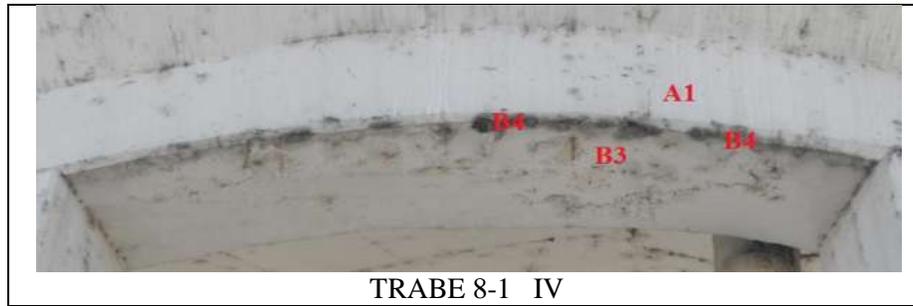


Tabla VIII.18 Registro fotográfico del exterior del tanque, a la trabe 8-1.

Enseguida se presentan los daños en el lado interior de las columnas; que para simplificar, sólo se presentan los elementos con daños mayores.

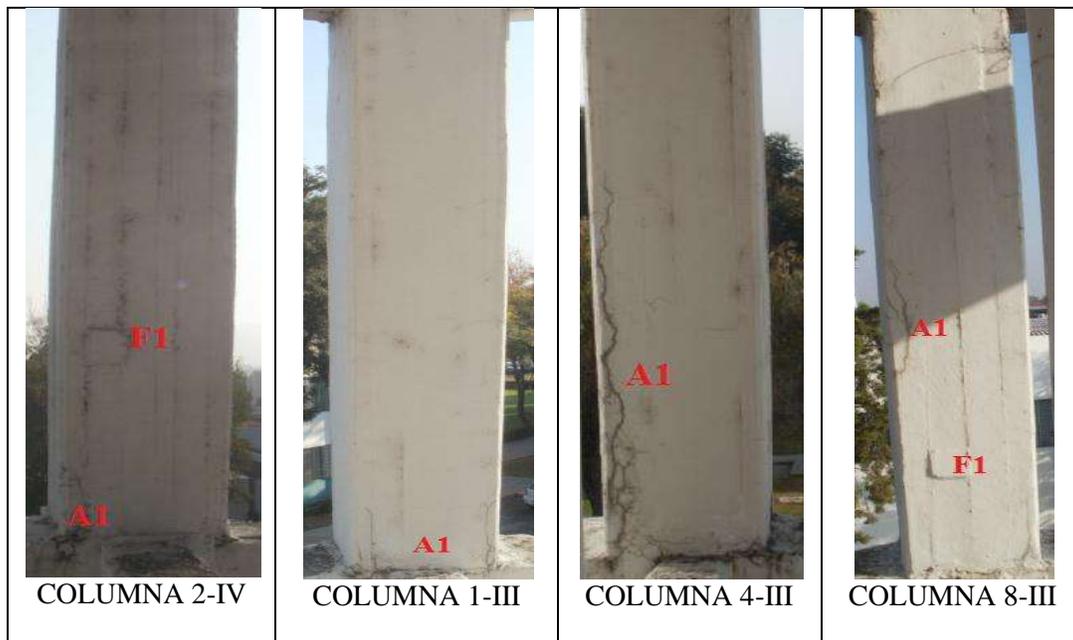


Tabla VIII.19 Registro fotográfico del interior de las columnas del tanque, con mayores daños.

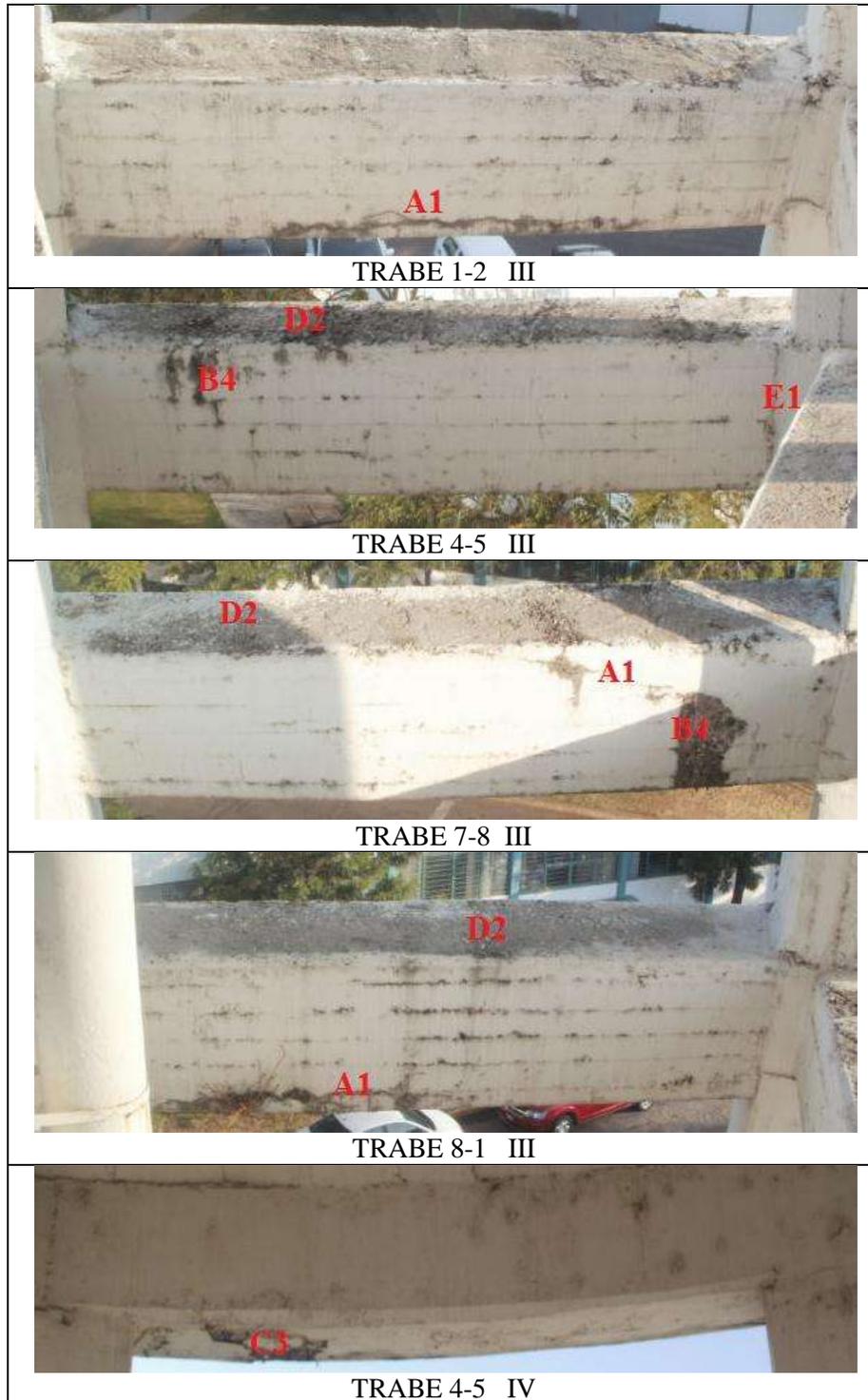


Tabla VIII.20 Registro fotográfico del interior de las trabes del tanque, con mayores daños.

## VIII.2 Profundidad de carbonatación.

Esta prueba se realizó a los núcleos extraídos inmediatamente después de que éstos fueron extraídos de la estructura. Los resultados obtenidos son los siguientes.

Espécimen 2			COL. 3-I		
Esesor carbonatado $X_{CO_2}$ (mm)	Esesor Rec. $e_c$ (mm)	Edad del concreto (años)	Constante de carbonatación $K_{CO_2}$ (mm/año <sup>1/2</sup> )	Rec. propuesto (mm)	Predicción (años)
7.32	32	36	1.220	0	0
				10	67
				20	269
				30	605
				32	688

Tabla VIII.21 Profundidad de carbonatación en columna 3-I.

Espécimen 3			COL. 2-I		
Esesor carbonatado $X_{CO_2}$ (mm)	Esesor Rec. $e_c$ (mm)	Edad del concreto (años)	Constante de carbonatación $K_{CO_2}$ (mm/año <sup>1/2</sup> )	Rec. propuesto (mm)	Predicción (años)
7.43	37	36	1.238	0	0
				10	65
				20	261
				30	587
				37	893

Tabla VIII.22 Profundidad de carbonatación en columna 2-I.

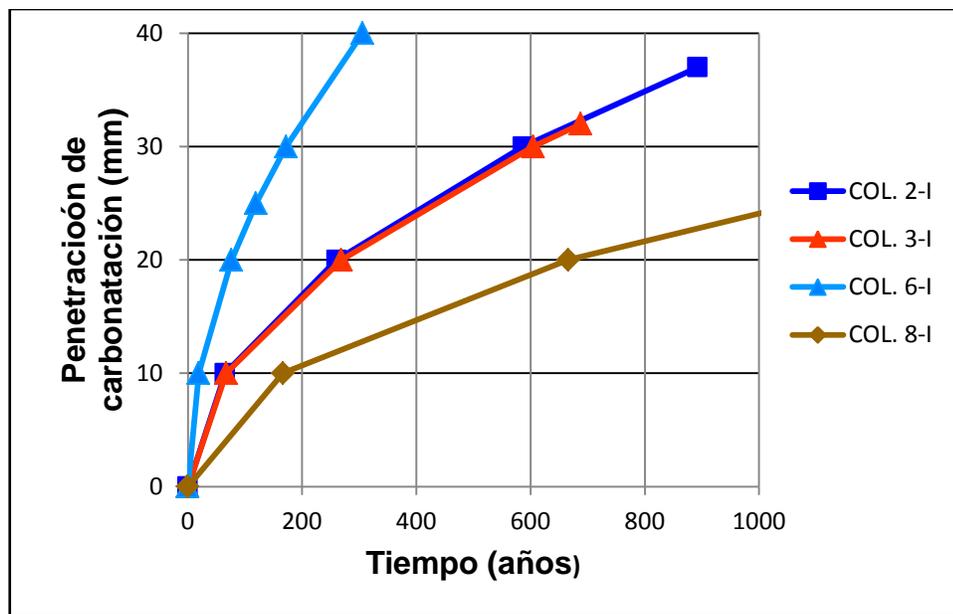
Espécimen 4			COL. 8-I		
Esesor carbonatado $X_{CO_2}$ (mm)	Esesor Rec. $e_c$ (mm)	Edad del concreto (años)	Constante de carbonatación $K_{CO_2}$ (mm/año <sup>1/2</sup> )	Rec. propuesto (mm)	Predicción (años)
4.65	29	36	0.775	0	0
				10	166
				20	666
				29	1400
				30	1498

Tabla VIII.23 Profundidad de carbonatación en columna 8-I.



Espécimen 5			COL. 6-I		
Espesor carbonatado $X_{CO_2}$ (mm)	Espesor Rec. $e_c$ (mm)	Edad del concreto (años)	Constante de carbonatación $K_{CO_2}$ (mm/año <sup>1/2</sup> )	Rec. propuesto (mm)	Predicción (años)
13.72	25	36	2.286	0	0
				10	19
				20	76
				<b>25</b>	<b>120</b>
				30	172

Tabla VIII.24 Profundidad de carbonatación en columna 6-I.



Gráfica VIII.1 Determinación del tiempo necesario para que la carbonatación alcance la armadura.

### VIII.3 Resistividad eléctrica

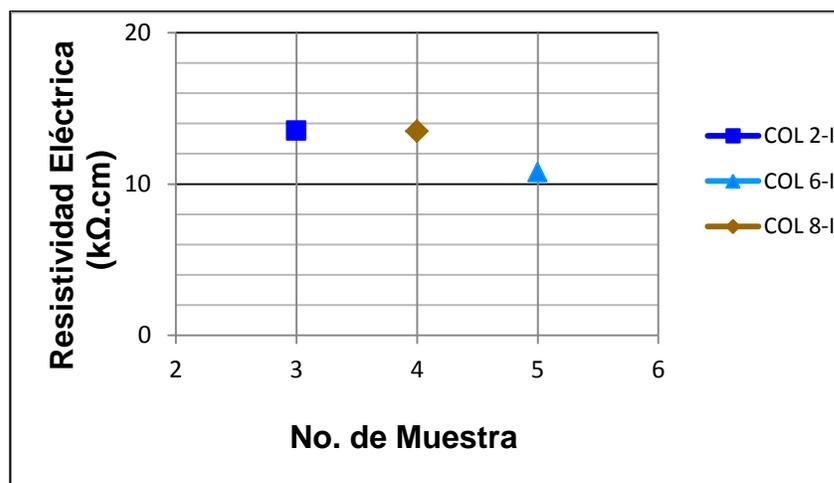
La prueba de Resistividad eléctrica se efectuó en el laboratorio de acuerdo al procedimiento descrito, y se realizó en los núcleos extraídos del tanque elevado, los cuales fueron saturados en agua por 24 h.



Los resultados obtenidos son los siguientes:

No. Espécimen	Elemento	Diámetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Longitud (cm)	Re kΩ	ρ kΩ.cm
3	COL. 2-I	9.45	70.14	20.2	3.9	13.54
4	COL. 8-I	9.44	69.99	10.9	2.1	13.48
5	COL. 6-I	9.48	70.58	19.0	2.9	10.77

Tabla VIII.25 Resultados de la prueba de Resistividad eléctrica.



Gráfica VIII.2 Resultados de la prueba de Resistividad eléctrica.

El equipo GECOR 8 utilizado para medir la velocidad de corrosión también mide la resistencia del concreto, la cual permite determinar la resistividad eléctrica con la fórmula:  $\rho = R_e \left(\frac{A}{L}\right)$

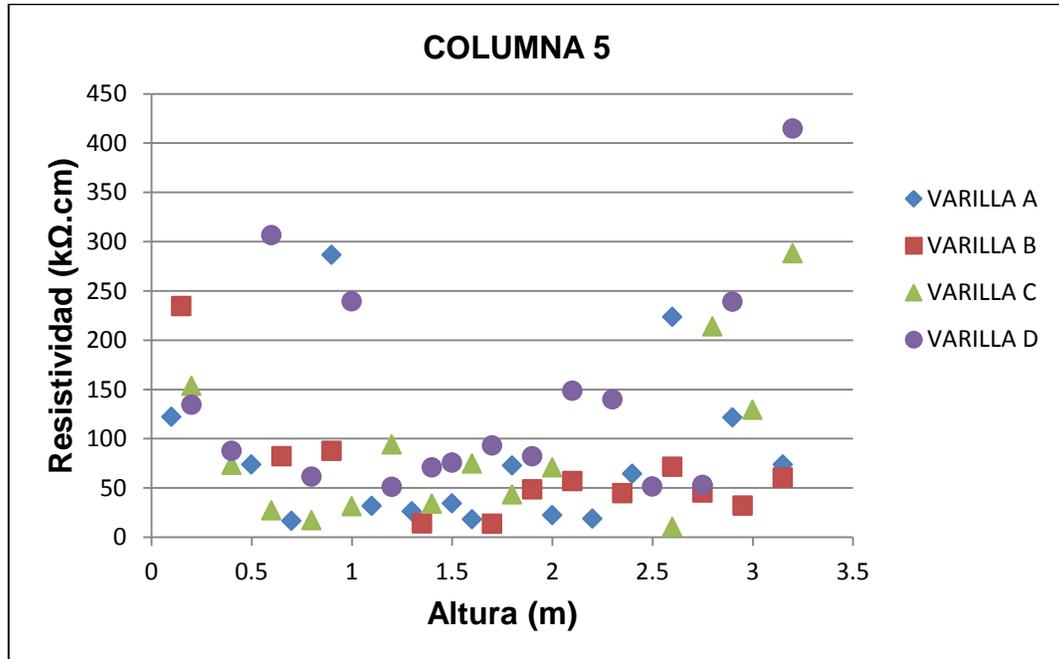
Donde:

A = Área afectada por la señal del sensor

L = Longitud de la varilla bajo el sensor del GECOR 8

Los resultados obtenidos de la columna 5-I se muestran a continuación.





Gráfica VIII.3 Resistividad eléctrica Vs Altura en columna 5-I.

