



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

TESIS

TITULO: ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO EN CONDICIONES ACELERADAS Y NATURALES: APLICACIÓN AL AMBIENTE DE LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY.

Tesista: Ing. Aldo Rubén Campos Silva.

Director de tesis: Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel.

Co-director de tesis: Dr. José Manuel Mendoza Rangel.

Monterrey N.L., a Diciembre de 2011



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - UANL
PRESENTE

Estimado Dr. Valdez,

En relación a su oficio en el que me informa que fui designado DIRECTOR DE LA TESIS "ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO EN CONDICIONES ACELERADAS Y NATURALES: APLICACIÓN AL AMBIENTE DE LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY", que presenta el **Ing. ALDO RUBÉN CAMPOS SILVA**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAN VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. 30 de noviembre de 2011.

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
DIRECTOR DE LA TESIS



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - UANL
PRESENTE

Estimado Dr. Valdez,

En relación a su oficio en el que me informa que fui designado DIRECTOR DE LA TESIS "ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO EN CONDICIONES ACELERADAS Y NATURALES: APLICACIÓN AL AMBIENTE DE LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY", que presenta el **Ing. ALDO RUBÉN CAMPOS SILVA**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAN VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. 30 de noviembre de 2011.

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
DIRECTOR DE LA TESIS



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx

DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
Presente.-

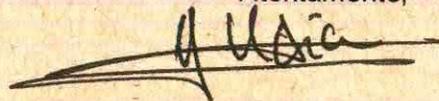
Monterrey, Nuevo León, 28 de noviembre 2011.

Estimado Dr. Valdez,

En relación a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la Tesis: "ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO EN CONDICIONES ACELERADAS Y NATURALES: APLICACIÓN AL AMBIENTE DE LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, que presenta el Ing. Aldo Rubén Campos Silva, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente,



DR. GERARDO MANUEL MEJÍA VELÁZQUEZ
DIRECTOR DE CAMBIO CLIMÁTICO, CALIDAD DEL AIRE Y RETC
EVALUADOR

c.c.p.:

Archivo.

GMMV'DIBH

Subsecretaría de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección de Cambio Climático, Calidad del Aire y RETC

www.nl.gob.mx

Washington No. 648 Ote. | Zona Centro Monterrey, NL
C.P. 64000 | Tels. (81) 2020. 6758 y 2020.6759 Fax: 2020.6755

AGRADECIMIENTOS

Ha sido descrito por múltiples escritores y pensadores la necesidad del ser humano, de tener una fe la cual le brinde un sentido a su vida. Así mismo esta le permita hacer frente a las adversidades que se le presenten, para muchas personas esta fe nace de la religión, la cual les ayuda a hacer frente a las dificultades de la vida. En lo personal y al menos en esta etapa de mi vida mi fe no es precisamente religiosa, mi fe proviene de mi familia. Por lo tanto agradezco a mis padres Héctor Rubén Campos Esparza a mi madre Martha Silva Luna por ser parte de mi vida.

A mi hermano Héctor Gerardo Campos Silva, por todos los momentos buenos y malos que hemos vivido juntos.

A mi cuñada Angélica García, también por compartir con nosotros múltiples vivencias.

A mi abuela Estefana Luna, por también ser parte de todos esos momentos que seguramente añorare en el futuro.

A mi sobrino Humberto Iván Campos García por ser nuestra vida eterna, ya que si alguna influencia dejamos en él, esta nos hará perdurable a través de los tiempos. Así como nosotros somos las enseñanzas de nuestros antepasados.

En lo que respecta a esta Tesis me gustaría agradecer primeramente a las personas que me ayudaron desinteresadamente a realizarla, como lo fue el Ing. Ulises Sánchez, por medio del cual pude conseguir el cemento CPO utilizado en esta Tesis.

A los alumnos de la maestría de Materiales de Construcción, Ing. Darío Adrian Aguilar Rodríguez, Ing. Bonifacio Manríquez, Ing. Eduardo Garza, Ing. Ricardo de León, Ing. Omar Díaz, Armando Escobar, Ing. Jonathan del Real por darme su opinión acerca de esta Tesis.

A los alumnos de doctorado M.C. Alejandro Herrera y al Ing. Rivera, los cuales me dieron su apoyo en numerosas ocupaciones de la Tesis.

A mi Director Dr. Gerardo Fajardo San Miguel por darme su apoyo en la realización de esta tesis.

Especialmente agradezco a mi Co-director Dr. José Manuel Mendoza Rangel por darse el tiempo de escuchar las dudas que tenía acerca de esta investigación y por brindarme su opinión.

A la Secretaria de Desarrollo Sustentable del gobierno del estado de N.L., por facilitar el uso de instalaciones para colocar las muestras en la estación de monitoreo SIMA.

Al Dr. Gerardo Manuel Mejía Velázquez por la atención prestada para la realización de esta investigación.

Especialmente se agradecen los apoyos otorgados para el desarrollo de esta tesis a los proyectos CONACYT Ciencia Básica CB-2007/82464 y PAICYT CA1499-07.

Por último quisiera agradecer a instituciones como SIMA y CONAGUA para los que sin su apoyo esta Tesis no sería posible al menos en los términos en que es presentada.

Al CONACYT por ayudarme siendo becario de tal organismo y mediante el cual y sin su apoyo fundamental esta Tesis no sería posible.

<i>Tema</i>	<i>Página</i>
1.- Las Generalidades	
1.1.- El Concreto Reforzado	4
1.2.- La Corrosión	5
1.2.1.- Los Daños causados por la corrosión	6
1.3. - La Carbonatación	8
1.3.1.- Los Modelos de Carbonatación	11
1.3.1.1.- El Modelo Analítico de Papadakis	11
1.3.1.2. – La Relación empírica de la Raíz cuadrada del tiempo	13
1.3.1.3. – El Modelo de difusión de CO ₂ propuesto por el CEB (Comite Euro-International du Beton 1997) el cual está basado en la primera Ley de Fick	14
1.3.1.4. – La Relación empírica de Parrott	15
1.4.- La Durabilidad	15
1.4.1.- La Vida Útil	17
1.4.2.- La Vida Residual	18
1.5.- La Contaminación atmosférica	19
1.5.1 - Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, IMECA	20
1.5.2- La Contaminación atmosférica en el área metropolitana de Monterrey	21
1.6.- El Efecto Invernadero	24

1.6.1 - Las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	25
1.7.- El Cambio Climático	27
1.7.1.- El Cambio Climático en el área metropolitana de Monterrey	29
1.7.2.- Las Causas del Cambio	37
1.8.- La Concentración de CO ₂	38
1.8.1 - La Concentración de CO ₂ en el área metropolitana de Monterrey	40
1.9.- Las Repercusiones del calentamiento global	41
1.9.1- Las Repercusiones del calentamiento global en el proceso de carbonatación	43
2.- Los Antecedentes	
2.1.- La Definición del problema	46
2.2.- El efecto del cementante	47
2.3.- El efecto de la relación a/c	49
2.4.-El efecto de la Humedad relativa	50
2.5.- El efecto de la concentración de CO ₂ , en condiciones naturales	51
2.5.1.- El efecto de concentración de CO ₂ , en condiciones aceleradas	52
2.6.- Alcances y Limitaciones	53
2.7.- La descripción de los trabajos realizados anteriormente	54
2.8.- La Justificación	71
2.9.- La Hipótesis	73
2.10.- El Objetivo general	73

2.10.1.- Los Objetivos específicos	73
3.- Metodología experimental	
3.1 - Los Cementantes	75
3.1.1.- Las características del cemento	76
3.2.- Las características de los agregados	78
3.2.1- El agregado grueso	78
3.2.2.- El agregado fino	81
3.3.- El diseño de las mezclas de concreto	82
3.4.- El proceso de mezclado	86
3.5.- Las características del concreto en estado fresco	88
3.5.1.- Determinación de la temperatura de la mezcla de concreto	88
3.5.2.- El revenimiento	90
3.5.3.- Las características del concreto en estado endurecido	91
3.5.3.1.- La resistencia a la compresión	91
3.6.- Los especímenes sometidos a carbonatación	92
3.6.1.- Dimensiones de los especímenes	92
3.6.2.- Curado de los especímenes	93
3.6.3.- Pre-acondicionamiento de los especímenes	93
3.7.- La exposición a carbonatación natural	94
3.7.1.- Caracterización de las condiciones meteorológicas	94
3.7.2- Selección de los lugares de exposición	95

3.7.3.- Lugares de exposición	97
3.7.3.1.- Norte de la zona metropolitana de Monterrey	97
3.7.3.2.- Centro de la zona metropolitana de Monterrey	98
3.8.- La exposición acelerada	100
3.9.- La medición de la profundidad de carbonatación	100
4.- Resultados y discusión	
4.1.- La caracterización de las condiciones meteorológicas	106
4.1.1.- La concentración de CO ₂	106
4.1.2.- La concentración de CO ₂ en las zonas de exposición	107
4.1.2.1.- La concentración de CO ₂ , en diferentes ambientes	109
4.1.3.- La Humedad Relativa	112
4.1.4.- La Temperatura	114
4.1.5.- La velocidad del viento	117
4.2.- La Profundidad de carbonatación vs Tiempo	119
4.2.1.- La Profundidad de carbonatación vs Tiempo en condiciones naturales	119
4.2.2.- La profundidad de carbonatación vs tiempo en condiciones aceleradas	122
4.3.- Profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión	127
4.3.1.- La profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión, en condiciones naturales	128
4.3.2.- La profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión,	131

en condiciones aceleradas.	
4.4.-Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión	134
4.4.1.-Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión en condiciones naturales	134
4.4.2.-Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión en condiciones aceleradas	138
4.5.- Relación entre la profundidad de carbonatación natural vs la profundidad de carbonatación acelerada	140
4.6.- Predicción de la profundidad de carbonatación	142
4.6.1.- Parámetro A	142
4.6.1.1.- Factor ambiental, m	143
4.7.- Predicción realizada con la raíz del tiempo	144
4.8.- Predicción lineal	145
4.9.- Verificación de las ecuaciones de Predicción	146
4.10.- Predicción lineal vs Predicción raíz	150

Figura 1.- Ilustración del proceso de corrosión	5
Figura 2.- Distribución de puentes por tipo de material	7
Figura 3.- Un Modelo de durabilidad de Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad de Andrés A. Torres Acosta y Miguel Martínez Madrid	19
Figura 4. Puntos IMECA máximos, Fuente: SIMA, Nuevo León	22
Figura 5. Días sobre la norma, Fuente SIMA, Nuevo León	23
Figura 6. Promedios de concentraciones de partículas menores a diez micras por zona en el área metropolitana de Monterrey, Fuente SIMA, Nuevo León	23
Figura 7. Promedios de concentraciones de monóxido de carbono en el área metropolitana de Monterrey, Fuente SIMA, Nuevo León	24
Figura 8.- El efecto invernadero	25
Figura 9. Emisiones de GEI	26
Figura 10.- a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004. b) Parte proporcional que representan diferentes GEI, antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO ₂ equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores	27

en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004,
 en términos de CO₂ equivalente. (En el sector silvicultura
 se incluye la deforestación)

Figura 11.- La temperatura máxima por decenio, Fuente CONAGUA	29
Figura 12.- La temperatura máxima promedio por decenio, Fuente CONAGUA	30
Figura 13.- La temperatura mínima por decenio, Fuente CONAGUA	31
Figura 14.- La temperatura mínima promedio por decenio, Fuente CONAGUA	32
Figura 15.- La temperatura media por decenio, Fuente CONAGUA	33
Figura 16.- La Humedad Relativa máxima por decenio, Fuente CONAGUA	34
Figura 17.- La Humedad Relativa máxima promedio por decenio, Fuente CONAGUA	35
Figura 18.- La precipitación promedio anual, Fuente CONAGUA	36
Figura 19.- Los vientos predominantes promedio, Fuente CONAGUA	37
Figura 20.- Concentración atmosférica de CO ₂	39
Figura 21.- Simón Bolívar y Madero	40
Figura 22.- Simón Bolívar y Leones	40
Figura 23 - Escenarios de Emisiones de GEI entre 2000 y 2100	41
Figura 24.- Tiempo de estabilización de la concentración atmosférica	43
Figura 25.- Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes contenidos de cemento por Kg/m ³	49
Figura 26.- Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes relaciones a/c	50

Figura 27.- Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes concentraciones de CO ₂	53
Figura 28.- Relación entre carbonatación natural y carbonatación acelerada a 5% de CO ₂	58
Figura 29.- Relación entre el coeficiente de carbonatación y la resistencia a la compresión a los 28 días (ciudad)	62
Figura 30.- Relación entre el coeficiente de carbonatación y la resistencia a la compresión a los 28 días (rural)	62
Figura 31.- Relación entre la profundidad de carbonatación en ambiente natural (ciudad) y ambientes acelerados.	63
Figura 32.- Relación entre la profundidad de carbonatación en ambiente natural (rural) y ambientes acelerados.	63
Figura 33.- Muestra en forma de cono	78
Figura 34.- Aplanado de la mezcla	78
Figura 35.- Retención de los cuartos opuestos	79
Figura 36.- Remezclado de la muestra	79
Figura 37.- Almacenaje del agregado	79
Figura 38.- Análisis granulométrico del agregado grueso	80
Figura 39.- Análisis granulométrico del agregado fino	81
Figura 40.- Relación de pruebas experimentales	85
Figura 41.- Revolvedora convencional	86

Figura 42.- Agregados grueso y fino, mezclados	86
Figura 43.- Concreto mezclado	87
Figura 44.-Concreto vertido en carretilla	87
Figura 45.- Medición de la temperatura en el concreto fresco	89
Figura 46.- Medición del revenimiento del concreto	90
Figura 47.- Cabeceo de cilindro	91
Figura 48.- Cilindro en compresión	91
Figura 49.- Resistencia a la compresión a los 28 días	92
Figura 50.- Dimensiones de los especímenes de concreto	93
Figura 51.- Especímenes al horno	94
Figura 52.- Medición de la concentración de CO ₂	95
Figura 53.- Clima Lluvioso	96
Figura 54.- Clima cálido	96
Figura 55.- Especímenes con una condición superficial semi-húmeda	96
Figura 56.- Vista general de la zona para los especímenes expuestos a carbonatación natural	97
Figura 57.- Av. Fidel Velázquez (Enero 2011)	98
Figura 58.- Industria de la zona (Enero 2011)	98
Figura 59.- Av. Universidad (Enero 2011)	98
Figura 60.- Especímenes expuestos a carbonatación natural	99
Figura 61.-Calle 5 de Mayo	99

Figura 62.- Estación Obispado	99
Figura 63.- Cámara de carbonatación	100
Figura 64.- Corte realizado al espécimen	101
Figura 65.- Aplicación de fenolftaleína	102
Figura 66.- Prismas después del corte	102
Figura 67.- 14 días a exposición acelerada	102
Figura 68.- 28 días de exposición	102
Figura 69.- Mediciones para obtener la profundidad de carbonatación	103
Figura 70.- Concentración de CO ₂ en ppm, en la Zona Norte	108
Figura 71.- Vista aérea de la zona metropolitana de Monterrey	110
Figura 72.- Zona Norte	110
Figura 73.-Zona habitacional	110
Figura 74.- Simón Bolívar y Leones	111
Figura 75.- Unidad médica (UANL)	111
Figura 76.- Simón Bolívar y Madero	111
Figura 77.- Concentración de CO ₂ promedio en ppm, en diversas zonas del área metropolitana de Monterrey	112
Figura 78.- Humedad Relativa mensual en la zona de exposición Norte	113
Figura 79.- Humedad Relativa mensual en la zona de exposición Centro	114
Figura 80.- Temperatura promedio, mínima y máxima en la zona Norte	115
Figura 81.- Temperatura promedio, mínima y máxima en la zona Centro	116

Figura 82.- Velocidad del viento en la zona Norte	117
Figura 83.- Velocidad del viento en la zona Centro	118
Figura 84.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente natural	120
Figura 85.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 3% de CO ₂	123
Figura 86.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 4% de CO ₂	124
Figura 87.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 5% de CO ₂	125
Figura 88.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 6% de CO ₂	126
Figura 89.- Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes realizados con cemento CPO y CPC	128
Figura 90.- Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes realizados con cemento CPO	129
Figura 91.- Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes realizados con cemento CPC	130
Figura 92.- Profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO ₂	131
Figura 93.- Profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO ₂ , para especímenes realizados	132

con cemento tipo CPO	
Figura 94.- Profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO ₂ , para especímenes realizados con cemento tipo CPC	133
Figura 95.- Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para los especímenes realizados con cemento CPO	135
Figura 96.- Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para los especímenes realizados con cemento CPC	136
Figura 97.- Coeficiente de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO ₂ , para especímenes realizados con cemento tipo CPO	138
Figura 98.- Coeficiente de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO ₂ , para especímenes realizados con cemento tipo CPC	139
Figura 99.- Carbonatación natural vs carbonatación acelerada para una concentración de 3% de CO ₂ , para especímenes realizados con cemento CPO	141
Figura 100.- Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 3% de CO ₂ (CPO Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8)	146
Figura 101.- Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la	147

profundidadde carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 3% de CO ₂ (CPC Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8)	
Figura 102.- Profundidad de carbonatación obtenida en prueba vs la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo lineal a una concentración de 3% de CO ₂ (CPO Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).	148
Figura 103.- Profundidad de carbonatación obtenida en prueba vs la profundidad de carbonatación de predicción lineal a una concentración de 3% de CO ₂ (CPC Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).	149
Figura 104.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para la predicción lineal y la predicción basada en la raíz del tiempo para especímenes realizados con CPO y una concentración de 3% de CO ₂ .	150

INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo pasado y principios del presente, cada vez se le ha dado mayor importancia al fenómeno conocido como calentamiento global. Este ha sido y será un tema que causa mucha polémica debido a la existencia de múltiples puntos de vista. Hay científicos que defienden la hipótesis la cual describe que se trata de un proceso natural de la Tierra, y por lo tanto carece de importancia realizar cualquier acción encaminada a mitigar este efecto. Otro aspecto que interfiere y quizás el más importante resulta en el hecho de que no es posible tener un desarrollo sostenible que no dañe las condiciones ambientales del planeta. Esto nos lleva a pensar que debemos cambiar de modelos de crecimiento económico, tales como los E.U.A. y China, debido a que su crecimiento subyace en un uso inadecuado de los recursos, lo cual aun en nuestros días es preocupante.

Es muy complicado precisar la amplitud de este cambio debido a que existen múltiples escenarios considerados por los científicos, los cuales en algunos casos resultan de efectos moderados, y en otros extremos como del que habla José Sarukhán, ex rector de la UNAM, el cual cifró en un 15 % las probabilidades de que un evento catastrófico a finales del siglo XXI, lo cual conllevaría a un aumento en la temperatura de la Tierra de hasta 9°C. Un aumento de la temperatura de la tierra en esa magnitud haría imposible la vida como la conocemos.

En lo que respecta a la Ciencia, esta se encarga de estudiar los fenómenos que producen una afectación a la humanidad. La Ingeniería Civil como parte de la Ciencia no puede soslayarse de la responsabilidad de estudiar fenómenos que atañen a la sociedad. El enfoque de esta tesis va encaminado a hacer conciencia del problema ambiental que tenemos en el contexto del fenómeno de carbonatación del concreto reforzado el cual causa numerosos daños en las obras e infraestructura civil elaborada con este material.

En esta tesis resulta primordial para el autor hablar del calentamiento global, presentar información obtenida a través de diferentes organismos como la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), SIMA (Sistema Integral de Monitoreo Ambiental) Nuevo León, del IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre cambio climático) con la finalidad de conocer lo que está

pasando y lo que podría suceder en lo que respecta en las condiciones ambientales.

Todo lo anterior retoma importancia debido a que el proceso de carbonatación es un fenómeno estrechamente ligado a las condiciones ambientales prevalecientes en el lugar, predecir su avance resulta cada vez más complicado si tomamos en cuenta los datos presentados en esta investigación, lo cuales muestran escenarios ambientales tan diferentes y como se mencionó anteriormente hasta catastróficos.

A través de los siguientes capítulos se abordara lo anteriormente descrito de la siguiente manera:

En el capítulo I se describirán las generalidades, las cuales están avocadas a describir las condiciones ambientales prevalecientes y los posibles escenarios ambientales en el ámbito local y mundial.

En el capítulo II, se hablará de las investigaciones enfocadas en el proceso de carbonatación en condiciones naturales y aceleradas.

El capítulo III, describe la metodología utilizada para la presente investigación.

El capítulo IV, se discuten los resultados obtenidos, a través de la investigación realizada.

Por último, en el capítulo V, se abordan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros, obtenidas de las experiencias al realizar nuestra investigación.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

“Los científicos pueden plantear los problemas que afectarán al medio ambiente con base en la evidencia disponible, pero su solución no es responsabilidad de los científicos, es de toda la sociedad”.

Dr. Mario Medina

1.- Generalidades.

En este capítulo, se pondrá especial atención en el tema del cambio climático y cómo este fenómeno afecta nuestro entorno, para ello se describirán las causas y los efectos que produce en el mundo, en el país y en nuestra región. Se pondrá especial interés en describir los cambios meteorológicos que se han presentando en los últimos años. A través de esta revisión, se pretende dar una visión general de los aspectos que interfieren en esta investigación y con esto brindar información que ayude a los lectores de esta tesis a juzgar la pertinencia de este trabajo.

1.1.- El Concreto Reforzado.

El concreto reforzado es el material de construcción más utilizado en el mundo, su versatilidad, economía y alcance lo hacen un material único en su clase. Sin embargo, el concreto reforzado se deteriora al interactuar con el medio ambiente [1].

Muchas estructuras de concreto reforzado construidas desde hace 40 a 100 años, ahora se incluyen dentro del patrimonio cultural debido a su importancia arquitectónica y social. Estos incluyen por ejemplo edificios, infraestructuras y estructuras industriales. Muchas de estas estructuras sufren el daño debido a la carbonatación del concreto y la consecuente corrosión de las varillas de acero embebidas en el concreto [2].

1.2.- La Corrosión.

Esta se define como la causa general de la alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre [3].

La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales [4]:

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

En la Figura 1, se ilustra el proceso de corrosión del concreto reforzado donde se forma la celda electroquímica, descrita anteriormente.

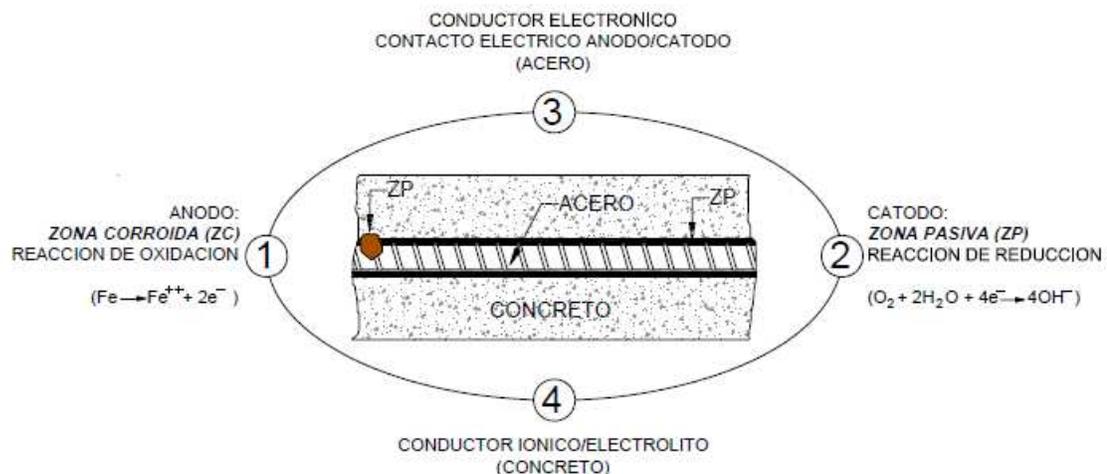


Figura 1.- Ilustración del proceso de corrosión.

La corrosión del acero es una de las causas más habituales del deterioro de las estructuras de concreto que está llevando a elevados gastos de reparación y mantenimiento, con la preocupación que ello supone para las administraciones que son las propietarias de las obras públicas, y los particulares cuyas viviendas sufren deterioros prematuros [5].

1.2.1.- Los Daños causados por la corrosión.

Con el fin de contextualizar la importancia de la corrosión en las estructuras de concreto a continuación se presentan algunas cifras [6].

- Se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura en los Estados Unidos de América.
- Así mismo, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión.

El deterioro de la infraestructura existente como, puentes, tuberías, tanques, edificios, canales, puertos, plantas de almacenamiento, aeropuertos, ferrocarriles, etc., es un problema grave en la actualidad que afecta no sólo a las dependencias responsables de ellas, sino que repercute indirectamente a la sociedad debido a que estas estructuras quedan inservibles tiempo antes de alcanzar el final de su vida útil de proyecto, y muchas de las veces se debe a que no se tiene un correcto diagnóstico, de las condiciones que afectarán a la estructura a lo largo de su vida, como es el caso del medio ambiente al cual estarán expuestas [7].

La Red Federal de Carreteras en México, cuenta con 6,854 puentes [8] la mayor parte de ellos construidos de concreto reforzado (67%) (véase Figura 2). Por su parte Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios

Conexos (CAPUFE) tiene a su cargo 2500 puentes de los cuales gran parte de ellos son también de concreto reforzado.

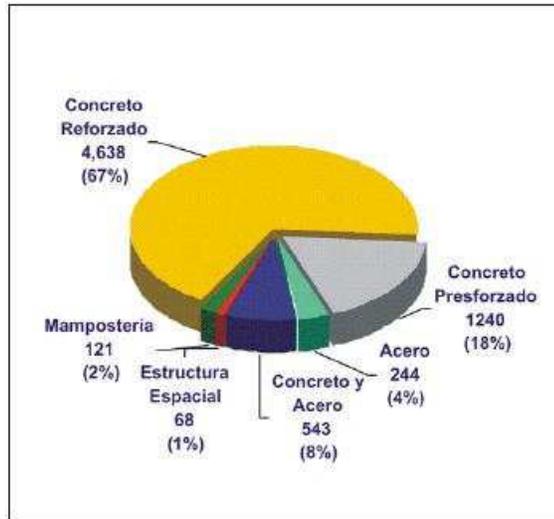


Figura 2.- Distribución de puentes por tipo de material.

Las estructuras a cargo de la Red Federal de Carreteras, presentan diferentes grados de corrosión, debido a la penetración de cloruros y a la carbonatación, como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1.- Clasificación en función del tipo y nivel de daño de puentes inspeccionados.

Puentes prioritarios por corrosión		
Prioridad	Por penetración de cloruros[9]	Por carbonatación [10]
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

Como se puede ver en la tabla anterior, el proceso de corrosión por carbonatación es un fenómeno que afecta a múltiples estructuras de concreto reforzado y por lo tanto cada vez es de mayor importancia.

1.3. - La Carbonatación.

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado perfectamente. En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia el interior de la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos [11].

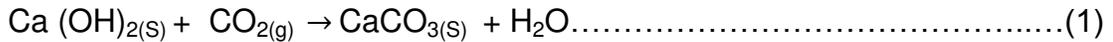
La corrosión del acero de refuerzo es el mayor factor en la reducción de la vida de servicio de las estructuras y elementos de concreto reforzado. En ambientes tropicales no marinos, la carbonatación del concreto induce posteriormente la corrosión del acero de refuerzo siendo el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado [1].

La carbonatación como se ha mencionado es el proceso que causa mayor deterioro de las estructuras en un ambiente urbano, para que este proceso se dé requiere de ciertas condiciones:

- a) Contenido de humedad.
- b) Contenido de CO₂ y SO₂ atmosférico.
- c) Permeabilidad del concreto.
- d) Humedad Relativa.
- e) El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% aproximadamente [12].

Es conocido que la carbonatación es una reacción química la cual sucede entre la portlandita y el CO₂ [13]. La portlandita (CaOH₂), está presente como producto de la hidratación de los componentes del cemento como el silicato tricálcico (C₃S) y silicato dicálcico (C₂S) [14].

La reacción de la portlandita con el dióxido de carbono puede ser escrito como en la ecuación 1:



Cuando el CO₂ penetra en el concreto endurecido, este reacciona con la portlandita en presencia de humedad formando CaCO₃. El avance de la carbonatación depende principalmente de la humedad relativa, la concentración de CO₂, la presión de penetración y la temperatura del ambiente donde es colocado el concreto [15].

La carbonatación disminuye el pH del concreto de mayores de 12.5 unidades a valores entre 8 y 9 unidades [16]. Una vez que el pH ha disminuido, el ambiente que rodea al refuerzo de acero pierde sus propiedades protectoras de la capa de oxido pasivo, y se desencadena, el proceso de la corrosión del acero y, posteriormente, el agrietamiento del concreto, dando fin al período de vida útil de la estructura [17].

El dióxido de carbono atmosférico se difunde dentro del concreto a través de la red de poros y microgrietas, y entonces reacciona con los componentes alcalinos de la solución del poro y las fases del cemento hidratado. Tales reacciones bajan la típica alcalinidad de la solución del poro. Esta reducción del PH dentro de la cubierta de concreto destruye la pasivación de la capa de óxidos inicialmente formada sobre el refuerzo y se inicia la corrosión. La importancia del contenido de humedad en los poros es crucial en la difusión del proceso. De ahí que la variación de este parámetro sea generalmente reconocido como un factor importante para la carbonatación del concreto [18].

Las grietas no modifican significativamente la vida de servicio, pero las microgrietas de tensión reducen el tiempo que es necesario para que agentes agresivos alcancen el refuerzo a través de la cubierta de concreto. La cuantificación de este efecto es esencial para predecir la vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado [19].

Para estimar los efectos de la carbonatación a largo plazo, es necesario un modelo de carbonatación fidedigno es necesario. Generalmente un número de propuestas pueden ser consideradas para la predicción de la vida de servicio del concreto tales como métodos semi-determinísticos, métodos experimentales relacionados con pruebas aceleradas basadas sobre un mecanismo de deterioro. En cualquier caso los modelos matemáticos proporcionan una expresión del proceso de degradación de la química y física del concreto [20].

1.3.1.- Los Modelos de Carbonatación.

Los siguientes modelos que se presentan tienen la ventaja de tener relativamente pocos parámetros para la complejidad del fenómeno [21].

1.3.1.1.- El Modelo Analítico de Papadakis.

Este modelo se basa en las siguientes hipótesis [22].

- El Coeficiente de difusión a través del material depende de la humedad relativa, pero no del estado hídrico del material (húmedo ó seco). Este modelo no distingue si el material es seco, húmedo o en equilibrio con la humedad relativa.
- Las reacciones químicas ocurren en equilibrio. Sin embargo, en el caso de las pruebas de carbonatación acelerada, los perfiles muestran que la formación de calcita no es instantánea.
- Las características del material (porosidad, contenido de Portlandita) son supuestas como uniformes a través de todos los especímenes simulados, los cuales actualmente se carbonatan de una forma heterogénea.

La aproximación de Papadakis estima analíticamente la profundidad de carbonatación de la concentración de ciertas fases de cemento (CH = portlandita, C-S-H = $x \text{ CaO} - y \text{ SiO}_2 - z \text{ H}_2\text{O}$, $\text{C}_2\text{S} = 2 \text{ CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{C}_3\text{S} = 3 \text{ CaO} - \text{SiO}_2$) que contienen calcio.

De acuerdo a Papadakis la profundidad X_c puede ser obtenida mediante la siguiente fórmula 2.

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}^c [CO_2]^0}{n_{CH}^0 + 1.7n_{C-S-H}^0 + 3n_{C_3S}^0 + 2n_{C_2S}^0}} \dots\dots\dots(2)$$

Donde $[CO_2]^0$ es la concentración inicial de CO_2 (en mol/m³), n_i^0 es la concentración inicial de la especie mineral en el material (en mol/m³) y $D_{CO_2}^c$ es el coeficiente de difusión en la zona carbonatada.

La difusividad se estima mediante la siguiente ley empírica (ecuación 3).

$$D_{CO_2}^c = 1.64 \times 10^{-6} \Phi^{C1.8} (1 - H.R.)^{2.2} \dots\dots\dots(3)$$

Donde Φ^C es la porosidad en la zona carbonatada obtenida de la ecuación 4.

$$\Phi^c = (\Phi_0 - \Delta\Phi^c) \left(1 + \frac{\frac{\rho_B a/b}{\rho_A}}{1 + \frac{\rho_B w/b}{\rho_1}} \right) \dots\dots\dots(4)$$

Donde ρ_B , ρ_A y ρ_1 son las densidades del cementantes, de los agregados y del agua respectivamente, a/b representa la relación de agregado con el cementante, w/b es la relación entre el agua y el cementante, Φ_0 representa la porosidad inicial y $\Delta\Phi^c$ es la variación de la porosidad debida a la carbonatación del C-S-H y CH (ecuación 5).

$$\Delta\Phi^c = [CH]^0 \Delta\bar{v}_{CH} + [CSH]^0 \Delta\bar{v}_{CSH} \dots\dots\dots(5)$$

Donde $\Delta\bar{v}_{CH} = 3.85 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ y $\Delta\bar{v}_{CSH} = 15.39 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$

1.3.1.2. – La Relación empírica de la Raíz cuadrada del tiempo.

Esta relación empírica es la ecuación más utilizada para determinar la profundidad de carbonatación, esto debido a su simplicidad, por que agrupa en el valor K , las diferentes variables (parámetros climáticos y características del concreto) que afectan en el proceso de carbonatación.

$$X = K\sqrt{t} \dots\dots\dots(6)$$

X = Profundidad del frente de carbonatación, en mm.

K = Coeficiente de Carbonatación, en $\text{mm/año}^{1/2}$.

t = Vida de la estructura de concreto, en años.

El coeficiente de carbonatación se modela como:

$$K = (2 * D * C / M)^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

D = Coeficiente de difusión del dióxido de carbono en el concreto.

C = Es la concentración de dióxido de carbono en el ambiente.

M = es la concentración equivalente de óxido de calcio hidratado en la pasta de cemento.

El tiempo de iniciación de la carbonatación inducida podría ser estimada si se conoce el valor de K y X es tomada del valor del recubrimiento.

$$t = \frac{X^2}{K^2} \dots\dots\dots(8)$$

1.3.1.3. – El Modelo de difusión de CO₂ propuesto por el CEB (Comite Euro-International du Beton 1997) el cual está basado en la primera Ley de Fick [23].

$$X^2 = \frac{2D}{a} (C_1 - C_2)t \dots\dots\dots(9)$$

En su propuesta asumen que el frente de carbonatación es igual a la profundidad de carbonatación y la concentración de CO₂ al fin de la profundidad de carbonatación (C₂) es igual a cero, la ecuación para el alcance de carbonatación se simplifica:

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}}{a} C_{CO_2}t} \dots\dots\dots(10)$$

X_c = Profundidad de carbonatación, en cm.

D_{CO₂} = Coeficiente de difusión, en cm²s⁻¹.

C_{CO₂} = concentración atmosférica de CO₂, en gcm⁻³.

a = Cantidad de CO₂ para una completa carbonatación gr/cm².

La cantidad requerida a de CO₂ para lograr carbonatar completamente el concreto en la unidad de volumen, es función de la capacidad cementante, y puede ser calculada de la relación entre CaO en el cemento y el grado de hidratación en la condición atmosférica.

$$a = 0.75 \times Ce \times CaO \times \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} (Kgm^{-3}) \dots\dots\dots(11)$$

Ce = contenido de cemento en kgm⁻³.

CaO = Contenido de CaO en el cemento.

α_H = Grado de hidratación.