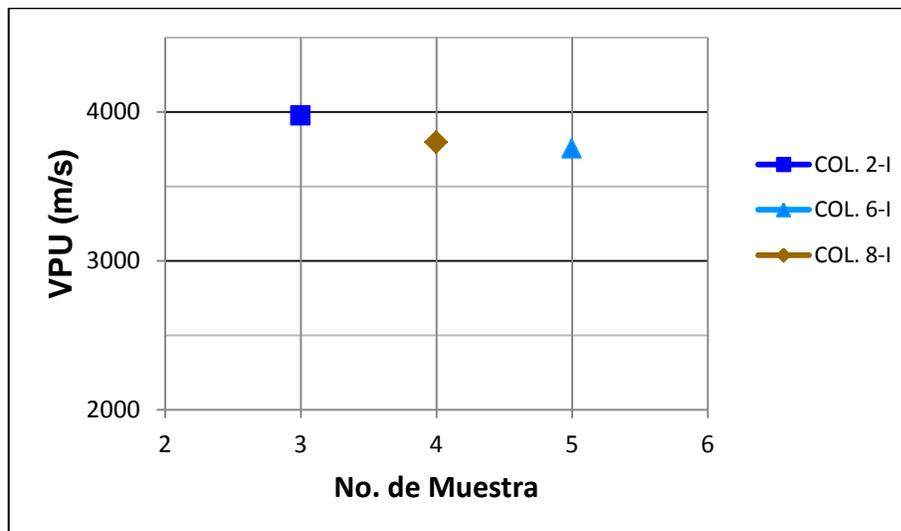
#### VIII.4 Velocidad de pulso ultrasónico.

Esta prueba se efectuó en el laboratorio de acuerdo al procedimiento anteriormente descrito, y se realizó en los núcleos extraídos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

No. Espécimen	Elemento	Longitud (cm)	Tiempo (μs)	VPU (m/s)
3	COL. 2-I	20.20	50.80	3976.38
4	COL. 8-I	10.90	28.71	3796.59
5	COL. 6-I	19.00	50.61	3754.20

Tabla VIII.26 Resultados de la prueba de Velocidad de pulso.





Gráfica VIII.4 Resultados de la prueba de Velocidad de pulso.

Para la prueba de velocidad de pulso combinada se utilizaron los especímenes que posteriormente se utilizarían para hacer la prueba de Módulo de elasticidad estático con la finalidad de comparar los resultados.

Los resultados son los siguientes:

No. Espécimen	Elemento	VPU (m/s)	Índice Esclerométrico	Desv. Est. del IE	Factor	f 'c (kg/cm <sup>2</sup> )
3	COL. 2-I	3821	36.7	3.20	0.70	290
5	COL. 8-I	3619	32.5	2.70	0.70	293

Tabla VIII.27 Resultados de la prueba de velocidad de pulso combinada.

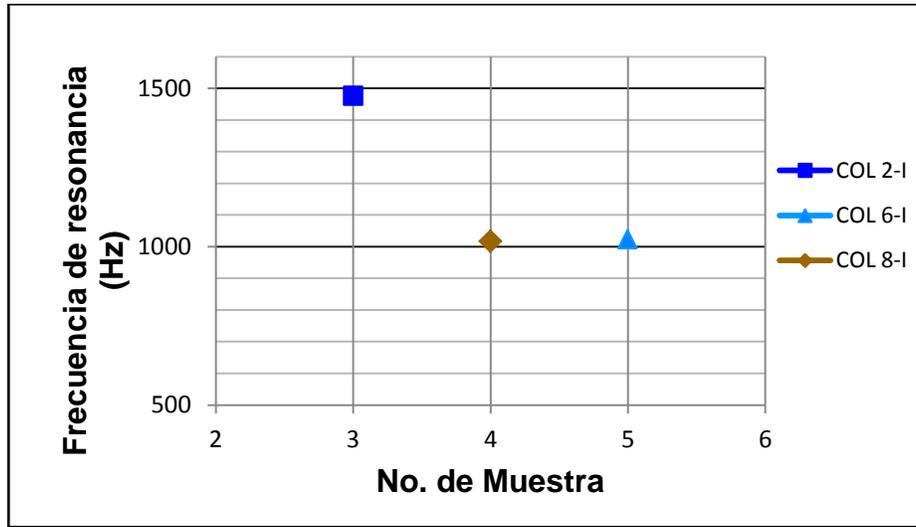
### VIII.5 Frecuencia de resonancia.

Los resultados de esta prueba se muestran a continuación.

No. Espécimen	Elemento	Frecuencia Hz
3	COL 2-I	1477
4	COL 8-I	1018
5	COL 6-I	1024

Tabla VIII.28 Resultados de la prueba de Frecuencia de resonancia.

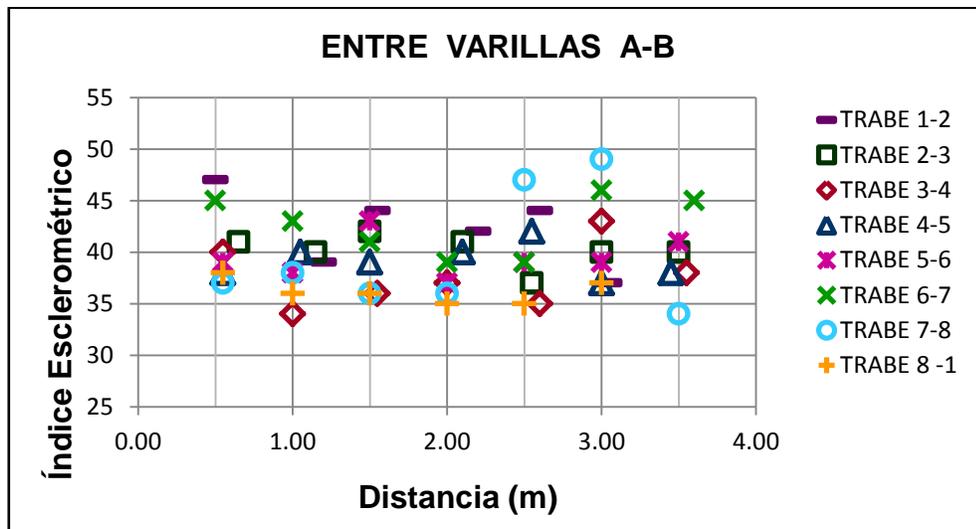




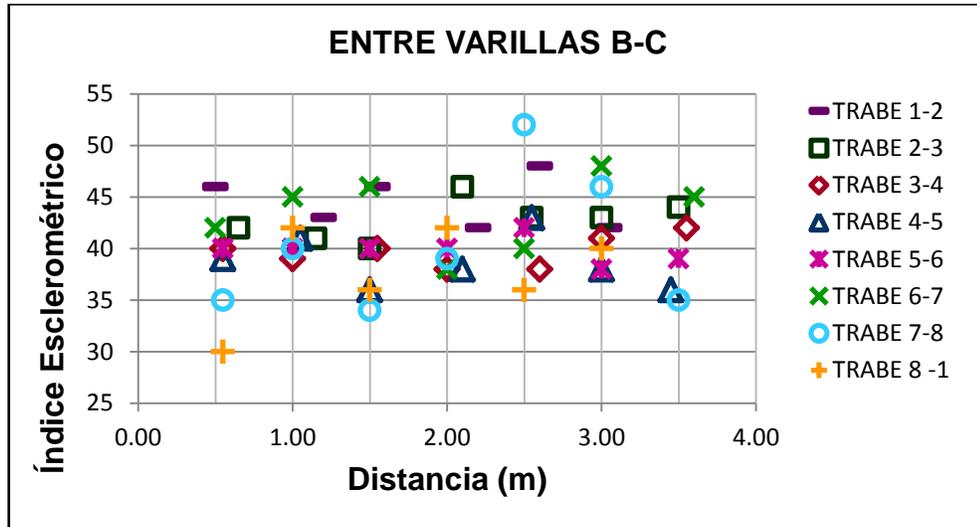
Gráfica VIII.5 Resultados de la prueba de Frecuencia de resonancia.

### VIII.6 Esclerometría.

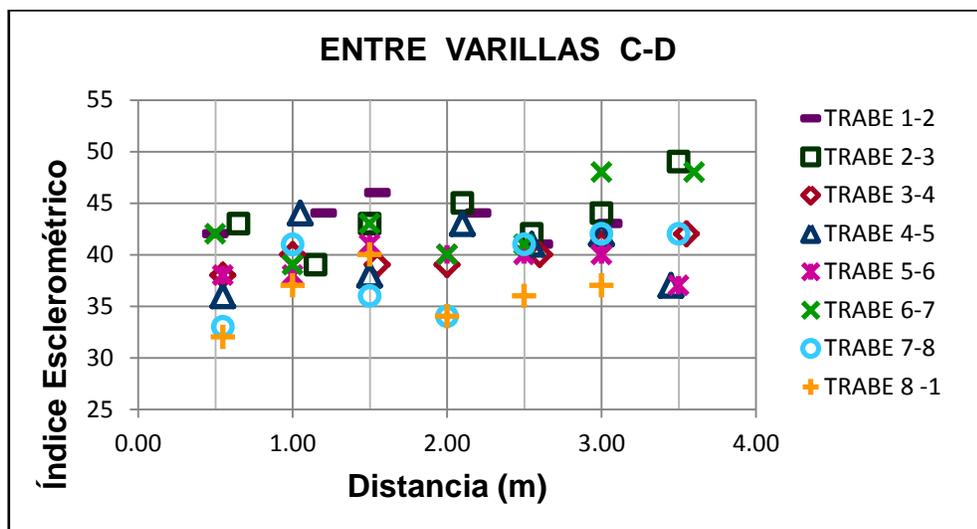
Esta prueba se realizó en el concreto de traveses y columnas del nivel I, tomando un promedio de 10 lecturas en cada espacio entre varillas a cada 50 cm aproximadamente. Los resultados son los siguientes:



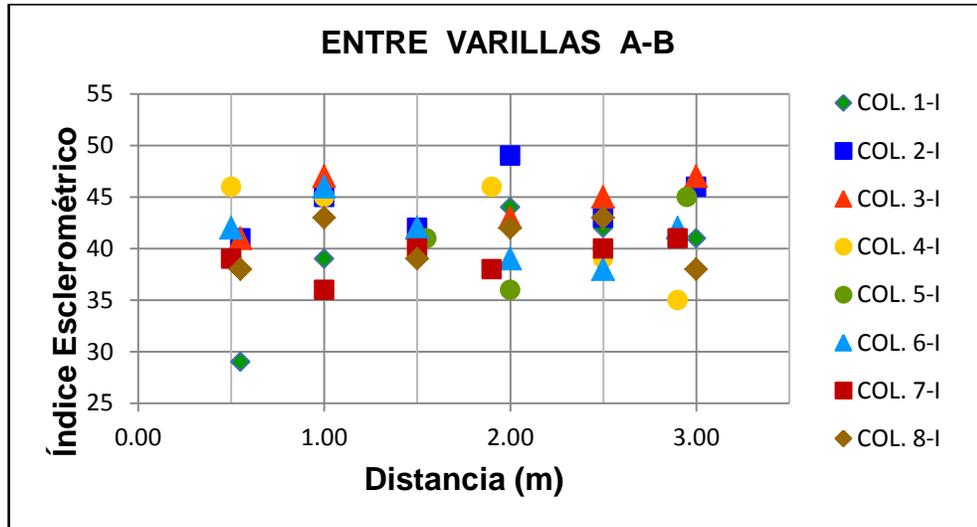
Gráfica VIII.6 Resultados de la prueba entre varillas A-B en traveses, Índice Esclerométrico Vs Distancia.



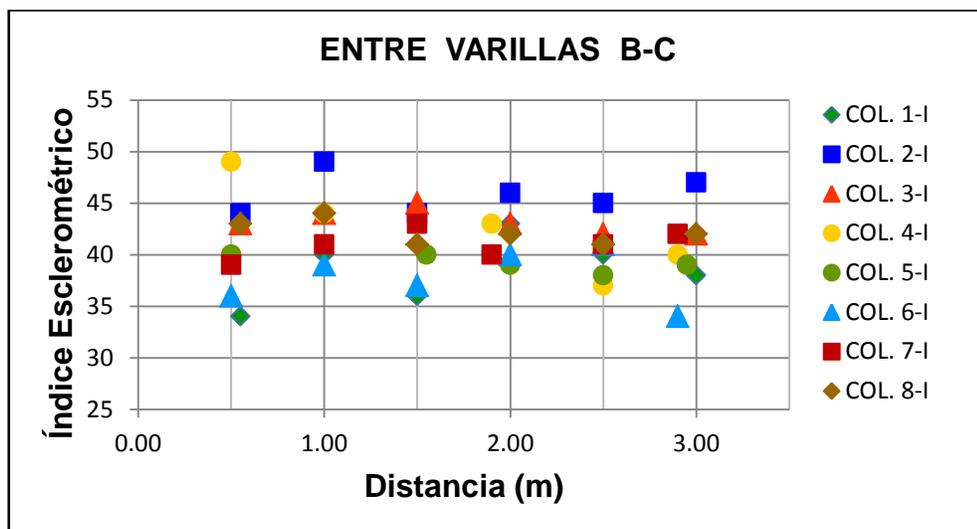
Gráfica VIII.7 Resultados de la prueba entre varillas B-C en traveses, Índice Esclerométrico Vs Distancia.



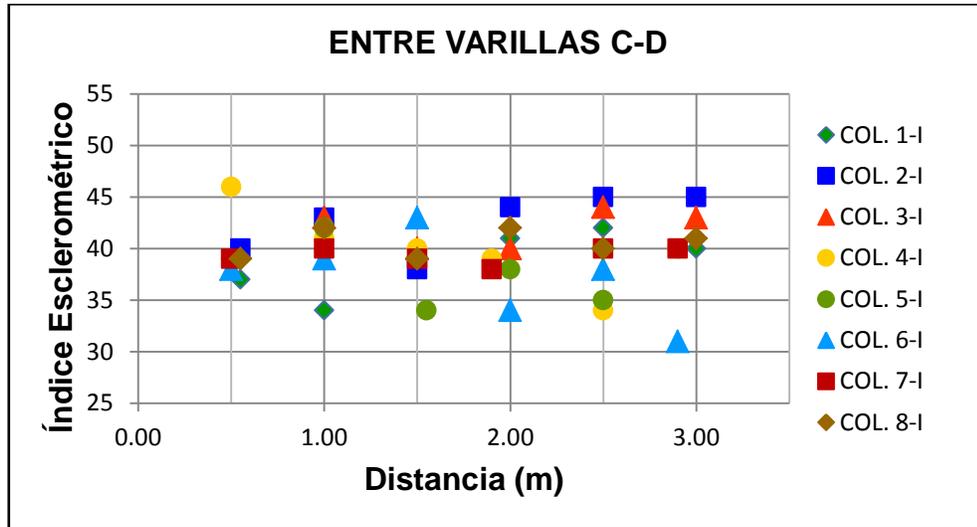
Gráfica VIII.8 Resultados de la prueba entre varillas C-D en traveses, Índice Esclerométrico Vs Distancia.



Gráfica VIII.9 Resultados de la prueba entre varillas A-B en columnas, Índice Esclerométrico Vs Altura.



Gráfica VIII.10 Resultados de la prueba entre varillas B-C en columnas, Índice Esclerométrico Vs Altura.



Gráfica VIII.11 Resultados de la prueba entre varillas C-D en columnas, Índice Esclerométrico Vs Altura.

### VIII.7 Resistencia a la compresión.

Esta prueba se realizó en el laboratorio a los núcleos extraídos de la estructura, los resultados se muestran a continuación.

Espécimen	Elemento	Diám. cm	Altura sin cabecear cm	Área cm <sup>2</sup>	Volumen cm <sup>3</sup>	Peso g	Peso vol. Kg/m <sup>3</sup>	Carga máx. Kg	f'c Kg/cm <sup>2</sup>	f'c Mpa
1	COL. 7-I	6.94	12.84	37.83	486	1039	2139	11400	301.4	29.5
2	COL. 3-I	6.94	13	37.83	492	1006	2046	10850	286.8	28.1

Gráfica VIII.12 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión

### VIII.8 Módulo de elasticidad estático.

Se efectuó en el laboratorio a dos de los núcleos extraídos; de acuerdo al procedimiento descrito. Los resultados obtenidos, son los siguientes.



## VIII.9 Porosidad.

### VIII.9.1 Absorción capilar.

Esta prueba se efectuó en el laboratorio de acuerdo al procedimiento descrito.