M = Masas molares ($\text{CO}_2 = 44 \text{ g mol}^{-1}$ y $\text{CaO} = 56 \text{ g mol}^{-1}$).

1.3.1.4. – La Relación empírica de Parrott [24].

$$X = 64 \frac{K^{0.4} t^{0.5}}{c^{0.5}} \dots\dots\dots(12)$$

c = concentración en el concreto (mol/kg).

X = Profundidad de carbonatación (m).

K = Coeficiente de permeabilidad del oxígeno (m^2/s).

t = Tiempo en años

Las limitaciones que presentan estos modelos se basan en que fijan o descartan variables tan importantes como la humedad a lo largo del espécimen, la temperatura, el contenido de cemento, la dirección del viento, periodos de lluvia, radiación solar etc., estas variables serán descritas más ampliamente en el capítulo 2 de esta tesis.

1.4.- La Durabilidad.

En los años más recientes se ha ido poniendo especial interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de las estructuras de concreto reforzado con el fin de programar eficientemente las acciones de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo [25].

En el concepto de durabilidad, no se da una definición específica que la describa claramente, dejando abierta la posibilidad de que los usuarios de las normativas la interpreten de diferente forma y ello afecte no solo a los proyectos sino a las predicciones de vida de servicio [26]. Esto debido, a que cada organismo establece su propia definición.

En la tabla 2, se muestran algunas definiciones del concepto durabilidad.

Tabla 2.- Definiciones de durabilidad [26].

Organismo	Definición	Año
Norma Mexicana NMX-C-403- ONNCCE-1999 [27]	Es la capacidad del concreto de uso estructural de resistir durante un tiempo determinado la acción ambiental, ataque químico, abrasión, corrosión del acero de refuerzo o cualquier otro proceso de deterioro para su forma original condición de servicio y propiedades mecánicas.	1999
Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE [28]	La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar durante la vida útil para la que ha sido proyectada las condiciones físicas y químicas a la que esta expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.	1999

La capacidad de mantener la serviceabilidad de un producto componente ensamble o construcción 2000 durante un tiempo especificado.

ACI 365.1 R-00 (ASTM E 632) [29]

En este mismo aspecto de durabilidad pero en función del cambio climático algunos investigadores la definen como la capacidad de un material de construcción, elemento o estructura de concreto de resistir las acciones físicas, químicas, biológicas y ambientales vinculadas al efecto del cambio climático global con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su serviceabilidad y conservando su forma original, propiedades mecánicas y condiciones de servicio [26].

Cada vez con mayor importancia se ha planteado en la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras afectadas por corrosión, por lo que en los últimos años se ha ido centrando el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de estructuras en servicio no deterioradas o estimar la futura en el caso de nuevas, influyendo desde la fase de proyecto [30].

1.4.1.- La Vida Útil.

El reporte de la Red Temática DURAR propone una definición clara para el concepto de vida útil de una estructura: “periodo en el que la estructura conserva los requisitos del 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 [31].

En el aspecto de vida útil en función del cambio climático, está se define como el periodo de tiempo durante el cual el desempeño de un material, elemento o estructura de hormigón conserva los requerimientos de proyecto en términos de seguridad (resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de fuego, seguridad en uso), funcionalidad (higiene, salud y medio ambiente, protección contra el ruido y ahorro energético y confort térmico) y estéticos (deformaciones, agrietamientos, desconchamientos), con un mínimo de mantenimiento que permita controlar los efectos del cambio climático global en su entorno [26].

1.4.2.- La Vida Residual.

“Se entiende por vida residual el tiempo a partir del momento que la estructura alcanza el anterior límite aceptable (fin de la vida útil)” [31]. Este es el periodo en el que la estructura necesitaría reparación, remodelación o completa renovación para que regrese a su estado de servicio original; esto es que sea segura, funcional y estética. En pocas palabras, la etapa de vida residual es el tiempo que tiene el dueño de la estructura, o elemento estructural, para repararla antes que la degradación avance hasta el límite de posible colapso [31].

En la Figura 3, se muestra un modelo para el diseño de estructuras.

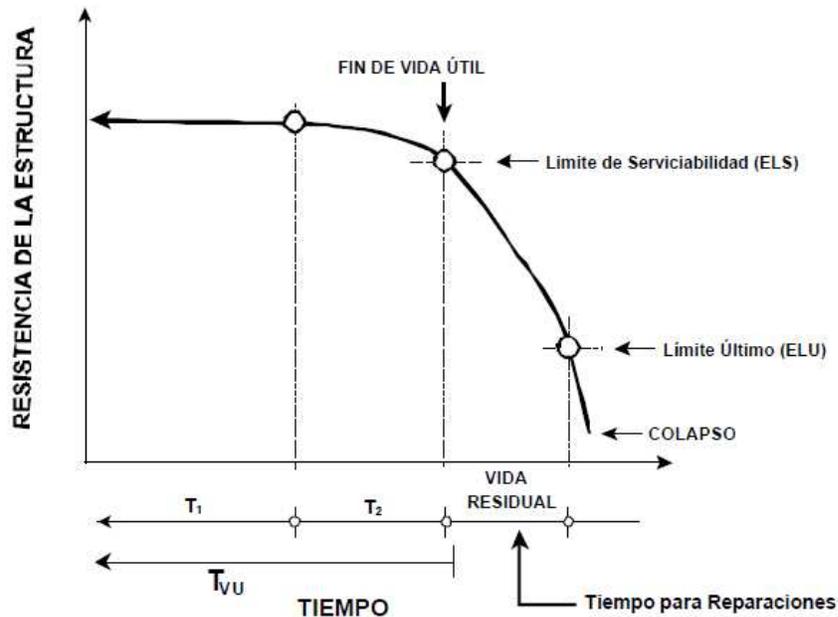


Figura 3.- Un Modelo de durabilidad de Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad de Andrés A. Torres Acosta y Miguel Martínez Madrid.

1.5.- La Contaminación atmosférica.

En los años recientes, el calentamiento global ha sido un aspecto de mayor importancia debido al aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO₂). Como consecuencia de esto la carbonatación ha comenzado a ser uno de los problemas más críticos de durabilidad para estructuras de concreto en zonas urbanas. Esto induce ambientes más agresivos que podrían no afectar instantáneamente la integridad de las estructuras [32].

Para iniciar el abordaje de este tema, se presenta la definición de la atmósfera. La atmósfera terrestre es una delgada película constituida por una masa gaseosa de composición prácticamente homogénea, de la cual sus componentes se encuentran en las siguientes proporciones: 78% de

nitrógeno (N₂), 21% de oxígeno (O₂), 0.9% de argón (Ar) y 0.03% de dióxido de carbono (CO₂) [1]. Esta composición es variable debido a que, todo contaminante gaseoso que se recibe en la atmósfera se diluye y acaba distribuyéndose en toda su extensión [33].

La contaminación atmosférica se refiere a la contaminación de atmósfera por residuos o productos secundarios gaseosos, sólidos o líquidos, que pueden poner en peligro la salud de los seres humanos y producir daños en las plantas y los animales, atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables [34].

1.5.1. - Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, IMECA.

El Índice Metropolitano de la calidad del aire es una escala que agrupa varios contaminantes (monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), partículas menores a diez micrómetros (PM₁₀), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO) y por medio de la cual se pretende dar a conocer a la población los riesgos que existen en la salud si se rebasan los siguientes parámetros.

En la tabla 3, se presentan los valores que indican la calidad de aire.

Tabla 3.- Calidad del aire, Fuente: SIMA, Nuevo León [35].

IMECA	Calidad del Aire	Efectos en la Salud
0 - 100	Satisfactorio	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades
101 - 200	No Satisfactorio	Aumento de molestias menores en la población sensible
201 - 300	Mala	Aumento de molestias e intolerancias relativas al ejercicio en la población con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general
301 - 500	Muy Mala	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población en general

1.5.2.- La Contaminación atmosférica en el área metropolitana de Monterrey.

La contaminación en el área metropolitana de Monterrey ha recibido a través de los años mayor atención, con el fin de medir la calidad del aire se ha usado como medida general los puntos IMECA.

El organismo encargado de monitorear la contaminación en el área metropolitana de Monterrey es el denominado SIMA (Sistema Integral de Monitoreo Ambiental), el cual nos proporciona mediciones de los contaminantes a partir del año de 1993. A continuación se presenta parte de esta información.

En la Figura 4, se observa una tendencia a incrementar en los valores de puntos IMECA máximos a partir del año 2001.

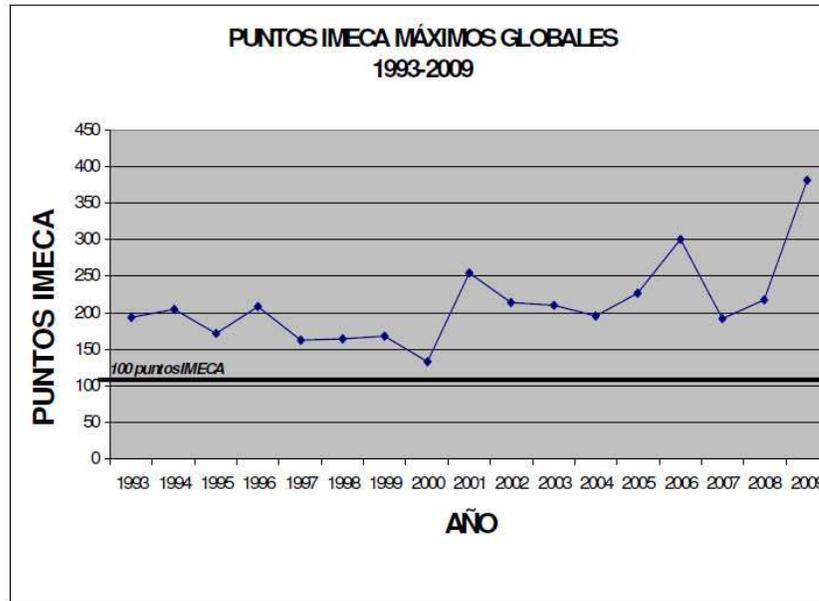


Figura 4.- Puntos IMECA máximos, Fuente: SIMA, Nuevo León.

En lo que respecta a los días sobre la norma globales, los contaminantes criterio, son el monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores a 10 micras, bióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y las partículas menores a 2.5 micras, las cuales se referencian a su respectiva norma y en la Figura 5 se observa un aumento considerable en días de excedencia de la norma a partir del año 2001.

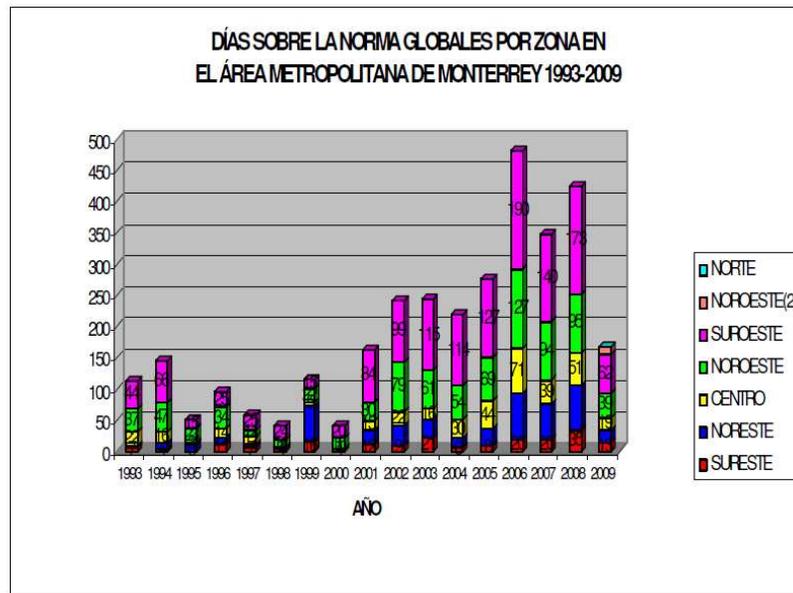


Figura 5.- Días sobre la norma, Fuente SIMA, Nuevo León.

Se identifica en la Figura 6, una tendencia al aumento de las partículas menores a diez micras siendo el punto de cambio el año 2001 al igual que en las gráficas anteriores.

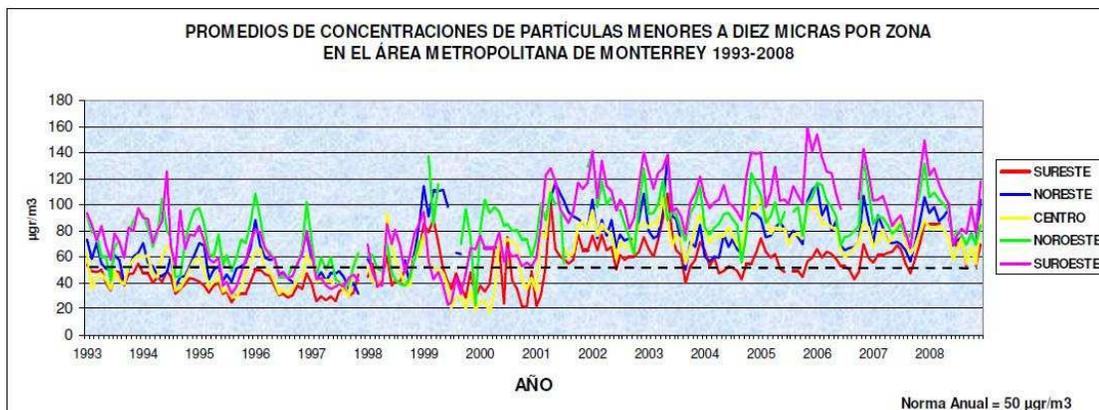


Figura 6.- Promedios de concentraciones de partículas menores a diez micras por zona en el área metropolitana de Monterrey, Fuente SIMA, Nuevo León.

En la Figura 7, se observan los promedios de concentraciones de monóxido de carbono, los cuales presentan un comportamiento estable, aunque incrementando su valor en los últimos años.

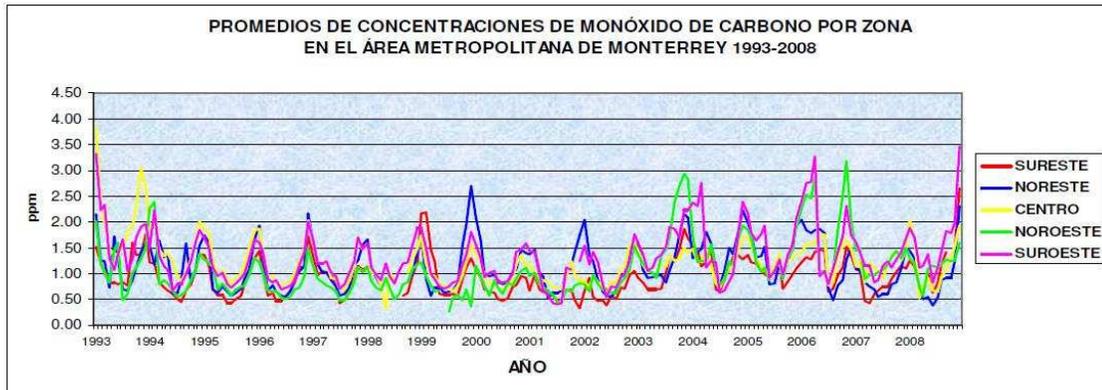


Figura 7.- Promedios de concentraciones de monóxido de carbono en el área metropolitana de Monterrey, Fuente SIMA, Nuevo León.

1.6. - El Efecto Invernadero.

El efecto invernadero es un proceso natural en el cual la atmósfera proporciona un aumento en la temperatura sobre la superficie terrestre. La atmósfera es prácticamente transparente a la radiación solar de onda corta, absorbida por la superficie de la Tierra. Gran parte de esta radiación se vuelve a emitir hacia el espacio exterior con una longitud de onda correspondiente a los rayos infrarrojos, pero es reflejada de vuelta por gases como el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, los clorofluorocarbonos (CFC) y el ozono, presentes en la atmósfera [34]. Estos gases se les conoce como gases de efecto invernadero (GEI). En la Figura 8, se presenta una descripción general de proceso de efecto invernadero.

Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero da lugar a una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera y, por consiguiente, a una

radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor a una temperatura menor. Ello origina un forzamiento radiativo que intensifica el efecto invernadero, suscitando así el denominado efecto invernadero intensificado [36].

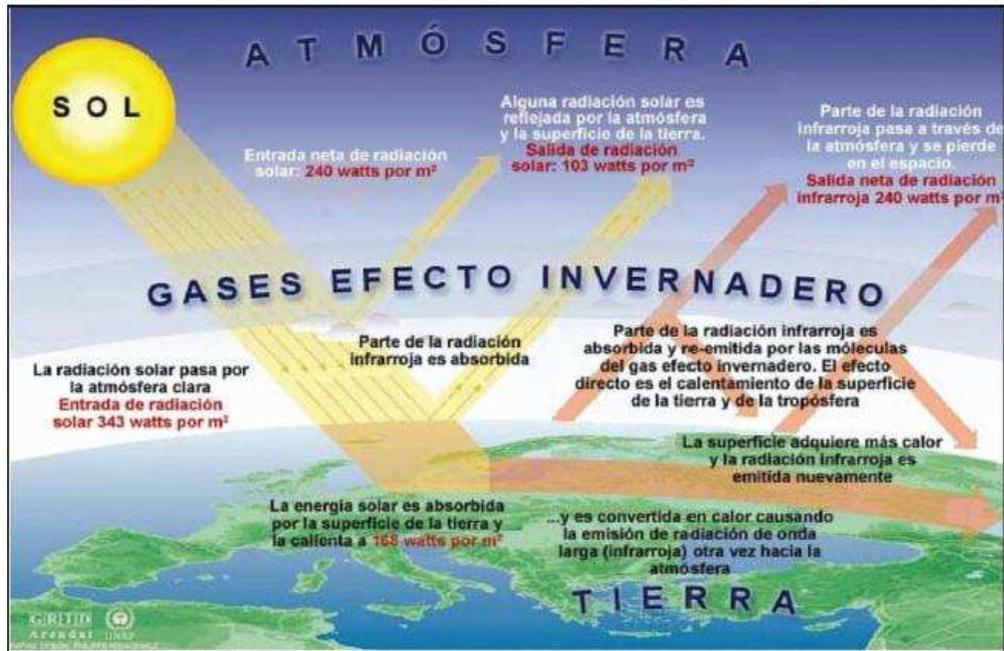


Figura 8.- El efecto invernadero.

1.6.1. - Las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo) [36]. En la Figura 9, se muestran las emisiones que se realizan de los gases de efecto invernadero por actividad humana.

Emisiones de GEI en el año 2000



Fuente: Stern Review; World resources Institute

Figura 9.- Emisiones de GEI.

En la Figura 9, se observa el uso del término de CO₂ equivalente, el cual se define como la concentración de dióxido de carbono que podría causar el mismo grado de forzamiento radiativo que una mezcla determinada de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero [37].

En la Figura 10, se observa que el gas que primordialmente afecta en el fenómeno de efecto invernadero, es el dióxido de carbono. Aunque cabe mencionar que el metano como gas de efecto invernadero tiene un potencial de calentamiento mayor al dióxido de carbono y el mencionado potencial en su proyección a 20 años se predice cuadruplicará su impacto en el proceso del calentamiento global [37].

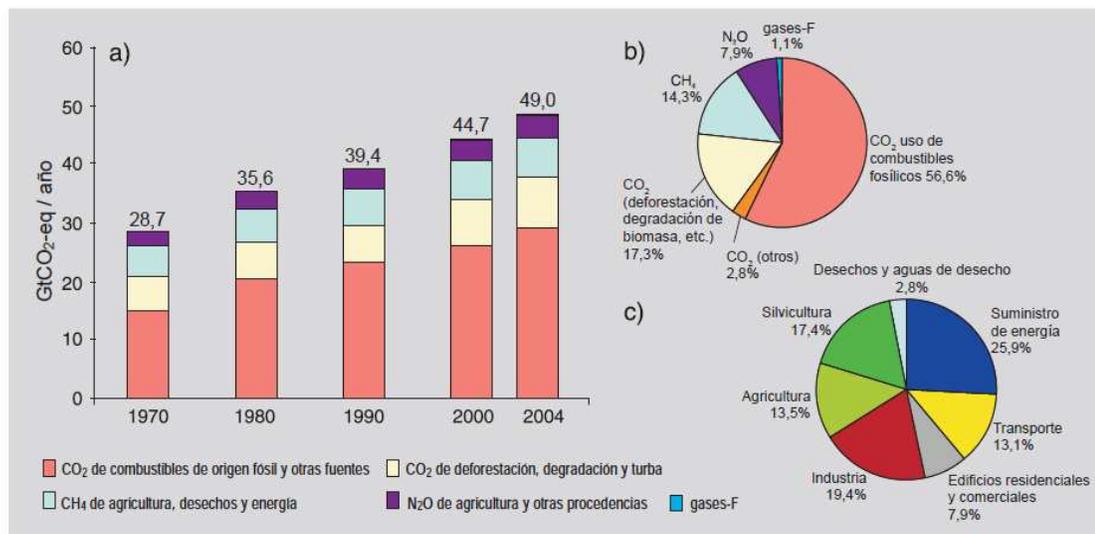


Figura 10.- a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropogénicos entre 1970 y 2004.

b) Parte proporcional que representan diferentes GEI, antropogénicos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO₂ equivalente.

c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropogénicos en 2004, en términos de CO₂ equivalente. (En el sector silvicultura se incluye la deforestación).

1.7.- El Cambio Climático.

Existe mucha controversia acerca de que es el cambio climático, debido a esto, las formas de explicarlo resultan diferentes, de ellas se encuentran dos vertientes principales, que han sido propuestas para explicar este fenómeno. La primera menciona que el aumento de la temperatura es debido a un proceso natural que se presenta con cierta periodicidad en la historia del planeta y la segunda menciona que el cambio es debido a la acción humana.

De acuerdo al IPCC (Intergubernamental Panel of Climate Change de la ONU) el cambio climático, se define como una alteración en el estado del clima, el cual persiste por un periodo prolongado de tiempo, generalmente cifrado en decenios o en periodos más largos [36].

Con el objetivo de dar validez al proceso del cambio climático, se hace uso de ciertas cifras, entre las cuales destacan que del periodo de doce años entre 1995 a 2006, once de ellos figuraron entre los doce más cálidos de los registros instrumentales de la temperatura mundial en superficie (desde 1850) [36]. Además en el año 2010 la temperatura media mundial igualó, la temperatura de los años 1998 y 2005, los cuales han sido los años más calientes de los que se tienen registro [38].

Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta, y es mayor en latitudes septentrionales altas. En la región ártica, el promedio de las temperaturas ha aumentado a un ritmo que duplica casi el promedio mundial de los últimos cien años. Las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos. Las observaciones efectuadas desde 1961 indican que, en promedio, la temperatura del océano ha aumentado hasta en profundidades de 3000 m como mínimo, habiendo absorbido los océanos más del 80% del calor incorporado al sistema climático. Nuevos análisis de las temperaturas observadas desde globos y satélites en la tropósfera inferior y media arrojan tasas de calentamiento similares a las observadas en la temperatura superficial [36].

La disminución observada de la extensión de nieves y hielos concuerda también con el calentamiento. Los datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que, en promedio anual, la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 2.7% [entre 2.1% y 3.3% por decenio, y en mayor medida en los veranos, en que ascendió a 7.4 entre 5.0 y 9.8% por decenio]. En promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han disminuido en ambos hemisferios. Desde 1900, la extensión máxima de suelo estacionalmente congelado se ha reducido en torno a un 7% en el Hemisferio Norte, con disminuciones de hasta un 15% durante la primavera. En términos

generales, las temperaturas de la capa superior de permafrost han aumentado en la región ártica, desde los años ochenta, en hasta 3 °C [36].

1.7.1.- El Cambio Climático en el área metropolitana de Monterrey.

El cambio climático como en su definición del IPCC afirma es una variación de temperaturas que persiste por periodos largos de tiempo generalmente decenios. Por esta razón a continuación se presentan gráficos donde se observa el cambio de las condiciones meteorológicas [36].

En la Figura 11, se observa un aumento en las temperaturas máximas, que va desde 2.5°C de la década de 1970 a la década de 1980, de 2°C de la década de 1980 a la década de 1990, de 0.2°C de la década de 1990 a la década del 2000 y una variación de 4.7°C en este tiempo.



Nota: La Temperatura máxima se refiere a una medición puntual.

Figura 11.- La temperatura máxima por decenio, Fuente CONAGUA.

La temperatura máxima promedio en el área metropolitana de Monterrey también ha ido en aumento, de la década de 1970 a la década del 2000, la variación total fue de 1.08°C, como puede observarse en la Figura 12.

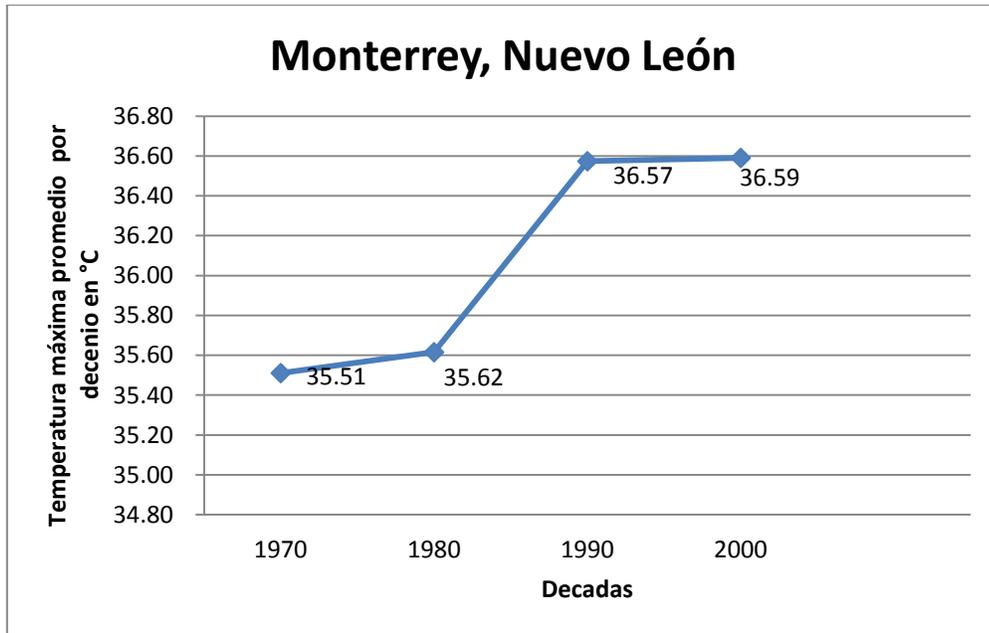
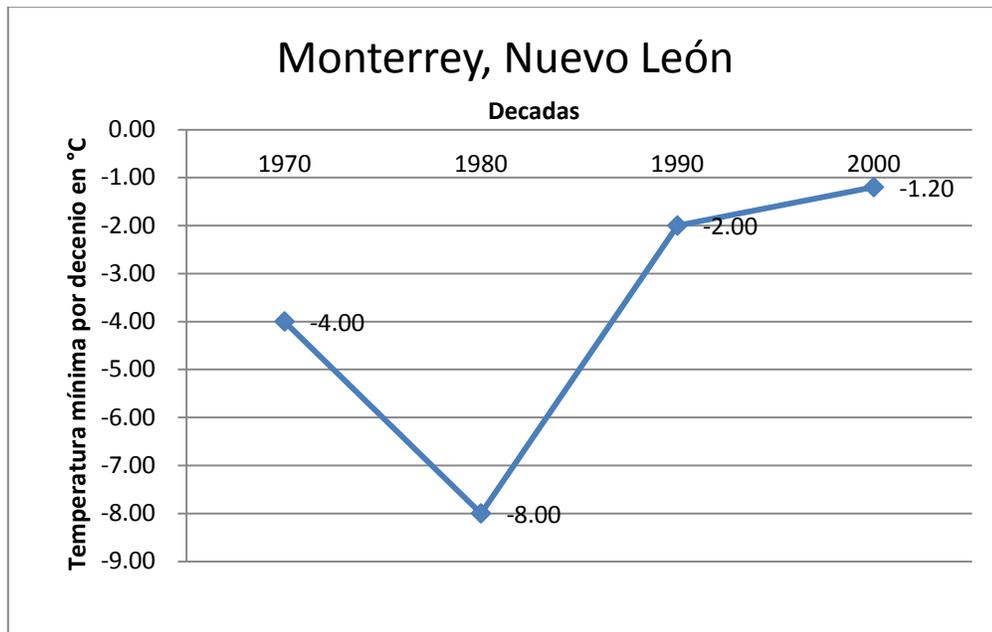


Figura 12.- La temperatura máxima promedio por decenio, Fuente CONAGUA.

En la Figura 13, se tomó la información obtenida de la CONAGUA para graficar las temperaturas mínimas que se han presentado en las últimas décadas, observando que después de la década de 1980, la temperatura mínima ha ido en aumento.



Nota: La Temperatura mínima se refiere a una medición puntual.

Figura 13.- La temperatura mínima por decenio, Fuente CONAGUA.

En lo que respecta a la temperatura mínima promedio obtenida en periodos de decenios, al igual que las gráficas anteriores se observa un aumento en la temperatura mínima promedio que va desde 10.70°C en la década de 1970, a 12.36 °C en la década del 2000, como puede constatarse en la Figura 14.

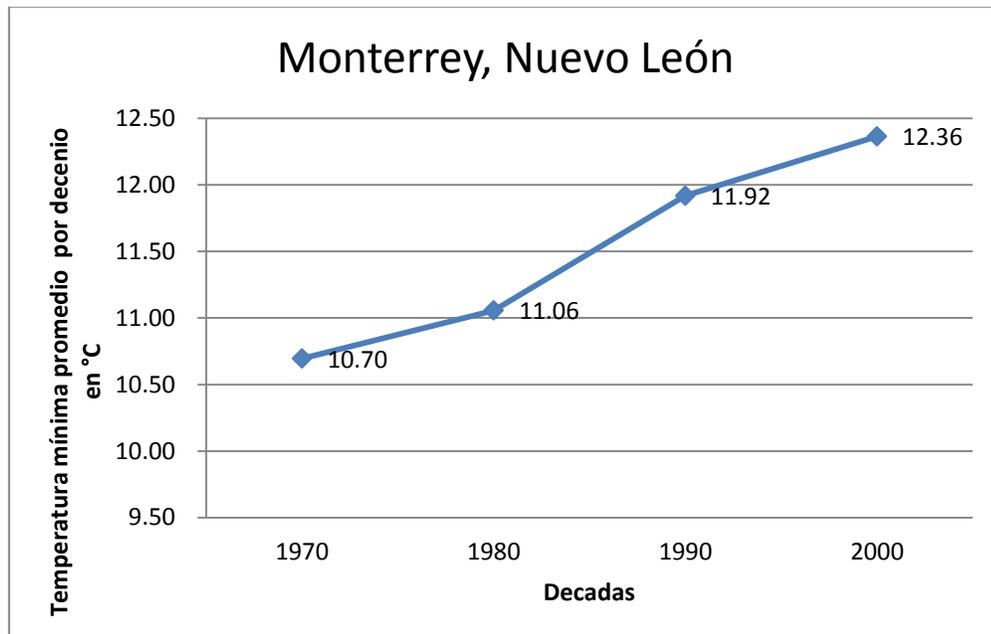


Figura 14.- La temperatura mínima promedio por decenio, Fuente CONAGUA.

La temperatura media también ha ido en aumento, donde en este rubro la variación de la década de 1970 a la década del 2000 fue de 1.61 °C, como se observa en la Figura 15.

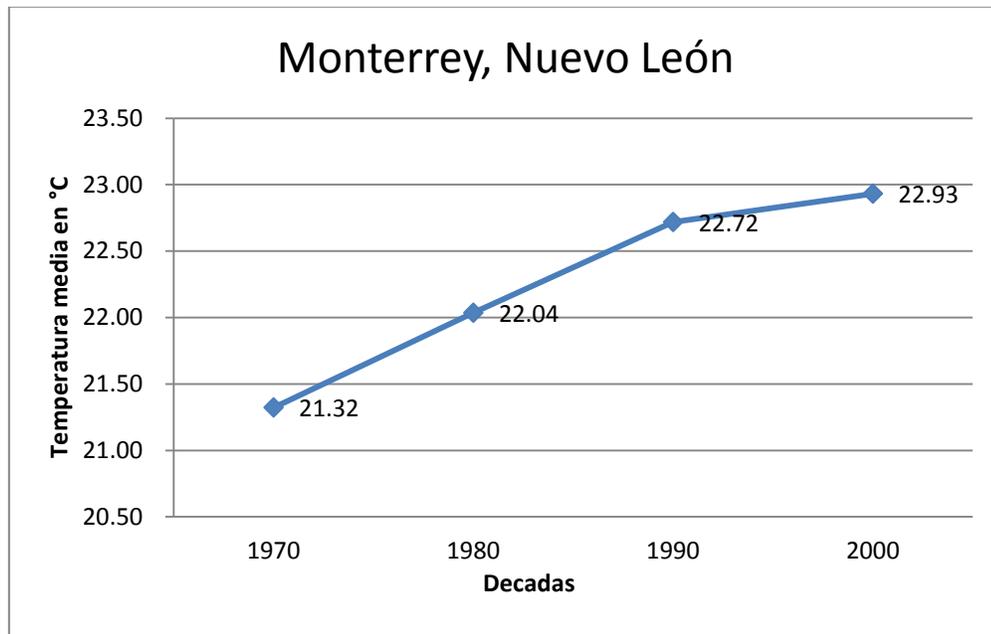


Figura 15.- La temperatura media por decenio, Fuente CONAGUA.

En la Figura 16, se puede notar una disminución en la Humedad Relativa máxima promedio, que va de 87% a 83% de la década de 1980 a la década del 2000, cabe mencionar que la información aquí mostrada representa un periodo de tiempo menor que las gráficas anteriormente mostradas.

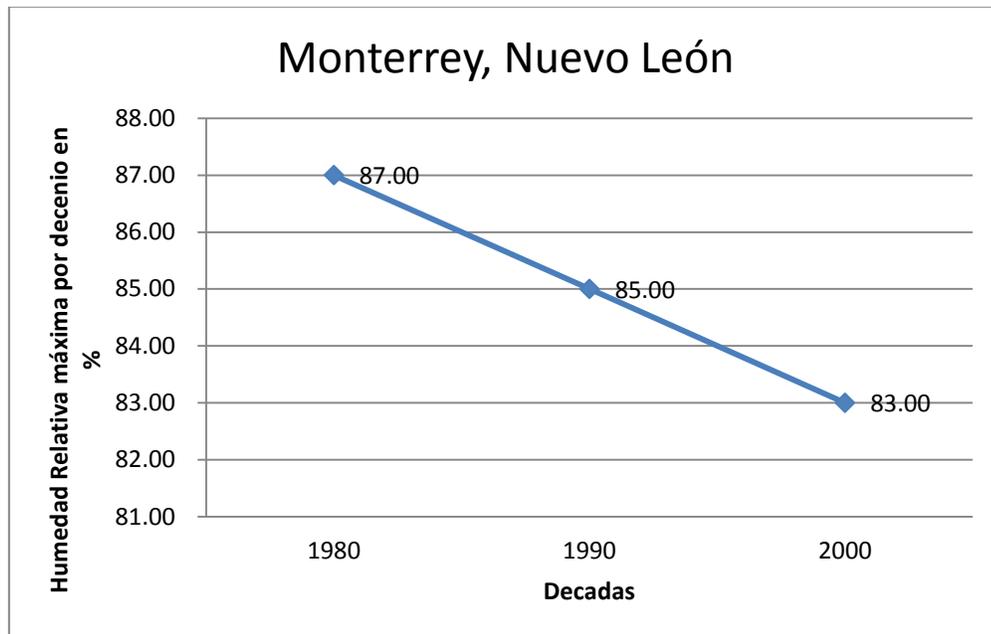


Figura 16.- La Humedad Relativa máxima por decenio, Fuente CONAGUA.

En la Figura 17, se presenta la información de la humedad relativa máxima promedio por decenios en la cual no se puede observar una tendencia clara.

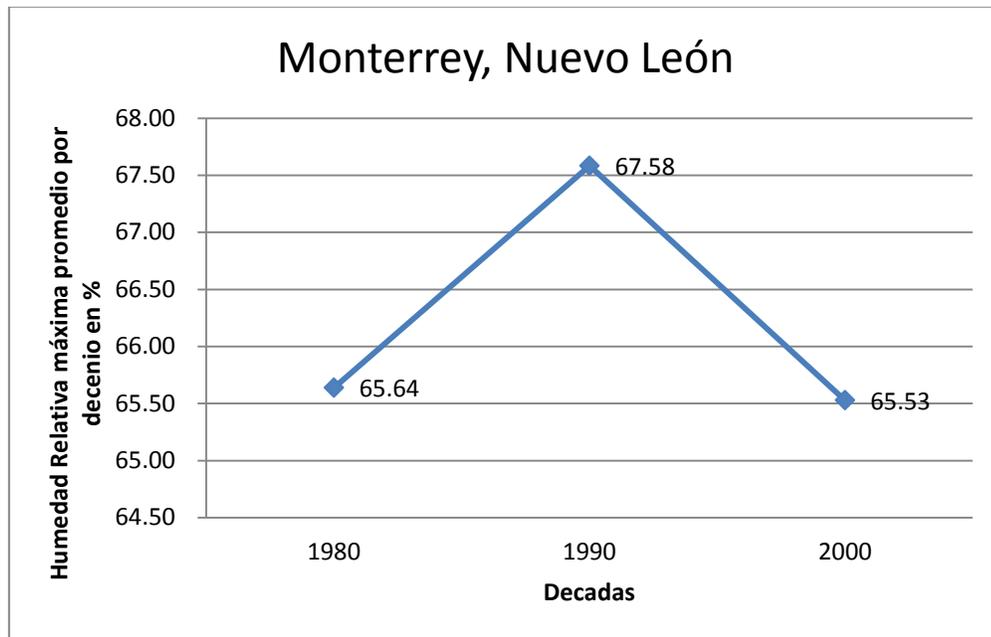


Figura 17.- La Humedad Relativa máxima promedio por decenio, Fuente CONAGUA.

La precipitación promedio anual es el rubro mejor documentado de los datos meteorológicos anteriormente presentados, los datos van desde la décadas de 1950. Con esta información no se observa una tendencia, como se puede ver en la Figura 18.

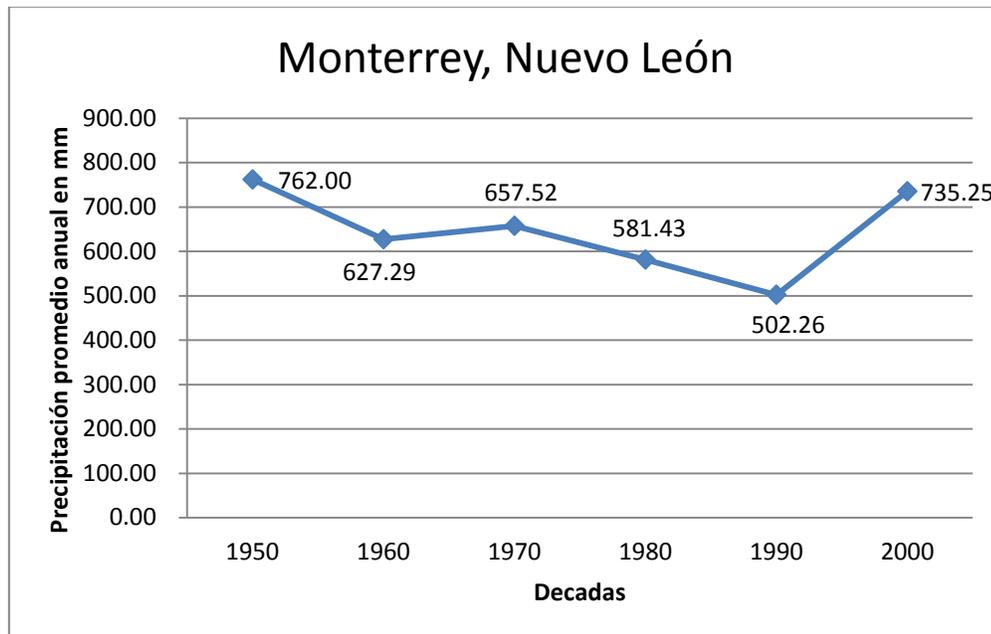


Figura 18.- La precipitación promedio anual, Fuente CONAGUA.

La información de vientos predominantes promedio es mínima debido a que existen muchos años en estas décadas que no han sido documentados, por esta razón la información que se presenta en la Figura 19, deberá analizarse con cautela.

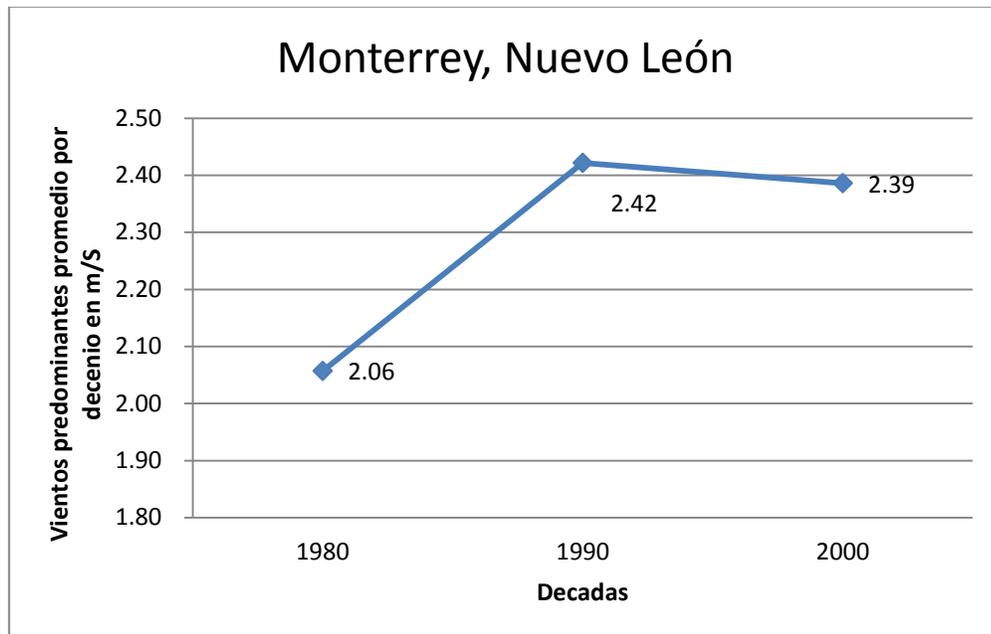


Figura 19.- Los vientos predominantes promedio, Fuente CONAGUA.

1.7.2.- Las Causas del Cambio.

El fenómeno del cambio climático implica la elevación de la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI), los cuales han aumentado en su concentración por más de 150 años. Sabiendo que la vida media de los gases esta alrededor de decenas de miles de años, los efectos provocados por el aumento de la concentración de estos gases perdurará por mucho tiempo [33]. Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004 [36].

El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI antropógeno más importante. Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004. La disminución a largo plazo de las emisiones de CO₂ por unidad de energía

suministrada invirtió su tendencia a partir del año 2000 .Las concentraciones de GEI en la atmósfera aumentan cuando las emisiones son superiores en magnitud a los procesos de detracción [36].

Las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O en la atmósfera mundial han aumentado considerablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, y en la actualidad exceden con mucho de los valores preindustriales determinados mediante el análisis de núcleos de hielo acumulados durante miles de años [36]. En 2005, las concentraciones de CO₂ y CH₄ en la atmósfera excedieron considerablemente del intervalo de valores naturales de los últimos 650.000 años [36].

El aumento de las concentraciones de CO₂ a nivel mundial, se debe principalmente al uso de combustibles de origen fósil, con una aportación menor, aunque perceptible, de los cambios de uso de la tierra. Es muy probable que el aumento observado de la concentración de CH₄ se deba predominantemente a la agricultura y al uso de combustibles fósílicos. El aumento de la concentración de N₂O se debe principalmente a las actividades agrícolas [35].

1.8.- La Concentración de CO₂.

El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero, por este motivo el aumento en la concentración de este gas impacta gravemente en el calentamiento global y las repercusiones que esto provoca en el ambiente.

El cambio de la concentración de CO₂ en la atmósfera ha pasado de 280 ppm (partes por millón) antes de la revolución industrial a 380 ppm en la

actualidad y se prevé un gran aumento en la concentración como se observa en la siguiente Figura 20.

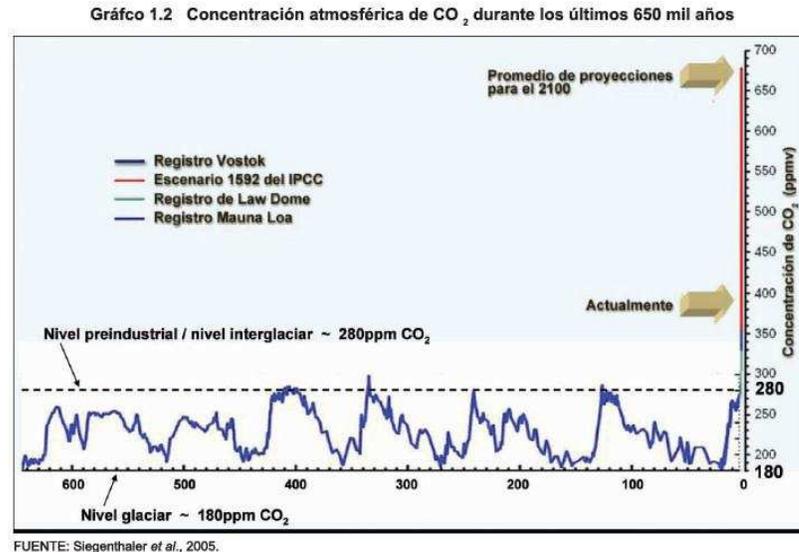


Figura 20.- Concentración atmosférica de CO₂. Fuente: Siegenthaler et al., 2005

En los últimos diez años, la tasa de crecimiento anual de las concentraciones de CO₂ (promedio del período 1995-2005: 1.9 ppm anuales) ha sido mayor que desde el comienzo de las mediciones directas continuas de la atmósfera (promedio de 1960-2005: 1.4 ppm anuales), aunque sujeta a variabilidad interanual [36].

En lo que respecta a las proyecciones que se realizan con el fin de predecir la evolución de este fenómeno, se pone especial énfasis en las proporciones de CO₂ en la atmósfera, el cual en la actualidad es de unas 400 partes por millón en volumen de aire y se calcula que en el 2099, si no se hace nada para impedirlo, la proporción será de 650 partes por millón [39].

En otro aspecto a considerar con relación a este fenómeno, es el aumento de la temperatura. Al respecto el Premio Nobel Mario Molina menciona. *“No hay certidumbres, pero la probabilidad de que la temperatura aumente 4 ó 5 °C para finales de siglo es del 90 % y la sociedad debe decidir lo que hace, porque, según los casos, puede suponer hasta un aumento de un 10 por ciento en las temperaturas actuales”* [39].

1.8.1. - La Concentración de CO₂ en el área metropolitana de Monterrey.

En este aspecto es difícil obtener información oficial de la localidad. La información obtenida por parte de las estaciones de monitoreo ambiental son monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas menores a 10 micras. En las imágenes subsecuentes (Figura 22 y 23), se observan mediciones de CO₂ realizadas en diversos lugares del área metropolitana de Monterrey, en diciembre de 2010. Los información de las mediciones realizadas se presenta en el Capítulo 4.



Figura 21.

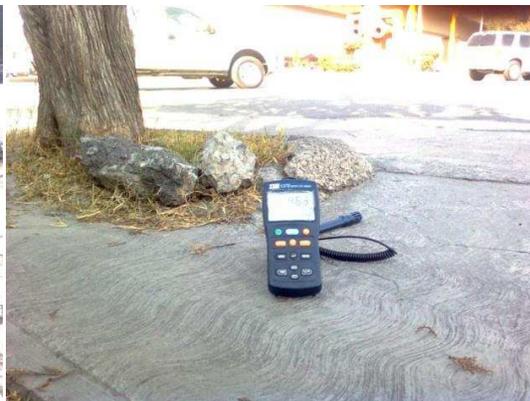


Figura 22.

Figura 21. Simón Bolívar y Madero y Figura 22. Simón Bolívar y Leones, se presentan mediciones de CO₂, realizadas en las intersecciones de dos avenidas principales de la ciudad de Monterrey.

1.9.- Las Repercusiones del calentamiento global.

El Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000) proyecta un aumento de las emisiones mundiales de GEI de entre 25% y 90% (CO₂-eq) entre 2000 y 2030 (véase Figura 23), suponiendo que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo [36]. Otros escenarios más recientes, que no contemplan medidas de mitigación de las emisiones adicionales, arrojan resultados similares.

En la Figura 23, se observan los diferentes escenarios previsible en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero.

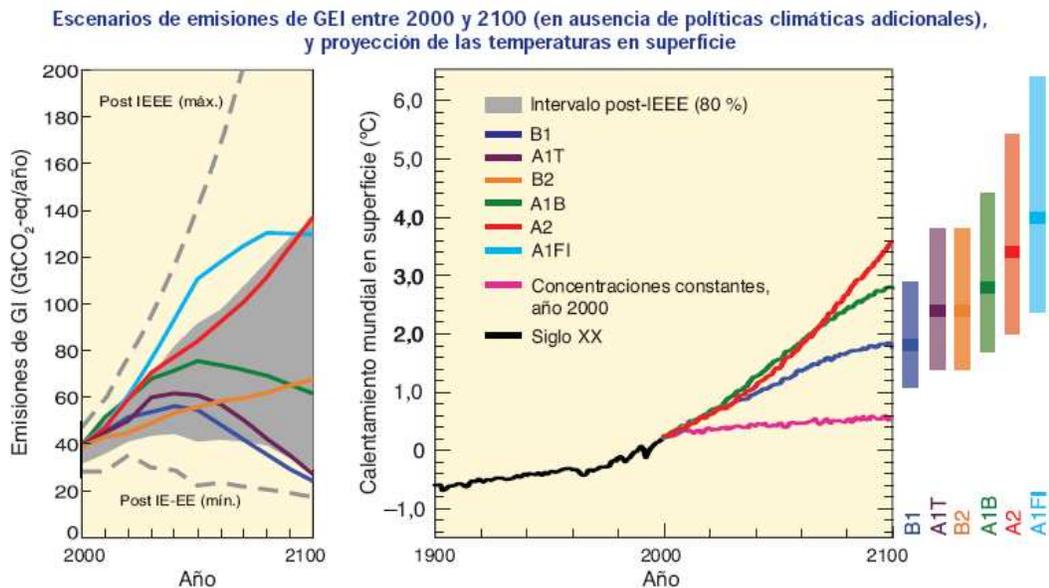


Figura 23. Escenarios de Emisiones de GEI entre 2000 y 2100.

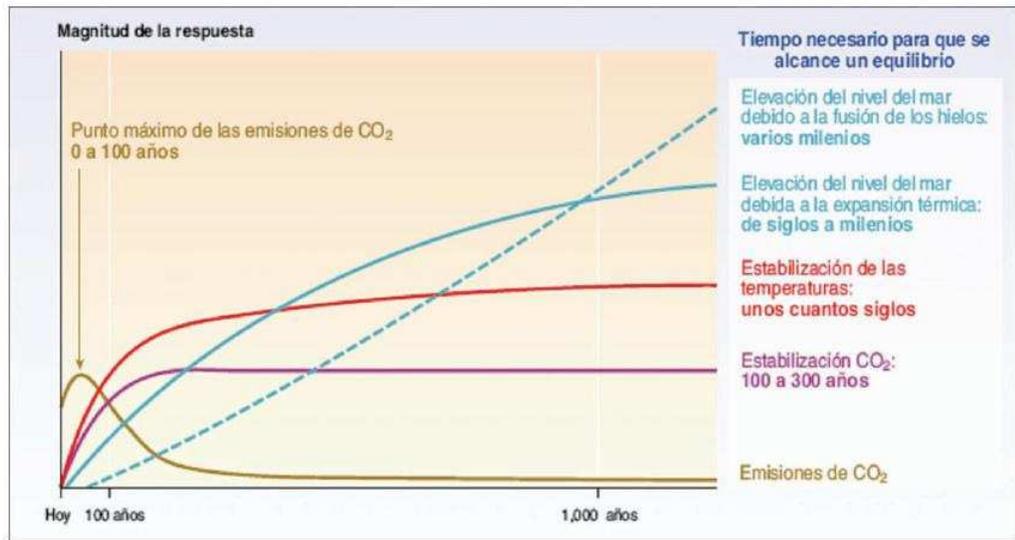
Para los dos próximos decenios las proyecciones indican un calentamiento de aproximadamente 0.2°C por decenio para toda una serie de escenarios de emisiones IEEEE. Aunque se hubieran mantenido constantes las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y aerosoles en los niveles de 2000, cabría esperar un ulterior calentamiento de

aproximadamente 0.1°C por decenio. A partir de ese punto, las proyecciones de temperatura dependen cada vez más de los escenarios de emisión [36].

Los cambios a escala regional abarcan:

- Un calentamiento máximo sobre tierra firme y en la mayoría de las latitudes septentrionales altas, y mínimo sobre el océano austral y partes del Atlántico Norte, como continuación de recientes tendencias observadas [36].
- La contracción de la superficie de las cubiertas de nieve, en la mayor profundidad de deshielo en la mayoría de las regiones de permafrost, y en la menor extensión de los hielos marinos; en algunas proyecciones basadas en escenarios IEEE, los hielos marinos de la región ártica desaparecerían casi completamente al final de los veranos en los últimos años del siglo XXI [36].
- muy probablemente aumentará la frecuencia de los valores extremos cálidos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas.
- probablemente aumentará la intensidad de los ciclones tropicales; menor confianza en que disminuya el número de ciclones tropicales en términos mundiales.
- desplazamiento hacia los polos de las trayectorias de las tempestades extratropicales, con los consiguientes cambios de las pautas de viento, precipitación y temperatura.
- muy probablemente aumentarán las precipitaciones en latitudes altas, y probablemente disminuirán en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales, como continuación de las tendencias recientemente observadas.

En la Figura 24, se presenta el tiempo que llevaría la estabilización de la temperatura, elevación del nivel del mar y la estabilización del CO₂ [36].



Aunque se logran minimizar las emisiones humanas de GEI, la temperatura en la superficie terrestre continuará incrementándose lentamente durante más de un siglo. La expansión térmica de los océanos continuará incluso mucho después de haberse reducido las emisiones de CO₂, y la fusión de las capas de hielo seguirá contribuyendo durante muchos siglos a la elevación del nivel del mar.

Figura 24. Tiempo de estabilización de la concentración atmosférica.

1.9.1.- Las Repercusiones del calentamiento global en el proceso de carbonatación.

Es difícil precisar como el cambio climático afectara el proceso de carbonatación, esto debido a que como lo plantea el IPCC (Intergubernamental Panel of Climate Change), existen varios escenarios posibles que difieren en la concentración de CO₂ y por lo tanto el aumento de la temperatura que pudiera darse. Conociendo estas limitaciones es necesario tratar de hacer relaciones entre ensayos acelerados y ensayos en condiciones naturales que incluyan las condiciones microclimáticas y los parámetros del material [33].

Ha sido observado por múltiples investigadores que al realizarse ensayos en condiciones naturales y aceleradas, el alcance de la profundidad de carbonatación aumenta conforme existe mayor concentración de CO₂, pero

debido también al cambio climático los valores presentes de humedad podrían aumentar y decrecer, esto afectando la velocidad de carbonatación, por este motivo en esta investigación se pretende aportar información que ayude a conocer mejor este fenómeno en la localidad y si este mismo proceso pueda ser incluido en manuales de durabilidad.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

“Para investigar la verdad es preciso dudar, en cuanto sea posible, de todas las cosas”.

René Descartes

2.- Los Antecedentes.

2.1.- La Definición del problema.

Para la determinación del avance de la carbonatación, pueden ser expuestos especímenes en ambientes naturales, pero estos resultados se obtienen a través de un proceso demasiado lento. Por esta situación se realizan pruebas acelerando el proceso, usando atmósferas de relativamente alta concentración de CO_2 . Sin embargo no existe una validación general sobre como extrapolar las condiciones de la prueba a un real desempeño, para realizar esta validación se requiere correlacionar la profundidad de carbonatación de las pruebas realizadas en ambiente natural con la profundidad en condiciones aceleradas [40].

Ha sido encontrado por múltiples investigadores, que el proceso de carbonatación en el concreto es un proceso que tiene buena repetibilidad, pero no buena reproducibilidad. También existen muchas dudas acerca de cómo validar una extrapolación de las pruebas comúnmente usadas a las condiciones reales [41].

La problemática de esta validación, se basa en que el proceso de carbonatación depende de un número de parámetros tales, como la composición química del cemento, las proporciones de la mezcla, el tiempo de exposición y particularmente del contenido de óxido de calcio (CaO) y la concentración de dióxido de carbono (CO_2) [42].

A continuación se describen los efectos más importantes, que interfieren en la obtención de una buena reproducibilidad para el proceso de carbonatación.

2.2.- El efecto del cementante.

Los principales compuestos del cemento portland son los óxidos de calcio (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y de hierro (Fe₂O₃) [14], dichos compuestos varían ampliamente según la norma a la que sean referenciados.

El principal compuesto del cemento es el óxido de calcio (CaO), cuando la proporción de este decrece en el cemento, produce como consecuencia que el hidróxido de calcio Ca(OH)₂, que se forma como producto de la hidratación del óxido de calcio (CaO) también disminuya [43].

En los concretos realizados con cemento portland, solamente importa la carbonatación del Ca(OH)₂. Sin embargo, cuando el Ca(OH)₂ llega a acabarse, la carbonatación del hidrato de silicato de calcio, C – S – H, es también posible [14].

Ha sido encontrado por el investigador Bier, la existencia de una mayor profundidad de carbonatación cuando la cantidad de Ca(OH)₂, es menor [44]. En la tabla 4 se muestran los valores de composición más utilizados en el cemento portland.

Tabla 4.- Límites aproximados de la composición de los principales óxidos contenidos en un cemento portland [14].

Óxido	Contenido en porcentaje
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 8
Fe ₂ O ₃	0.5 – 6
MgO	0.5 – 4
Álcalis	0.3 – 1.2
SO ₃	2 – 3.5

El efecto del cementante, ha sido analizado por investigadores como, Eric I. Moreno, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia y Francisco Duarte Gómez, los cuales concluyen que existe una relación entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento. En efecto, la profundidad de carbonatación aumenta conforme el contenido de cemento disminuye [45]. Esto adquiere mayor importancia, debido a que el concreto se puede realizar usando un rango amplio de valores, que van desde variaciones en el contenido de cemento, además del uso de materiales suplementarios en adición o sustitución de cemento.

En la Figura 25, se observa el efecto que tiene la dosificación de cemento por metro cúbico, en la profundidad de carbonatación.

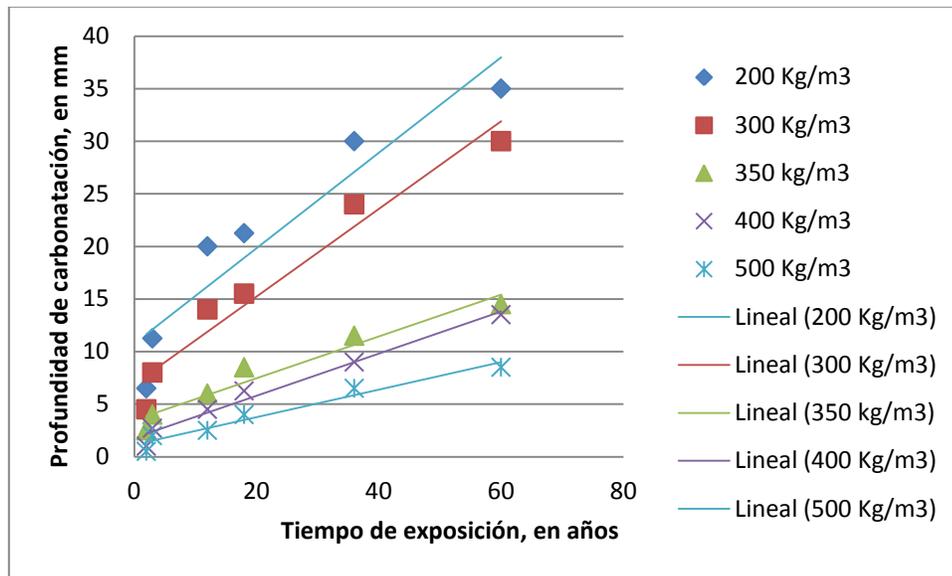


Figura 25.- Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes contenidos de cemento por Kg/m³.

2.3.- El efecto de la relación a/c (agua-cemento).

La relación a/c determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación. Así, la relación a/c y el grado de compactación afecta al volumen de vacíos en el concreto, y por esto el volumen de aire del concreto [14].

El efecto de la relación a/c en el concreto ha sido descrito por investigadores como H. Al-Khayat M. N. Haque y N. I. Fattuhi, los cuales concluyen en su investigación, que la relación a/c es el principal parámetro que afecta el alcance de la carbonatación en el concreto [46].

El aumento en la relación a/c provoca una mayor profundidad de carbonatación esto ha sido corroborado por varios investigadores como J. Khunthongkeaw , S. Tangtermsirikul , T. Leelawat (2005)[47], Serrano

Ixtepan D., Moreno Eric I(2006) [1], In-Seok Yoona,b, Oguzhan Copuroglu, Ki-Bong Park (2007)[32].

En la Figura 26, se muestra el efecto de la relación a/c, con la profundidad de carbonatación.

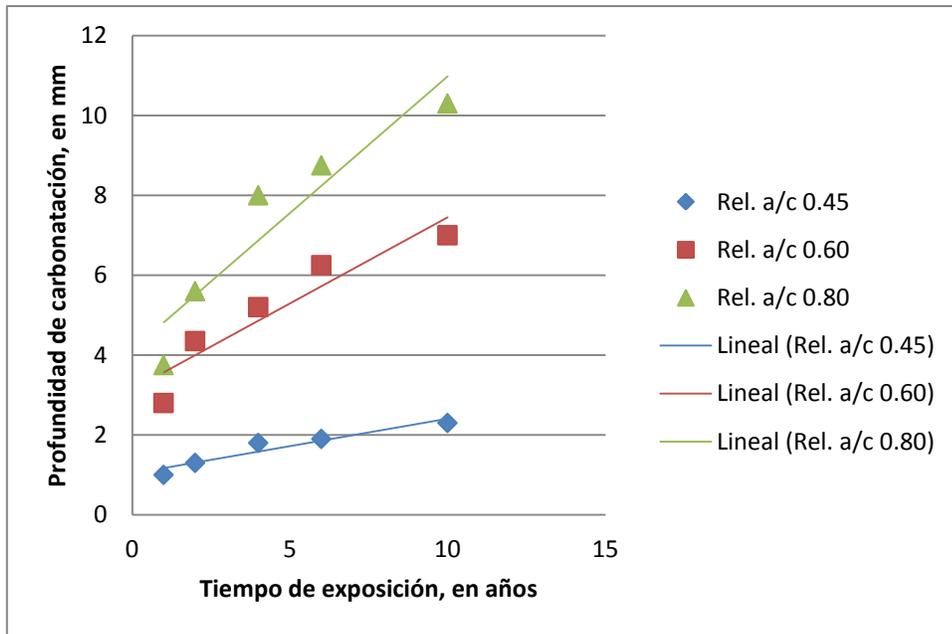


Figura 26.- Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes relaciones a/c.

2.4.-El efecto de la Humedad relativa.

La humedad relativa (H.R.) ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% aproximadamente; [48] 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. En la tabla 5, se muestran los valores que favorecen el avance de la carbonatación.

Tabla 5.- Los efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación.

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

2.5.- El efecto de la concentración de CO₂, en condiciones naturales.

El contenido de CO₂ en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar, ya que existen grandes diferencias de una zona urbana a una zona rural, siendo mayores en la primera; aunque para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO₂, que normalmente se encuentra en la atmósfera, en el rango de 0.03% en volumen [49].

Ha sido registrado también, que los mayores coeficientes de carbonatación han sido encontrando en zonas de mayor concentración de CO₂, como lo son las zonas urbanas [47].

2.5.1.- El efecto de concentración de CO₂, en condiciones aceleradas.

Debido a que el proceso de carbonatación es un proceso demasiado lento se utilizan ambientes de relativamente alta concentración de CO₂. Ha sido probado que utilizando CO₂ puro, la microestructura de las pastas carbonatadas es diferente a las pastas carbonatadas en ambiente natural [50].

Investigadores como Marta Castellote, Lorenzo Fernández, Carmen Andrade y Cruz Alonso, concluyeron que, se puede deducir que el proceso de carbonatación acelerada a 3% de CO₂ (aproximadamente 100 veces mayor que la carbonatación en condiciones naturales), no cambia dramáticamente la microestructura con respecto a la carbonatación natural, ya que las fases que se presentan son muy similares [51]. Cuando carbonataron los especímenes a 10% y 100% de CO₂, el gel CSH y la etringita desaparecieron totalmente, las principales fases que se obtuvieron fueron calcita y el gel de Ca- modificado, además no se encontró material sin hidratar [51].

En la Figura 27, se presenta el efecto que provoca las distintas concentraciones de CO₂, en la profundidad de carbonatación para este concreto. En la cual se puede deducir que entre estas concentraciones existe una gran similitud.

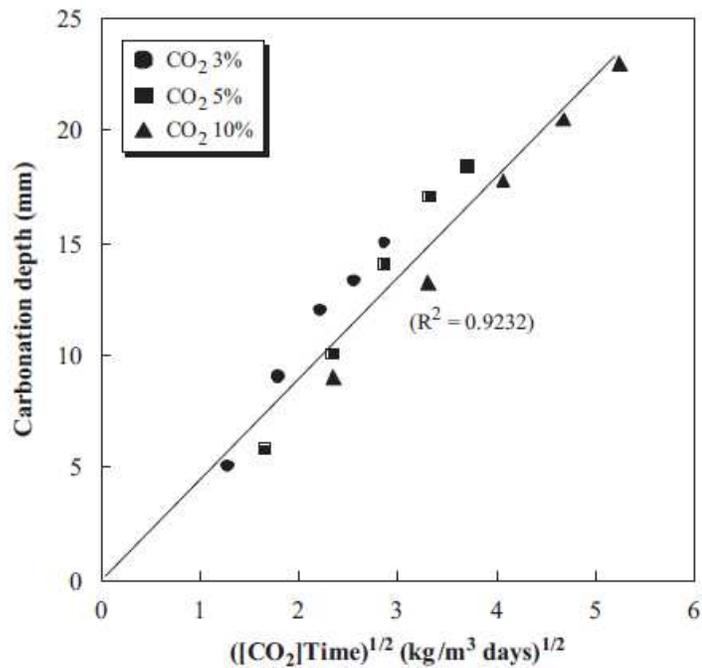


Figura 27.- Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes concentraciones de CO₂.

2.6.- Alcances y Limitaciones.

A través de esta investigación se pretende obtener un coeficiente de carbonatación promedio, para al menos un ambiente representativo de la zona metropolitana de Monterrey, para este fin se utilizan 3 relaciones a/c (0.6, 0.7 y 0.8) y 2 tipos de cemento (CPO y CPC).

Para encontrar este coeficiente y poder predecir el avance de la carbonatación en una estructura, las mezclas realizadas se someten a pruebas del avance de la carbonatación en un ambiente natural y acelerado.

El limite que existe en esta investigación, es la imposibilidad de recrear la variedad de microclimas existentes en la localidad. No obstante se pretende

iniciar con la obtención de información suficiente para dar validez a la presente investigación.

En nuestra investigación, se eligió para la realización de la experimentación en ambiente natural, una zona urbana en la que anteriormente se han realizado investigaciones donde se midió la profundidad de carbonatación. Esta elección se debió a la imposibilidad de recrear la gran cantidad de microclimas existentes en la localidad y la necesidad de comparar los resultados antes obtenidos con nuestra presente investigación.

Para dar esa validez, se hará uso de las investigaciones realizadas por otros autores, en las cuales se incluyeron diversas relaciones a/c y diferentes contenidos de cemento. Dado lo anterior, la obtención de una correlación directa será muy complicada.

2.7.- La descripción de los trabajos realizados anteriormente.

Título: Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions [40].

Autores: M. A. Sanjuán, C. Andrade y M. Cheyrezy.

Año: 2002.

Lugar: España.

Materiales

Cemento: En su investigación usaron dos tipos de cemento, el primero es un cemento Portland ordinario denominado CEM I 42.5 R con un bajo contenido de C_3A (3 a 6%) y el segundo llamado CEM I 52.5 con 11% de C_3A , ambos dentro del estándar Europeo EN 197-1:2000.

Materiales cementantes suplementarios: Los investigadores usaron un humo de sílice danés, con un promedio de 95 % de SiO₂ amorfo, el cual fue agregado al cemento para la realización de algunas mezclas, de acuerdo a la normas prEN13263:1998 y ASTM C1260.

Además utilizaron dos tipos de cenizas volantes, la primera con un bajo contenido de CaO (3%) y la segunda con alto contenido de CaO (53%), este material también fue agregado al cemento para algunos especímenes.

Agregados:

Agregado Fino: El agregado que utilizaron estuvo en los rangos de tamaño de 0- 6 mm de acuerdo a la norma EN 206:2000.

Agregado Grueso: Este agregado estuvo en el rango de 6-12 mm de acuerdo a la norma EN 933-1.

Procedimiento experimental:

Los especímenes realizados fueron de forma cilíndrica, de 7.5 x15 cm en sus dimensiones. Estos especímenes fueron sometidos a diferentes condiciones de exposición, para los especímenes usados para cuantificar la carbonatación natural estos fueron sometidos a un ambiente de laboratorio de 22±2 °C y 50±5% humedad relativa.

Los especímenes sometidos a carbonatación acelerada, fueron almacenados en un cuarto con una humedad relativa de 60 % y una concentración de CO₂ de 5 y 100%. Para el 100% de concentración de CO₂ se realizaron pruebas a 1, 2 y 5 días, para el 5% de concentración de CO₂ se realizaron pruebas a 1. 26 meses de exposición.

En la tabla 6, se presenta el coeficiente de carbonatación en condiciones naturales y aceleradas para el cemento CEM I 52.5. La concentración de

CO₂ en la cámara de carbonatación fue de 100% para las condiciones aceleradas.

Tabla 6.- Coeficiente de carbonatación K , en condiciones naturales y aceleradas para concreto realizado con cemento CEM I 52.5.

Contenido de cemento en kg/m ³ de concreto CEM I 52.5	Relación a/c	K natural en mm/año0.5	K acelerada en mm/año0.5
250	0.69	4.95	213.60
350	0.49	3.54	128.20

+ K natural, calculada a partir de una exposición natural de 24 meses.