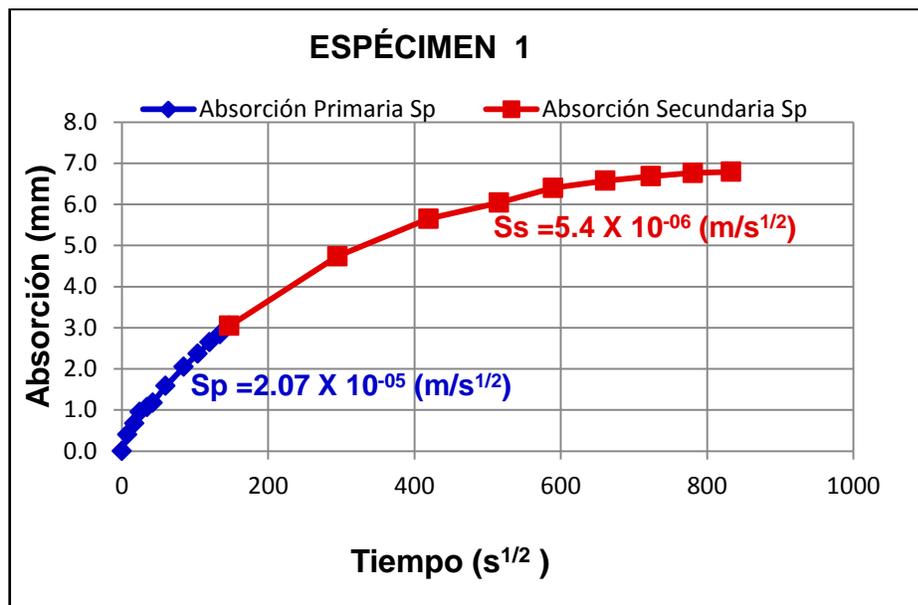
Los resultados de esta prueba de absorción capilar son los siguientes:

Espécimen	1	Fecha de Ensayo:	20/10/2011
Edad	36 años	Elemento	COL. 7-I
Peso $W_o$ (g)	407.92	Edad de extr. (días)	218
Diámetro (mm)	69.0	Peso $W_f$ (g)	420.51
Altura (mm)	51.5	Área (mm <sup>2</sup> )	3739

TIEMPO							
Días	s	s <sup>1/2</sup>	Peso (g)	$\Delta$ peso (g)	I (mm)		
	0	0	420.51	0	0.00	Sp =	2.07E-05 m/s <sup>0.5</sup>
	60	8	422.03	1.52	0.41	Ti =	0
	300	17	423.03	2.52	0.67	Tf =	147
	600	24	424.07	3.56	0.95	li =	0.00
	1200	35	424.51	4	1.07	If =	3.05
	1800	42	424.92	4.41	1.18		
	3600	60	426.44	5.93	1.59	Ss =	5.46E-06 m/s <sup>0.5</sup>
	7200	85	428.17	7.66	2.05	Ti =	147
	10800	104	429.37	8.86	2.37	Tf =	833
	14400	120	430.41	9.9	2.65	li =	3.05
	18000	134	431.12	10.61	2.84	If =	6.79
	21600	147	431.9	11.39	3.05		
1	87000	295	438.23	17.72	4.74		
2	175800	419	441.64	21.13	5.65		
3	265800	516	443.1	22.59	6.04		
4	348000	590	444.44	23.93	6.40		
5	436800	661	445.1	24.59	6.58		
6	523200	723	445.5	24.99	6.68		
7	609480	781	445.8	25.29	6.76		
8	694380	833	445.9	25.39	6.79		

Tabla VIII.29 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 7-I.





Gráfica VIII.13 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 7-I.

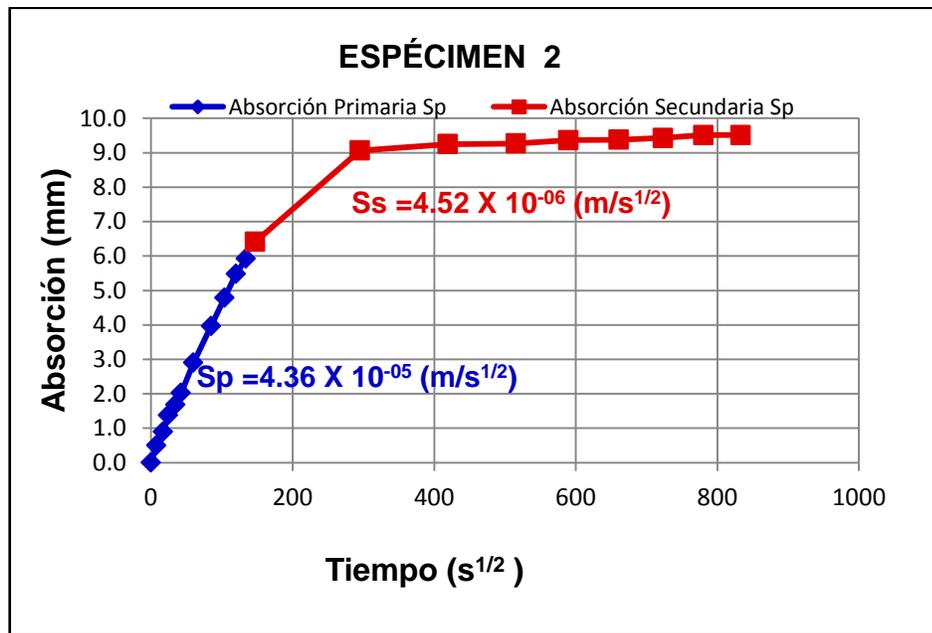
Espécimen	2	Fecha de Ensayo:	20/10/2011
Edad	36 años	Elemento	COL. 3-I
Peso Wo (g)	386.59	Edad de extr. (días)	218
Diámetro (mm)	68.9	Peso Wf (g)	397.14
Altura (mm)	51.6	Área (mm <sup>2</sup> )	3728

TIEMPO			Peso (g)	Δ Peso (g)	I (mm)		
Días	s	s <sup>1/2</sup>				Sp =	
	0	0	397.14	0	0.00	Sp =	4.36E-05 m/s <sup>0.5</sup>
	60	8	399	1.86	0.50	Ti =	0
	300	17	400.5	3.36	0.90	Tf =	147
	600	24	402.29	5.15	1.38	li =	0.00
	1200	35	403.4	6.26	1.68	If =	6.41
	1800	42	404.68	7.54	2.02		
	3600	60	407.97	10.83	2.90	Ss =	4.52E-06 m/s <sup>0.5</sup>
	7200	85	411.93	14.79	3.97	Ti =	147
	10800	104	414.99	17.85	4.79	Tf =	833
	14400	120	417.57	20.43	5.48	li =	6.41
	18000	134	419.24	22.1	5.93	If =	9.51



	21600	147	421.04	23.9	6.41
1	87000	295	430.94	33.8	9.07
2	175800	419	431.62	34.48	9.25
3	265800	516	431.7	34.56	9.27
4	348000	590	432.06	34.92	9.37
5	436800	661	432.1	34.96	9.38
6	523200	723	432.3	35.16	9.43
7	609480	781	432.6	35.46	9.51
8	694380	833	432.6	35.46	9.51

Tabla VIII.30 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 3-I.



Gráfica VIII.14 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 3-I.

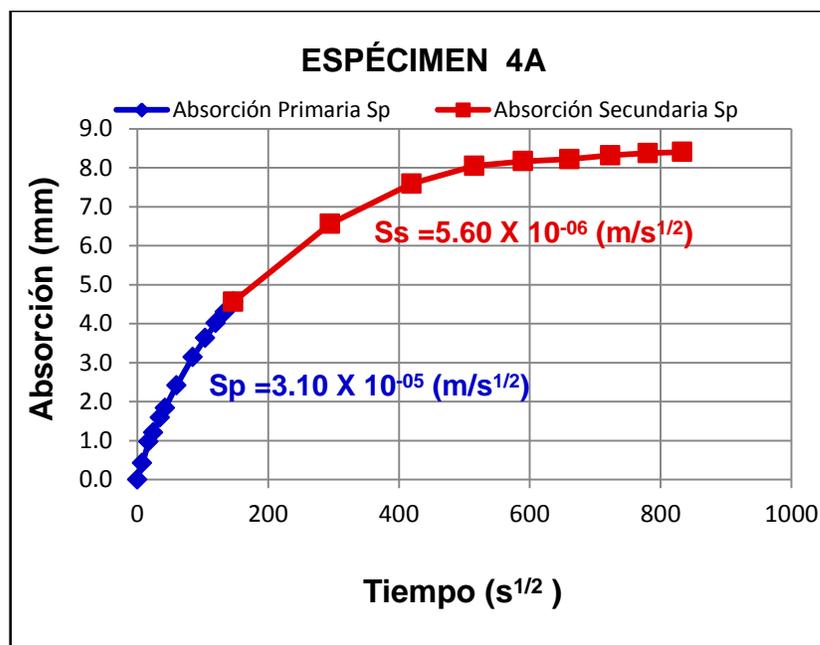
Espécimen	4A	Fecha de Ensayo:	20/10/2011
Edad	36 años	Elemento	COL. 8-I
Peso W <sub>o</sub> (g)	744.29	Edad de extr. (días)	72
Diámetro (mm)	94.5	Peso W <sub>f</sub> (g)	758.35
Altura (mm)	5.28	Área (mm <sup>2</sup> )	7014

TIEMPO			Peso (g)	Δ Peso (g)	I (mm)	Sp =	3.10E-05 m/s <sup>0.5</sup>
Días	s	s <sup>1/2</sup>					
	0	0	758.35	0	0.00		



	60	8	761.31	2.96	0.42	Ti =	0
	300	17	765.17	6.82	0.97	Tf =	147
	600	24	766.83	8.48	1.21	Ii =	0.00
	1200	35	769.48	11.13	1.59	If =	4.56
	1800	42	771.24	12.89	1.84		
	3600	60	775.28	16.93	2.41	Ss =	5.60E-06 m/s <sup>0.5</sup>
	7200	85	780.41	22.06	3.15	Ti =	147
	10800	104	783.82	25.47	3.63	Tf =	833
	14400	120	786.52	28.17	4.02	Ii =	4.56
	18000	134	788.52	30.17	4.30	If =	8.40
	21600	147	790.35	32	4.56		
1	87000	295	804.38	46.03	6.56		
2	175800	419	811.6	53.25	7.59		
3	265800	516	814.8	56.45	8.05		
4	348000	590	815.63	57.28	8.17		
5	436800	661	816	57.65	8.22		
6	523200	723	816.7	58.35	8.32		
7	609480	781	817.1	58.75	8.38		
8	694380	833	817.3	58.95	8.40		

Tabla VIII.31 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 8-I, espécimen A.



Gráfica VIII.15 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 8-I, espécimen A.

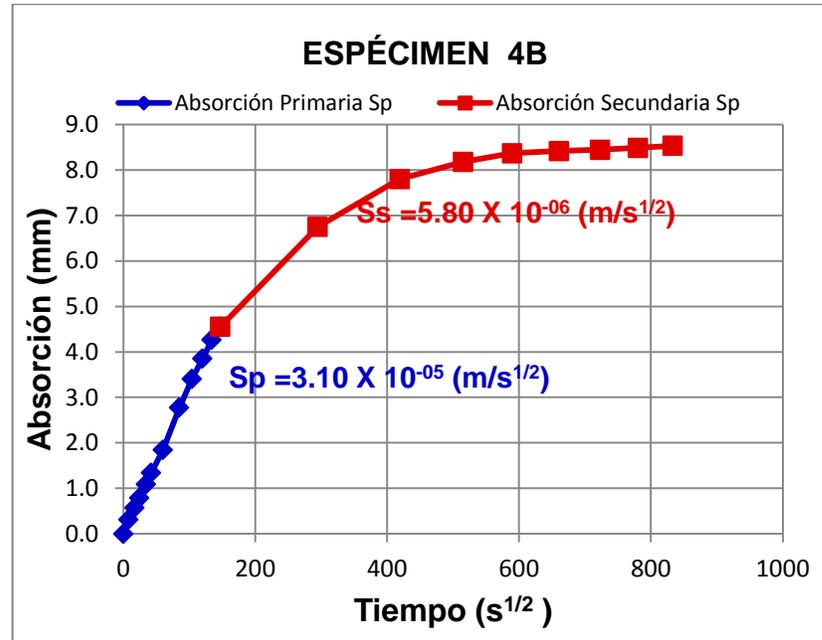


Espécimen	4B	Fecha de Ensayo:	20/10/2011
Edad		Elemento	COL. 8-I
Peso $W_o$ (g)	729.34	Edad de extr. (días)	72
Diámetro (mm)	94.3	Peso $W_f$ (g)	748.11
Altura (mm)	51.5	Área (mm <sup>2</sup> )	6984

TIEMPO							
Días	s	s <sup>1/2</sup>	Peso (g)	Δ Peso (g)	I (mm)		
	0	0	748.11	0	0.00	Sp =	3.10E-05 m/s <sup>0.5</sup>
	60	8	750.27	2.16	0.31	Ti =	0
	300	17	752.12	4.01	0.57	Tf =	147
	600	24	753.63	5.52	0.79	li =	0.00
	1200	35	755.7	7.59	1.09	If =	4.55
	1800	42	757.48	9.37	1.34		
	3600	60	760.99	12.88	1.84	Ss =	5.80E-06 m/s <sup>0.5</sup>
	7200	85	767.48	19.37	2.77	Ti =	147
	10800	104	771.89	23.78	3.40	Tf =	833
	14400	120	775.03	26.92	3.85	li =	4.55
	18000	134	777.9	29.79	4.27	If =	8.53
	21600	147	779.9	31.79	4.55		
1	87000	295	795.26	47.15	6.75		
2	175800	419	802.6	54.49	7.80		
3	265800	516	805.25	57.14	8.18		
4	348000	590	806.56	58.45	8.37		
5	436800	661	806.9	58.79	8.42		
6	523200	723	807.1	58.99	8.45		
7	609480	781	807.4	59.29	8.49		
8	694380	833	807.7	59.59	8.53		

Tabla VIII.32 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 8-I, espécimen B.





Gráfica VIII.16 Resultados de la prueba de absorción capilar en la columna 8-I, espécimen B.

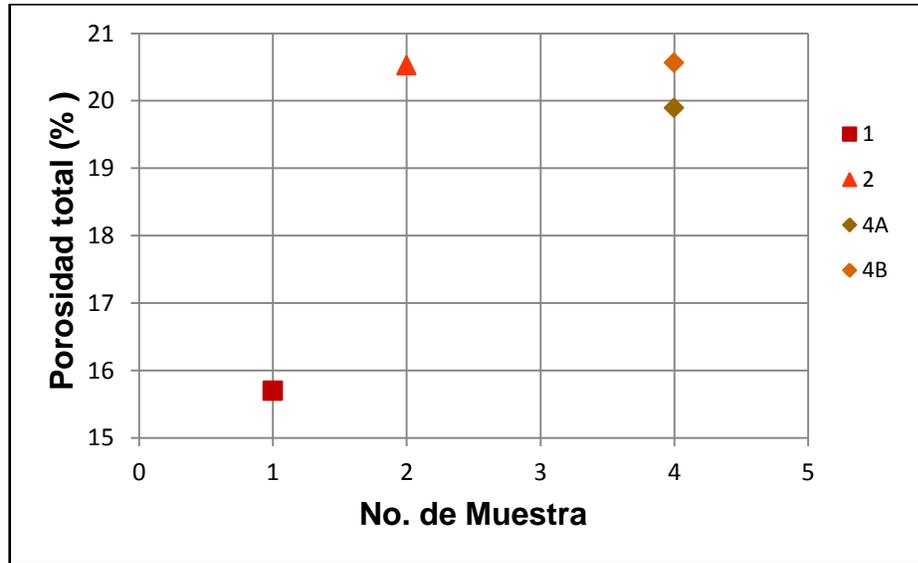
### VIII.9.2 Porosidad total.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

No. Espécimen	W <sub>saturado</sub> (g)	W <sub>105 °C</sub> (g)	W <sub>sumergido</sub> (g)	% Porosidad Total
1	430.7	400.9	240.9	15.7
2	419.4	379.9	227	20.53
4A	798.5	723.4	421	19.89
4B	784.3	710.8	426.9	20.57

Tabla VIII.33 Resultados de la prueba de Porosidad total.

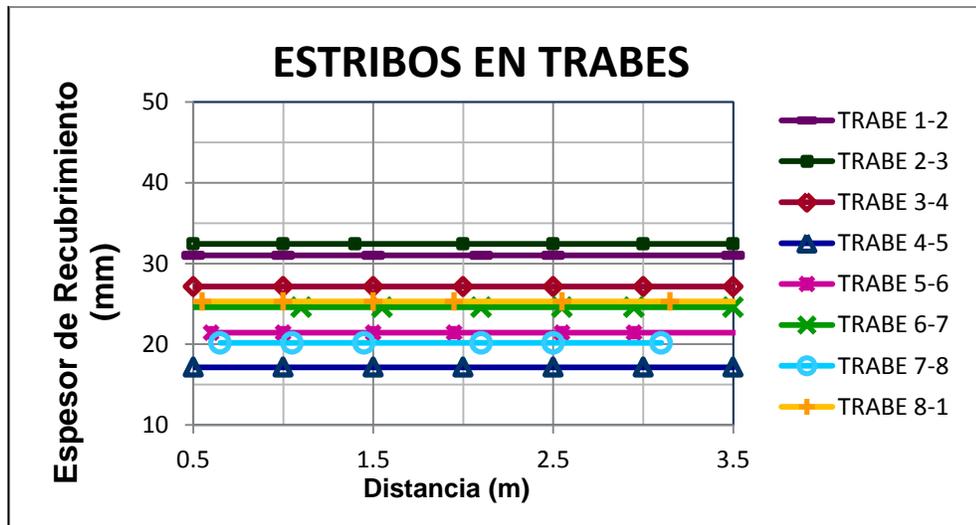




Gráfica VIII.17 Resultados de la prueba de Porosidad total.