+ K acelerada, la obtuvieron de un periodo de exposición de 5 días.

En la tabla 7, se presentan los valores de coeficiente de carbonatación K , correspondiente al cemento CEM I 42.5. La cámara de carbonatación en este experimento fue realizado con una concentración de CO₂ de 5%.

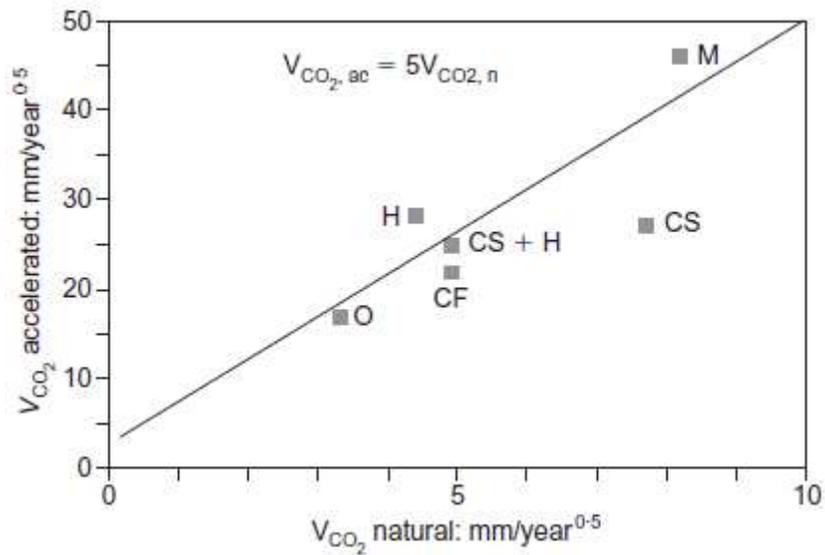
Tabla 7.- Coeficiente de carbonatación K en condiciones naturales y aceleradas para concreto realizado con cemento CEM I 42.5.

Contenido de cemento en kg/m^3 de concreto CEM I 42.5	Nomenclatura	Ceniza Volante CaO (3.00%)	Ceniza Volante CaO (53.0%)	Humo de Sílice	Relación a/c	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$	K acelerada en $\text{mm/año}^{0.5}$
300	M				0.43	8.21	45.67
395	O				0.33	3.29	16.97
296	CS	99			0.44	7.89	26.85
296	CF		99		0.44	4.93	21.91
356	H			40	0.36	4.38	27.77
296	CS+H		59	40	0.44	4.93	25.00

+ K natural, calculada a partir de una exposición natural de 10 meses.

+ K acelerada, la obtuvieron de un periodo de exposición de 1.26 meses.

En la Figura 28, se observa la relación obtenida entre la carbonatación natural y acelerada a 5% de CO_2 , esta relación les llevo a deducir que el proceso de carbonatación fue 5 veces más rápida para los concretos M, CF, CS y CS+H, pero 8 veces más rápido para los concretos O y H.



Nota: La variable V, representa en nuestra investigación el coeficiente de carbonatación K.

Figura 28- Relación entre carbonatación natural y carbonatación acelerada a 5% de CO₂.

Conclusiones

- Con respecto a la carbonatación acelerada, ha sido sugerido por otros investigadores que con una concentración de 4 o 5%, en un periodo de 7 a 15 días es aproximadamente equivalente a un año de exposición en condiciones naturales secas (50-60% de humedad relativa) [40]. En esta investigación obtuvieron un promedio de 10.37 días.
- En lo que respecta a las diferencias entre los tipos de cemento con diferentes adiciones solo pueden ser comparados en condiciones naturales.

Titulo: A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete [47].

Autores: J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul y T. Leelawat.

Año: 2004.

Lugar: Tailandia.

Materiales

Cemento: cemento Portland ordinario Tipo I, según la norma ASTM C 150.

Materiales cementantes suplementarios: Utilizaron 2 tipos de cenizas, la primera con bajo contenido de CaO (8.28%) y la segunda es una ceniza volante con alto contenido de CaO (15.07%), clasificado de acuerdo a la norma EIT 1014-46 (Engineering Institute of Thailand).

Agregados

Agregado Fino: Arena de río, con un modulo de finura de 3.12, cumpliendo con la norma ASTM C 33.

Agregado Grueso: Caliza triturada con un tamaño máximo de agregado de 20 mm, cumpliendo con la norma ASTM C33.

Procedimiento experimental:

En su investigación realizaron cubos de 50 mm, los cuales desmoldaron después de 24 horas de haber sido colados los especímenes. Todos los especímenes fueron curados por 28 días.

En la carbonatación natural, sometieron especímenes al ambiente, en periodos de 3, 6, 12, 18 y 24 meses, tiempo en el cual procedieron a medir la profundidad de carbonatación.

Los especímenes sometidos a carbonatación acelerada, fueron colocados en una cámara de carbonatación, en la cual controlaron la temperatura y la

humedad relativa en 40 °C y 55% respectivamente. La concentración de CO₂ fue de 4% por un periodo de 4 y 8 semanas tiempo en el cual midieron la profundidad de carbonatación.

Resultados

En la tabla 8, se presentan los resultados que obtuvieron con respecto al coeficiente K en $\text{mm/año}^{0.5}$, para especímenes con ceniza volante con bajo contenido de oxido de calcio (CaO).

Tabla 8.- Coeficientes de carbonatación K , para especímenes con ceniza volante con CaO 8.28%.

Contenido de cemento en kg/m^3 de concreto	Ceniza Volante CaO (8.28%)	Relación a/c	K ciudad en $\text{mm/año}^{0.5}$	K rural en $\text{mm/año}^{0.5}$	K acelerada en $\text{mm/año}^{0.5}$
325	0	0.5	1.73	1.28	24.42
287	32	0.5	2.22	1.66	24.42
214	92	0.5	4.26	3.64	36.62

Nota: K calculada, a partir de los datos encontrados en esta investigación.

+ K ciudad y K rural fue obtenida de una exposición natural de 24 meses.

+ K acelerada la obtuvieron de un periodo de exposición de 4 semanas en una cámara de carbonatación.

En la tabla 9, se muestran los valores que obtuvieron, para especímenes realizados con ceniza volante con alto contenido de CaO.

Tabla 9- Coeficientes de carbonatación K , para especímenes con ceniza volante con CaO 15.07%.

Contenido de cemento en kg/m^3 de concreto	Ceniza Volante CaO (15.07%)	Relación a/c	K ciudad en $\text{mm/año}^{0.5}$	K rural en $\text{mm/año}^{0.5}$	K acelerada en $\text{mm/año}^{0.5}$
290	0	0.6	-	-	31.39
257	29	0.6	-	-	34.88
193	83	0.6	-	-	52.32

Nota: K calculada, a partir de los datos encontrados en esta investigación.

+ K acelerada, la obtuvieron de un periodo de exposición de 4 semanas, en una cámara de carbonatación.

En las Figuras 29 y 30, se observa la relación entre el coeficiente de carbonatación y la resistencia a la compresión a los 28 días, en donde los investigadores describen, que a igual resistencia a la compresión el coeficiente de carbonatación aumenta, conforme crece el porcentaje de reemplazo de la ceniza volante.

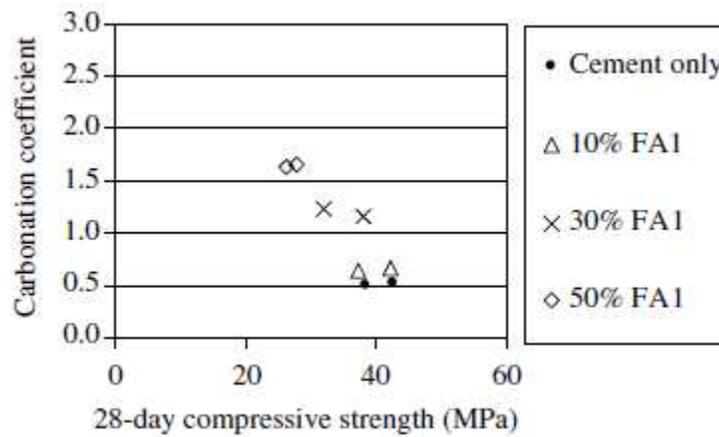


Figura 29.- Relación entre el coeficiente de carbonatación K ($\text{mm/año}^{0.5}$) y la resistencia a la compresión a los 28 días (ciudad). FA significa Flying ash (Ceniza Volante) en porcentaje de reemplazo.

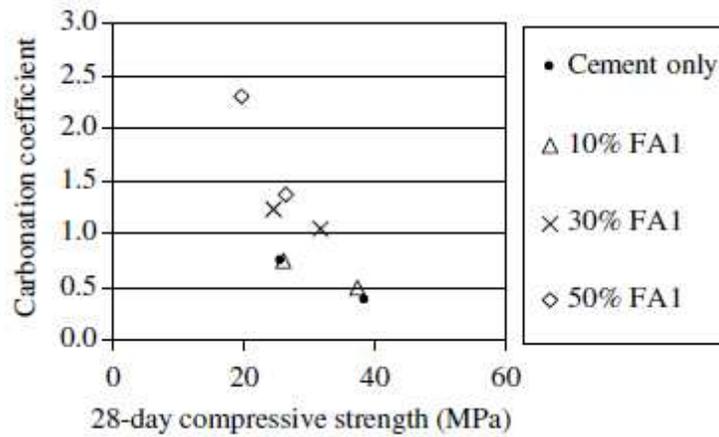


Figura 30.- Relación entre el coeficiente de carbonatación K ($\text{mm/año}^{0.5}$) y la resistencia a la compresión a los 28 días (rural). FA significa Flying ash (Ceniza Volante) en porcentaje de reemplazo.

En la Figura 31 y 32, los investigadores establecen que existen fuertes relaciones entre la carbonatación realizada en un ambiente natural con la realizada en condiciones aceleradas.

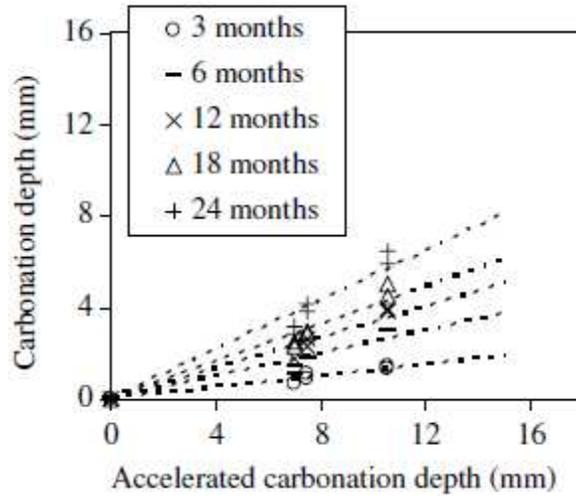


Figura 31.- Relación entre la profundidad de carbonatación en ambiente natural (ciudad) y ambientes acelerados.

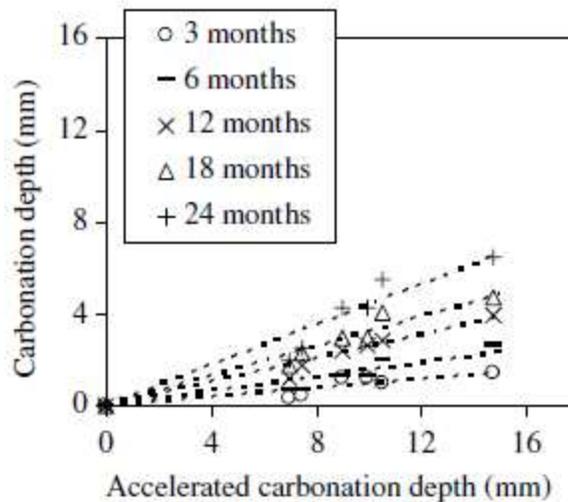


Figura 32.- Relación entre la profundidad de carbonatación en ambiente natural (rural) y ambientes acelerados.

Conclusiones

- El coeficiente de carbonatación aumenta, con el incremento de ceniza volante.
- El coeficiente de carbonatación es mayor, para especímenes con bajo contenido de CaO en la ceniza volante.
- Existen fuertes relaciones entre la profundidad de carbonatación de especímenes expuestos al ambiente natural y los expuestos a una cámara de carbonatación acelerada.

Titulo: Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración [45].

Autores: Eric I. Moreno, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia y Francisco Duarte Gómez.

Año: 2004.

Lugar: Yucatán, México.

Materiales

Cemento: cemento Portland ordinario Tipo I, según la norma ASTM C 150.

Agregados

Agregado Fino: Arena con un modulo de finura de 2.64, cumpliendo con la norma ASTM C 33.

Agregado Grueso: agregado dentro de la norma ASTM C 33.

Procedimiento experimental:

Los investigadores diseñaron cuatro diferentes tipos de mezclas de concreto para su estudio en ambientes acelerados de CO₂, con el fin de determinar sus coeficientes de carbonatación para cada mezcla.

Los especímenes fueron de forma cilíndrica de 7.5 X 15 cm, sometidos a una cámara de carbonatación con una concentración de CO₂ de 4% y una humedad relativa de 60%.

En la tabla 10, se presentan la información del coeficiente de carbonatación en condiciones aceleradas.

Tabla 10. Coeficientes de carbonatación *K*, para diferentes relaciones a/c.

Relación a/c	<i>K</i> acelerada en mm/año ^{0.5}
0.8	-
0.7	83.5
0.62	71.2
0.55	51.7

•*K* acelerada, la obtuvieron de un periodo de exposición de 35 días.

Conclusiones

- Los coeficientes de carbonatación presentaron una variación de acuerdo con la a/c; a mayor a/c, mayor fue el coeficiente de carbonatación.

- La profundidad de carbonatación varió de acuerdo al tipo de mezcla, mayor profundidad de carbonatación conforme aumenta a/c.
- Existe una relación entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento; la profundidad de carbonatación aumenta conforme el contenido de cemento disminuye.

Título: DURACON: Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto. Parte 2. Resultados de Chile después de 5 años de Exposición [52].

Autores: Vera R., Villarroel M., Delgado D., Carvajal A.M., De Barbieri F. y Troconis O.

Año: 2009.

Lugar: Santiago y Valparaíso, Chile.

Materiales

Cemento: cemento Portland Puzolanico.

Procedimiento experimental:

Los Investigadores realizaron especímenes prismáticos de 15 X 15 X 30 cm, para ser expuestos en condiciones naturales.

Los especímenes fueron curados por 28 días.

En las tablas 11 y 12, se presenta el coeficiente de carbonatación para condiciones naturales.

Tabla 11.- Coeficientes de carbonatación natural K , para un año de exposición.

Contenido de cemento en kg/m^3 de concreto	Relación a/c	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Santiago)	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Valparaíso)
323	0.65	11	7.8
387	0.45	6	3.2

Nota: K calculada, a partir de los datos encontrados en esta investigación.

+ K natural, calculada a partir de una exposición natural de 12 meses.

Tabla 12.- Coeficientes de carbonatación natural K , para dos años de exposición.

Contenido de cemento en kg/m^3 de concreto	Relación a/c	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Santiago)	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Valparaíso)
323	0.65	9.19	2.83
387	0.45	8.84	6.86

+ K natural, calculada a partir de una exposición natural de 24 meses.

Titulo: Efecto del ambiente en el concreto reforzado, después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (proyecto DURACON) [53].

Autores: Moreno E. I., Ayuso-Blanco F., Torres-Acosta A. A. y Troconis-Rincón O.

Año: 2009.

Lugar: Yucatán, México.

Materiales

Cemento: cemento Portland ordinario resistente a sulfatos (CPO 30 RS), según la norma NMX C 414.

Agregados

Agregado Fino: Arena cuarzosa.

Agregado Grueso: grava silíceo de tamaño máximo de agregado de 19 mm.

Procedimiento experimental:

En la investigación realizaron especímenes de concreto simple de 15 X15 X30 cm, los cuales fueron curados por un periodo de 21 días, para ser expuestos en condiciones naturales.

Resultados

En las tablas 13 y 14, se presentan los valores de coeficiente de carbonatación para especímenes expuestos en condiciones naturales para caras expuestas a los vientos dominantes y para las caras no expuestas a vientos dominantes.

Tabla 13.- Coeficientes de carbonatación K , para caras expuestas y no expuestas a los vientos dominantes, para un periodo de tiempo de 14 meses.

Contenido de cemento en kg/m^3 de concreto	Relación a/c	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Viento dominante)	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Viento no dominante)
285	0.65	4.3	3.2
411	0.45	0.7	0.6

+ K natural, calculada a partir de una exposición natural de 14 meses.

Tabla 14.- Coeficientes de carbonatación K para caras expuestas y no expuestas a los vientos dominantes, para un periodo de tiempo de 36 meses.

Contenido de cemento en kg/m^3 de concreto	Relación a/c	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Viento dominante)	K natural en $\text{mm/año}^{0.5}$ (Viento no dominante)
285	0.65	3.63	2.99
411	0.45	1.32	0.76

+ K natural, calculada a partir de una exposición natural de 36 meses.

Conclusiones

Los parámetros climáticos han presentado consistencia durante los cuatro años que se han monitoreado, con valores de humedad y temperatura

suficientes para desarrollar velocidades de corrosión importantes una vez que la superficie de acero se despasive.

Conclusiones personales sobre los antecedentes.

En los antecedentes antes presentados, la metodología para realizar los ensayos acelerados de carbonatación son muy variables, en los cuales se establecen diferentes tiempos de curado, diferentes concentraciones y diferentes tiempos de exposición principalmente. Esto debido a que no existe una metodología normalizada para el ensayo acelerado.

En estas investigaciones, se realizan relaciones entre los ensayos realizados en ambiente natural y los ensayos realizados en condiciones aceleradas. Estas relaciones, son realizadas específicamente para las condiciones en las cuales se realiza el estudio.

Las investigaciones que se presentan anteriormente fijan su atención a otros aspectos a la de esta investigación, ya que en su mayoría realizan ensayos acelerados o ensayos naturales por separado, solo en Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions [40] y en A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete [47], se busca relacionar ambos ensayos.

Por último, en las investigaciones anteriores no hay una descripción de las condiciones prevalecientes en la zona al momento de realizar la experimentación en ambiente natural, solo en las investigaciones de DURACON se muestran estos datos, pero no los relacionan con el proceso de carbonatación.

2.8.- La Justificación.

La principal motivación para realizar esta investigación, es que no existe una metodología normalizada para realizar ensayos acelerados correlacionados con ensayos en ambiente natural. En los antecedentes presentados, se podrá notar que la forma de tratar los especímenes para realizar la experimentación, es muy diversa y corresponde principalmente a características propias del ambiente donde se realiza la investigación.

En otro aspecto, una de las principales motivaciones para realizar esta investigación, es la falta de información oportuna en la localidad como lo son, la concentración de CO₂, la temperatura y la humedad relativa, lo cual es de suma importancia para nuestro fenómeno debido a que la influencia de las condiciones ambientales en el lugar afectan primordialmente el proceso de la carbonatación.

La intención de esta investigación es ayudar a dar mayor importancia, a las consecuencias que el cambio climático ejerce sobre nuestro medio ambiente y como esto nos afecta en nuestras actividades. El conocer como el cambio climático afecta nuestro entorno nos ayudara a conocer cómo prevenir estos efectos.

El aumento de las concentraciones de CO₂ y la temperatura dentro del fenómeno del calentamiento global, ha ido tomando mayor importancia en los recientes años, debido a que este es un proceso dinámico, en el cual las concentraciones de CO₂ han variado mayormente en los últimos años. Siendo la concentración de CO₂ y la temperatura de los principales factores que afectan el proceso de carbonatación, analizar el efecto que producen el cambio climático en los valores de estos factores es requerido.

La carbonatación en el concreto, es una de las dos principales causas de la despasivación del acero en el concreto reforzado. Para la prevención de la

corrosión del acero, necesitamos conocer el avance de la carbonatación para mitigar su efecto sobre al acero de refuerzo del concreto.

En el progreso de la carbonatación, se han adoptado valores para simplificar el avance de este proceso, comúnmente se acepta el valor de 1 mm/año^{0.5}, (cuyo valor es utilizado para estimar el avance de la carbonatación cuando no se cuenta con datos experimentales. Este valor deberá ser analizado para corroborar si cumple o no con las condiciones de nuestra localidad.

El proceso de la carbonatación tiene buena repetibilidad pero no buena reproducibilidad. Esto debido a que este proceso es dependiente de las condiciones ambientales del lugar como lo son la humedad relativa, la concentración de CO₂ y la temperatura. En esto recae la importancia de realizar un estudio que nos permita conocer la velocidad de carbonatación debido a las condiciones específicas del lugar y de esta manera poder utilizar este conocimiento para aplicarlo en un índice de durabilidad para nuestra localidad.

Otro aspecto que ha tomado mayor relevancia en los últimos años, es la durabilidad, esto debido a lo costos que implica realizar reparaciones algunas veces prematuras en la infraestructura existente. La durabilidad es un aspecto primordial para la mejora de la infraestructura nacional, para que mejoremos la durabilidad de la infraestructura necesitamos un mayor conocimiento de los procesos que interfieren en ella. Entre esos procesos se encuentra la carbonatación, en el cual se pone énfasis en como los diversos factores (CO₂, temperatura, humedad relativa, etc.) afectan al fenómeno.

2.9.- La Hipótesis.

Será posible correlacionar los parámetros (concentración de CO₂, humedad relativa, temperatura, etc.) usados en la prueba de carbonatación acelerada, para predecir la velocidad de carbonatación en al menos un ambiente natural representativo de la zona metropolitana de Monterrey.

2.10.- El Objetivo general:

Determinar una correlación entre la prueba de carbonatación acelerada y carbonatación natural, la cual permita realizar una predicción confiable entre estas.

2.10.1.- Los Objetivos específicos:

1. Determinar el avance de la carbonatación, así mismo la velocidad de la carbonatación mediante pruebas en ambiente natural a mediano plazo.
2. Determinar los parámetros de CO₂, H.R. y temperatura necesarios para obtener el equivalente a un año de carbonatación acelerada, para al menos un ambiente representativo de la zona metropolitana..
3. Caracterizar las condiciones ambientales en la que son expuestos los especímenes (carbonatación natural).
4. Recopilar información que permita en un futuro obtener una relación entre el cambio climático con el proceso de carbonatación.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

“¿Por qué esta magnífica tecnología científica, que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil, nos aporta tan poca felicidad? La respuesta es está, simplemente: porque aún no hemos aprendido a usarla con tino”.

Albert Einstein

3.- La Metodología experimental.

En el Capítulo 3, se presenta la metodología experimental, en la cual en primera instancia, se abordan las características de los materiales y del concreto. Posteriormente se presenta el procedimiento utilizado para realizar la experimentación. Además se muestran los resultados obtenidos a través de esta investigación. El conjunto de esta información se presenta con el fin de aportar al lector las herramientas necesarias, para juzgar la reproducibilidad de este experimento.

3.1. - Los Cementantes.

La presente investigación se realizó con dos tipos de cementantes, un cemento portland ordinario que posee una resistencia a la compresión mínima a los 28 días de 40 MPa (CPO 40) y un cemento portland compuesto, el cual obtiene una resistencia mínima a la compresión a los 3 días de 20 MPa y a los 28 días de 30 MPa (CPC 30R), clasificados ambos en la Norma NMX-C-414. A continuación en la tabla 15, se presentan las especificaciones para los cementantes utilizados en esta investigación.

Tabla 15.- Especificaciones de los cementantes, según la Norma NMX-C-414.

Material	Descripción
CPC 30 R	Cemento portland compuesto, está constituido por clínker + yeso, además de dos o más adiciones. La norma establece que la combinación de clínker + yeso debe estar dentro del 50 al 94 %, la escoria granulada de alto horno del 6 al 35%, los materiales puzolánicos del 6 al 35%, el humo de sílice del 1 al 10%, la caliza del 6 al 35%, y otros minoritarios de 0 a 5 %, todos estos referenciados en porcentaje por masa.
CPO 40	Cemento portland ordinario, el cual está constituido por clínker + yeso de 95 a 100% y otros minoritarios de 0 a 5 %, referenciados conforme a su porcentaje en masa.

El cemento portland compuesto (CPC 30 R), se utilizó con el propósito de representar a la mayoría de las estructuras de nuestro entorno, esto debido a que es el cemento más comercializado en la zona metropolitana de Monterrey. El cemento portland ordinario se utilizó para comparar los efectos de usar adiciones, en el cemento para el proceso de carbonatación.

3.1.1.- Las características del cemento.

Los cementos utilizados para esta investigación fueron cemento Portland ordinario (CPO) y cemento Portland compuesto (CPC). En las tablas 16 y 17 se presentan la composición de los mismos.

Tabla 16.- Cemento CPO (Cemento Portland Ordinario).

Determinación o Compuesto	Valores obtenidos en %
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	2.88
Oxido de Calcio (CaO)	62.43
Oxido Férrico (Fe_2O_3)	2.90
Oxido de Magnesio (MgO)	1.10
Oxido de Potasio (K_2O)	0.33
Oxido de Sodio (Na_2O)	0.13
Dióxido de Silicio (SiO_2)	25.68
Dióxido de Titanio (TiO_2)	0.23
Perdida por Ignición a 900 °C	1.55
Sulfatos (SO_4)	2.80
Humedad a 105 °C	Menor a 0.1

Tabla 17.- Cemento CPC (Cemento Portland Compuesto).

Determinación o Compuesto	Valores obtenidos en %
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	3.30
Oxido de Calcio (CaO)	59.20
Oxido Férrico (Fe_2O_3)	1.55
Oxido de Magnesio (MgO)	1.50
Oxido de Potasio (K_2O)	0.33
Oxido de Sodio (Na_2O)	0.33
Dióxido de Silicio (SiO_2)	18.30
Dióxido de Titanio (TiO_2)	0.26
Perdida por Ignición a 900 °C	12.20
Sulfatos (SO_4)	3.01
Humedad a 105 °C	Menor a 0.1

3.2.- Las características de los agregados.

Los agregados utilizados, son extraídos de la zona metropolitana de Monterrey. Estos son rocas sedimentarias, denominadas calizas las cuales son trituradas para obtener la granulometría requerida.

3.2.1.- El agregado grueso.

Se utilizó un agregado con tamaño máximo de 3/8", estando éste dentro de los requerimientos granulométricos de la Norma ASTM C 33. El material fue homogenizado manualmente y después muestreado de acuerdo a la norma NMX C- 30, para obtener el análisis granulométrico. En las Figuras 33 a 37, se muestra el procedimiento de muestreo.



Figura 33.- Muestra en forma de cono. Figura 34.- Aplanado de la mezcla.



Figura 35.- Retención de los cuartos opuestos



Figura 36.- Remezclado de la muestra.

Posterior al muestreo, el agregado fue introducido en costales para su almacenaje, hasta el momento de realizar las mezclas de concreto, como se puede apreciar en la Figura 37.



Figura 37.- Almacenaje del agregado.

En la Figura 38, se muestra el análisis granulométrico del agregado grueso, usando como referencia la Norma ASTM C 33.

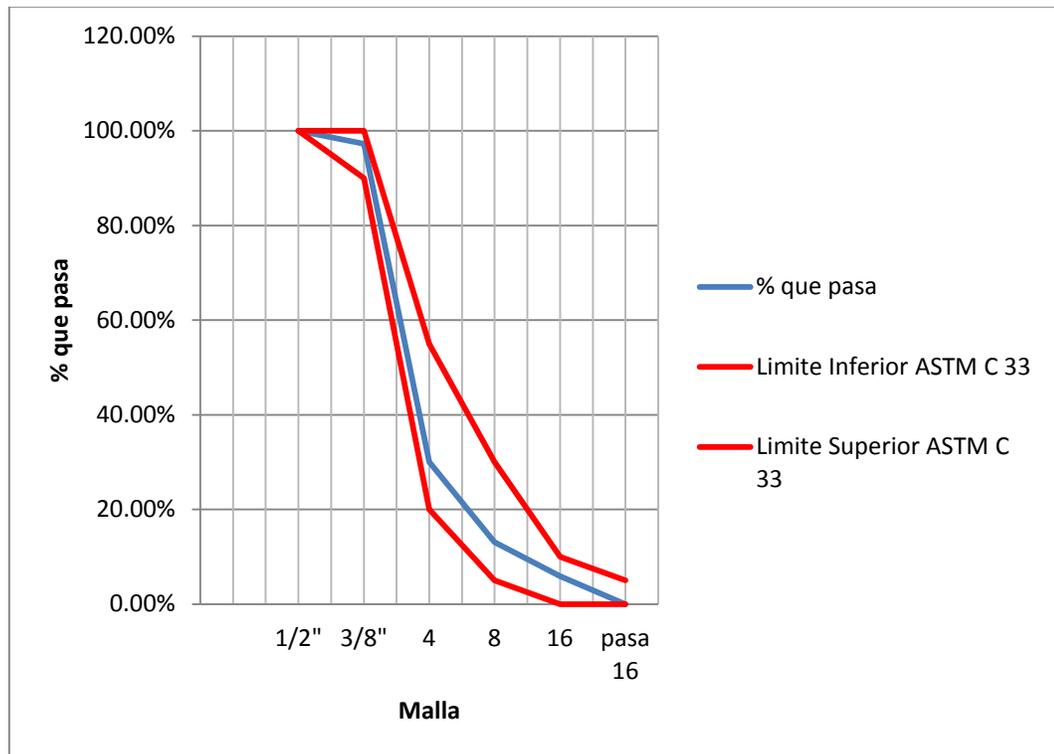


Figura 38.- Análisis granulométrico del agregado grueso.

La granulometría obtenida a través del análisis, nos muestra un agregado dentro de los límites de la Norma ASTM C 33. Además dicha granulometría, se sitúa alrededor de los valores medios del rango. En la tabla 18, se presentan las características del agregado grueso.

Tabla 18.- Características del agregado grueso.

Densidad	2.710 g/cm ³
Absorción	0.93%

3.2.2. - El agregado Fino.

El material utilizado como agregado fino, es la denominada arena No. 4, la cual fue muestreada de un lote para obtener su análisis granulométrico, el cual se observa en la Figura 39.

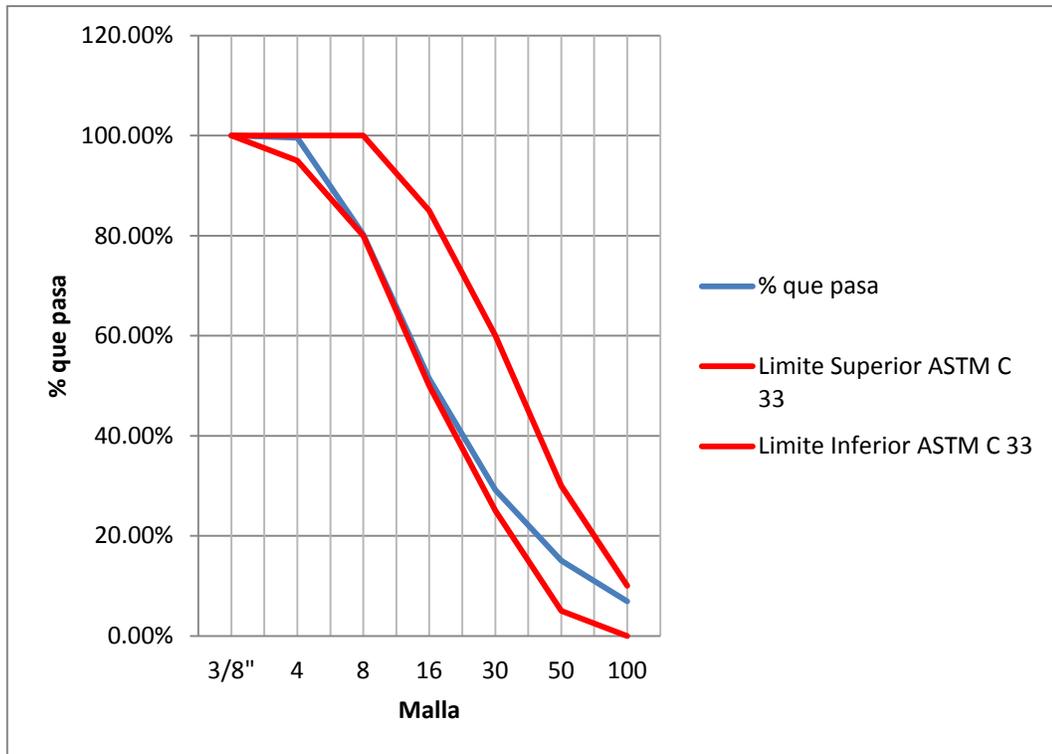


Figura 39.- Análisis granulométrico del agregado fino.

El módulo de Finura obtenido del agregado Fino, fue de 3.18. A través de este valor y de la Figura anterior 39, el agregado se denomina arena gruesa, debido a su alto valor en el Módulo de Finura, lo cual gráficamente se presenta ubicándose sus valores en el límite inferior de la Norma ASTM C 33. En la tabla 19, se presentan las características del agregado fino.

Tabla 19.- Características del agregado Fino.

Densidad	2.710 g/cm ³
Absorción	0.87%

3.3.- El diseño de las mezclas de concreto.

Dado el enfoque de esta investigación, el diseño de las mezclas fue enfocado con el objetivo de fabricar especímenes que estén dentro del común de las estructuras realizadas en la región. Esto debido a que, dichas estructuras son las más propensas a ser dañadas por la carbonatación, a causa del uso de altas relaciones agua/cemento, tamaño de los agregados y sobre todo los bajos consumos de cemento en la mezcla.

En lo que respecta al cemento, se realizaron los especímenes con el cemento de mayor comercialización en la región, como lo es el cemento portland compuesto (CPC30R) y el cemento portland ordinario (CPO 40). Este último, contiene adiciones no mayores al 5% de su masa, lo que permite comparar los efectos de las adiciones en el concreto. En cuanto a la relación a/c, se seleccionaron las más usadas en el común de las estructuras, eligiendo 0.6, 0.7 y 0.8. A continuación en la tabla 20, se presentan las relaciones a/c recomendadas por las cementeras existentes en el mercado nacional para obtener una resistencia a la compresión requerida y en donde los valores varían de una relación mínima de 0.48 hasta una máxima de 1.14.

Tabla 20.- Relaciones a/c recomendadas por las cementaras para obtener una resistencia a la compresión requerida.

Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	Cemento Cruz Azul [54] Relación a/c	Cemento Moctezuma [55] Relación a/c	Cemento Apasco [56] Relación a/c
100	0.86	0.95	1.14
150	0.78	0.76	0.95
200	0.65	0.67	0.76
250	0.57	0.57	0.67
300	--	0.48	--

El tamaño máximo del agregado fue de 3/8" (9.5 mm), esto debido a las limitaciones de las dimensiones de los moldes en los cuales se realizó el colado, siendo su dimensión mínima 50 mm. Estas dimensiones afectaron el tamaño máximo de agregado y consecuentemente a la cantidad de cemento necesaria para la mezcla, esto debido a que tiene mayor área superficial a ser cubierta por el cementante. Al respecto, el ACI 302 recomienda el uso de un mínimo de 360 kg/m³ de cemento, para obtener una superficie plana (PCA). En la presente investigación se seleccionó una dosificación de 330 kg/m³, esta cantidad se fijó a través de la realización de mezclas de prueba.

A continuación, en la tabla 21, se presenta el proporcionamiento utilizado para cada tipo de concreto.

Tabla 21.- Proporcionamiento de cada tipo de concreto.