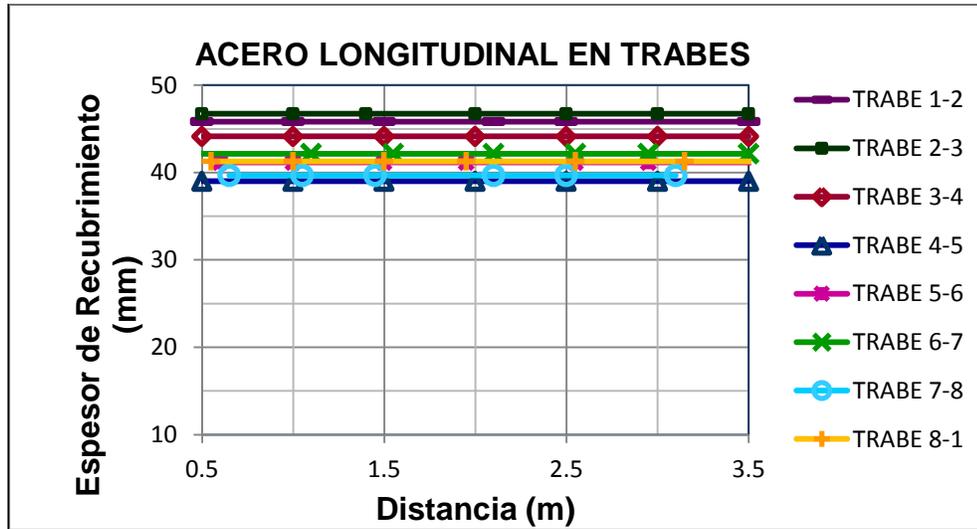
### VIII.10 Profundidad de la armadura.

Esta prueba se efectuó sobre el acero de refuerzo; tanto en el acero principal como en los estribos de traveses y columnas del nivel I. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

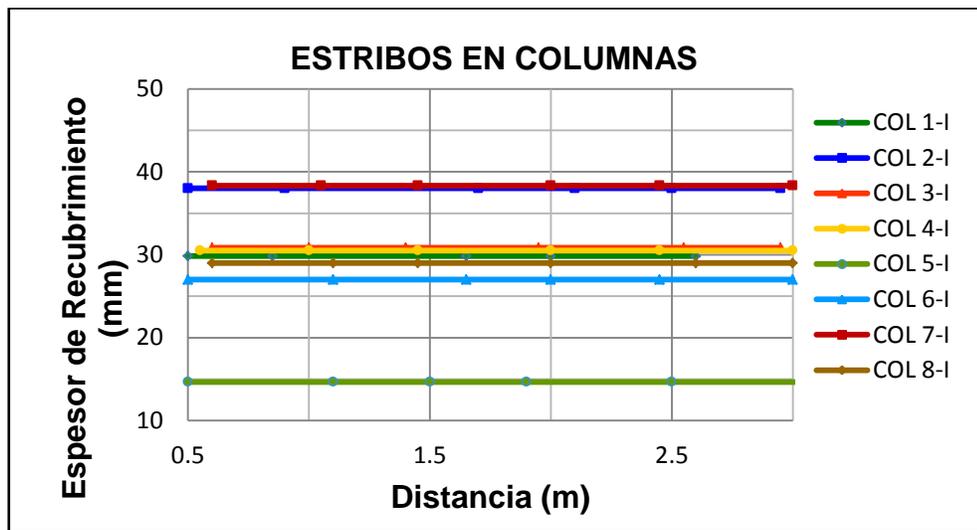


Gráfica VIII.18 Espesor de recubrimiento en estribos de traveses, Espesor Vs Distancia.

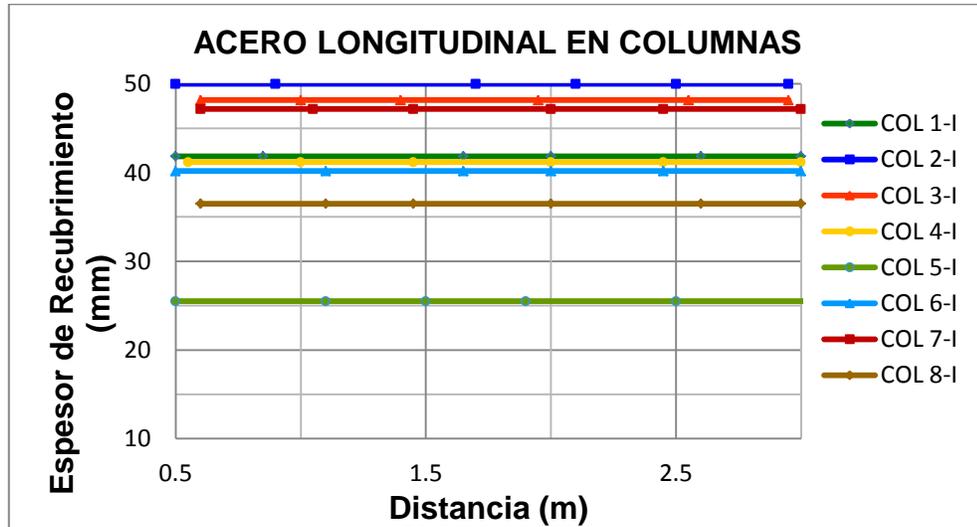




Gráfica VIII.19 Espesor de recubrimiento en el acero longitudinal de traveses, Espesor Vs Distancia.



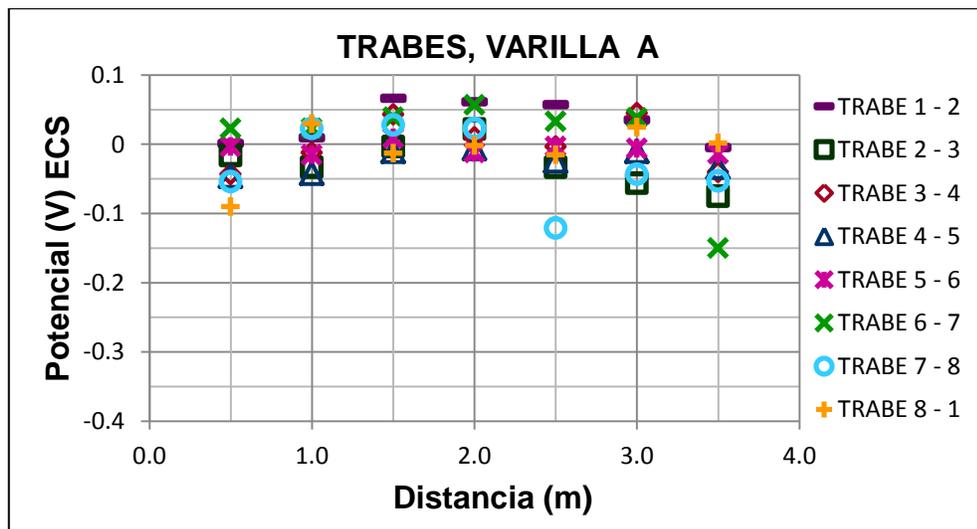
Gráfica VIII.20 Espesor de recubrimiento en estribos de columnas, Espesor Vs Altura.



Gráfica VIII.21 Espesor de recubrimiento en el acero longitudinal de columnas, Espesor Vs Altura.

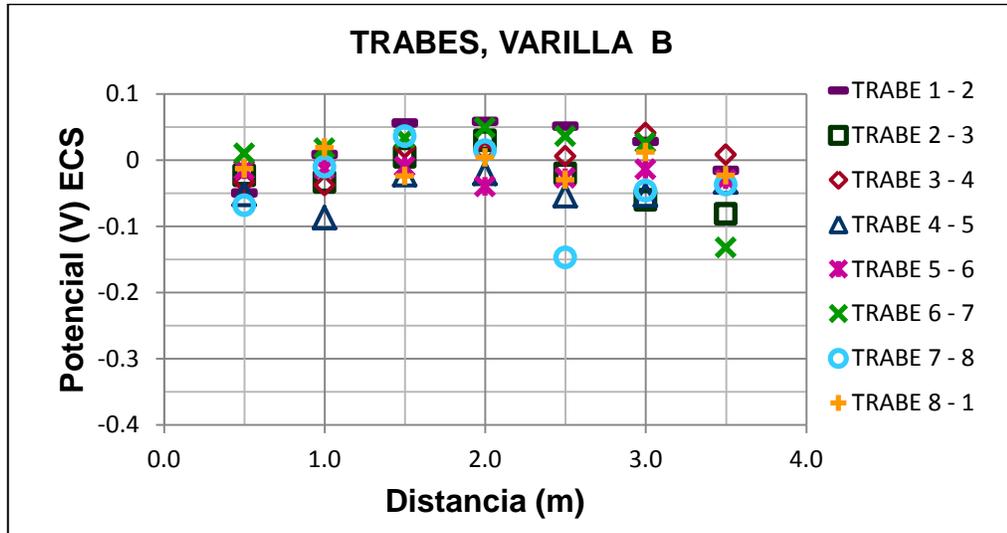
### VIII.11 Medición de Potenciales.

Esta prueba se efectuó sobre el acero principal, tanto de traveses como de columnas del nivel I, a cada 50 cm aproximadamente. Los resultados obtenidos son los siguientes:

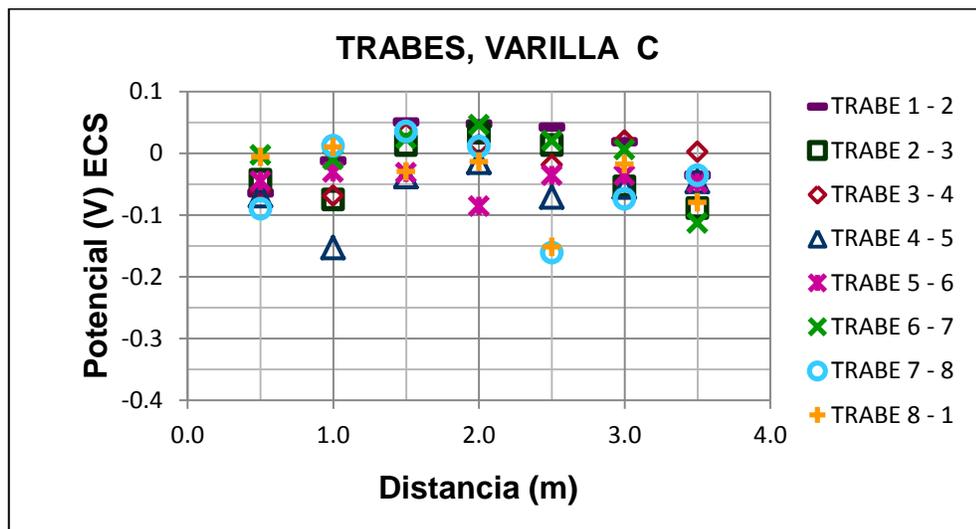


Gráfica VIII.22 Resultados de la medición en varilla A en traveses, Potencial Vs Altura.

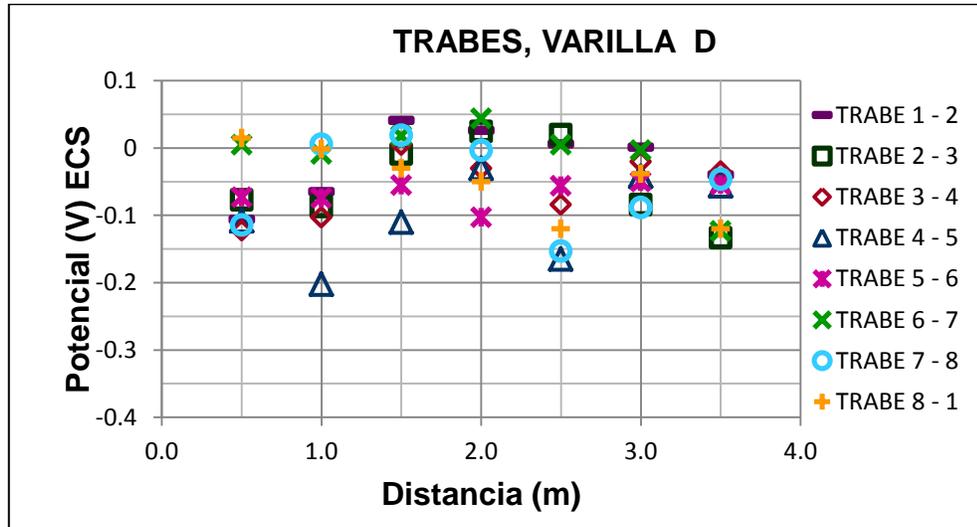




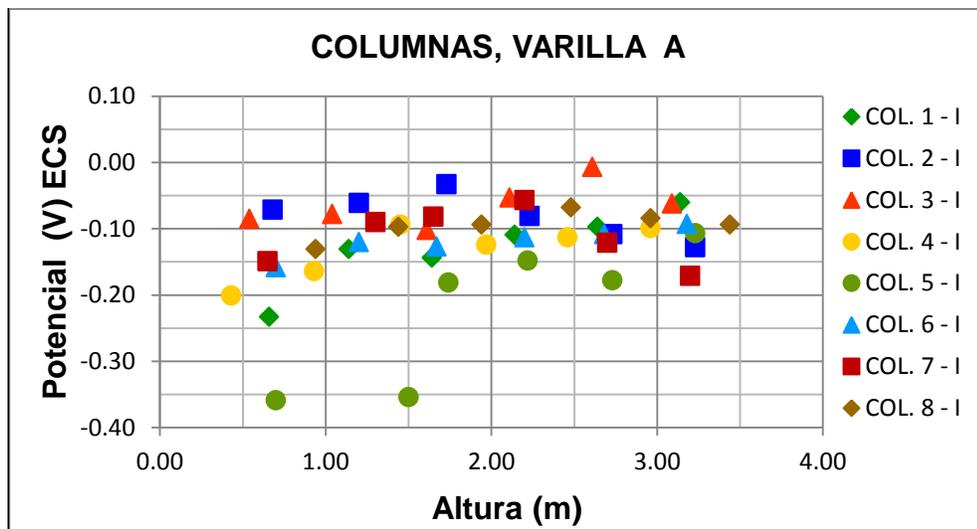
Gráfica VIII.23 Resultados de la medición en varilla B en trabes, Potencial Vs Altura.



Gráfica VIII.24 Resultados de la medición en varilla C en trabes, Potencial Vs Altura.

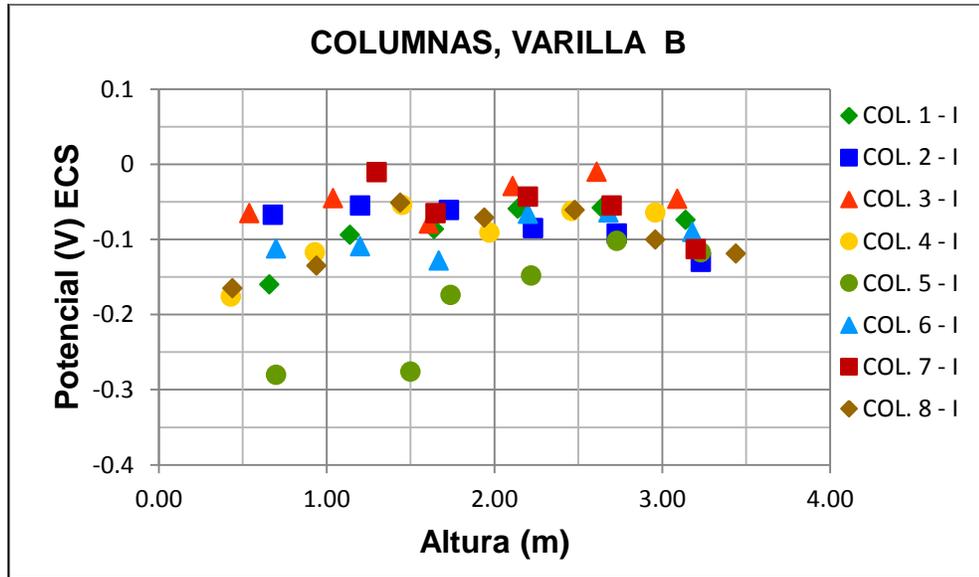


Gráfica VIII.25 Resultados de la medición en varilla D en traveses, Potencial Vs Altura.

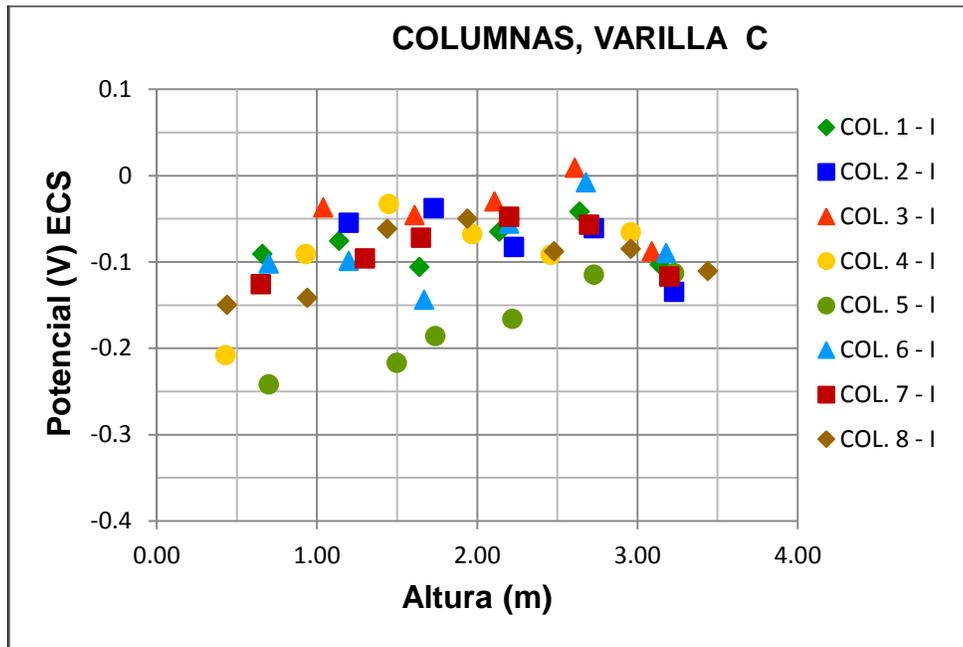


Gráfica VIII.26 Resultados de la medición en varilla A en columnas, Potencial Vs Altura.



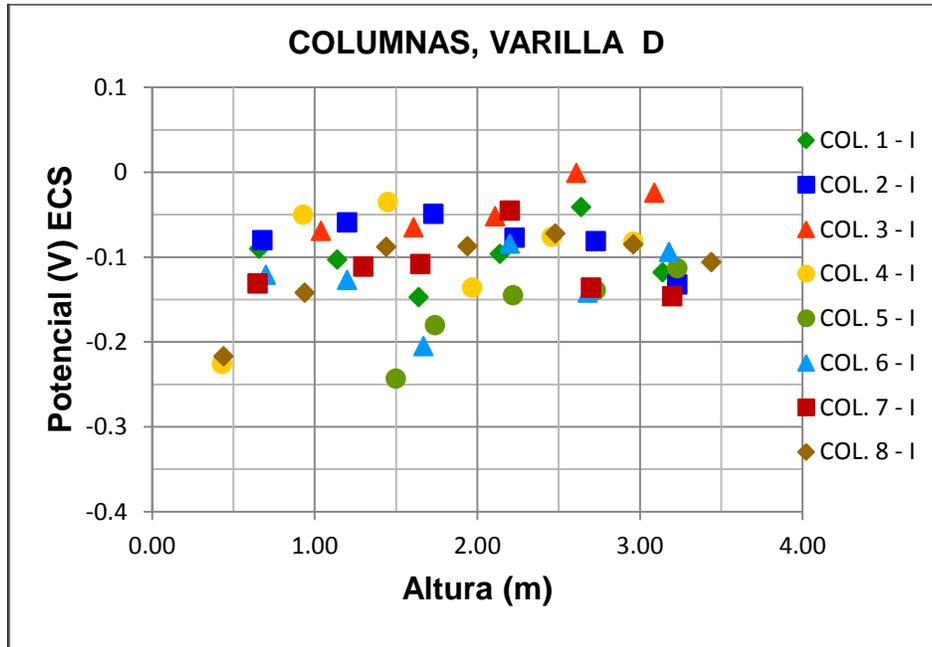


Gráfica VIII.27 Resultados de la medición en varilla B en columnas, Potencial Vs Altura.



Gráfica VIII.28 Resultados de la medición en varilla C en columnas, Potencial Vs Altura.

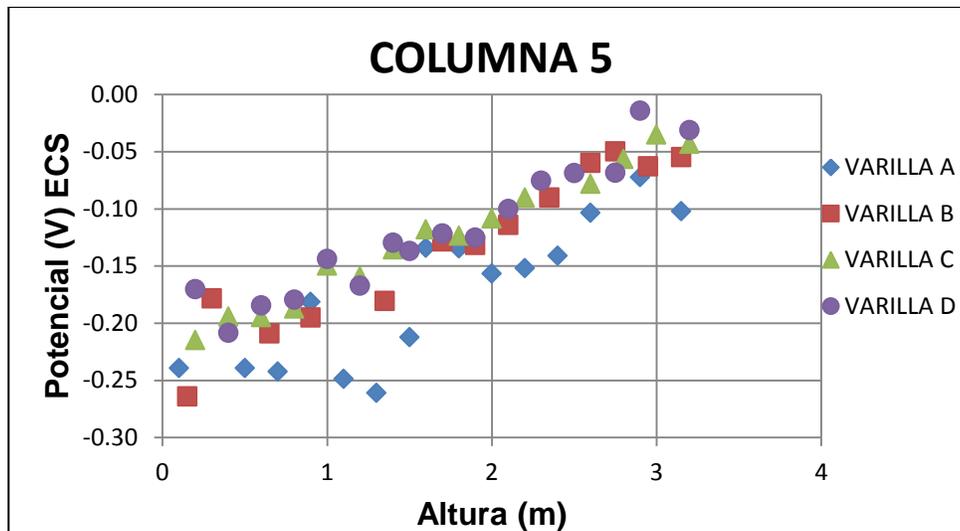




Gráfica VIII.29 Resultados de la medición en varilla D en columnas, Potencial Vs Altura.

El equipo GECOR 8 utilizado para medir la velocidad de corrosión también mide potencial de corrosión con un electrodo de referencia del tipo Ag/AgCl, el cual puede convertirse al de tipo Cu/CuSO<sub>4</sub>.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

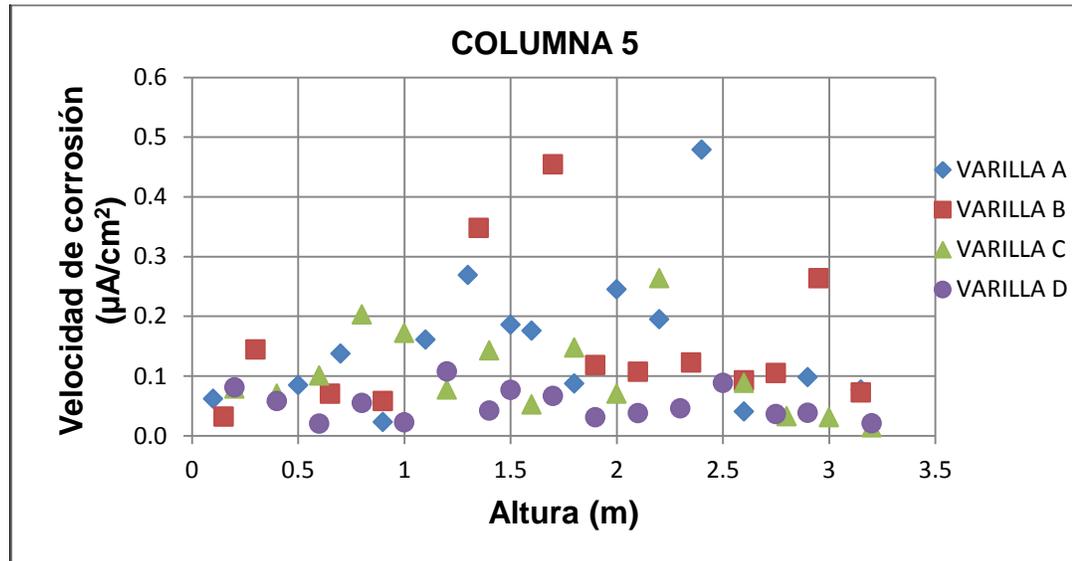


Gráfica VIII.30 Potencial Vs Altura, en columna 5-I.



### VIII.12 Velocidad de corrosión.

Esta prueba se realizó en cada una de las cuatro barras de acero principal de la columna 5-I, seleccionándose esta columna dado que en las mediciones de potencial es la que presenta mayor probabilidad de corrosión. Los resultados obtenidos son los siguientes:



Gráfica VIII.31 Resultados de la prueba de Velocidad de corrosión Vs Altura, en columna 5-I.

## IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### Inspección visual general del tanque elevado.

En la tabla IX.1 se muestra la frecuencia de los daños de acuerdo a la inspección visual realizada.

<b>CODIGO</b>	<b>DAÑO</b>	<b>CANTIDAD</b>
A1	Grietas o fisuras	47
B4	Manchas de humedad	24
D2	Nidos de abeja(Cangrejera)	21
A2	Red de grietas	18
E1	Junta de construcción	18
F1	Cimbra muy marcada	13
C3	Delaminación	12
C2	Concreto fofo	5
B3	Manchas de óxido	4
C4	Intemperismo	4

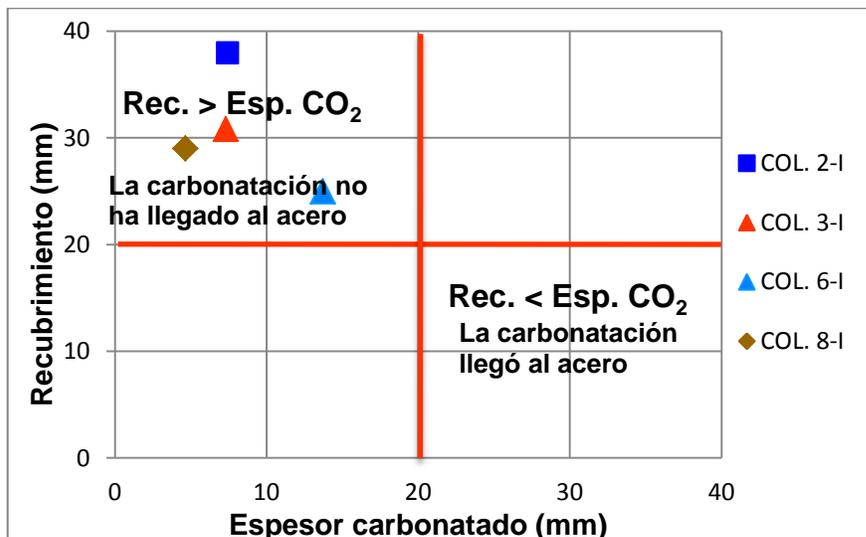
Tabla IX.1 Cuantificación de daños de la estructura.

La mayor cantidad de daños son grietas presentes tanto en traveses como en columnas, que se deben a la corrosión del acero. Le siguen las manchas de humedad las cuales en su mayoría están presentes en las traveses del nivel IV, estas debido al escurrimiento del agua de lluvia a través del contenedor. En tercer lugar se ubican los nidos de abeja, los cuales se aprecian sobre todo en la parte superior de las traveses, este daño está asociado a la falta de vibrado durante el vaciado del concreto.

### Profundidad de carbonatación.

En la gráfica se muestra la comparación entre el espesor carbonatado y el espesor de recubrimiento, así como los criterios de evaluación.





Gráfica IX.1 Carbonatación Vs Recubrimiento.

Espécimen	Elemento	$K_{CO_2}$ (mm/año <sup>0.5</sup> )	Clasificación
2	COL. 3-I	1.2200	Concreto de buena calidad
3	COL. 2-I	1.2383	Concreto de buena calidad
4	COL. 8-I	0.7750	Concreto de buena calidad
5	COL. 6-I	2.2867	Concreto de buena calidad

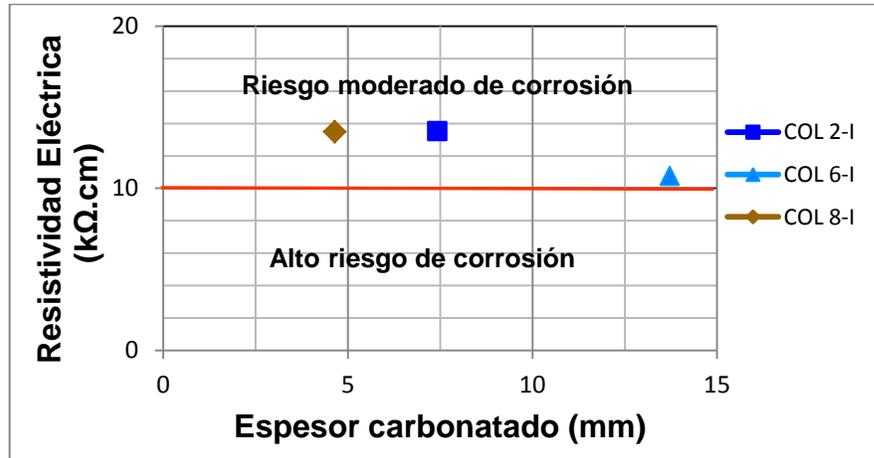
Tabla IX.2 Clasificación del concreto en función de la constante de carbonatación.

Para todos los especímenes se observa buena calidad del concreto de acuerdo a la clasificación de la red Durar, además en ningún elemento muestreado la carbonatación es mayor al espesor de recubrimiento, en la columna 6-I es donde el avance del frente carbonatado es mayor, y aún así se prevé que la carbonatación alcance el acero más exterior en 120 años desde su construcción, es decir en 84 años más.

#### Resistividad eléctrica.

Para determinar la calidad del concreto en función a la resistividad eléctrica, se considera el criterio de evaluación de la prueba, donde en primera instancia se clasifica el valor de resistividad obtenido ( $\tau$ ); y como segundo término para obtener la clasificación se considera si hay presencia de cloruros o si el elemento está carbonatado.

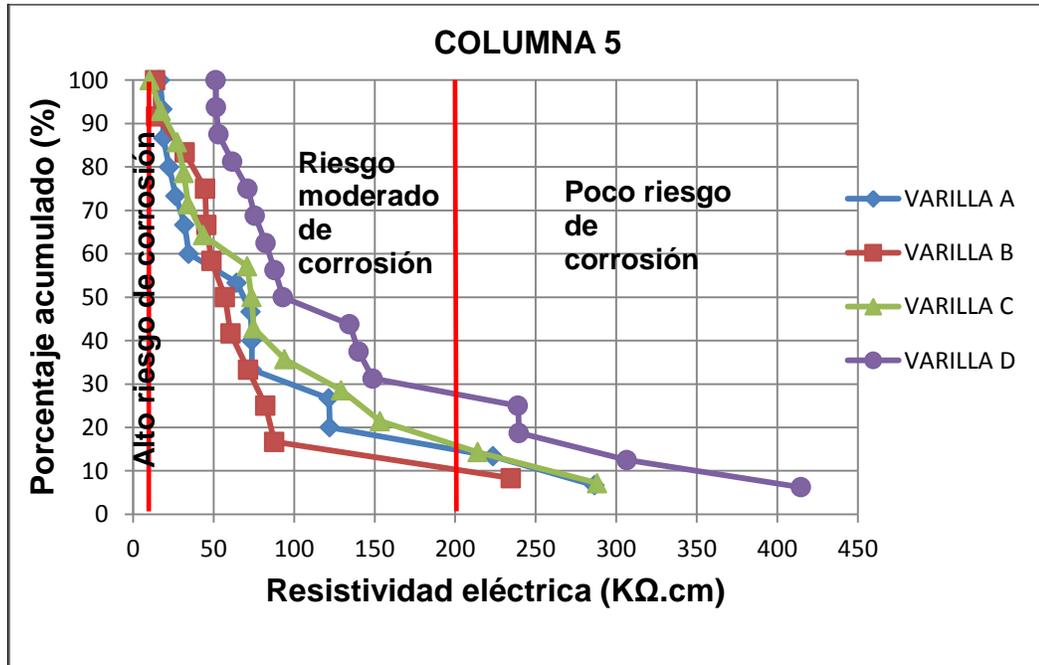




Gráfica IX.2 Resistividad eléctrica Vs Espesor carbonatado.