Tipo de concreto	Dosificación de cemento en kg/m ³ de concreto.	Contenido de agua en litros/m ³ de concreto (Agua total).	Agregado grueso en kg/m ³ de concreto.	Agregado Fino en kg/m ³ de concreto.
CPO 0.6	330	201.59	735.96	1112.50
CPO 0.7	330	233.47	700.01	1059.10
CPO 0.8	330	265.75	664.05	1005.30
CPC 0.6	330	201.05	738.16	1116.38
CPC 0.7	330	232.05	702.91	1063.16
CPC 0.8	330	265.39	666.92	1008.33

En la Figura 40, se presenta el diseño experimental realizado para nuestra investigación.

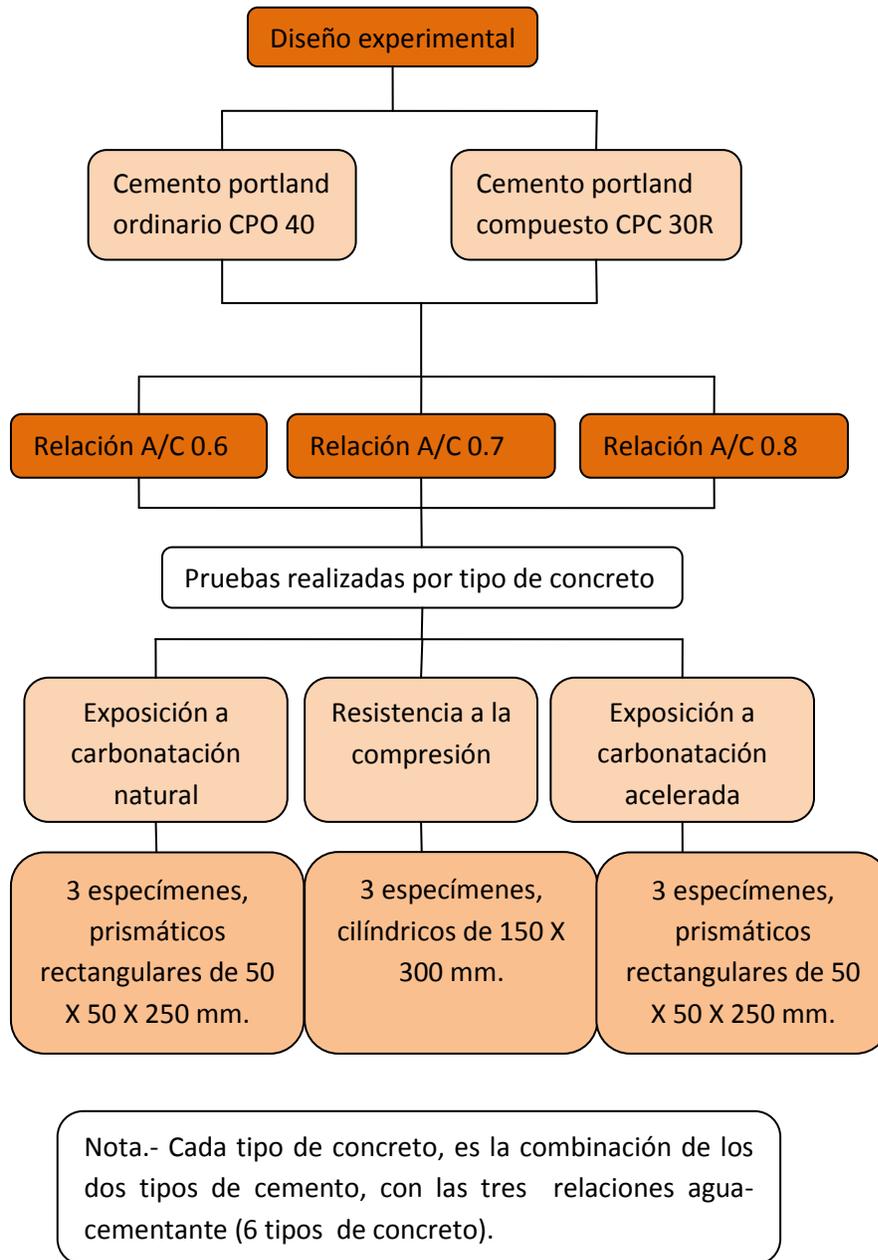


Figura 40.- Relación de pruebas experimentales.

3.4.- El proceso de mezclado.

Primero se realizó el pesado de los materiales (cemento, agregado grueso, agregado fino, y agua) de acuerdo a los valores obtenidos del proporcionamiento (véase tabla 21).

En la Figura 41, se muestra la revolvedora convencional utilizada para realizar las mezclas.



Figura 41.- Revolvedora convencional.

Después el agregado fino y el agregado grueso, fueron mezclados previamente por un espacio de tiempo de 1 min, con el objetivo de dar una mayor integración entre ellos, y así poder evitar la segregación, véase la Figura 42.



Figura 42.- Agregados grueso y fino, mezclados.

Después se procedió a agregar el cemento y el agua. Colocados todos los materiales dentro de la revolvedora se realiza el proceso de mezclado por un periodo de 5 min. En la Figura 43, se presenta el concreto después del proceso de mezclado.



Figura 43.- Concreto mezclado.

Al terminar, el proceso de mezclado, la mezcla se vierte en una carretilla previamente humedecida, la cual es cubierta inmediatamente después con una membrana, para evitar la evaporación del agua. En la Figura 44, se observa el concreto vertido en la carretilla.



Figura 44.-Concreto vertido en carretilla.

A continuación en la tabla 22, se presenta la nomenclatura utilizada para denominar a los especímenes de concreto con sus principales características.

Tabla 22.- Nomenclatura y características de los especímenes.

Nomenclatura	Características
CPO 0.6	Cemento CPO 40 con relación a/c de 0.6
CPO 0.7	Cemento CPO 40 con relación a/c de 0.7
CPO 0.8	Cemento CPO 40 con relación a/c de 0.8
CPC 0.6	Cemento CPC 30 R con relación a/c de 0.6
CPC 0.7	Cemento CPC 30 R con relación a/c de 0.7
CPC0.8	Cemento CPC 30 R con relación a/c de 0.8

3.5.- Las características del concreto en estado fresco.

Las pruebas realizadas al concreto en estado fresco para esta investigación, fueron la prueba de revenimiento y la obtención de la temperatura en la mezcla de concreto. En los subtemas siguientes se presentan las características encontradas.

3.5.1.- Determinación de la temperatura de la mezcla de concreto.

La temperatura tiene una gran influencia sobre las propiedades del concreto fresco. La medición de la temperatura fue realizada con un termómetro con precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ introducido en el concreto fresco, por un periodo de 2 minutos, de acuerdo a la Norma ASTM C 1064. En la Figura 45, se muestra la medición de la temperatura en el concreto fresco y en la tabla 23, se presentan los valores de la temperatura del concreto en estado fresco para cada mezcla.



Figura 45.- Medición de la temperatura en el concreto fresco.

Tabla 23.- Temperaturas del concreto en estado fresco.

Nombre de la mezcla	Temperatura °C
CPO 0.6	22.5
CPO 0.7	23.0
CPO 0.8	23.0
CPC 0.6	22.5
CPC 0.7	24.0
CPC 0.8	22.5

La Norma Europea ENV 206:1992, limita a 30°C, la temperatura de colocación del concreto. Las temperaturas de colado no superaron esta cifra.

3.5.2.- El revenimiento.

El ensayo de revenimiento fue realizado de acuerdo a la Norma ASTM C 143, el cual no es un ensayo que mida la trabajabilidad, pero a través de éste se otorga una clasificación de la trabajabilidad. En la Figura 46, se muestra la medición del revenimiento en el concreto y en la tabla 24, se presentan los resultados de la prueba de revenimiento para cada mezcla.



Figura 46.- Medición del revenimiento del concreto.

Tabla 24.- Revenimiento del concreto.

Nombre de la mezcla	Revenimiento, cm
CPO 0.6	3.0
CPO 0.7	13.5
CPO 0.8	22.0
CPC 0.6	2.0
CPC 0.7	14.0
CPC 0.8	23.0

3.5.- Las características del concreto en estado endurecido.

A continuación, se presentan los resultados de resistencia a la compresión, a los 28 días para los distintos tipos de concreto, con la finalidad de poder hacer relaciones con este valor.

3.5.1.- La resistencia a la compresión.

Se utilizaron 3 cilindros de 15 X 30 cm para cada tipo de mezcla, con el fin de obtener la resistencia a la compresión, de acuerdo a la Norma ASTM C 192.

En la Figura 47, se observa el aspecto de los especímenes posterior al cabeceo. La Figura 48 presenta una parte del ensayo a la compresión de los cilindros.



Figura 47.- Cabeceo de cilindros.



Figura 48.- Cilindro en compresión.

En la Figura 49, se presentan los resultados del ensayo a la compresión a los 28 días, los cuales varían de un mínimo de 226.9 kg/cm² para el espécimen CPC 0.8, a un máximo de 439.57 kg/cm², para el espécimen CPO 0.6.

Resistencia a la compresión 28 días

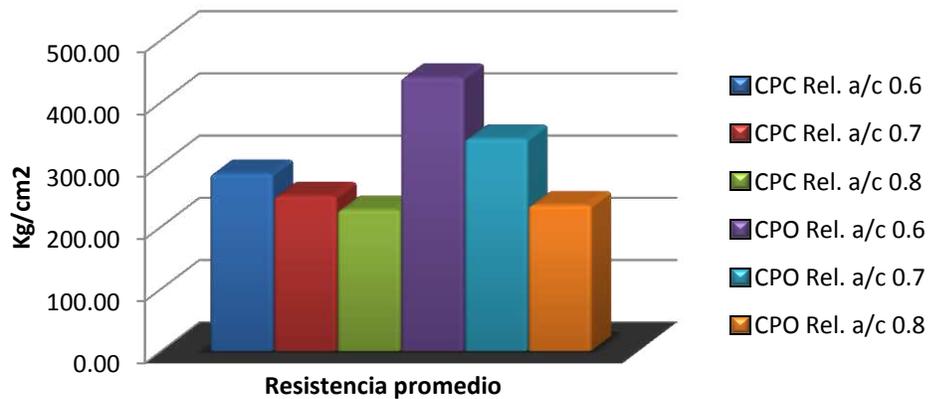


Figura 49.- Resistencia a la compresión a los 28 días.

3.6.- Los especímenes sometidos a carbonatación.

Las principales características de los especímenes sometidos a carbonatación, se enfocaron en obtener la facilidad de manipulación para su transportación a un ambiente natural. Además su tiempo de curado y el pre-acondicionamiento, limita la afectación del proceso por otras variables que no pertenecen a la naturaleza de la presente investigación.

3.6.1.- Dimensiones de los especímenes.

Los especímenes fueron colados sobre moldes de acero para obtener dimensiones de 50X50X250 mm. Dichas dimensiones, además de proporcionar una sencilla manipulación, nos permite realizar mediciones a diferentes tiempos de exposición. En la Figura 50, se muestran las dimensiones de los especímenes.

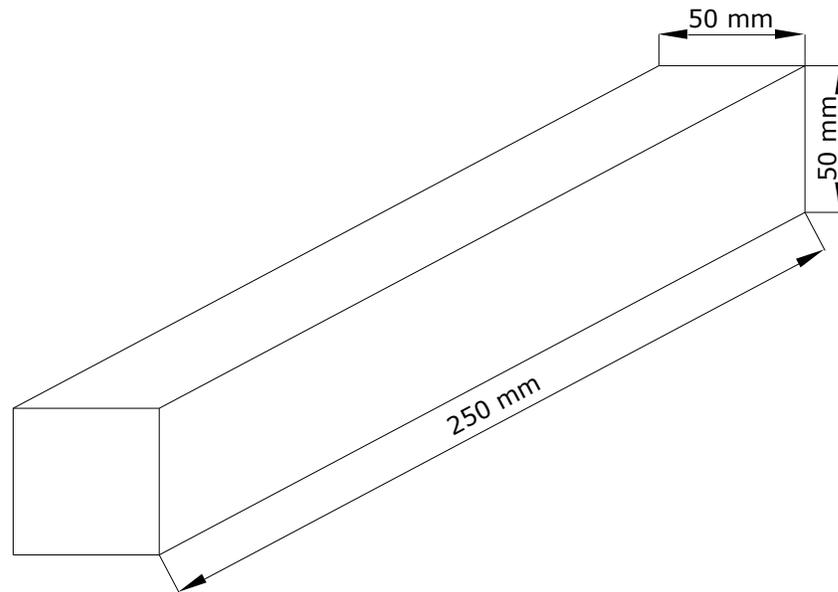


Figura 50.- Dimensiones de los especímenes de concreto.

3.6.2.- Curado de los especímenes.

Las mezclas de concreto fueron sometidas a un curado estándar vía húmeda, por medio de un cuarto de curado a 23 ± 2 °C, con una HR de $90 \pm 5\%$, por un periodo de 28 días en todos los casos.

3.6.3.- Pre-acondicionamiento de los especímenes.

Los especímenes fueron colocados dentro de un cámara ambiental marca Thermo electron modelo 3911, la cual se utilizó como horno a una temperatura de 40 °C por un periodo de 24 h. El pre-acondicionamiento tiene la finalidad de evitar afectaciones que no sean propias del ambiente de exposición. Una de estas afectaciones es debida a que un espécimen

húmedo cambia el avance de la carbonatación (véase Capítulo 2). En la Figura 51, se observan los especímenes de concreto dentro del horno.



Figura 51.- Especímenes al horno.

Después de realizado el curado por 28 días, y el secado al horno por 24 horas, se procedió a exponer los especímenes al proceso de carbonatación, en condiciones naturales y aceleradas.

3.7.- La exposición a carbonatación natural.

Se expusieron 3 especímenes para cada tipo de mezcla, con el fin de medir la profundidad de carbonatación, esta medición se realizó a 0, 95, 170, 246 y 270 días de exposición, con el objetivo de determinar el avance de carbonatación. Además se muestra la proyección a 365 días.

3.7.1.- Caracterización de las condiciones meteorológicas.

Aunado a la medición de la profundidad de carbonatación, se realizaron mediciones puntuales de las condiciones meteorológicas en los lugares de exposición, con la ayuda de un termo-higrómetro modelo TES-1370, a través

del cual se midió la temperatura, la Humedad Relativa y la concentración de CO₂, con una precisión para la temperatura de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, para la humedad de $\pm 5\%$ y por último en el caso de la concentración de CO₂, esta fue de ± 1 ppm. Además de las mediciones puntuales, se solicitó la información de las condiciones meteorológicas de los lugares de exposición, esto a través del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA Nuevo León). Las condiciones meteorológicas son registradas con el objetivo de relacionar estas condiciones con el avance de carbonatación. En la Figura 52, se muestra la medición de la concentración de CO₂.



Figura 52.- Medición de la concentración de CO₂.

3.7.2.- Selección de los lugares de exposición.

Los especímenes de concreto fueron expuestos en zonas donde no existieran interferencias que afectaran las condiciones meteorológicas del lugar primordialmente la velocidad del viento. En otro aspecto importante, estas zonas son lugares donde existe un monitoreo diario de las condiciones climáticas.

Otro aspecto que se tomó en cuenta para la elección de estos lugares, es que estos representaran diferentes zonas geográficas dentro de la zona metropolitana de Monterrey.

En las Figuras 53, 54 y 55, se muestran distintas condiciones de exposición a las que fueron sometidas las mezclas realizadas.



Figura 53.- Clima Lluvioso.



Figura 54.- Clima cálido.



Figura 55.- Especímenes con una condición superficial semi-húmeda.

3.7.3.- Lugares de exposición.

Los lugares de exposición al ambiente natural, fueron 2 para nuestra investigación. El primero representa las condiciones prevaecientes en el norte de la zona metropolitana de Monterrey y el segundo se avoca a las condiciones presentes en la zona centro de la misma zona.

3.7.3.1.- Norte de la zona metropolitana de Monterrey

La exposición a carbonatación, se realizó en la azotea del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL (expuesto aproximadamente a 10 m de altura con respecto al nivel del suelo), ubicado en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, al Norte de la zona metropolitana de Monterrey, En la Figura 56, se observa una vista general de la zona de exposición.



Figura 56.- Vista general de la zona para los especímenes expuestos a carbonatación natural.

En los alrededores de la zona de exposición, se encuentra industrias importantes. Además de dos vialidades principales como lo son, la Av. Fidel Velázquez y la Av. Universidad. En las Figuras de la 57, 58, y 59, se muestra los alrededores de la zona de exposición.



Figura 57.- Av. Fidel Velázquez (Enero 2011).



Figura 58.- Industria de la zona (Enero 2011).



Figura 59.- Av. Universidad (Enero 2011).

3.7.3.2.- Centro de la zona metropolitana de Monterrey.

Los especímenes de concreto fueron colocados dentro de las instalaciones del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental de Nuevo León (SIMA), organismo creado para medir las condiciones meteorológicas en la zona metropolitana de Monterrey, eligiéndose la estación Obispedo ubicada en el centro de Monterrey. En la Figura 60, se observa la zona de exposición.



Figura 60.- Especímenes expuestos a carbonatación natural.

La zona de exposición es un lugar residencial ubicado en la calle 5 de Mayo, a un costado de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, las vialidades importantes alrededor de la zona son: Av. Venustiano Carranza y la calle George Washington, ambas calles resultan alejadas de la zona. En la Figura 61 y 62, se muestran los alrededores de la zona.



Figura 61.- Calle 5 de Mayo.



Figura 62.- Estación Obispo.

3.8.- La exposición acelerada.

Se introdujeron en la cámara de carbonatación marca Fisher modelo ISOTEMP 40369 los especímenes de concreto, además en la misma cámara se fijaron los valores de exposición, los cuales fueron en la concentración de CO₂ de 3%, 4%, 5% y 6% cada una a la vez, en los cuales se realizó la medición de la profundidad de carbonatación a 3, 7, 14 y 28 días, la HR se mantuvo en un rango de 60 - 70% y una temperatura de 30°C. En la Figura 63, se presenta la cámara de carbonatación, donde se llevaron a cabo los ensayos acelerados.



Figura 63.- Cámara de carbonatación.

3.9.- La medición de la profundidad de carbonatación

Para efectuar la medición de la profundidad de carbonatación, se utilizaron tres replicas por cada tipo de concreto (mezcla). En cada replica se procedió a realizar el corte, el cual en primera instancia se comenzó haciendo una ranura en la periferia del espécimen, esta ranura se localiza a una distancia de aproximadamente 40 mm desde un extremo del espécimen. No existe un espesor definido para realizar tal acción pero se utilizó este valor debido a que permite efectuar el corte sin dañar el espécimen. Por último, después de

hacer la ranura para guiar el corte, se hace uso de cincel y martillo para finalizar dicho corte. Los especímenes después son limpiados en su superficie interna, con el uso de aire a presión con la finalidad de quitar material suelto y polvo que se encuentre presente en la superficie interna del espécimen. Posteriormente, se aplica un indicador ácido-base en este caso es una solución de fenolftaleína al 1%, esta solución se vierte sobre la superficie interna de la muestra. La fenolftaleína presenta un rango de viraje de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10. Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0 [57]. El proceso que abarca desde la realización del corte hasta la aplicación de la fenolftaleína se efectuó en un tiempo no mayor a 15 minutos. En la Figura 64, se observa el corte realizado en el espécimen, el cual deberá repetirse para cada edad a partir del extremo del espécimen.,

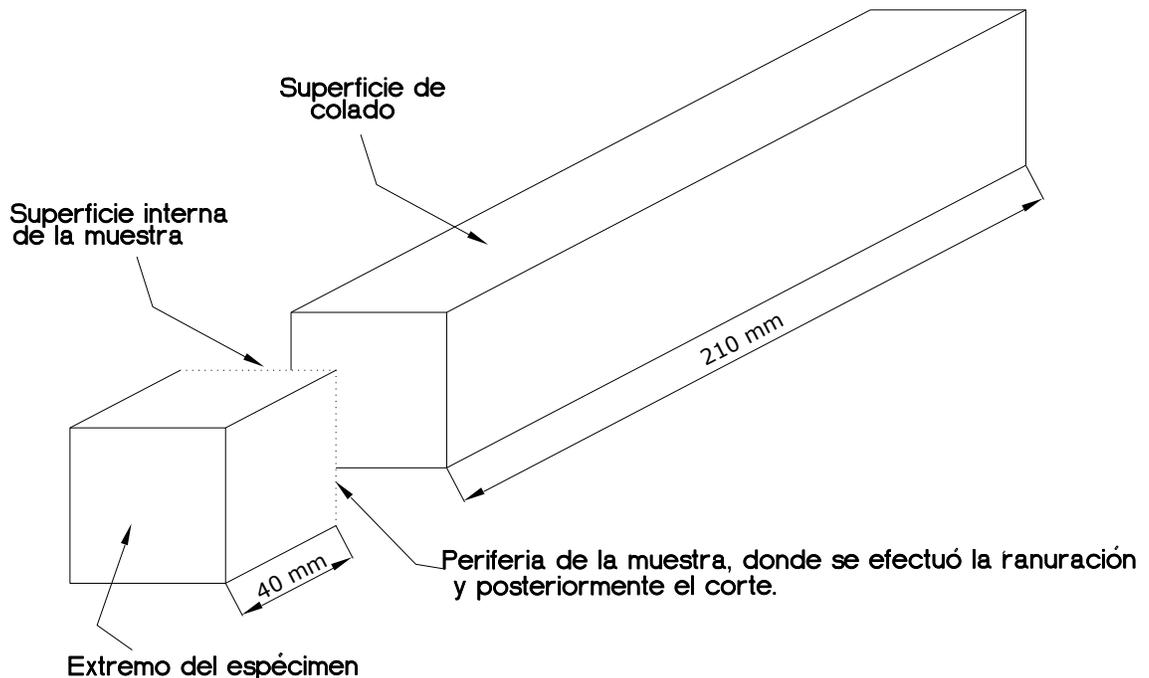


Figura 64.- Corte realizado al espécimen.

La fenolftaleína se aplica en la superficie interna de la muestra. En las Figuras 65 y 66, se muestran los especímenes posterior a la aplicación del indicador de fenolftaleína.



Figura 65.- Aplicación de fenolftaleína.

Figura 66.- Prismas después del corte.

Los especímenes fueron fotografiados para llevar a cabo la recopilación de la información, como se muestra en las Figuras 67 y 68.

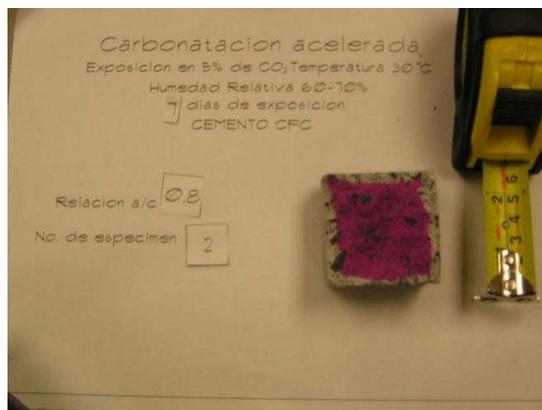


Figura 67.- 14 días a exposición acelerada.

Figura 68.- 28 días de exposición acelerada.

Para obtener la profundidad de carbonatación, se midieron tres de las cuatro caras del espécimen, descartando la superficie de colado, debido a que la superficie de enrasado adquiere una terminación diferente a las demás caras a causa del enrasado manual. En cada cara se procedió a realizar cuatro mediciones. En la Figura 69, se presenta la forma en que se realizaron las mediciones de la profundidad de carbonatación.

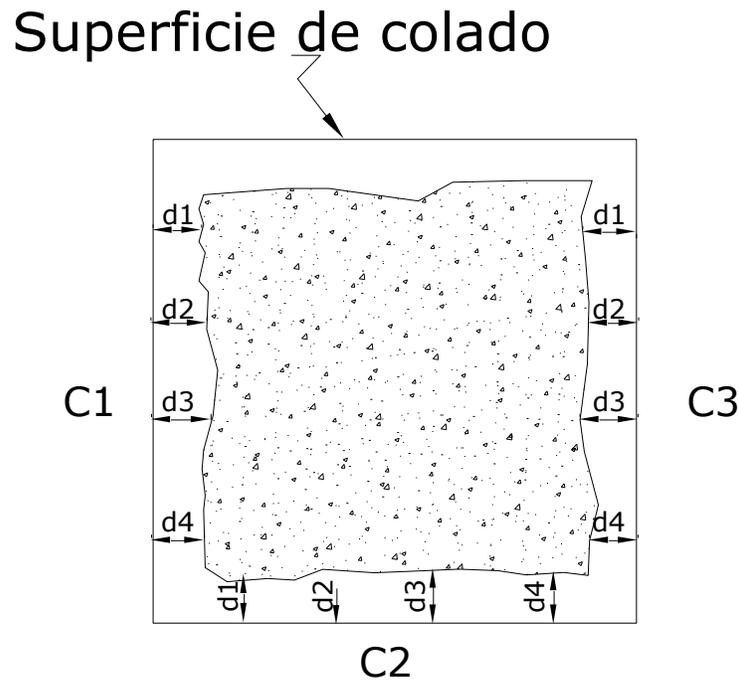


Figura 69.- Mediciones para obtener la profundidad de carbonatación.

La profundidad promedio de carbonatación para la cara 1 (C1), se obtiene a través de la siguiente ecuación.

$$X1 = \frac{d1+d2+d3+d4}{4} \dots\dots\dots(13)$$

Donde:

X_1 = Profundidad de carbonatación promedio para la cara 1.

d_1, d_2, d_3 y d_4 = Mediciones puntuales de la profundidad de carbonatación.

En el caso de la profundidad de las caras C2 y C3, se realiza el mismo proceso de la ecuación 13, obteniendo el promedio de las mediciones puntuales en cada cara.

La profundidad de carbonatación del espécimen, se obtiene mediante la ecuación 14.

$$X = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \dots\dots\dots(14)$$

Donde:

X = Profundidad promedio de carbonatación.

X_1, X_2 y X_3 = Profundidad de carbonatación promedio para las diversas caras del espécimen.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

“Es mejor saber después de haber pensado y discutido que aceptar los saberes que nadie discute para no tener que pensar”.

Fernando Savater

4.- Resultados y discusión.

En este Capítulo, se presentan los resultados obtenidos en esta investigación, los cuales tienen la finalidad de asociar las propiedades mecánicas del concreto y los factores ambientales prevalecientes en la zona de exposición con el avance en el proceso de carbonatación. Esta investigación abarcó este efecto en condiciones naturales y aceleradas. En la parte final, se discutirá sobre la pertinencia de los resultados obtenidos y su campo de aplicación.

4.1.- La caracterización de las condiciones meteorológicas.

La ausencia de información estadística especialmente en lo que respecta a la concentración de CO₂, imposibilita que el proceso de carbonatación pueda ser relacionado con las condiciones ambientales que prevalecen en esa zona. Dado lo anterior, primeramente se procedió a caracterizar las zonas de exposición con el objetivo de ofrecer información que facilite estas relaciones.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la humedad relativa, temperatura y concentración de CO₂, para las 2 zonas de exposición de especímenes ubicadas dentro del área metropolitana de Monterrey.

4.1.1.- La concentración de CO₂.

El aumento en la concentración de CO₂ en el ambiente, ha sido un fenómeno que ha tomado mayor importancia debido a que las tasas de crecimiento de esta concentración también han ido en aumento. Se calcula que existe en la

actualidad un promedio de 400 ppm en la atmósfera y además para el año 2099 se proyecta que existirá una concentración de CO₂ de 650 ppm [38]. Al respecto, se realizaron mediciones puntuales, en diversas zonas del área metropolitana de Monterrey con la finalidad de comparar las concentraciones mundiales con las concentraciones encontradas en nuestra localidad.

4.1.2.- La concentración de CO₂ en las zonas de exposición.

Como se ha mencionado anteriormente, relacionar las condiciones ambientales prevalecientes con el proceso de carbonatación, permite asociar las causas que afectan el proceso con su avance. Por tal motivo en esta investigación, una especial atención fue puesta en la concentración de CO₂ prevaleciente en las zonas de exposición de los especímenes de concreto. En la Figura 70, se muestran las concentraciones promedio por mes en la zona de exposición Norte, que representa la zona en la cual se ha registrado mayor información debido a que existe mayor tiempo de exposición.

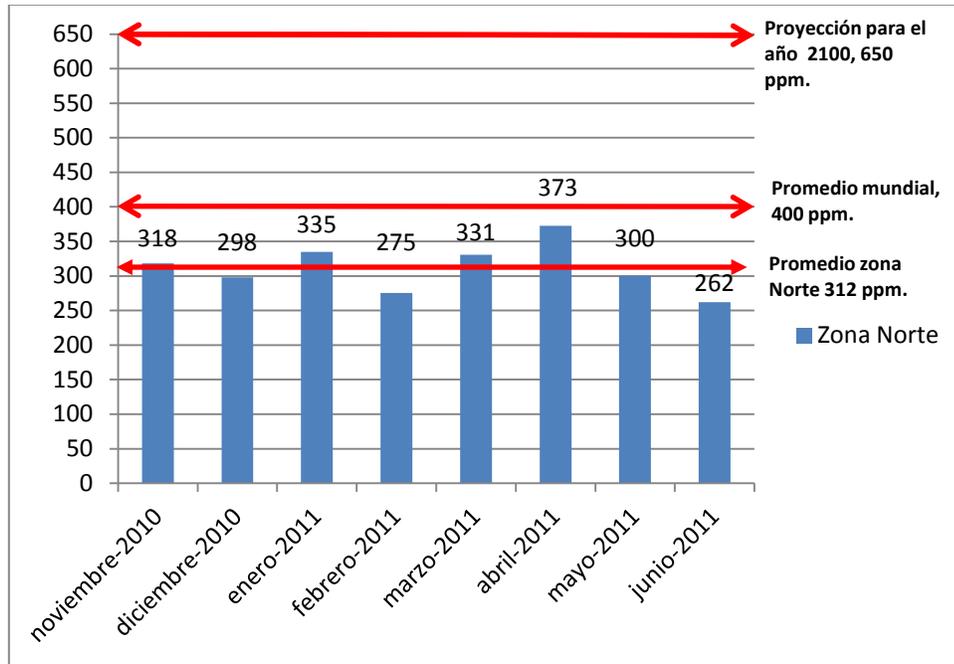


Figura 70.- Concentración de CO₂ en ppm, en la Zona Norte (donde fueron expuestos los especímenes, de Noviembre de 2010 a Junio 2011).

Los valores obtenidos a través de estas mediciones fluctúan de un valor mínimo de 262 ppm en el mes de Junio, a un valor máximo de 372 ppm en el mes de Abril, siendo el promedio de 312 ppm en este periodo de exposición. Estos valores permanecen por debajo del promedio mundial y de otros valores registrados en la literatura, como es el caso de Seúl en Corea del Sur en el cual se registraron valores de 430 ppm en 1996 [58]. En otro caso ubicado en la ciudad de Bangkok, Tailandia se registró en una zona citadina una concentración de 625 ppm en el 2004 [47].

4.1.2.1.- La concentración de CO₂, en diferentes ambientes.

La existencia de microclimas dentro de una misma zona metropolitana ha sido un fenómeno descubierto por varios investigadores [7, 32]. Por tal motivo, la información que se muestra a continuación representa diferentes zonas de nuestra localidad.

A continuación en la Tabla 25, se presenta una breve descripción de las características prevalecientes en cada lugar.

Tabla 25.-Características de las zonas en donde se realizaron mediciones de CO₂.

Zona	Características de la zona
Norte	A Lugar ubicado dentro de la ciudad Universitaria de la UANL, rodeada de avenidas principales.
Zona habitacional	B Zona habitacional rodeada por avenidas principales.
Simón Bolívar y Leones	C Avenidas principales de la ciudad de Monterrey.
Unidad médica de la UANL	D Lugar ubicado dentro de una zona habitacional.
Simón Bolívar y Madero	E Avenidas principales de la ciudad de Monterrey.

En la Figura 71, se presenta en color verde las zonas donde se realizaron las mediciones de concentración de CO₂, ubicándose las mismas dentro del área metropolitana de Monterrey.

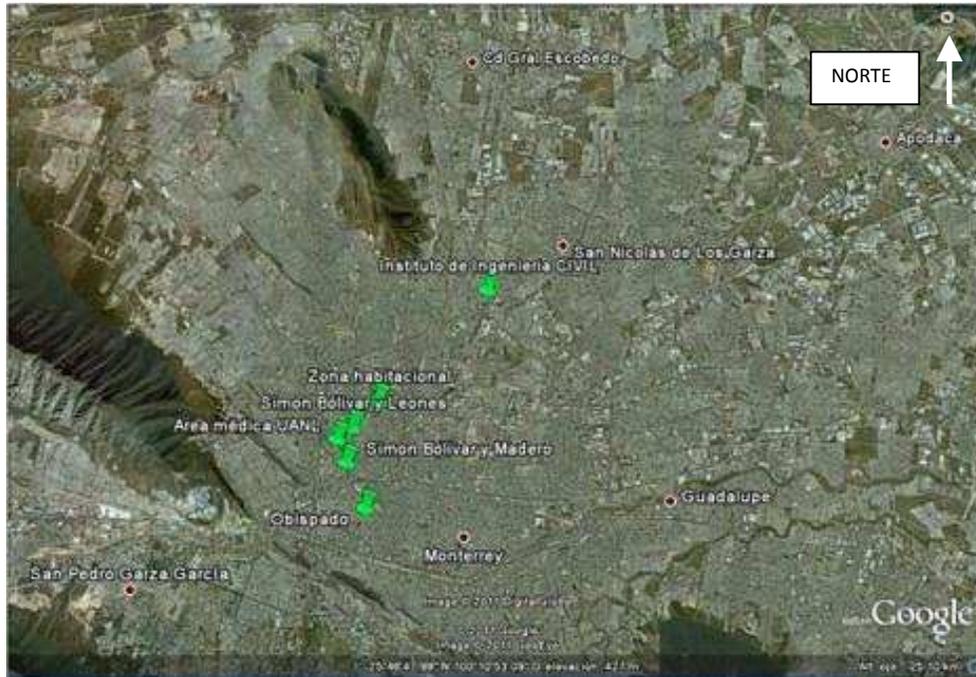


Figura 71.- Vista aérea de la zona metropolitana de Monterrey.

En las Figuras de la 72 a la 76, se presenta una vista aérea de las zonas descritas en la Tabla 25.



Figura 72.- Zona Norte.



Figura 73.-Zona habitacional.



Figura 74.- Simón Bolívar y Leones.



Figura 75.- Unidad médica (UANL).



Figura 76.- Simón Bolívar y Madero.

★ Lugar de medición

En la Figura 77, se presenta la concentración de CO₂, en los diferentes ambientes dentro del área metropolitana de Monterrey, de las mediciones realizadas en todos los ambientes se obtuvo un promedio de 341 ppm, el cual es representado en la gráfica con una línea horizontal.

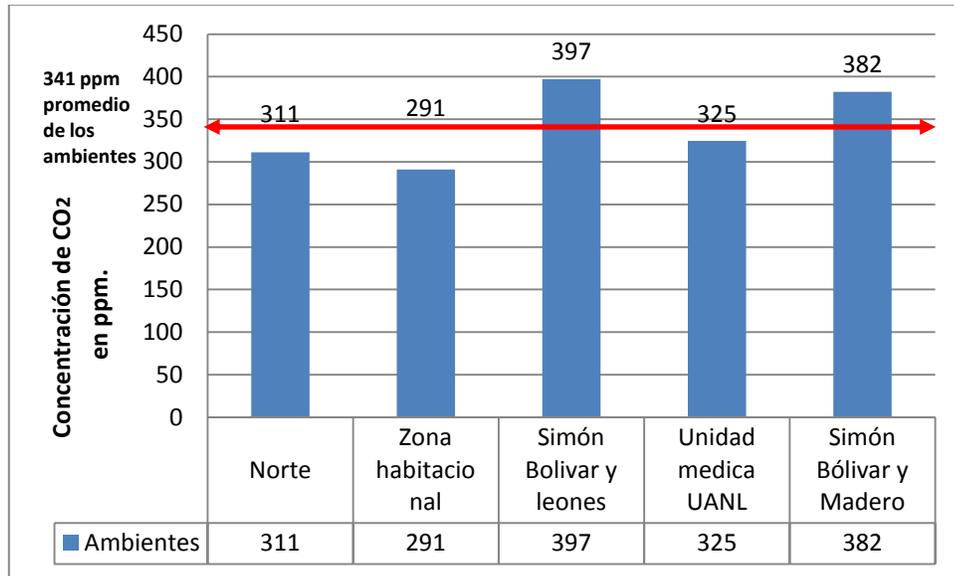


Figura 77.- Concentración de CO₂ promedio en ppm, en diversas zonas del área metropolitana de Monterrey (mediciones realizadas de Noviembre de 2010 a Mayo de 2011).

En la Figura 77, se muestra una concentración diferente para cada ambiente donde se realizaron mediciones de CO₂, Se constata que la concentración es mayor en avenidas principales del área metropolitana de Monterrey, en las que se alcanzaron en promedio valores de 397 ppm. Por el contrario los valores de menor concentración fueron los obtenidos en la zona habitacional, para la cual se obtuvo el valor promedio de 291 ppm.

4.1.3.- La Humedad Relativa.

A continuación se presentan los valores de Humedad Relativa que corresponden a las dos zonas de exposición Norte y Centro. La información mostrada representa los valores de humedad para el tiempo de exposición que corresponde a cada zona.

En la Figura 78, se muestran los valores de Humedad Relativa promedio mensual para la zona de exposición Norte.

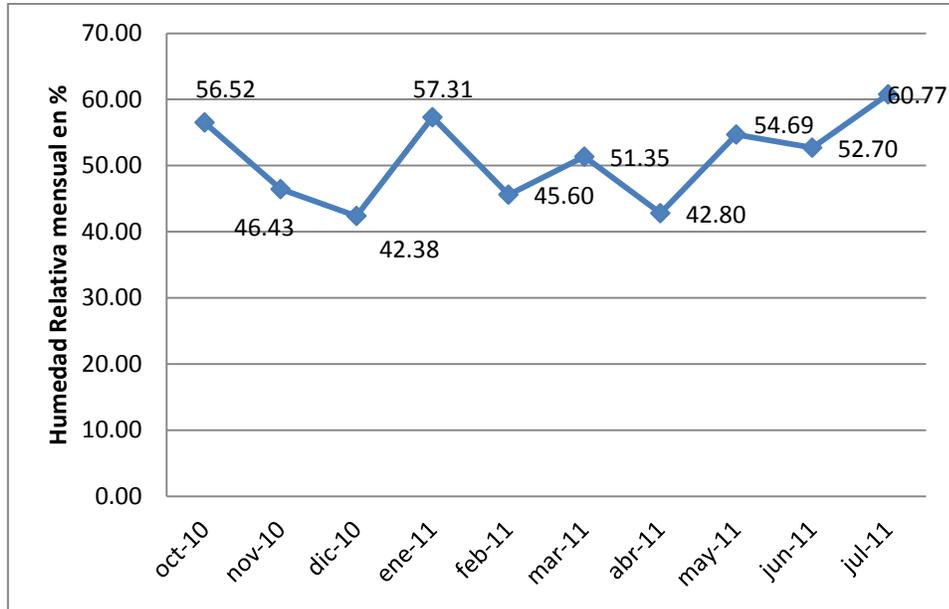


Figura 78.- Humedad Relativa promedio mensual en la zona de exposición Norte.

La zona de exposición Norte presenta un valor máximo de 60.77% y un valor mínimo de 42.38%. Los valores encontrados aumentan y decrecen de forma repetitiva, aunque más importante que lo anterior resulta el hecho de que la variación de los valores es de 18.39%, una fluctuación aceptable, tomando en cuenta que para la realización de ensayos acelerados utilizamos un rango de 10%.

En la Figura 79, se presentan los valores de Humedad Relativa para la zona de exposición Centro.

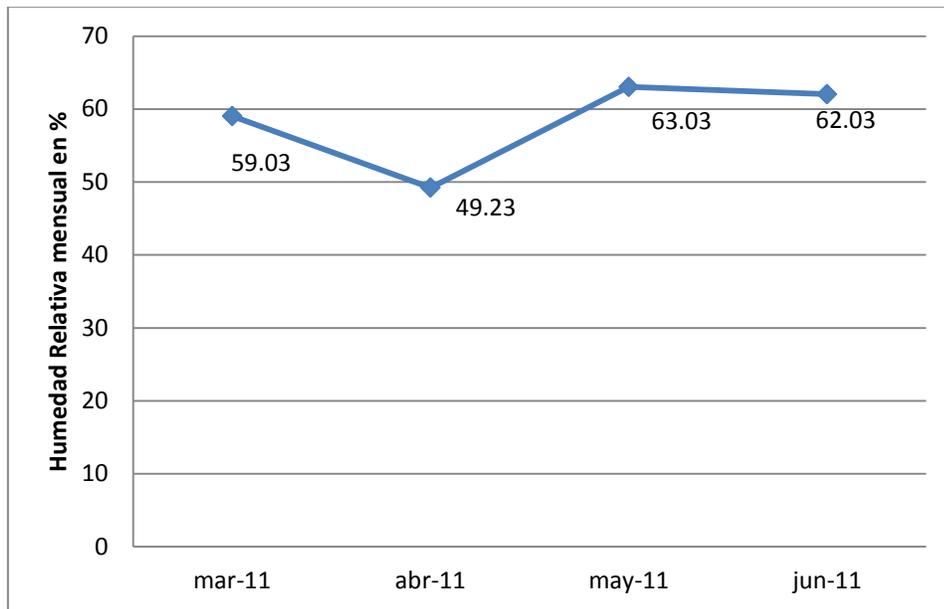


Figura 79.- Humedad Relativa mensual en la zona de exposición Centro.

La zona de exposición centro tiene un menor tiempo de exposición, en el cual las variaciones entre el valor máximo y mínimo son de 13.8%, que al igual que en la zona anterior las variaciones no resultan considerables, al menos para nuestro periodo de exposición.

En lo que respecta a las diferencias entre las dos zonas de exposición encontramos una divergencia promedio de 7.95%, siendo mayor la Humedad Relativa en la zona Centro del área metropolitana de Monterrey.

4.1.4.- La Temperatura.

En la Figura 80, se presentan los valores de Temperatura (promedio, máxima y mínima) en la zona de exposición Norte.

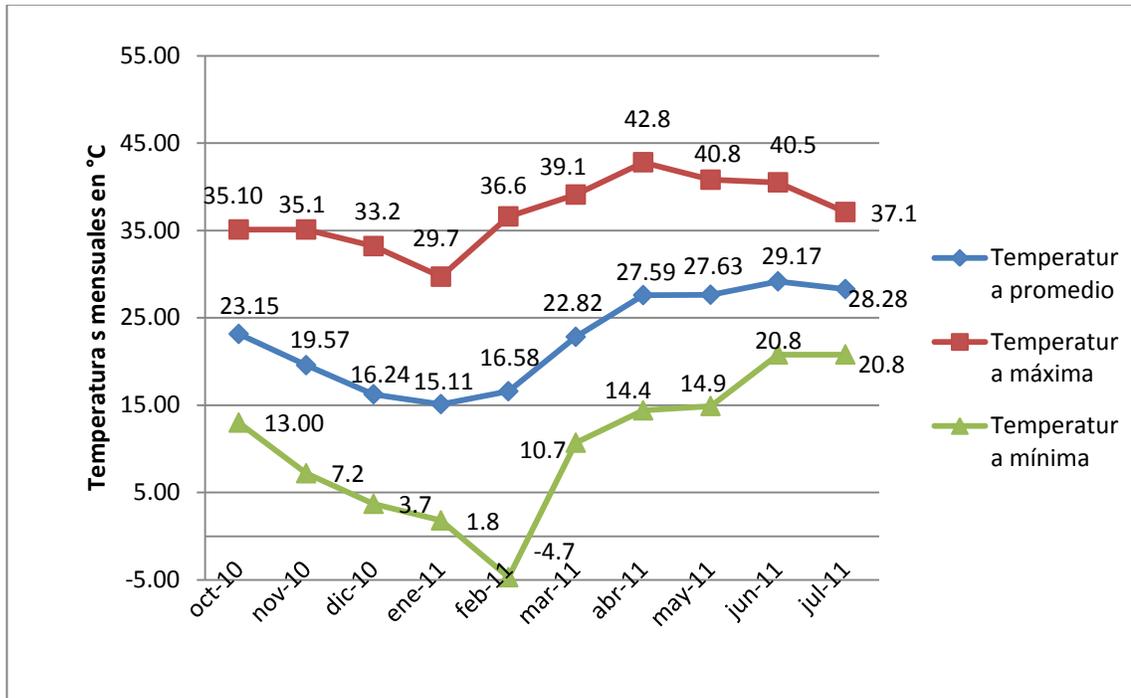


Figura 80.- Temperatura promedio mensual, mínima y máxima en la zona Norte.

La temperatura promedio mensual en la zona Norte tiene un mínimo de 15.1°C y un máximo de 29.1°C, por lo cual la diferencia es de 14.0°C. En lo que respecta a la temperatura mínima registrada fue de -4.7°C y la temperatura máxima fue de 42.8°C, existiendo una variación de 47.5°C, en el tiempo de exposición.

En la Figura 81, se presentan los valores de Temperatura (promedio, máxima y mínima) en la zona de exposición Centro.

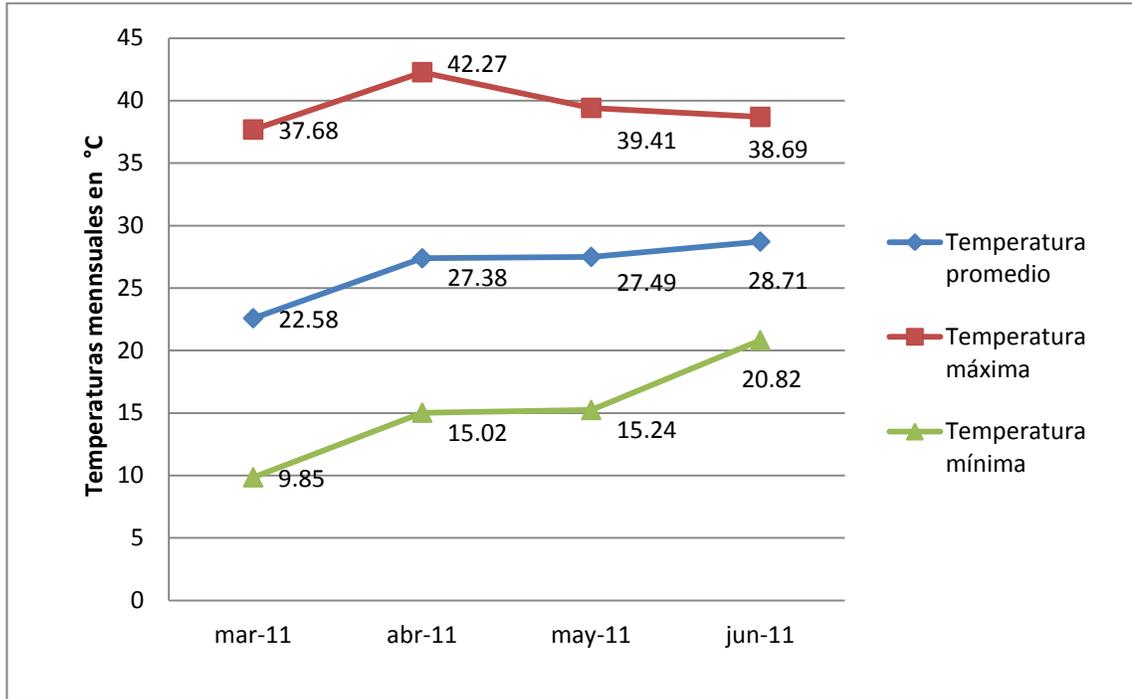


Figura 81.- Temperatura promedio mensual, mínima y máxima en la zona Centro.

En la zona Centro, se registraron los siguientes valores, en lo que respecta a la temperatura promedio, la mínima presentó un valor de 22.5°C y la máxima un valor de 28.7°C, existiendo una diferencia de 6.1°C. Los valores registrados mínimos y máximos fueron de 9.8°C a 42.2°C respectivamente, existiendo una diferencia entre ambas de 32.4°C.

La diferencia entre las dos zonas de exposición en todas las temperaturas fue muy similar, siendo la mayor diferencia entre éstas de 1.8°C para la temperatura máxima.

4.1.5.- La Velocidad del viento.

En la Figura 82, se presentan los valores de velocidad de viento para la zona de exposición Norte.

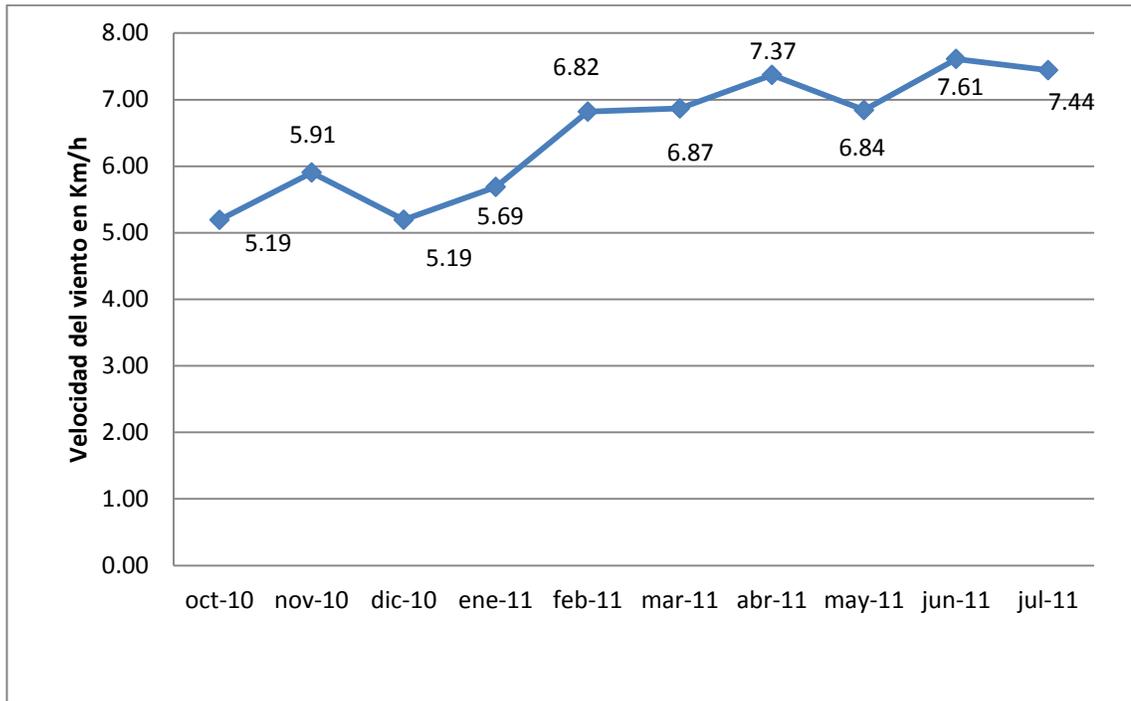


Figura 82.- Velocidad del viento en la zona Norte.

Los valores de velocidad promedio fluctúan de un mínimo de 5.19 km/h a un valor máximo de 7.61 km/h.

En la Figura 83, se presentan los valores de la velocidad de viento en la zona Centro.

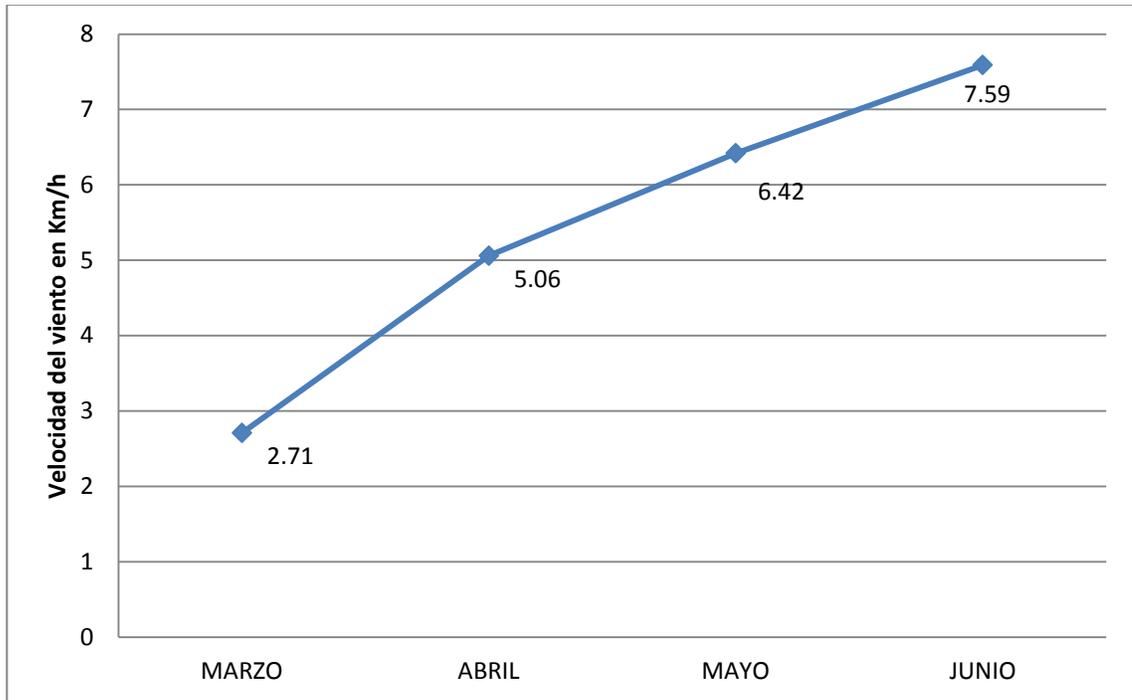


Figura 83.- Velocidad del viento en la zona Centro.

Los valores mínimos de velocidad de viento para la zona centro fue de 2.71 km/h y el valor máximo fue de 7.59 km/h.

A través de las gráficas anteriores se observa que existen grandes variaciones en los valores de temperatura en cada zona, lo cual dificulta poder hacer uso de un valor fijo, en la búsqueda de relacionar los valores ambientales para predecir la velocidad de carbonatación.

A través de los valores ambientales en las zonas de exposición Norte y Centro, podemos concluir que las diferencias más significativas entre ambas son en la Humedad Relativa y en la velocidad del viento.

4.2.- La Profundidad de carbonatación vs Tiempo.

La relación entre la profundidad de carbonatación vs tiempo, ha sido ampliamente utilizada en diversas investigaciones para determinar el comportamiento prevaleciente en el avance de la carbonatación. Se ha concluido que la curva que representa gráficamente este proceso, tiene un comportamiento el cual obedece a una función dada como la raíz cuadrada del tiempo (ecuación 6) asemejando la forma de una semi-parábola.

4.2.1.- La Profundidad de carbonatación vs Tiempo en condiciones naturales.

La Profundidad de carbonatación vs. Tiempo en condiciones naturales para especímenes de concreto, demuestran el comportamiento de este proceso para las condiciones ambientales prevalecientes en determinada zona de exposición. El conocimiento de este comportamiento facilita la predicción del proceso de carbonatación.

En la Figura 84, se presentan los resultados de la profundidad de carbonatación vs tiempo de los especímenes expuestos en la zona Norte (Azotea del Instituto de Ingeniería Civil).

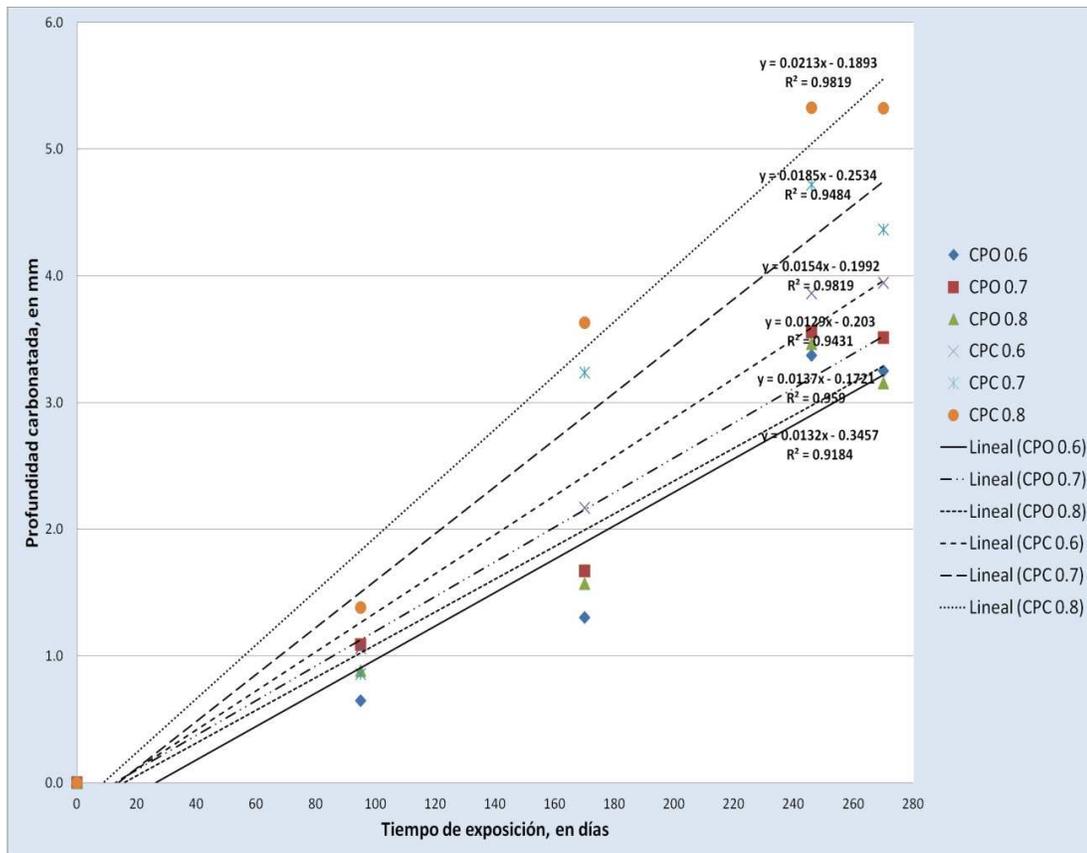


Figura 84.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente natural.

El comportamiento presentado en la Figura 84, demuestra que el avance de carbonatación presenta una tendencia lineal al menos en los periodos de exposición comprendidos en esta investigación.

Tabla 26.- Profundidad de carbonatación en mm, para especímenes ubicados en la zona Norte (Instituto de Ingeniería Civil), para distintos periodos de exposición.

Profundidad de carbonatación, mm						
Tiempos de exposición (días)	CPO 0.6	CPO 0.7	CPO 0.8	CPC 0.6	CPC 0.7	CPC 0.8
170	1.9	2.2	2.0	2.4	2.9	3.4
270	3.2	3.5	3.3	4.0	4.7	5.6
365	4.5	4.8	4.5	5.4	6.5	7.6

Los valores de profundidad de carbonatación, presentan grandes divergencias entre un concreto de alta resistencia a la compresión de 439.57 kg/cm² (CPO 0.6), el cual es 41% menor en la profundidad de carbonatación, en comparación con un concreto de resistencia regular a la compresión de 226.9 kg/cm² (CPC 0.8).

Eric I. Moreno y Gerardo G. Domínguez, en Yucatán, México, obtuvieron valores de profundidad de carbonatación de 3.3 a 10.2 mm para periodos de exposición de un año en ambiente natural, con relaciones agua/cemento de 0.55 para el primero y 0.8 para el segundo [45]. En nuestra investigación, las relaciones agua/cemento son prácticamente iguales y nuestros valores se encuentran dentro de los resultados obtenidos en dicha investigación.

En la Tabla 27, se presentan los valores de profundidad de carbonatación, para los especímenes expuestos en la zona centro (Obispado).

Tabla 27.- Profundidad de carbonatación en mm, para los especímenes ubicados en la zona Centro (Obispado), para un periodo de exposición de 168 días.

Tiempo de exposición (días)	CPO 0.6 (mm)	CPO 0.7 (mm)	CPO 0.8 (mm)	CPC 0.6 (mm)	CPC 0.7 (mm)	CPC 0.8 (mm)
168	2.4	2.4	2.8	3.0	3.7	4.9

Los valores que resultan comparables entre las dos zonas de exposición (Norte y Centro) son los resultados a 170 días para la zona Norte y de 168 días para la zona centro. Con los resultados mostrados en las Tablas 26 y 27, se muestra que los valores mayores son obtenidos en los especímenes expuestos en la zona Centro para todos los tipos de concreto, lo cual nos representa comparativamente que la zona Centro es un ambiente relativamente más agresivo de exposición.

4.2.2.- La profundidad de carbonatación vs tiempo en condiciones aceleradas.

El comportamiento de estas gráficas en comparación a las obtenidas en condiciones naturales, radica en que en este ambiente se presentan condiciones ambientales que permanecen constantes durante todo el periodo de exposición. En otro aspecto las concentraciones de CO₂, son aproximadamente 100 veces más en comparación a los obtenidos en un ambiente natural. En la investigación realizada por Castellote et al., concluyen que para especímenes de concreto (fabricado con CPO) expuestos a una carbonatación acelerada, no mayor al 3% de concentración de CO₂, no existe un cambio dramático en la microestructura en comparación con especímenes expuestos a carbonatación natural [51]. En lo que respecta

a concentraciones de 4, 5 y 6%, se desconoce su afectación a la microestructura.

En las Figuras 85 a 88, se presenta el comportamiento obtenido en el proceso de avance de la carbonatación para ambientes acelerados.

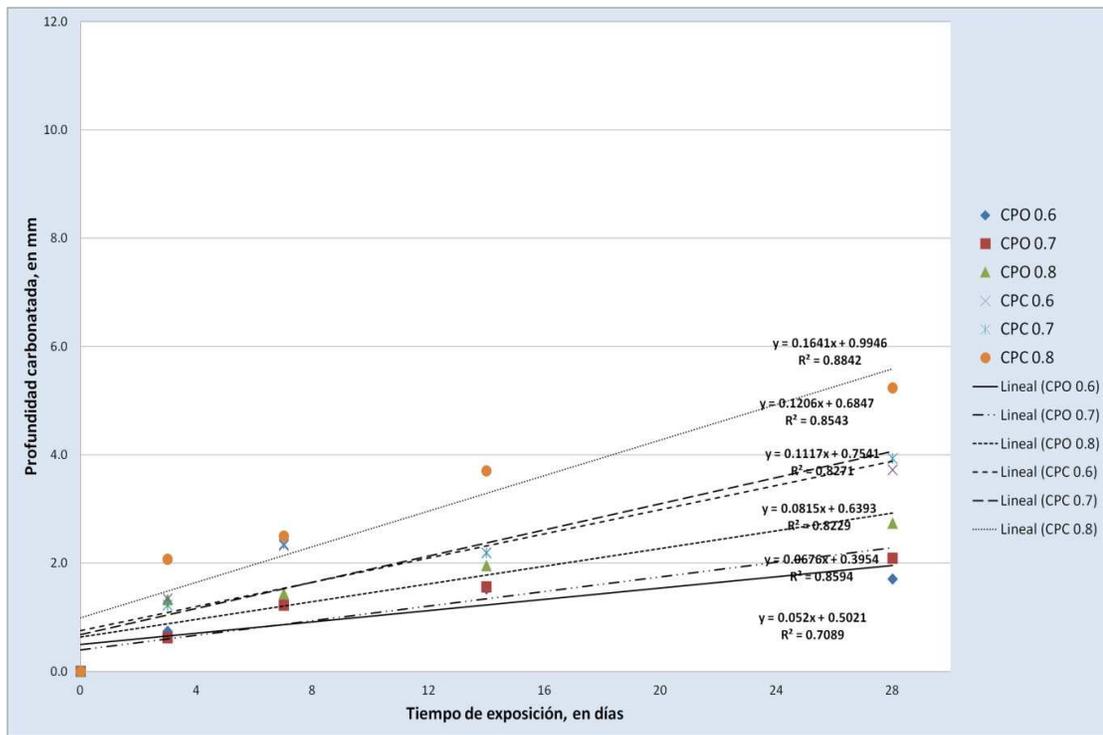


Figura 85.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 3% de CO₂.

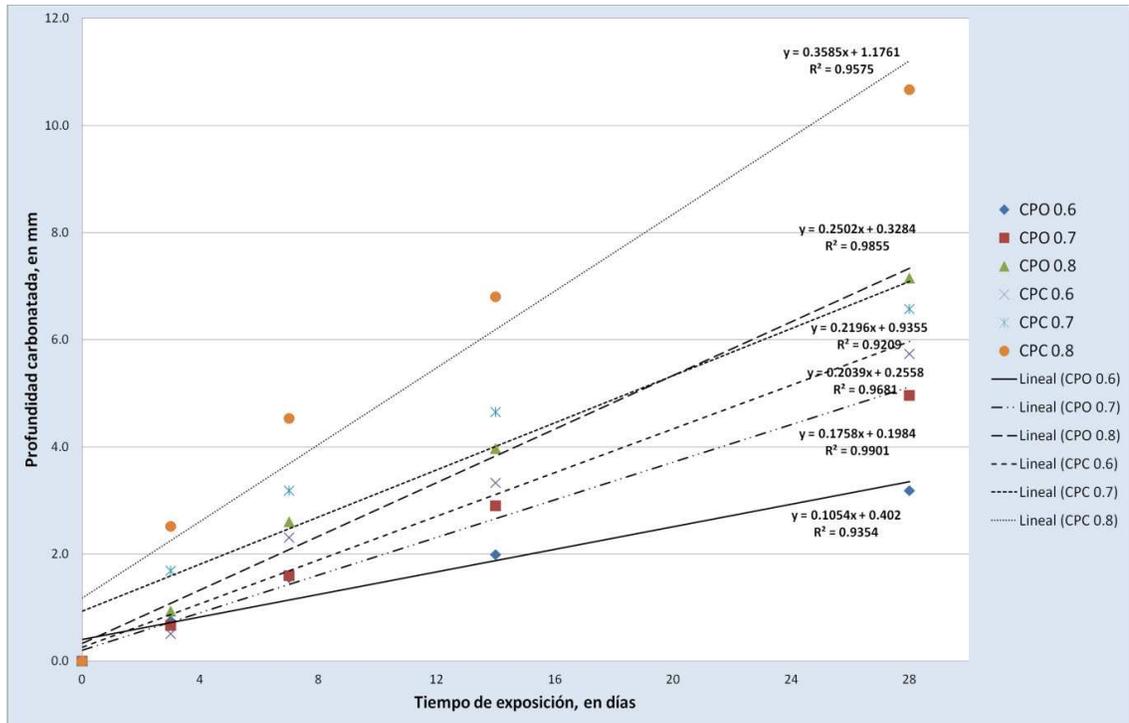


Figura 86.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 4% de CO₂.

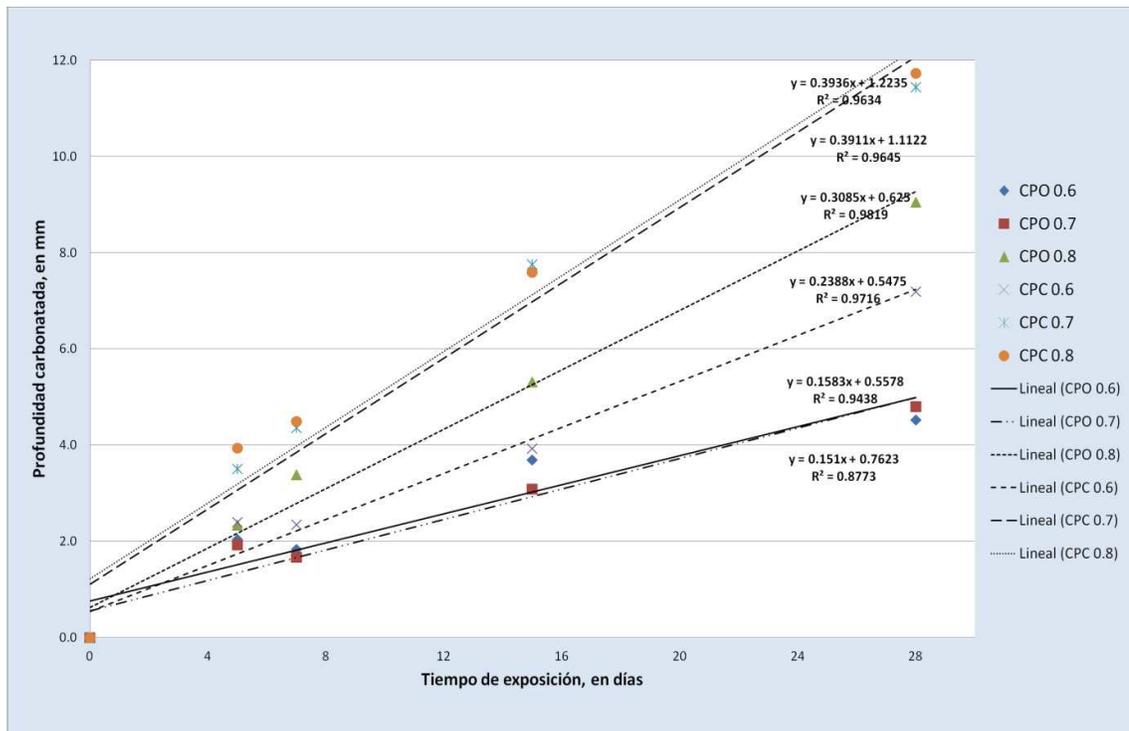


Figura 87.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 5% de CO₂.

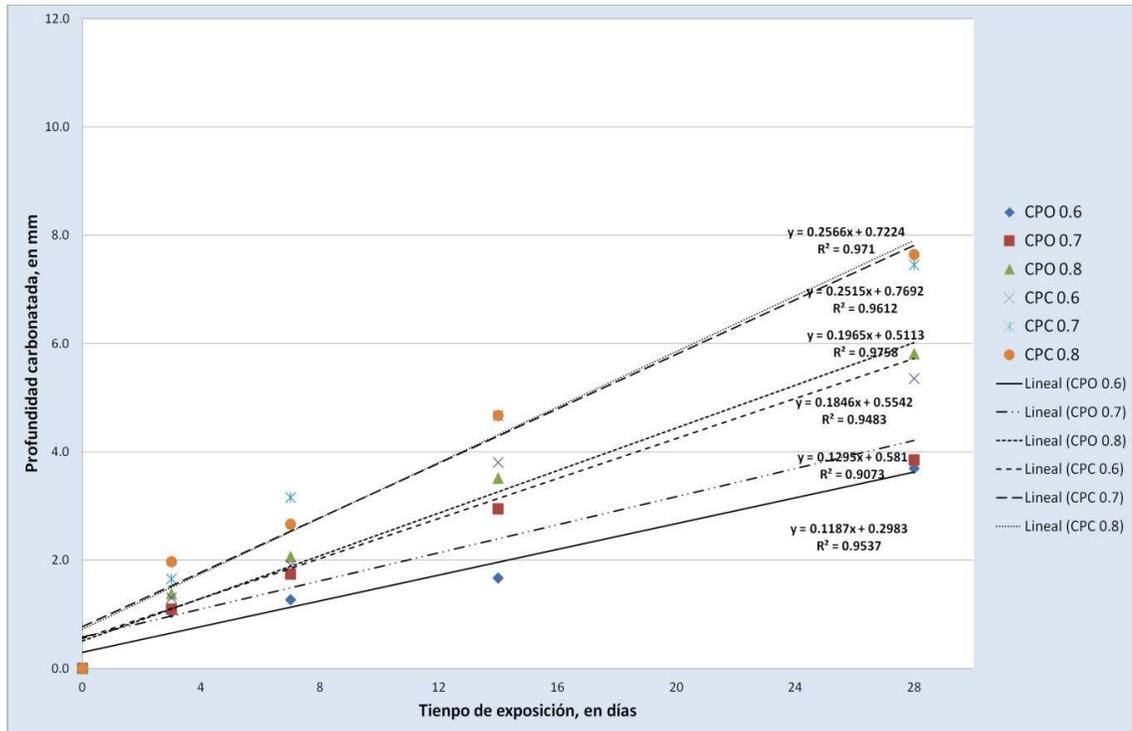


Figura 88.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente acelerado concentración de 6% de CO₂.