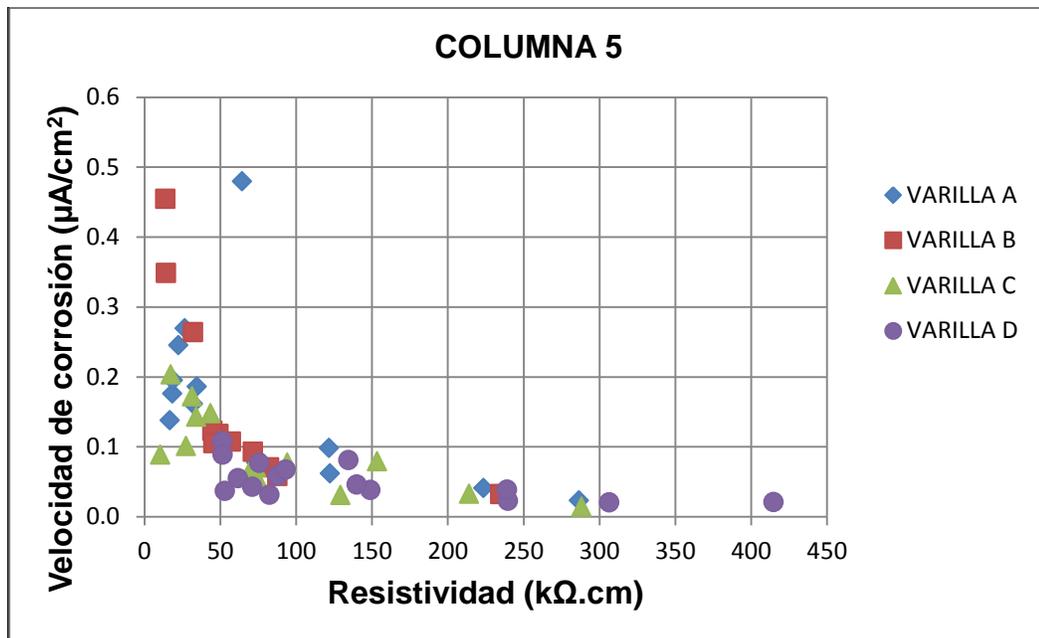
Cuando los carbonatos llenan los poros del concreto la resistividad eléctrica aumenta, dado que la corriente eléctrica no encuentra interferencias. En este caso se observa lo contrario, puesto que la prueba de resistividad eléctrica se realizó en la zona no carbonatada de los núcleos.

Dado que la resistividad eléctrica es mayor a 10 kΩ.cm en los elementos muestreados y no hay presencia de cloruros, además el espesor de recubrimiento es mayor al espesor carbonatado la red Durar ubica el material con una moderada probabilidad de corrosión.



Gráfica IX.3 Porcentaje acumulado Vs Resistividad eléctrica, columna 5-I.

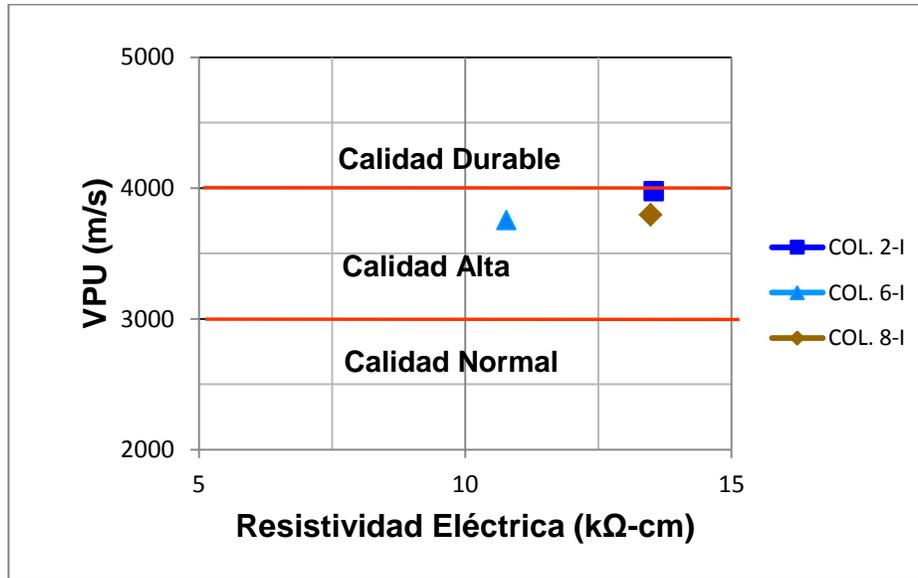
Para el caso de la columna 5-I, se observa que la varilla D es la que presenta el porcentaje mayor (29%) de lecturas más elevadas en cuanto a resistividad, y por el contrario la varilla B es la que presenta el porcentaje menor de lecturas con resistividad alta, y se sitúa en un 90% de los valores con riesgo moderado de corrosión.



Gráfica IX.4 Velocidad de corrosión Vs Resistividad, en columna 5-I.

En la grafica IX.4 se puede apreciar que al incrementar la resistividad disminuye la velocidad de corrosión y viceversa, además se puede observar que cuando la resistividad es mayor a 200 k $\Omega$ .cm (donde se considera poco riesgo de corrosión) aunque si existe corrosión, su velocidad es relativamente baja.

**Velocidad de Pulso Ultrasónico**

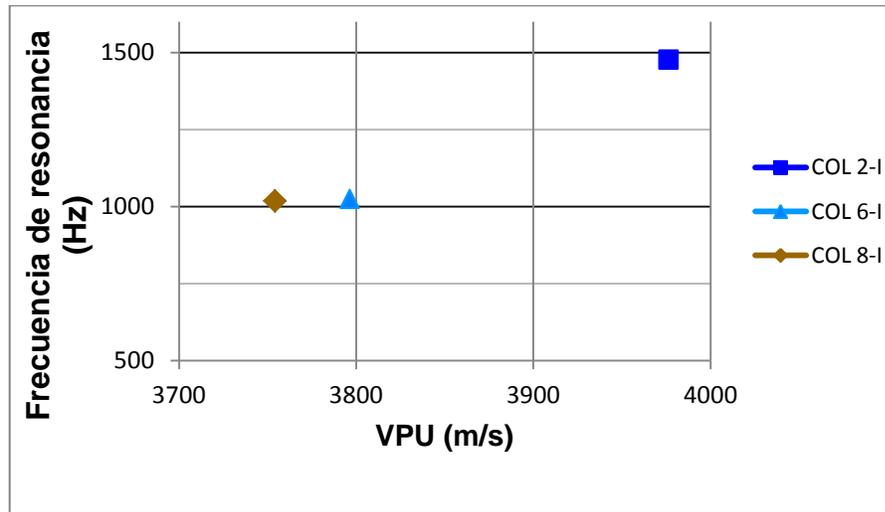


Gráfica IX.5 Velocidad de Pulso Ultrasónico Vs Resistividad Eléctrica.

En la gráfica IX.5 parece haber una ligera tendencia que al obtener resultados mayores de la velocidad de pulso en el concreto, aumenta la resistividad eléctrica del mismo. En este caso el espécimen extraído de la columna 6-I es el que presenta una menor velocidad de pulso y asimismo menor resistividad eléctrica, aun así los tres elementos se encuentran en la clasificación de concreto de calidad alta, aunque no durable.



### Frecuencia de resonancia.

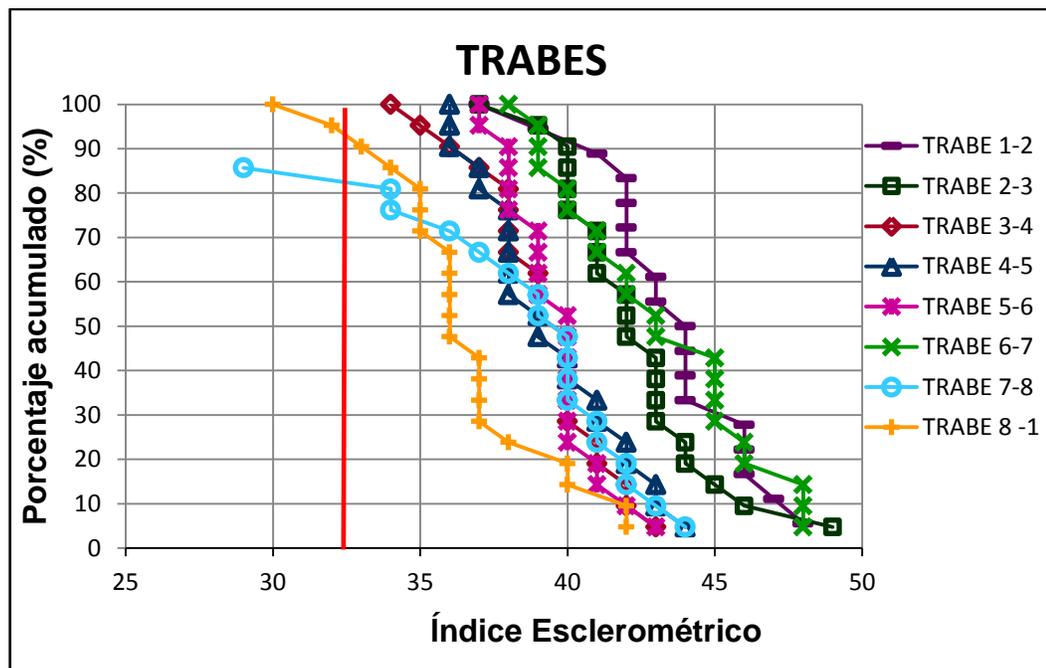


Gráfica IX.6 Frecuencia de resonancia Vs Velocidad de pulso ultrasónico.

En la gráfica IX.6 se puede apreciar que cuando la velocidad de pulso aumenta la frecuencia de resonancia también lo hace, en este caso el espécimen de la columna 2-I es el que reporta valores más altos.

### Esclerometría.

Existe una limitante para poder correlacionar el Índice Esclerométrico (IE) con la resistencia a compresión en concretos viejos, debido a que los esclerómetros son calibrados con especímenes en laboratorio, además los resultados obtenidos en esta prueba pueden ser elevados dado que la carbonatación tiende a endurecer al concreto, aún con todo esto, con esta prueba se puede tener una idea de la uniformidad superficial del concreto.

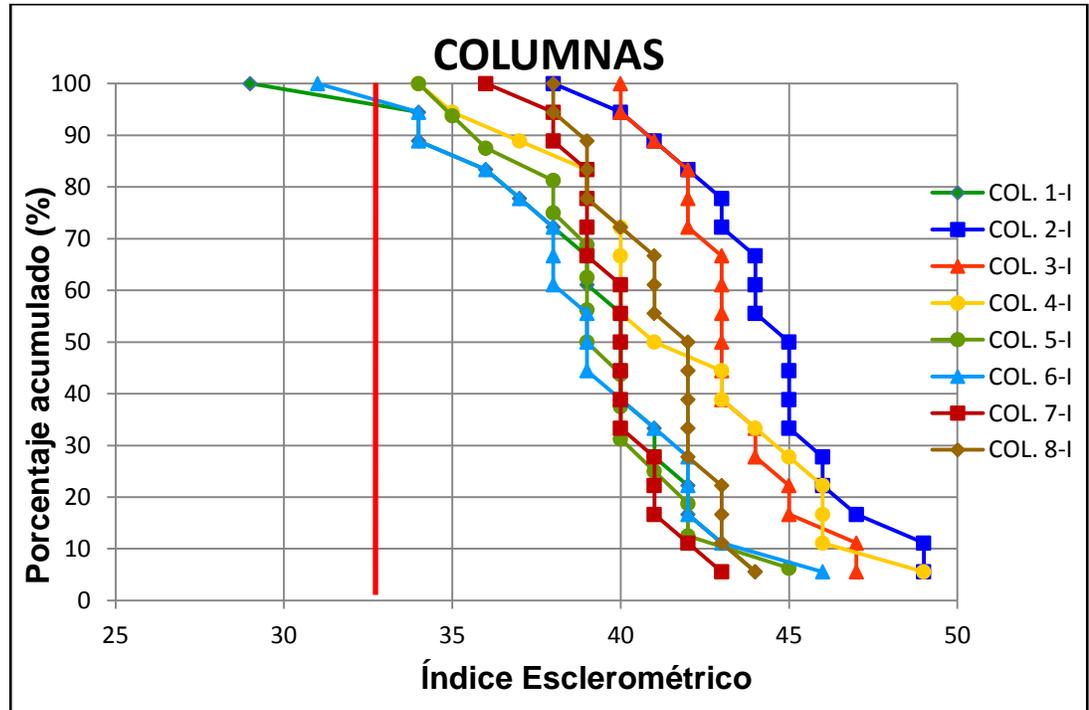


Gráfica IX.7 Porcentaje acumulado Vs Índice esclerométrico, en trabes.

En la gráfica anterior se puede observar que la trabe con la mayor dureza superficial es la trabe 1-2,

Por otro lado la trabe que presenta los valores más bajos de IE es la trabe





Gráfica IX.8 Porcentaje acumulado Vs Índice esclerométrico, en columnas.

En la gráfica IX.8 se aprecia que la columna 3-I tienen el 100% de sus datos igual o mayor al IE de referencia de 40, y la columna 6-I muestra el menor porcentaje (38.9%) de datos con IE igual o mayor de 40.

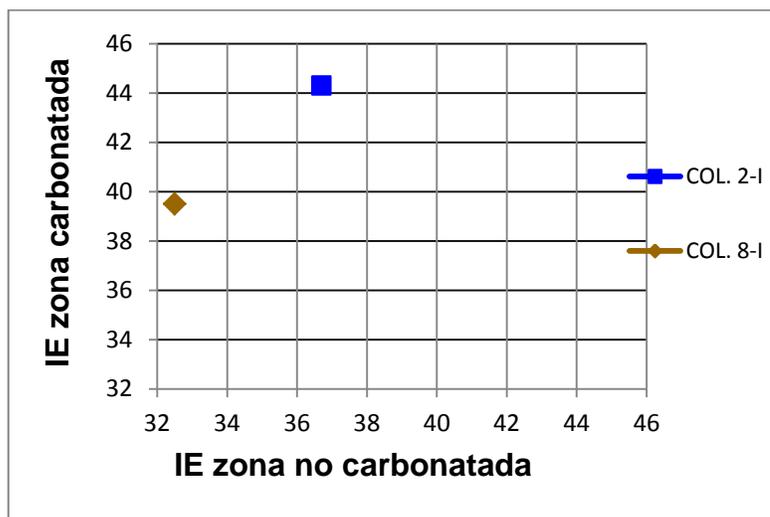
Se hace notar que en general los valores de IE en columnas son ligeramente mayores que en las trabes, esto se debe a la posición del esclerómetro cuando se realiza la prueba, ya que el índice esclerométrico o número de rebote está afectado por la gravedad, incrementándose en una posición vertical hacia arriba ( $+90^\circ$ ), disminuyendo en posición vertical hacia abajo ( $-90^\circ$ ) (como es el caso de las trabes) y manteniéndose en valores intermedios cuando la prueba se hace en posición horizontal ( $0^\circ$ ).

Con la finalidad de considerar la diferencia que existe entre las mediciones en la zona carbonatada y la zona no carbonatada se muestra la tabla IX.3. Los datos de la zona no carbonatada corresponden a las mediciones hechas con el esclerómetro en los núcleos

extraídos, y la zona carbonatada corresponde a las mediciones realizadas en campo (Ambas pruebas se hicieron con el esclerómetro en la misma posición).

Elemento	IE en zona no carbonatada	IE en zona carbonatada	Diferencia (%)
COL. 2-I	36.7	44.3	20.7
COL. 8-I	32.5	39.5	21.5

Tabla IX.3 Variación del IE en zona carbonatada y no carbonatada.



Gráfica IX.9 Variación del IE en zona carbonatada y no carbonatada.

Se observa un incremento aproximadamente del 21% del IE en la zona carbonatada, como se mencionaba anteriormente la capa superficial del concreto endurece debido a la carbonatación, además influyen otros factores como la forma, la zona restringida, ya que en los núcleos al no estar en gran masa es fácil que se disipe la energía dando como resultado el índices esclerométricos más bajos.