Las gráficas mostradas anteriormente se ajustan a un comportamiento lineal independiente de la concentración de CO₂ y tipo de cemento utilizado. A través de este ajuste se obtuvo una ecuación de la forma $y = mx + c$ para cada tipo de concreto.

Las ecuaciones obtenidas de la forma $y = mx + c$, son útiles para determinar la profundidad de carbonatación, en los periodos de exposición comprendidos en las gráficas. Sin embargo, debido a que el comportamiento lineal no es esperable para tiempos de exposición mayores, estas ecuaciones carecen de validez en la predicción de la profundidad de carbonatación.

En las Figuras de la 85 a la 88, los resultados infieren que, para especímenes expuestos en ambientes acelerados, existe un incremento en

el valor de la pendiente conforme el ambiente de exposición es más agresivo, con la excepción de los especímenes expuestos a 6% de CO₂. Con base a lo referenciado en otras investigaciones [45, 53], no existe una razón para que el avance de carbonatación con una mayor concentración de CO₂, haya resultado menor. Aunque en lo concerniente a esta investigación este fenómeno se explica de la siguiente manera: debido a que la reducción en el avance de carbonatación se presentó en todos los tipos de concreto, y estos fueron elegidos de forma aleatoria para cada condición de exposición, se descarta que estos valores provengan de las características del concreto, sino este decremento es causado por las condiciones ambientales, más focalizado en las variaciones de la HR, para la cual se permitió un rango de 60-70 %, para todas las concentraciones.

4.3.- Profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión.

Ha sido encontrado a través de diversas investigaciones la existencia de una relación lineal entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a la compresión [45, 53]. Esto debido a que una matriz más densa en el concreto proporciona una mayor resistencia a la compresión y menor permeabilidad a la acción de agentes agresivos. Por lo cual se ha determinado que a mayor resistencia a la compresión la profundidad de carbonatación decrece.

Encontrar relaciones verificables en este aspecto no es el objetivo de esta investigación. Por tal motivo, se procede a mostrar las tendencias que se presentaron en nuestros distintos tipos de concreto.

4.3.1.- La profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión, en condiciones naturales.

En la Figura 89, se muestra la gráfica de profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión, para especímenes realizados con cemento CPO y CPC.

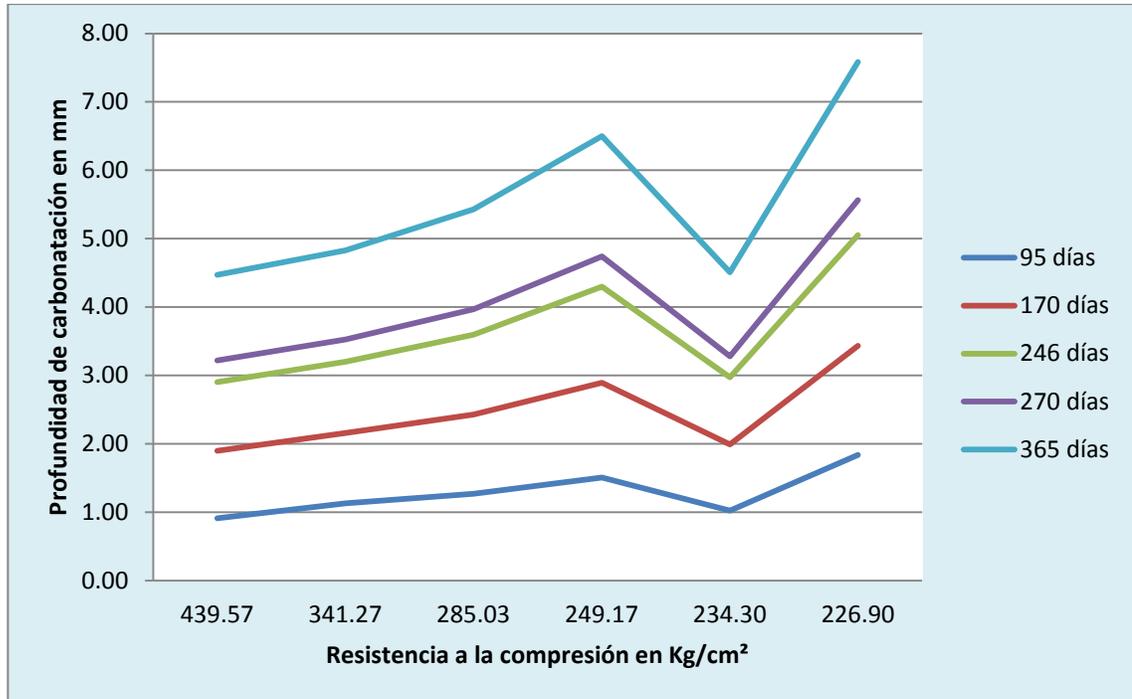


Figura 89.- Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes realizados con cemento CPO y CPC (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

Los especímenes fabricados con diferentes tipos de cemento, no muestran una tendencia a comportarse de forma lineal, como se puede observar en la Figura anterior.

En la Figura 90, se presenta la gráfica de Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes elaborados con cemento CPO.

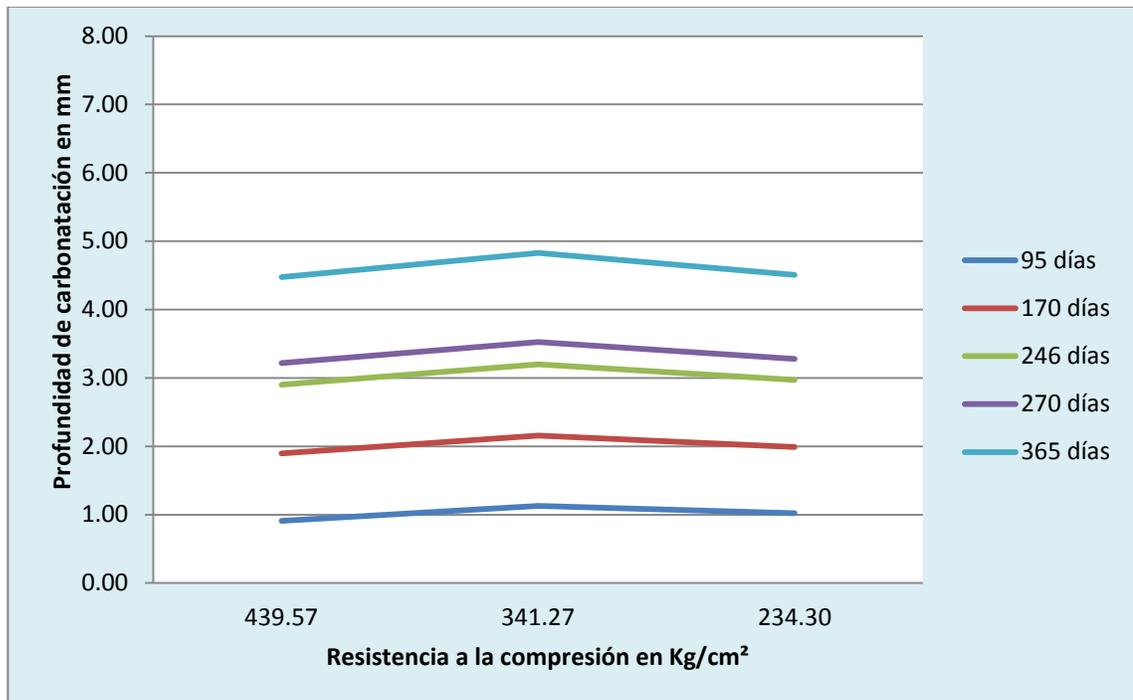


Figura 90.- Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes realizados con cemento CPO (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

En los especímenes fabricados con cemento CPO (véase la Figura 90) no se observa, la existencia de una mayor profundidad de carbonatación para especímenes con menor resistencia a la compresión, algo no esperable debido a que existen grandes variaciones en los valores de resistencia a la compresión.

La Figura 91, muestra la gráfica de Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes con cemento CPC.

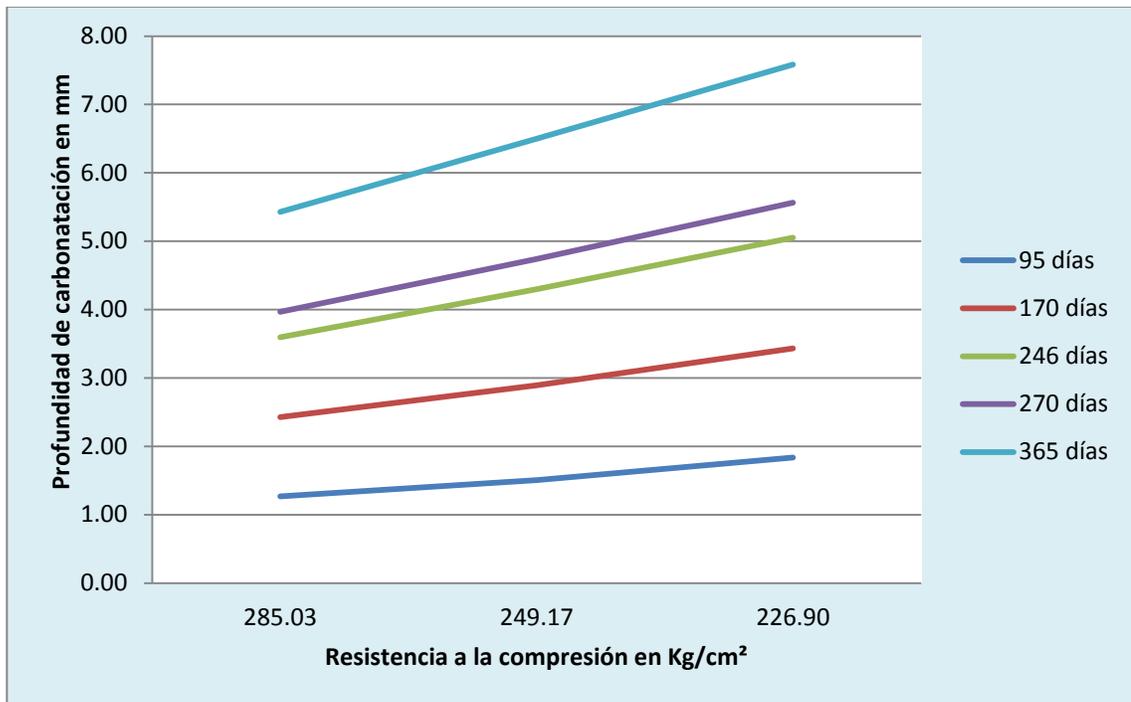


Figura 91.- Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para especímenes con cemento CPC (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

En los especímenes con cemento CPC, existe una tendencia hacia el incremento en la profundidad de carbonatación con la disminución en la resistencia a la compresión a diferencia del CPO, lo cual es acorde a la literatura científica, véase Figura 91.

4.3.2.- La profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión, en condiciones aceleradas.

En la Figura 92, se presenta la gráfica de profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión, para un ambiente acelerado, en este caso de 3%, en donde se incluyen datos de especímenes realizados con cemento CPO y CPC.

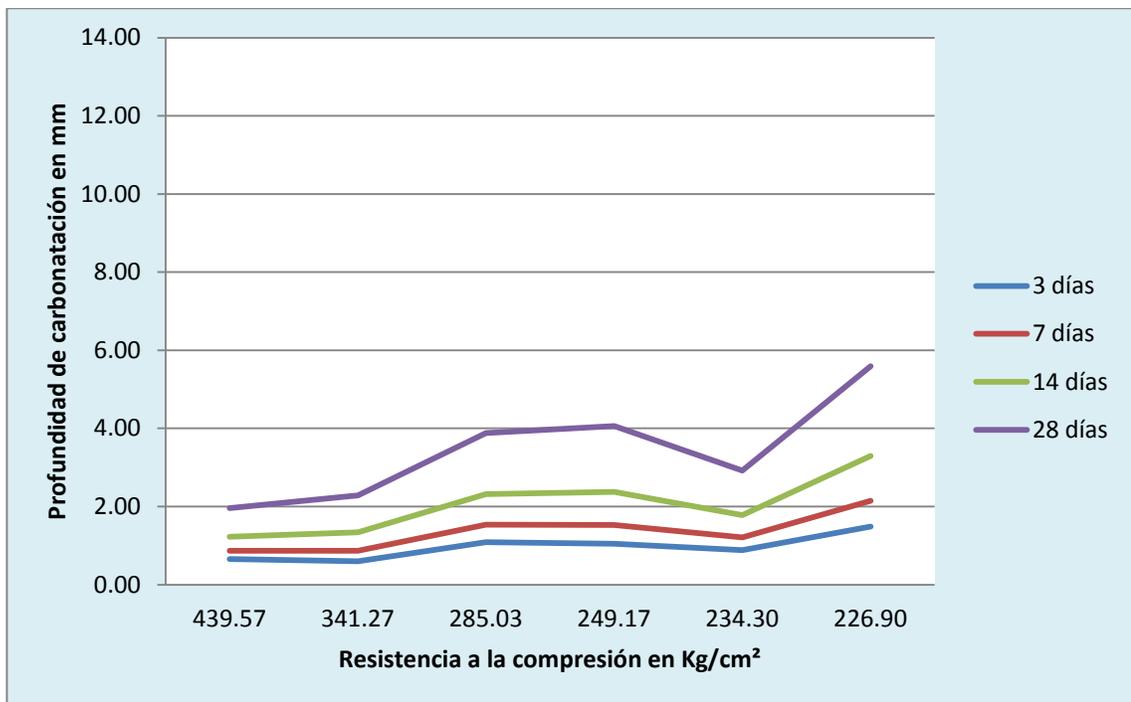


Figura 92.- Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO₂, para los cementos CPO y CPC (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

Se constata un comportamiento diferente al linealmente esperado. El uso de diferentes tipos de cemento, con diferente composición química pudo haber influenciado el comportamiento lineal esperado. Por lo tanto, el

comportamiento lineal es esperable para concretos realizados con el mismo tipo y contenido de cemento. Los especímenes expuestos a concentraciones de 4, 5 y 6% de CO₂, presentan un comportamiento similar al de 3% de CO₂, estas gráficas pueden verse en el Anexo A.

En la Figura 93, se muestra la gráfica de profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión para especímenes realizados con cemento portland ordinario (CPO) en un ambiente acelerado con una concentración de 3% de CO₂.

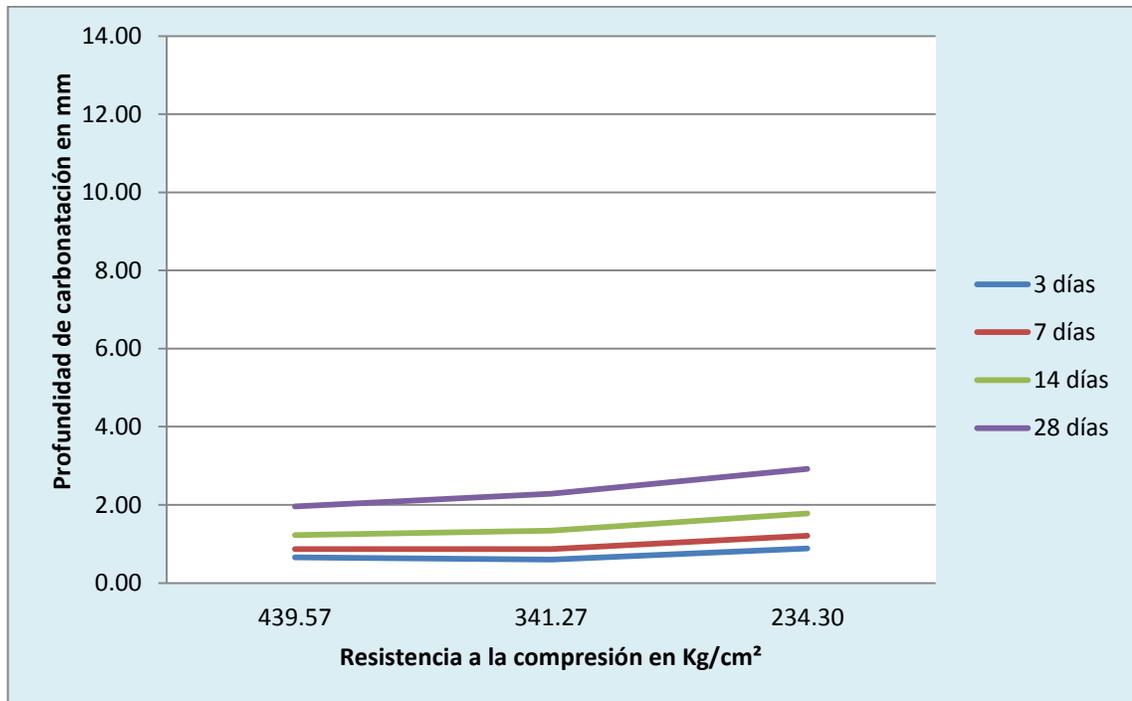


Figura 93.- Profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPO (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

En la Figura 94, se muestra la gráfica de profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión para especímenes realizados con cemento portland compuesto (CPC) en un ambiente acelerado con una concentración de 3% de CO₂.

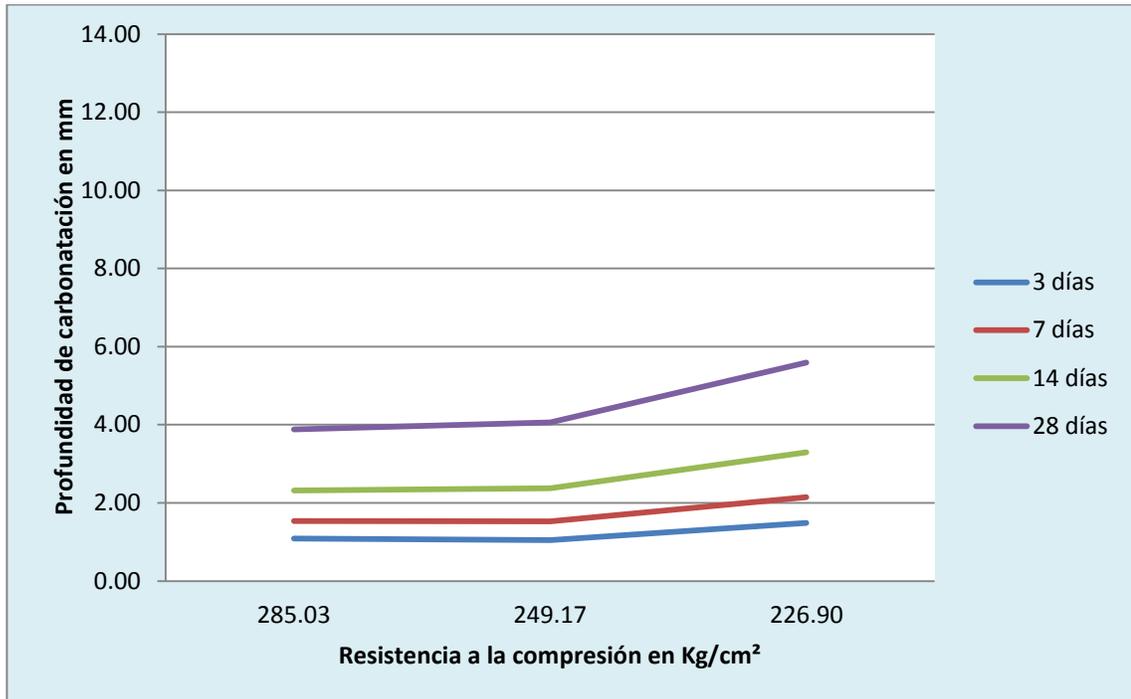


Figura 94.- Profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPC (Relación a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

Como puede observarse en las Figuras 93 y 94, se presenta una tendencia hacia un comportamiento lineal para los especímenes realizados con cemento Portland ordinario (CPO) y los realizados con cemento Portland compuesto (CPC). Dicho comportamiento no es verificable debido a la ausencia de especímenes necesarios para reafirmar esta tendencia. Las gráficas obtenidas con concentraciones de 3, 4, 5 y 6% presentan similar comportamiento, lo cual puede verse en la sección de Anexo B.

4.4.-Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión.

El coeficiente de carbonatación K , es obtenido a través la ecuación de la ley de la raíz cuadrada del tiempo (ecuación 6), este coeficiente ha sido tomado por varios investigadores [47] para ser comparado con la resistencia a la compresión en la cual el valor K varía inversamente a la resistencia a la compresión.

El valor K debe utilizarse de forma cautelosa debido a que no es comparable entre ambientes acelerados y naturales ya que este valor se ve afectado por la raíz del tiempo, lo cual incluso no lo hace comparable entre periodos de exposición distintos.

4.4.1.-Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión en condiciones naturales.

En la Figura 95, se muestra la relación entre el Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para los especímenes realizados con cemento CPO.

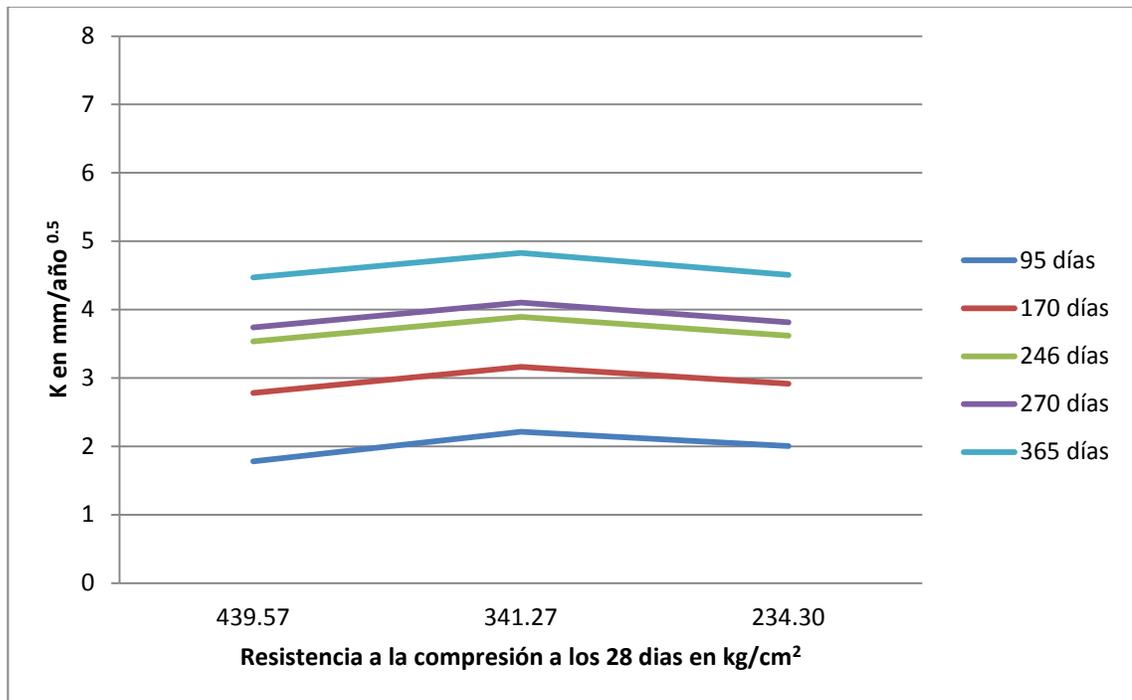


Figura 95.- Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para los especímenes realizados con cemento CPO (Relación a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

La Figura 96, presenta la gráfica entre el Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para los especímenes realizados con cemento CPC.

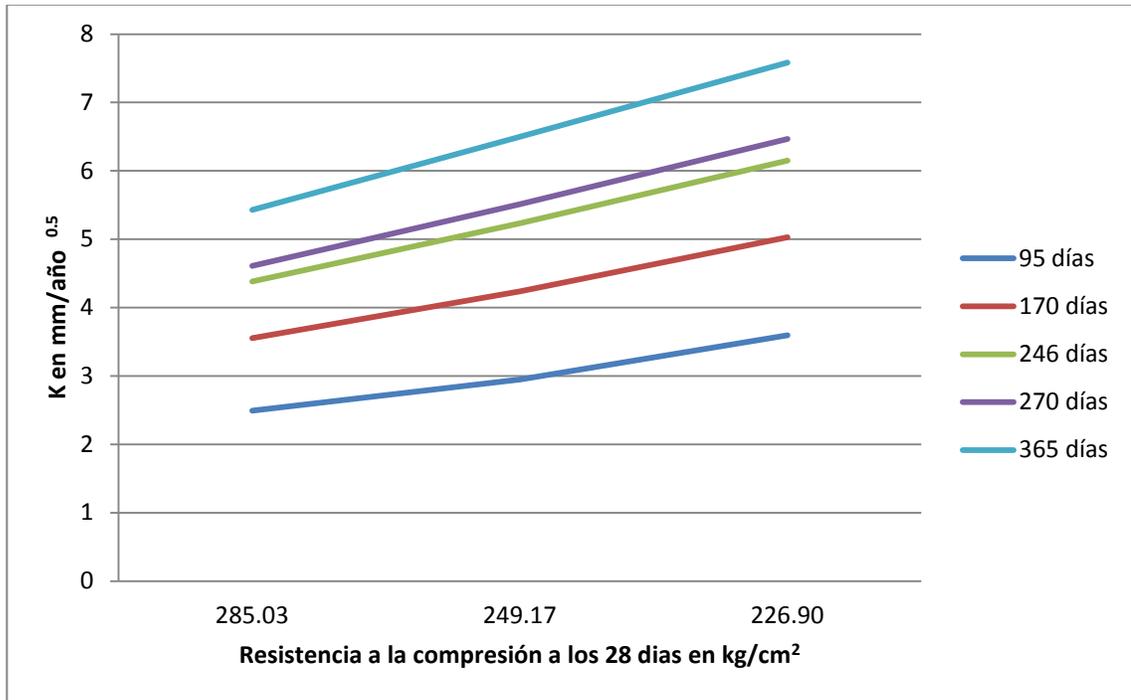


Figura 96.- Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión, para los especímenes realizados con cemento CPC (Relación a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

El comportamiento presentado en las Figuras 95 y 96 es similar al comportamiento encontrado para las graficas de Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión, es decir no existen tendencias claras en lo concerniente al coeficiente de carbonatación con respecto a la Resistencia a la compresión en los especímenes efectuados con cemento CPO. Caso contrario para los especímenes realizados con cemento CPC, en los cuales no se presentó dicho comportamiento, ya que si son observables tendencias. Es decir, se obtuvo un mayor coeficiente de carbonatación con la disminución de la resistencia a la compresión.

En la Tabla 28, se presentan los valores de coeficiente de carbonatación para el periodo de exposición de 270 días y la proyección a los 365 días, para todos los tipos de concreto.

Tabla 28. Coeficiente de carbonatación natural para los distintos tipos de concreto.

Coeficiente de carbonatación K , en $\text{mm/año}^{0.5}$						
Tiempos de exposición (días)	CPO	CPO	CPO	CPC	CPC	CPC
	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.8
Obtenido a 270	3.74	4.10	3.81	4.61	5.51	6.47
Proyectado a 365	4.47	4.83	4.51	5.43	6.50	7.59

En lo que respecta a los valores mostrados en la Tabla 25, Alonso y Andrade han sugerido que un concreto de calidad regular tiene un valor de K , entre 3 y 6 $\text{mm/año}^{0.5}$, un concreto de alta calidad presenta un valor menor de 3 $\text{mm/año}^{0.5}$, y un concreto de baja calidad presenta un valor mayor a 6 $\text{mm/año}^{0.5}$ [59]. De lo anterior, aplicándolo a nuestros valores, obtenemos que la calidad de nuestro concreto es regular para la mayoría de los tipos de concreto, solo en el caso de CPC 0.7 y CPC 0.8 para los periodos de exposición de 365 días resultaría un concreto de baja calidad. Aunque estos valores deben de considerarse con precaución debido a que el valor K , no solo describe la calidad del concreto, sino también las condiciones ambientales de exposición. Además, Andrade propone una edad de aproximadamente de 2 años para determinar un valor estable de K y por tanto representativo del concreto correspondiente [60].

4.4.2.-Coeficiente de carbonatación vs Resistencia a la compresión en condiciones aceleradas.

En la Figuras 97 y 98, se presentan la gráficas de coeficiente de carbonatación vs resistencia a la compresión para especímenes expuestos a una concentración de 3% de CO₂, con CPO y CPC respectivamente.

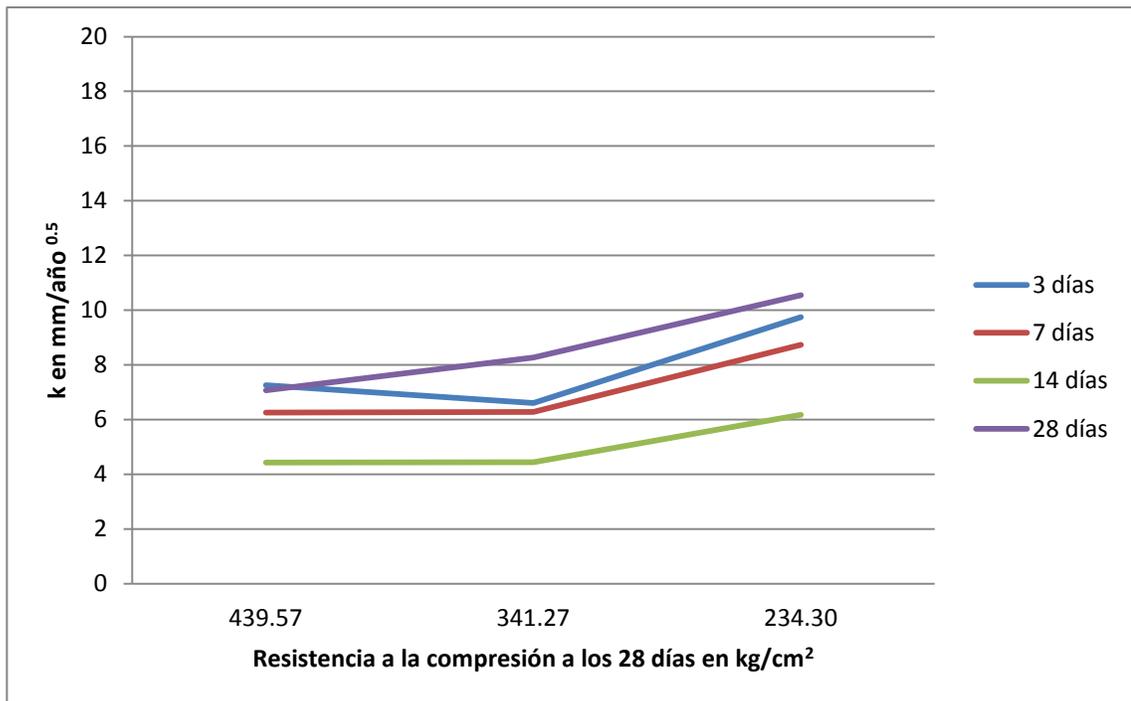


Figura 97.- Coeficiente de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPO (Relación a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

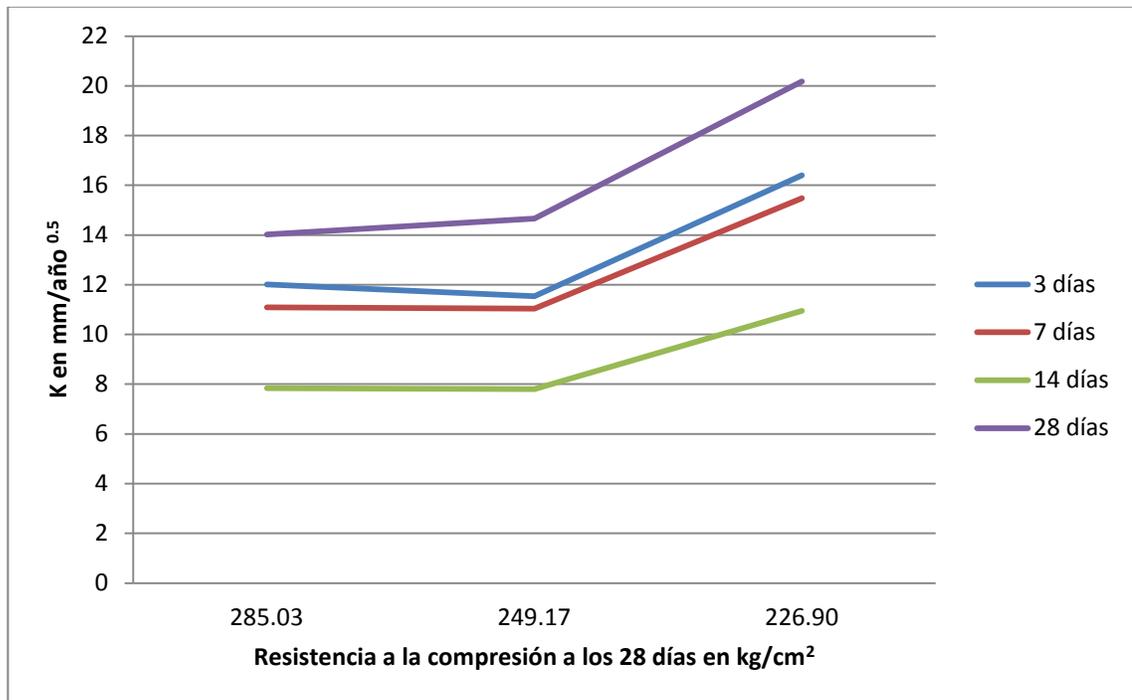


Figura 98.- Coeficiente de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de 3% de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPC.

De las Figuras anteriores se constata un comportamiento complejo debido principalmente al tiempo de exposición, ya que como se mencionó en el subtema anterior, el coeficiente K necesita de un tiempo para estabilizarse y así poder ser tomado como representativo de un concreto en específico. Debido a ello, si analizamos las figuras 97 y 98, no se observa el comportamiento descrito por la ecuación 6, la cual describe un comportamiento de una media parábola, en la cual el valor K tiende a ser estable en un tiempo de exposición mayor a 2 años, según la literatura [60]

Del análisis anterior se infiere que el coeficiente K debe ser analizado con cautela debido a dos motivos principales. Por un lado, dicho coeficiente no debe ser tomado para realizar comparaciones entre ambientes naturales y acelerados, ya que es altamente dependiente del tiempo de exposición. Por

otro lado, como ha sido demostrado aquí, la magnitud de la pendiente también depende del ambiente de exposición. Lo anterior causa que los coeficientes exhiban un amplio rango de valores, lo cual complica las comparaciones aun en tiempos de exposición similares. En la investigaciones presentadas en el Capítulo II de esta tesis, dos de ellas tienen similares tiempos de exposición en ambiente acelerados, como es el caso de la investigación de Eric I. Moreno et al. en donde se obtuvieron coeficientes de 51.7, 71.2 y 83.5 mm/año^{0.5} para relaciones a/c 0.55, 0.62 y 0.7, respectivamente [45]. Por su parte, J. Khunthongkeaw et al. Presentaron valores de K de 24.3 y 31.3 mm/año^{0.5} para especímenes con contenido de cemento de 325 y 290 kg/m³ y relaciones a/c de 0.5 y 0.6 respectivamente, ambos especímenes con sustitución de ceniza volante [47].