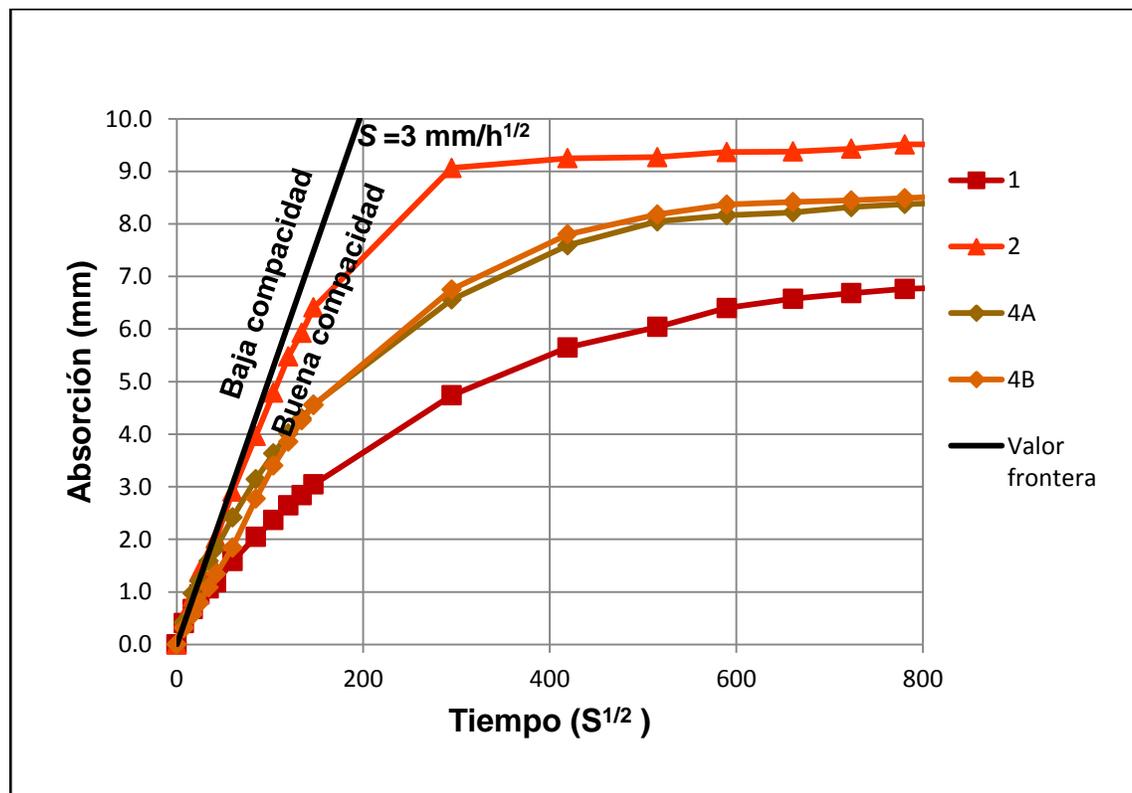
### Resistencia a la compresión.



### Módulo de elasticidad estático.

### Porosidad.

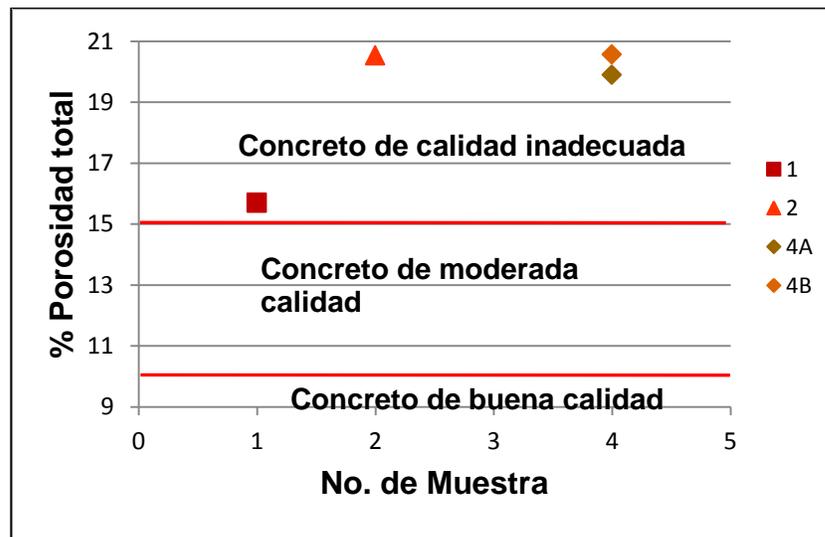
#### a. Absorción capilar.



Gráfica IX.10 Determinación de la compacidad del concreto en función de la absorción capilar.

La Gráfica IX.10 refleja que todas las muestras presentan absorción capilar menores a la absorción de frontera, que para ambientes urbanos con Humedad Relativa >70% es:  $s = 3,0 \text{ mm/h}^{1/2}$  ( $5.10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ ). Lo que muestra que el concreto estudiado es de buena compacidad.

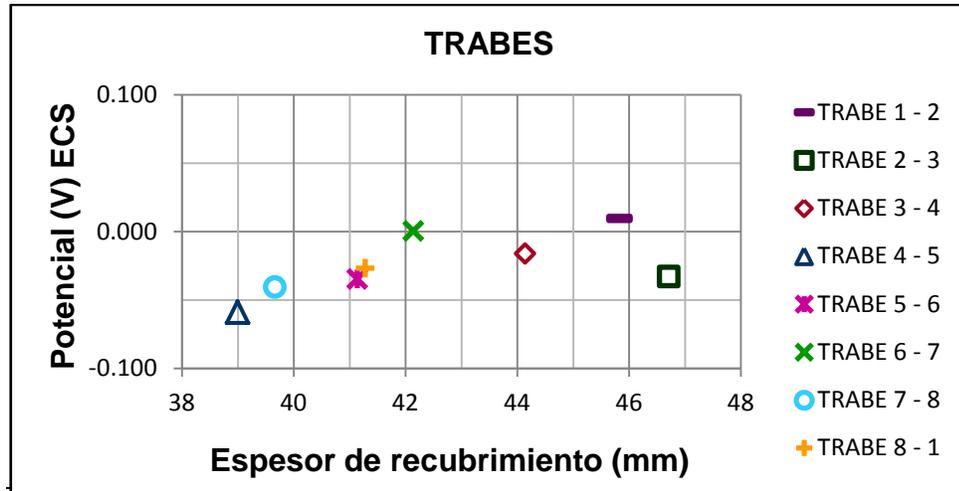
**a. Porosidad total.**



Gráfica IX.11 Calidad del concreto en función de la porosidad total.

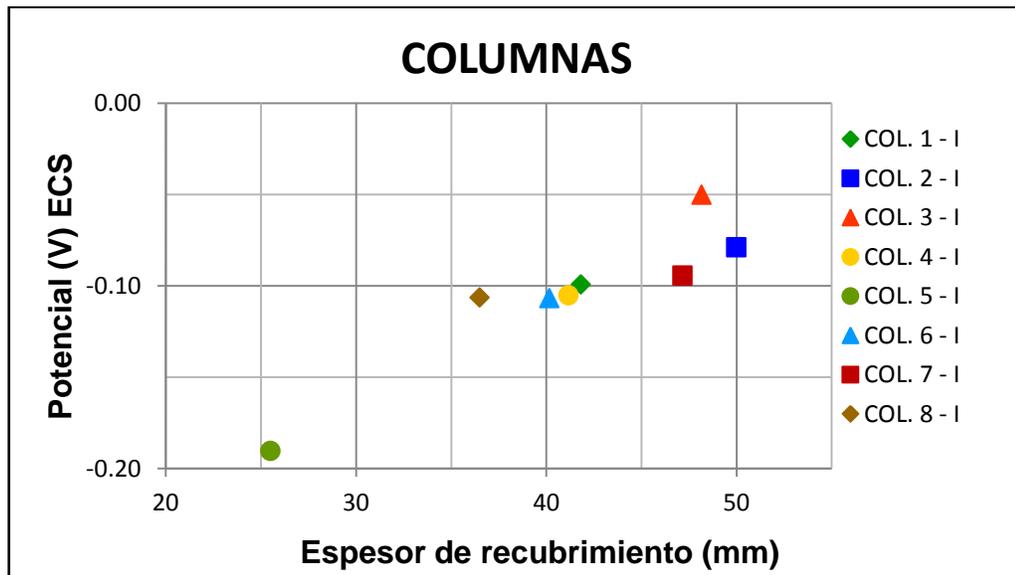
Se puede notar que la absorción capilar es baja en todas las muestras, pero la porosidad es elevada de acuerdo a los criterios, esto demuestra que el concreto aunque si tiene muchos poros, éstos no están interconectados entre ellos, motivo por el cual la absorción capilar es baja, y las probabilidades de que penetren los agentes agresivos son bajas también.

### Profundidad de la armadura.



Gráfica IX.12 Potencial Vs Recubrimiento, en trabes.

La profundidad a la que se encuentre el acero influye en los resultados del potencial de corrosión ya que al haber un recubrimiento mayor los agresores del ambiente tardan más tiempo en llegar a la varilla.

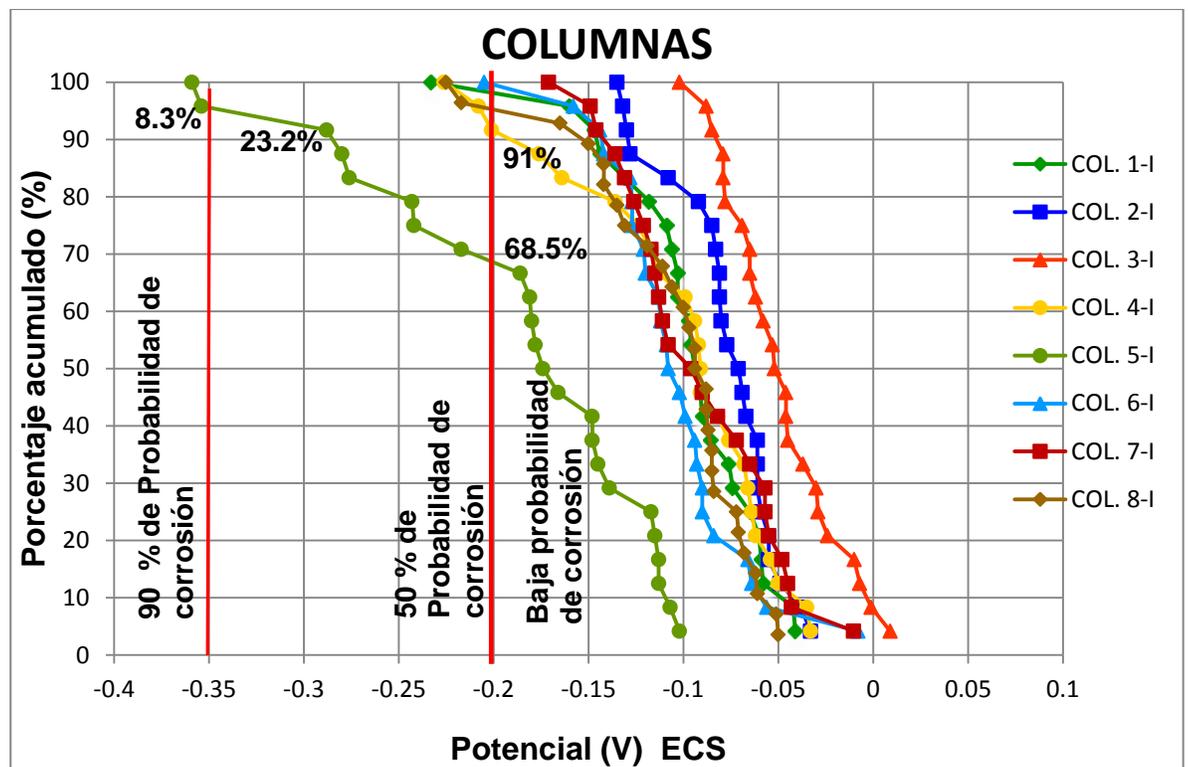


Gráfica IX.13 Potencial Vs Recubrimiento, en columnas.



En la gráfica anterior se aprecia que la columna 5-I es la que tiene menor espesor de recubrimiento, y como consecuencia se encontraron potenciales más negativos lo que significa que esta columna es potencialmente más vulnerable a la corrosión, dado que al encontrarse el acero más cerca de la superficie es relativamente fácil que la humedad del ambiente, el agua de lluvia y el rocío de los aspersores de riego, penetren el espesor de recubrimiento y generen las condiciones idóneas para que se presente el fenómeno de corrosión.

### Medición de Potenciales.

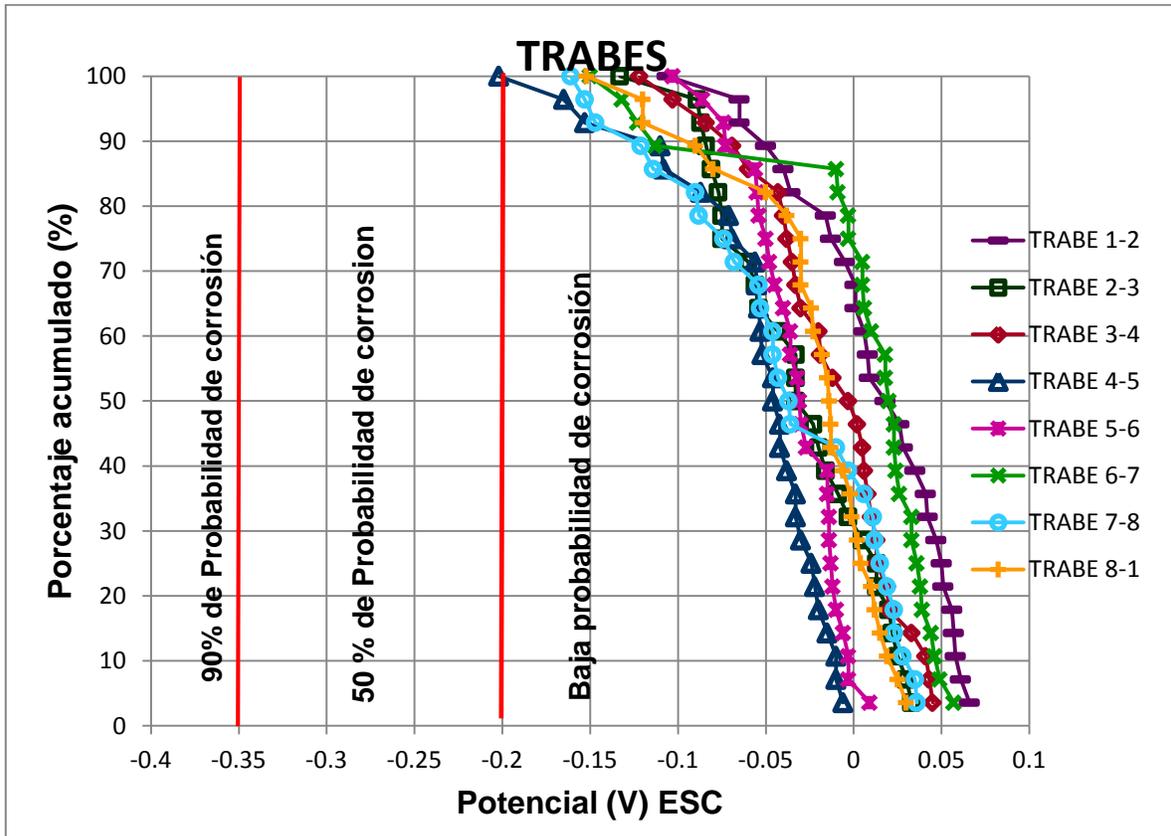


Gráfica IX.14 Porcentaje acumulado Vs Potencial de corrosión, en columnas.

En la gráfica IX.14 se visualiza con claridad que la columna 5-I es la que presenta potenciales más negativos presentando el 8.3% del total de datos con un 90 % de probabilidad de corrosión, el 23.2% con el 50% de probabilidad de corrosión y el 68.5 % restante se considera baja probabilidad de corrosión. Se aprecia que la columna 3-I es la



que tiene potenciales más elevados, que junto con las columnas 2-I, y la columna 7-I presentan el 100% de los datos con baja probabilidad de corrosión.



Gráfica IX.15 Porcentaje acumulado Vs Potencial de corrosión, en traveses.

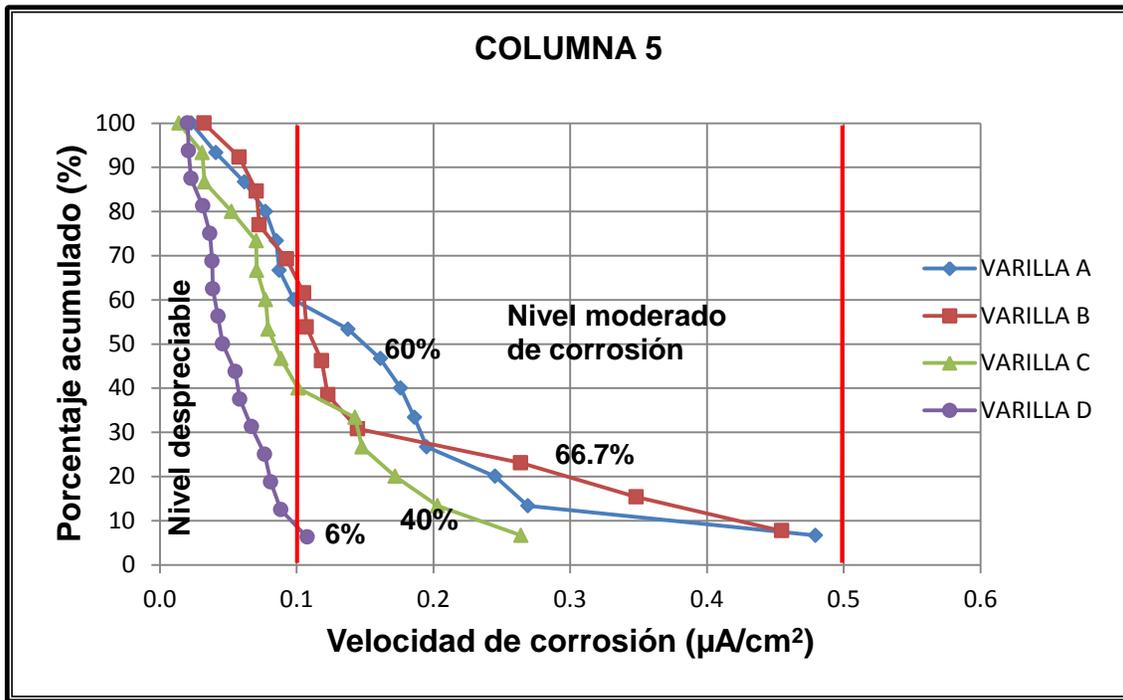
En la gráfica IX.15 se observa que la trabe 4-5 es la que tiene potenciales más negativos y la trabe 1-2 es la que presenta potenciales más positivos ambas se encuentran en la zona de baja probabilidad que exista corrosión.

En las traveses los resultados muestran menor probabilidad de corrosión, lo cual es posible puesto que el contenedor protege a las traveses de la lluvia, además las columnas están propensas a la humedad del suelo.

Otro factor que puede afectar las mediciones es el clima en el que se realizaron las pruebas, ya que los potenciales en columnas se efectuaron en época de lluvias y en las traveses el clima fue más seco.



**Velocidad de corrosión.**



Gráfica IX.16 Porcentaje acumulado Vs Velocidad de corrosión, en columna 5-I.

En la gráfica IX.16 se muestran los porcentajes de datos que corresponden a cada nivel de corrosión, se tiene que la varilla B presenta el porcentaje mayor de lecturas (66.7%) con nivel de corrosión moderado, le siguen la varilla A con el 60% la varilla C con 40% y por último la varilla D reporta el 94% de lecturas con nivel de corrosión despreciable. La literatura (Durar) dice que armaduras que se corroen de 0.1 a 0.2  $\mu A/cm^2$  producen óxidos expansivos que provocarán en 10-20 años la fisuración del recubrimiento, lo que significa que dentro de este lapso de tiempo el porcentaje que ahora es nivel de corrosión moderado se reflejará en el concreto a través de grietas por lo que se necesitará una reparación estructural de esa columna.

Considerando el caso más crítico de velocidad de corrosión que sería 0.479  $\mu A/cm^2$  convirtiéndolo a unidades de penetración mediante la ley de Faraday.

$$\frac{\mu A}{cm^2} = 11.58 \frac{\mu m}{año} \quad \therefore 0.479 \frac{\mu A}{cm^2} = 5.546 \frac{\mu m}{año}$$

Este dato se puede utilizar para estimar la pérdida de capacidad portante estructural.



## **X. PROPUESTAS DE USO.**

Con base en los resultados obtenidos y en el análisis de los resultados se ha optado por realizar dos propuestas encaminadas a dar uso al tanque, las cuales se mencionan a continuación.

Dado que la estructura incrementaría significativamente su periodo de vibrar con el contenedor lleno de agua [25], es recomendable no llenarse, tomando como base los resultados obtenidos del presente estudio de durabilidad se ha optado por hacer una propuesta encaminada al cambio de uso de la estructura con la finalidad de aprovecharla al máximo, dado que a lo largo de la mayor parte de su vida ha estado en desuso por la incertidumbre que se tenía sobre su estado. Ahora se sabe que si bien no puede ser utilizada para el objetivo inicial, puede darsele otros usos, puesto que los materiales, aunque presentan daños, estos no son lo suficientemente elevados como para tomar la decisión de demoler dicha estructura.

Las siguientes propuestas están encaminadas a dar posibles alternativas de solución al problema que representa el tener el tanque elevado sin darle uso significativo.

Actualmente la planta baja se encuentra dividida en dos partes iguales, albergando personal de seguridad de C.U. y en otra se encuentra una bodega del departamento de Servicios Generales de la Universidad.

### **Propuesta 1**

Consiste en demoler la estructura del contenedor con la finalidad de quitar masa a la estructura de soporte, lo que además desde el punto de vista sísmico reduciría los momentos por torsión debidos a la excentricidad del tanque. Ya que se ha visto que en tanques elevados apoyados en una plataforma formada por multicolumnas presentan un tipo de falla originada principalmente por torsión del contenedor [25].

Para usar los 3 niveles superiores es posible construir cubículos, oficinas o salas de estudio, que no demanden gran cantidad de peso muerto sobre estos, como lo demandan las de bodegas.

El proceso constructivo a seguir puede ser el siguiente:

El primer paso debe consistir en la reubicación del personal que actualmente ocupa la planta baja para la posterior demolición del contenedor ya sea con mano de obra o con



maquinaria pesada; el siguiente paso debe ser la escarificación de columnas y traveses con la finalidad de dar un mejor acabado de estas y, donde sea el caso, dar recubrimiento al acero expuesto.

Posteriormente se debe descubrir el acero superior de las traveses perimetrales y radiales (las que convergen en el anillo central) con la finalidad de amarrar un emparrillado con varillas de 3/8” para formar una losa maciza de 10 cm de espesor, la cual debe llevar una dala de 15x20 cm en el extremo perimetral de la losa con la finalidad de desplantar los muros. Este mismo procedimiento puede ser utilizado en cada uno de los niveles, colando el siguiente nivel de losa una vez que el de abajo haya adquirido la resistencia necesaria para soportar la cimbra y el peso del siguiente nivel.

Los muros deben desplantarse de la dala embebida en la losa y puede ser de tabique de barro recocido y deberán llevar castillos en los extremos para dar confinamiento al muro; éstos deben estar separados de las traveses del tanque evitando rigidizar la estructura. Pueden estar unidos mediante taquetes tipo hilti y la junta debe rellenarse, con espuma de poliestireno, relleno de Celotex, etc. Los muros pueden tener una altura de 1.2 m como máximo con la finalidad de no adicionar demasiado peso a la estructura; la altura mencionada debe incluir una dala de cerramiento para que sobre ésta descansa la cancelería.

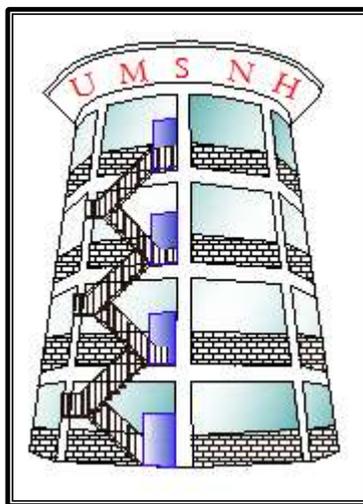


Figura X.1 Primer propuesta para la utilización del tanque elevado.

La cancelería debe cubrir el espacio entre el muro y la trabe del tanque puede sujetarse a los costados de las columnas del propio tanque por medio de taquetes, con la finalidad de no descubrir el acero de la estructura.

La escalera de acceso puede construirse en el exterior sujetándose de las columnas y trabes, en forma de zig-zag; puede fabricarse de acero evitando materiales pesados como lo es el concreto armado.

### **Propuesta 2**

Esta propuesta difiere en la anterior al proponer dejar el contenedor, ya que esto significa un ahorro económico importante y para no adicionar demasiado peso se puede utilizar materiales ligeros para la construcción de oficinas y/o cubículos.

El procedimiento constructivo a seguir propuesto se menciona a continuación.

Reubicar el personal que actualmente habita la planta baja, al igual que en la propuesta anterior, se deben picar las columnas y trabes para repellar y así dar un mejor acabado a la estructura, asimismo dar un recubrimiento en las zonas donde actualmente el acero está expuesto.

El sistema de losa propuesto es igual al anterior, ya que los claros a cubrir en cada nivel no son demasiado grandes como para proponer un tipo de losa aligerado. Sobre el perímetro de la losa deberán dejarse varillas expuestas para el posterior amarrado de éstas con un muro prefabricado.

Los muros pueden ser de panel COVINTEC, W, etc. a una altura de 1.5 m, los muros deberán llevar al menos tres castillos por cada claro a cubrir (uno en cada extremo y el tercero al centro), así como al menos dos dadas con la finalidad de dar mayor rigidez al muro. Éste tipo de muros tiene la ventaja que se ahorra en tiempo de construcción, además dado que los muros no son de carga es posible su utilización sin mayor inconveniente. Los castillos deben estar separados de las columnas y pueden estar unidos mediante algún anclaje tipo perno de expansión, y usando algún relleno para junta de expansión.

La cancelería puede construirse con marcos de aluminio y vidrios de acuerdo a las necesidades que se tengan.



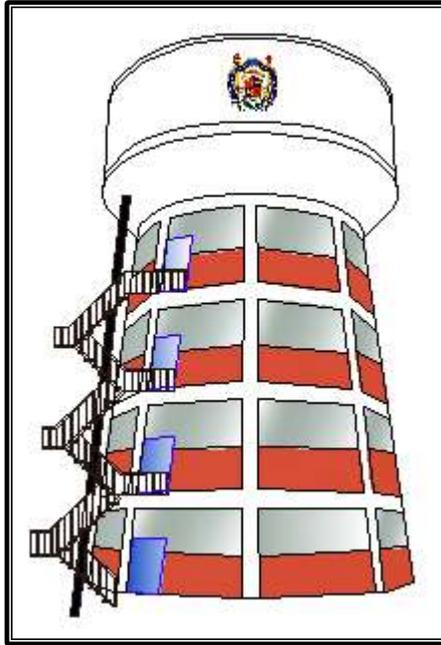


Figura X.2 Segunda propuesta para la utilización del tanque elevado.

La escalera puede ser de acero y construirse independiente del tanque, mediante un poste tubular de acero hincado en el terreno y que el contenedor solamente sirva como apoyo, y en torno al poste debe girar la escalera.

## **XI. CONCLUSIONES.**

La carbonatación no es un factor por el cual haya corrosión en el acero de la estructura, puesto que el frente carbonatado es menor que el espesor de recubrimiento, además las constantes de carbonatación no son consideradas un peligro para la armadura.

El índice esclerométrico no representa con exactitud el esfuerzo a la compresión, puesto la gran cantidad de factores que intervienen en su resultado, sin embargo se puede deducir que el concreto es relativamente homogéneo, lo que implica una buena calidad del mismo.

Los resultados de las pruebas realizadas al concreto del tanque elevado, en general presentan buenos resultados, solamente los ensayos de resistividad eléctrica y porosidad total son los que muestran resultados que clasifican al concreto como de baja calidad.

Los resultados de la prueba de potencial de corrosión indican que el concreto, aunque ya tiene zonas puntuales de corrosión, en general la velocidad de corrosión del acero es media y la vida remanente de la estructura es aún considerable.

La prueba de Resistividad eléctrica está directamente relacionada con la velocidad de corrosión.

En cuanto a los resultados de las pruebas en el acero, indican que el acero se corroe a una velocidad que Durar considera nivel de corrosión moderado, con los resultados de la medida de velocidad de corrosión más elevada de  $5.546 \mu\text{m/año}$ , se puede y recomienda realizar, en un estudio posterior, un cálculo estructural considerando esta pérdida de sección del acero por corrosión, y así determinar la vida remanente de acuerdo a la capacidad estructural del tanque elevado.

La estructura se encuentra en el periodo de vida residual, donde es el momento para reparaciones, y así alargar un poco más este periodo, teniendo en cuenta que el periodo de vida residual culmina con un límite inaceptable de durabilidad y puede considerarse en función de la capacidad de carga de la estructura.



## **XII. BIBLIOGRAFÍA.**

[1] Ávila J., Genescá J., (1996), “Mas allá de la herrumbre”, Fondo de cultura económica, ISBN 968-16-2396-7, México, D.F., pp 7-19.

[2] Tecnología del antiguo Egipto, consultado el 20 de Octubre de 2011, de la Página: [http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa\\_del\\_Antiguo\\_Egipto](http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa_del_Antiguo_Egipto).

[3] Abastecimiento de agua en las ciudades romanas, consultado el 23 de Octubre de 2011, de la Página: <http://www.historicodigital.com/aqua-el-abastecimiento-de-agua-en-las-ciudades-romanas.html>.

[4] Comisión Nacional del Agua, (2009), “Semblanza histórica del agua en México”, Distrito Federal, México, pp 10.

[5] Comisión Nacional del Agua, (2007), “Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento: diseño, construcción y operación de tanques de regulación para abastecimiento de agua potable”, Distrito Federal, México, pp 3,4.

[6] Otto Intze, consultado el 09 de Noviembre de 2011, de la Página: [http://de.wikipedia.org/wiki/Otto\\_Intze](http://de.wikipedia.org/wiki/Otto_Intze).

[7] E. Harmsen T., (2005), “Diseño de estructuras de concreto armado”, 4ª Edición, Pontificia Universidad Católica del Perú, ISBN 9972-42-730-7, Lima, Perú, pp 512-514.

[8] “Torres y Tanques de concreto en la Planicie” En: “Construcción Mexicana”, Septiembre 1964, No.9, Año5, Editora Cultural México-Holanda, pp 13,14.

[9] Aguado A., Agulló L., (2002), “Anales de Construcciones y Materiales Avanzados Volumen 1 Curso 2001-2002”, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D’Enginyeria de la construcció, Referencia: 706-D02-01, Barcelona, España, pp 126-129.

[10] Mariaca Rodríguez L., Genésca Llongueras J., et al., (1999), “CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA (MICAT-MÉXICO)”, Plaza y Valdés, ISBN 968-856-707-8, Distrito Federal, México, pp 6, 37.

[11] Red iberoamericana XV.B. “DURAR” (Durabilidad de la Armadura), (1997), “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico en estructuras de hormigón armado”,



CYTED Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo, Rio de Janeiro, Brasil.

[12] López Celis R., Pérez Quiroz J. T., et al., (2006), “Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbanos de México”. Publicación Técnica No. 292, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México, pp12-15.

[13] Pasindo Gómez Carlos, (2005), “Levantamiento de daños por corrosión y rehabilitación de la banda B del puerto de Manzanillo”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, pp 16, 24-29.

[14] Brito Chávez Esteban, (2007), “Durabilidad de estructuras existentes de concreto reforzado, obtención de su metodología de evaluación, y anteproyecto de la normativa, correspondiente para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT”, Tesis de Maestría, Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías Terrestres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.

[15] Carmona Leal Noé, (2008), “Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto, en un atmósfera urbana, caso Morelia, Michoacán”, Tesis de Maestría, Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías Terrestres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, pp 13-17.

[16] Méndez Miranda Benito A., (2011), “Análisis y evaluación de la durabilidad de los materiales del puente el Rangel en Michoacán, México.” Tesis de Maestría, Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías Terrestres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.

[17] Barrera Moreno Wendy, (2005), “Levantamiento de daños, diagnóstico y propuestas de solución para la rehabilitación de la banda A en el muelle de Manzanillo, colima”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, pp 40-43.

[18] Del Valle Moreno A., Pérez López T., Martínez Madrid M., (2001), “El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado”. Publicación Técnica No. 182 Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México, pp 54-59.



[19] Torres Acosta A. A., Martínez Madrid M., (2001), “Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad”. Publicación Técnica No. 181, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México, pp 4-16.

[20] NMX -C-169-ONNCCE-2009, “Industria de la construcción - Concreto - Extracción de especímenes cilíndricos o prismáticos de concreto hidráulico endurecido”.

[21] Torres Acosta A. A., Martínez Molina W., et al. (2010), “Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto” Publicación Técnica No. 328, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México, pp 43-45.

[22] Chávez García Hugo Luis, (2011), “Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos locales y cemento CPC30R RS”, Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias, Centro de Investigación y Desarrollo del Estado de Michoacán, Michoacán, México.

[23] Díaz González Noel, (2011), “Efecto del agregado grueso pétreo triturado en sollicitaciones mecánicas dinámicas y estáticas. Caso de concreto hidráulico simple adicionado con fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco”, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, pp 92-94.

[24] ASTM. American Standard Testing Materials. “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concrete. Designation C-1585-04.

[25] Hernández Barrios H., Arce L. C., et al. (2011), “Comportamiento sísmico de un tanque elevado de concreto reforzado con fondo troncocónico”, Artículo publicado en el XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes, México.