De igual manera que en las gráficas de profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión, se ha establecido por diversos investigadores que dicha relación presenta un comportamiento lineal. La presente investigación, no está enfocada en confirmar esta relación, debido a que se necesita ampliar el universo de tipos de concreto para confirmar dicho comportamiento. En cualquier caso, el trabajo realizado permite inferir un comportamiento lineal para los especímenes realizados con CPC, y una tendencia no lineal para aquellos fabricados con CPO.

4.5.- Relación entre la profundidad de carbonatación natural vs la profundidad de carbonatación acelerada.

Encontrar relaciones entre ambiente acelerado y el ambiente natural, permite conocer su comportamiento y mediante éste, es posible realizar una predicción confiable para al menos los tiempos de exposición que se incluyen en la investigación.

En la Figura 99, se presenta la profundidad de carbonatación obtenida en ambiente natural (95, 170, 246, 270 y 365 días) con su correspondiente en ambientes acelerados (28 días) para un mismo tipo de concreto (cemento CPO y distintas relaciones a/c de 0.6, 0.7 y 0.8) a una concentración de 3% de CO₂.

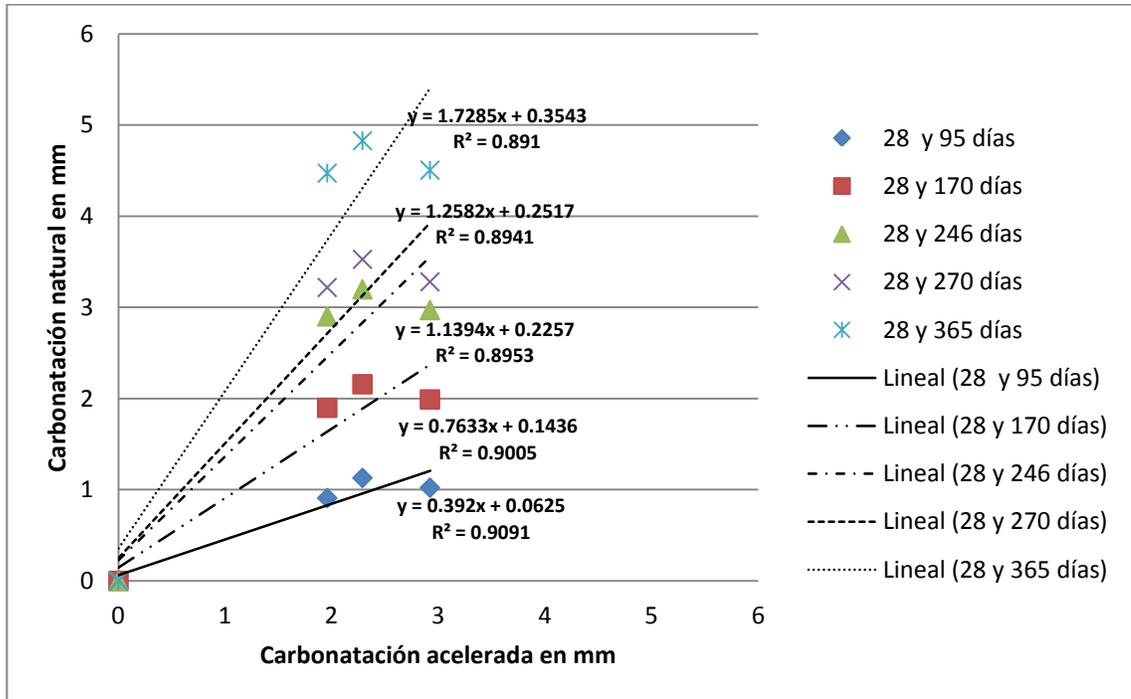


Figura 99.- Carbonatación natural vs carbonatación acelerada para una concentración de 3% de CO₂, para especímenes realizados con cemento CPO y relaciones a/c de 0.6, 0.7 y 0.8.

Se puede observar la existencia de una adecuada relación lineal mediante la línea de regresión, entre ambos ambientes para los periodos de exposición usados en esta investigación. El comportamiento lineal obtenido bajo nuestras condiciones experimentales demuestra la influencia del ambiente y del periodo de exposición, descartando que la pendiente obtenida sea afectada por el tipo de concreto. Esto debido a que cada punto representa

una relación a/c, (diferente resistencia a la compresión) y los puntos se ajustan dentro de una tendencia lineal.

El resto de las gráficas que representan las distintas condiciones de experimentación, presentan una buena relación lineal entre ambos ambientes lo cual puede observarse en el ANEXO A.

4.6.- Predicción de la profundidad de carbonatación.

Ha sido determinado por varios autores que este proceso varía de acuerdo a la ley de la raíz cuadrada del tiempo, como lo indica la ec. 6.

$$X = K \sqrt{t} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

X= La profundidad de carbonatación para un tiempo “t”.

K= Es un factor que agrupa parámetros concernientes al tipo de concreto y a las características climatológicas.

t = tiempo de exposición natural en años.

4.6.1.- Parámetro A.

Este parámetro se define como la pendiente resultante de la relación entre la profundidad de carbonatación natural vs profundidad de carbonatación acelerada. La cual es dependiente de los factores ambientales y del tiempo de exposición. Algunos investigadores han propuesto a esta pendiente de la siguiente forma [47]:

$$A = m\sqrt{t} \dots\dots\dots(11)$$

A = Es la pendiente de relación.

m = Factor ambiental.

t = Tiempo de exposición el cual varía a la raíz del tiempo.

En esta investigación se descartó que el valor A tuviera una variación de la forma descrita anteriormente, esto debido a que a través de la Figura 97, se obtuvo un comportamiento lineal en el periodo de exposición experimental, por lo cual se propone para nuestra Investigación, el siguiente comportamiento:

$$A = mt \dots \dots \dots (12)$$

A = Es la pendiente de relación.

m = Factor ambiental.

t = Tiempo de exposición el cual varía de forma lineal.

4.6.1.1.- Factor ambiental, m .

El Factor ambiental establece una relación entre las condiciones naturales y aceleradas para especímenes similares. Debido a que las condiciones aceleradas son controladas es posible mediante este factor determinar cualitativamente si el entorno se convierte en más agresivo, al menos para especímenes con similar tipo y contenido de cemento.

En la Tabla 29 se presentan los diferentes factores ambientales para los especímenes realizados con cemento CPO.

Tabla 29.- Valores obtenidos de Factor ambiental m, para los especímenes realizados con cemento CPO, en años.

Factor ambiental m CPO en años			
3% de CO ₂	4% de CO ₂	5% de CO ₂	6% de CO ₂
1.653	0.609	0.482	0.794

En la Tabla 30, se presentan los diferentes factores ambientales para los especímenes realizados con cemento CPC.

Tabla 30.- Valores obtenidos de Factor ambiental m, para los especímenes realizados con cemento CPC, en años.

Factor ambiental m CPC en años			
3% de CO ₂	4% de CO ₂	5% de CO ₂	6% de CO ₂
1.395	0.703	0.566	0.888

En la Tabla 29 y 30, se presentan en la mayoría de los casos valores mayores en cuanto al Factor ambiental para especímenes realizados con cemento CPO. El Factor ambiental establece una relación de un tipo de concreto expuesto a carbonatación en condiciones aceleradas y naturales. Por tal motivo dichos valores son comparables para similares tipos de concreto expuestos en las mismas condiciones aquí establecidas.

4.7.- Predicción realizada con la raíz del tiempo.

Del comportamiento observado en la Figura 97, se determinó que la pendiente de relación entre ambientes naturales y acelerados no depende del tipo de concreto, resulta consecuente descartar este parámetro del factor

X propuesto en la ley de la raíz cuadrada del tiempo. Por lo cual se propone la siguiente ecuación 13 [47].

$$X = X_a A \sqrt{t} \dots \dots \dots (13)$$

X = La profundidad de carbonatación para un tiempo t , en años.

X_a = la profundidad de carbonatación en ambiente acelerado para un periodo de 28 días de exposición, en mm.

A = Es la pendiente de relación, la cual es dependiente de las condiciones ambientales.

t = Tiempo en años.

4.8.- Predicción lineal.

Otra ecuación entonces es formulada con el objetivo de representar el comportamiento lineal presente en las primeras etapas del proceso de carbonatación.

$$X = X_a A t \dots \dots \dots (14)$$

X = La profundidad de carbonatación para un tiempo t , en años.

X_a = la profundidad de carbonatación en ambiente acelerado para un periodo de 28 días de exposición, en mm.

A = Es la pendiente de relación, la cual es dependiente de las condiciones ambientales.

t = Tiempo en años.

4.9.- Verificación de las ecuaciones de Predicción.

Las ecuaciones propuestas anteriormente para predecir la profundidad de carbonatación, fueron verificadas con los valores de profundidad de carbonatación obtenidos a partir de los ensayos en exposición natural con la finalidad de validarlas.

En la Figuras 100 y 101, se presenta la verificación de la profundidad de carbonatación obtenida a través de la experimentación vs. la profundidad de carbonatación de predicción obtenida para la ecuación 13, la cual varía con la raíz del tiempo, para especímenes realizados con CPO y CPC.

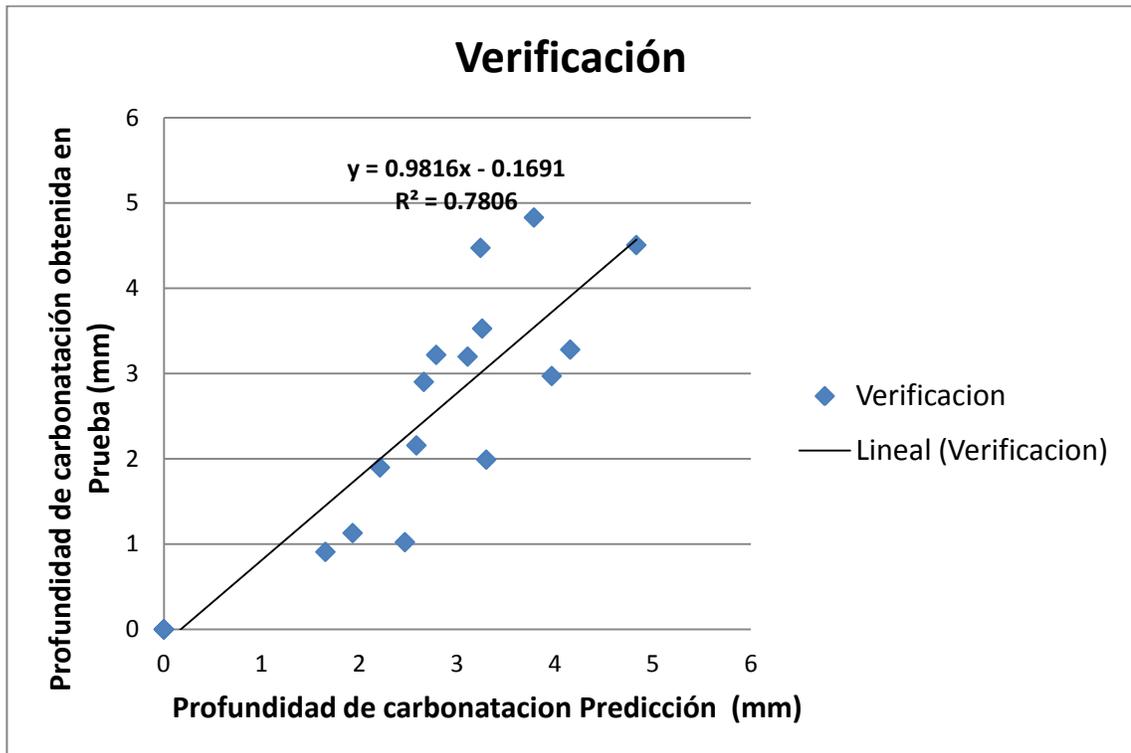


Figura 100.- Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 3% de CO₂ (CPO Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

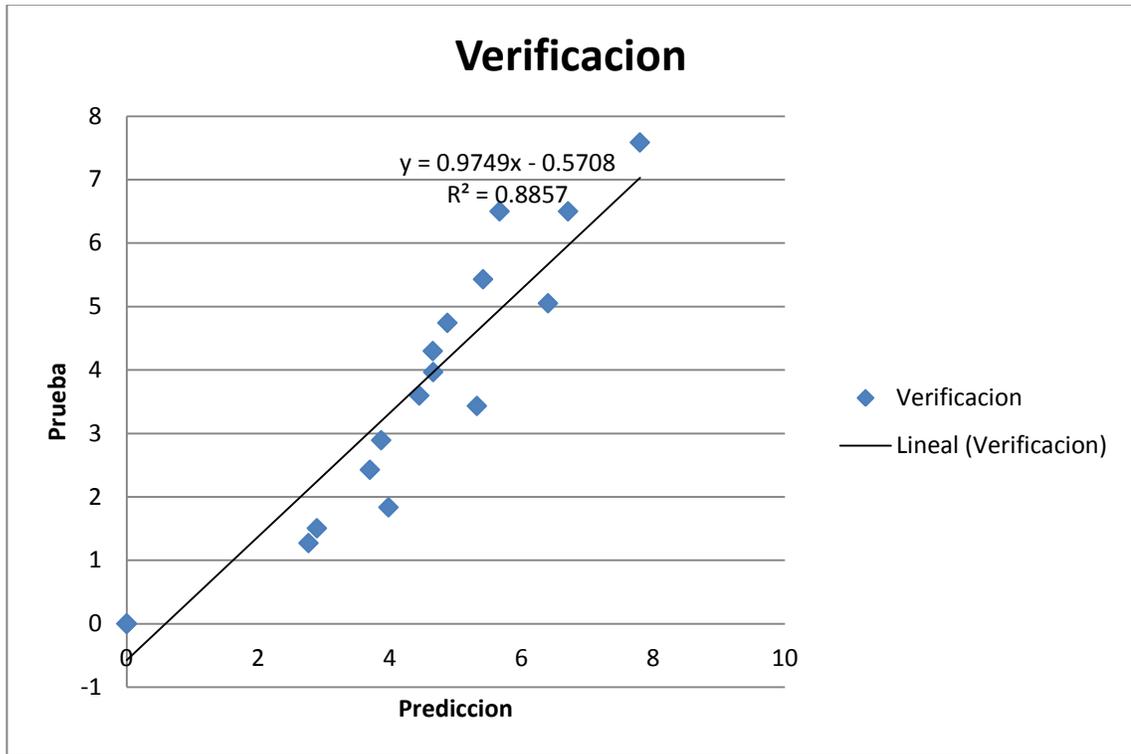


Figura 101.- Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 3% de CO₂ (CPC Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

En la Figuras 102 y 103, se presenta la verificación de la profundidad de carbonatación obtenida en prueba vs la profundidad de carbonatación de predicción esta última obtenida a través de la ecuación 14, la cual considera el tiempo lineal, para especímenes realizados con CPO y CPC.

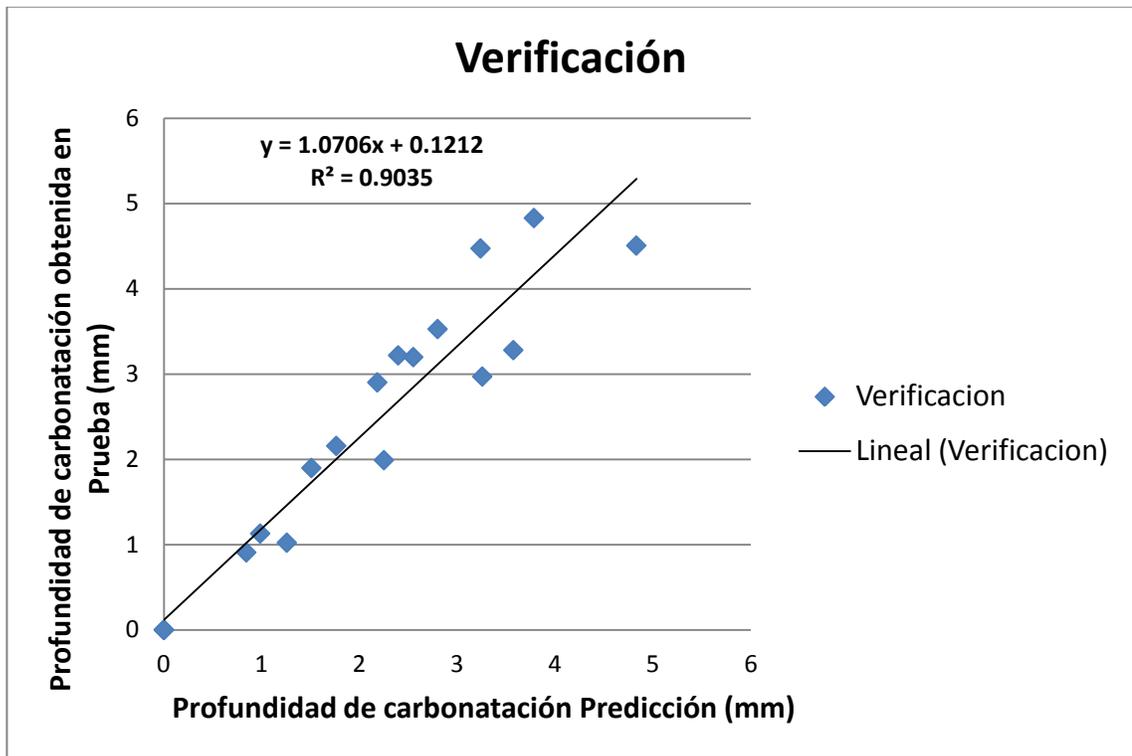


Figura 102.- Profundidad de carbonatación obtenida en prueba vs la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo lineal a una concentración de 3% de CO₂ (CPO Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

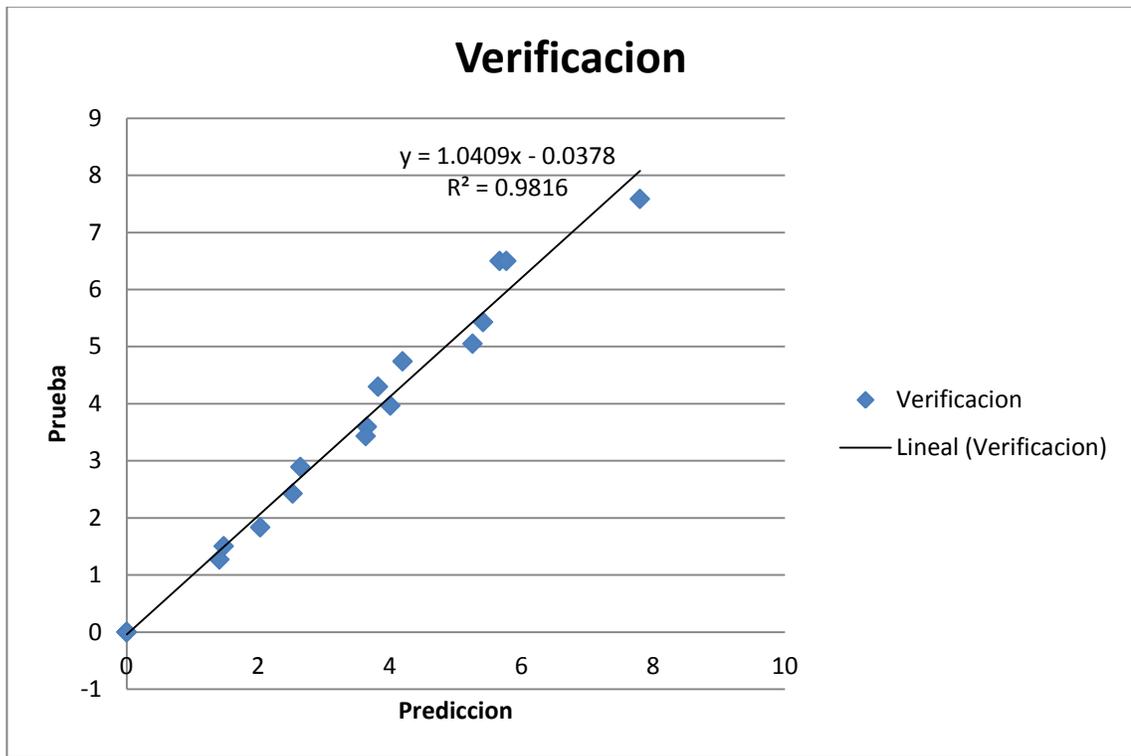


Figura 103.- Profundidad de carbonatación obtenida en prueba vs la profundidad de carbonatación de predicción lineal a una concentración de 3% de CO₂ (CPC Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

La verificación realizada con la ecuación 13, presenta una mayor dispersión en comparación con la predicción realizada a través de la ec. 14. Además, con la utilización de la ecuación 14 se obtiene un mejor coeficiente de regresión.

4.10.- Predicción lineal vs Predicción raíz.

En cuanto a la predicción lineal, no se obtuvo un ajuste al comportamiento descrito en la literatura por diversos investigadores [61-64]. Por lo tanto, es importante comparar las divergencias entre una predicción basada en un comportamiento lineal del tiempo con otra basada en la raíz de este.

En la Figura 100, se presenta el comportamiento obtenido de las predicciones realizadas para tiempos mayores de exposición a los empleados en esta investigación aplicando las ecuaciones 13 y 14.

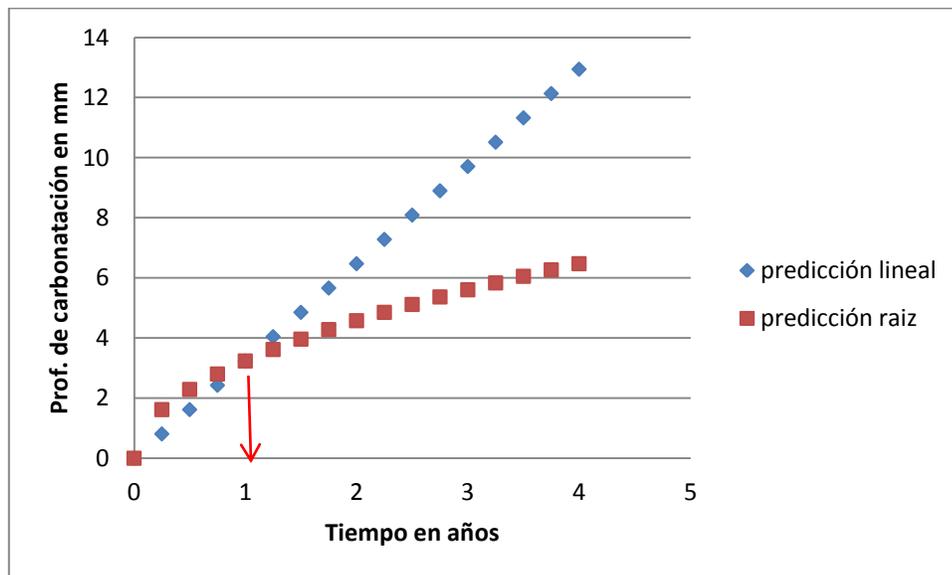


Figura 104.- Profundidad de carbonatación vs tiempo, para la predicción lineal y la predicción basada en la raíz del tiempo para especímenes realizados con CPO y una concentración de 3% de CO₂.

Como se muestra en la Figura anterior, la predicción basada en la raíz del tiempo y la predicción lineal, tienen un periodo en el que estos valores presentan un comportamiento similar. Dicho comportamiento permanece válido para tiempos de exposición menores de 1 año. Posteriormente, los valores entre las dos predicciones no pueden ser comparables.

La importancia de esto radica en que a través de esta investigación se encontró una mejor verificación para la predicción lineal que para la predicción basada en la raíz del tiempo. No obstante, ésta última predicción es sustentada por múltiples investigadores. Un cuestionamiento relevante que se extrae de este análisis es aquel que propone la búsqueda del periodo donde resultan similares, lo cual nos permitiría conocer el dominio de aplicación de la predicción lineal expresada en la ecuación 14.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Conclusiones.

A continuación y como parte del resultado de la presente investigación, se presentan las conclusiones obtenidas.

- Las concentraciones de CO₂ ambiental, en la presente investigación resultaron menores a los valores de referencia encontrados en la literatura. En todo caso por debajo del promedio existente estimado en la atmósfera, el cual es de 380 ppm. Entre las diferentes zonas de exposición analizadas una variación del 31%, entre el mínimo y el máximo fue obtenido, lo cual confirma la existencia de microclimas dentro de la misma zona metropolitana. No obstante no es posible efectuar una generalización de los valores mostrados en la presente investigación ya que dependerán del microclima de exposición en específico.
- Para nuestros periodos de exposición, un comportamiento lineal en carbonatación acelerada y natural fue encontrado con el seguimiento de la profundidad de carbonatación con respecto al tiempo.
- La profundidad y el coeficiente de carbonatación con respecto a la resistencia a la compresión, mostraron una tendencia lineal para especímenes realizados con el mismo tipo de cemento e igual cantidad de cemento por m³ de concreto. En efecto los especímenes elaborados con cemento Portland Compuesto, (CPC) la profundidad de carbonatación fue inversamente proporcional al incremento de la resistencia a la compresión.
- Existen buenas relaciones entre el proceso de carbonatación en un medio natural con respecto a un medio acelerado, para especímenes realizados con similar contenido y tipo de cemento. A través de esta investigación se demuestra que el parámetro *A* depende de las condiciones y tiempo de exposición de los especímenes.

- La predicción lineal presenta menor dispersión en sus puntos y su vinculación es mayor con los datos obtenidos de forma experimental en comparación con la predicción basada en la raíz del tiempo. Esto aplicándose al menos a los periodos de exposición concernientes a esta investigación.
- Para períodos de exposición menores a 1 año, se encontraron valores semejantes entre la predicción basada en la raíz del tiempo (forma parabólica) y la predicción lineal.. Por tal motivo es aceptable utilizar la predicción lineal en tiempos menores a 1 año.
- La predicción basada en la raíz del tiempo, no resultó confiable para nuestros periodos de exposición, debido a que presentó una mayor dispersión en sus valores. La aplicabilidad de esta predicción no es demostrable a través de esta investigación, por lo tanto se sugiere utilizarla para tiempos de exposición mayores a 1 año.
- Con los datos encontrados por diversos investigadores en cuanto a cambio climático y a la información presentada en esta investigación, se concluye que se deben realizar predicciones con modelos que incluyan variables como la concentración de CO₂, la Humedad Relativa y Temperatura.

Recomendaciones a Futuro.

A través de la experiencia obtenida al realizar este trabajo, me permito aconsejar sobre la realización de trabajos a futuro, entre los cuales destaco:

- Los trabajos deben ser enfocados a realizarse con diferentes características (relación a/c, uso de puzolanas, etc.) del concreto esto debido a que la cantidad de especímenes que en esta investigación se abordan, resultan insuficientes para representar la gama de concretos de la región. Además dicha experimentación deberá ser acompañada de las características ambientales de la zona de exposición.
- Realizar investigaciones que sean cotejadas con valores obtenidos de estructuras existentes en la localidad.
- En otro aspecto, algunos trabajos deben de ser designados para comprobar las relaciones realizadas en esta investigación con especímenes de concreto similares.
- Es necesario que se verifique el comportamiento de la profundidad de carbonatación natural para tiempos de mayor exposición (mayores a 1 año), con el objetivo de conocer la confiabilidad de la predicción basada en la raíz del tiempo.
- Determinar si existen cambios importantes en las características del ambiente como resultado de la acción del cambio climático.

Referencias Bibliográficas.

- 1) Serrano Ixtepan D., Moreno E. I., Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 10-2, 2006, pp. 37-45.
- 2) Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R. , Corrosion of steel in concrete - Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- 3) Ávila Javier y Genescá Joan, “Más allá de la herrumbre”, 3^a edición, México D.F., fondo de cultura económica, 2002, pp. 7-8.
- 4) Trocónis de Rincón Oladis y miembros de la Red DURAR. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.-CYTED.- Tercera Edición.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000. pp. 13-14, pp. 21, pp. 38-40.
- 5) De Rincón, O. y miembros de la Red DURAR, “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado”, 2^a edición, CYTED, Maracaibo, Venezuela, 1998.
- 6) Gundaker E. F., “Corrosion monitoring and protection for infrastructure projects” 2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE, 1996.
- 7) López Celis Raquel, Pérez Quiroz José Trinidad, Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Madrid Miguel, Martínez Molina Wilfredo, Ariza Aguilar Luis Eduardo, Zamudio Cíntora Emilio, Genescá Llongueras Joan y Valdez Salas Benjamín, “Durabilidad de la Infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos”, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica No. 292, 2006, pp. 3-14.
- 8) <http://portal.sct.gob.mx/SctPortal/appmanager/Portal/Sct>, 2006.
- 9) <http://www.imt.mx/siget/galinfopuen7.htm>, 2006.

- 10) <http://www.imt.mx/siget/galinfopuen9.htm>, 2006.
- 11) Parrot, L.J., "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete", Cement and Concrete Association, Building Research Establishment, 1987.
- 12) Francois R. y Arliguie G. "Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment", ACI SP-145.- American Concrete Institute, EUA, 1994.
- 13) Neville A.M., Brooks J.J. Concrete technology. Longman Group UK Ltd, 1993.
- 14) Neville Adam M., Tecnología del concreto, Cemento Portland, 4^a edición, México D.F., IMCYC, 2007.
- 15) Neville A. M., Properties of concrete. Fourth Edition. Longman Group UK Ltd, 1995.
- 16) Moreno E. I., "Carbonation of blended cement concretes," Disertación Doctoral, University of South Florida, 1999.
- 17) Moreno, E. I., "La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto," Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 2000, pp. 43-48.
- 18) Parrott J.L. Measurement and modelling of porosity in drying cement paste. Materials Research Symposium Proceedings 1987, pp. 85 -104.
- 19) Konin A., François R., Arliguie G., Material and Structures, Analysis of progressive damage to reinforced ordinary and high performance concrete in relation to loading, 1998, pp. 27–35.
- 20) Clifton, J.R., Predicting service life of concrete. ACI Material Journal, 1993, pp. 611–617.
- 21) Stora E., Albert B., Barbarulo R., A benchmark of carbonation models on concretes with and without mineral additions, 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, Netherlands, 2010, pp. 73-81.

- 22) Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(4):363-373.
- 23) CEB, New approach to durability design—an example for carbonation induced corrosion. In: Schiessl, P. (Ed.), *Bulletin*, vol. 238, Comité Euro-International du Béton, Lausanne, 1997.
- 24) Parrott L. J. Design for avoiding damage due to carbonation included corrosion, SP-145-15 International Congress on Durability of Concrete Malhotra Ed., Nice, CANMET, 1994, pp. 283–298.
- 25) ACI 365, Service-life prediction, State-of-the-art report. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2000.
- 26) Mendoza Rangel J. M., Castro-Borges P., Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. Situación actual. *Materiales de Construcción*, Nota técnica, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, Vol. 59, 2009, pp. 117-124.
- 27) NMX-C-403-ONNCCE-1999: “Construction Industry – Hydraulic Concrete for Structural Use” (in Spanish), Mexico, 1999.
- 28) Spanish Instruction of Structural Concrete (EHE), Chapter VII, B.O.E. January 13th, 1999.
- 29) American Concrete Institute (ACI) 365.1R-00: “Service-Life Prediction, State-of-the-Art Report”, reported by ACI Committee 365, 2000.
- 30) Mangat, P. S. and Molloy, B. T. *Materials and Structures*, “Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete”, 27, 1994, pp. 338-346.
- 31) Red DURAR, “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado,” CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales” (Maracaibo, Venezuela: CYTED, 1997).

- 32) Yoon In-Seok, Oguzhan Copuroglu, Park Ki-Bong, Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, Atmospheric environment, 2007, pp.7274-7285.
- 33) CICC, Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Estrategia Nacional del Cambio Climático, SEMARNAT, México, 2007.
- 34) Microsoft Encarta 2006. 1993-2005 Microsoft Corporation.
- 35) http://www.ni.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima, Agosto 2011.
- 36) IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- 37) Instituto Nacional de Ecología, Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002, Mexico D.F., 2006.
- 38) www.un.org, 20 de enero de 2011.
- 39) EFE, Mario Molina advierte sobre los riesgos de calentamiento global. periódico el universal, lunes 23 de abril de 2007.
- 40) Sanjuán M. A., Andrade C. y Cheyrezy M., Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. Advances in Cement Research, Instituto español del cemento y sus aplicaciones; Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, 2003, pp. 171-180.
- 41) CEN TC51/W612/T65 Report CR 12793. Measurement of the carbonation depth of hardened concrete, 1997.
- 42) RILEM REPORT 12, 1995. Performance criteria for concrete durability. In: Kropp, J., Hilsdorf, H.K. (Eds.), E & FN SPON, pp. 98–102.
- 43) Montemor M.F., Cunha M.P., Ferreira M.G., Simoes A.M., “Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides, Cement and Concrete Composites, 2002, pp. 45-53.

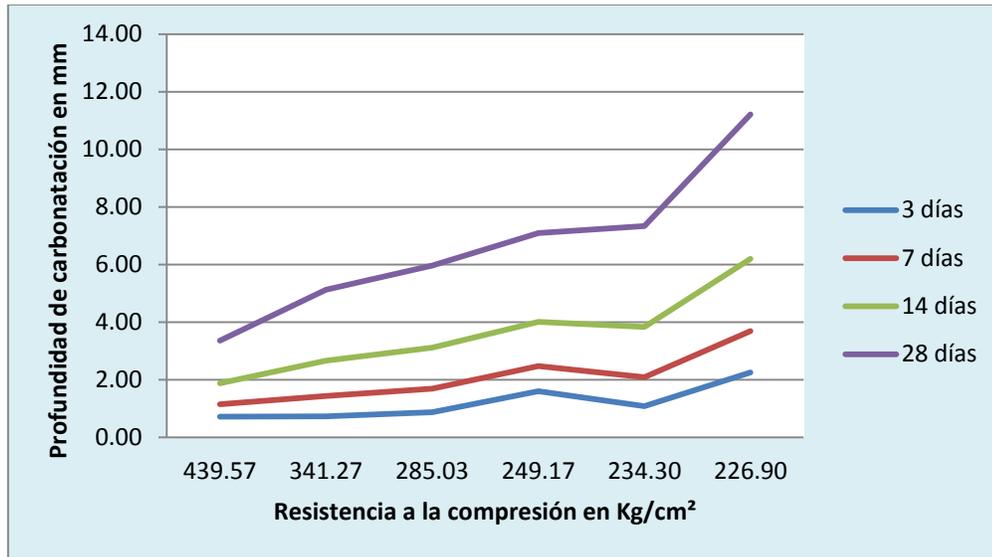
- 44) Bier Th. A., "Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste", Materials research Society Symposium, 85, 1987, pp.385 -392.
- 45) Moreno E. I., Domínguez Lara G. G., Cob Sarabia E. J., Duarte Gómez F. Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 8 (2), 2004, 117-130.
- 46) Haque M. N., y Al-Khaiat H. Carbonation of Concrete Structures in Hot Dry Coastal Regions, Cement and Concrete Composites, 1996: pp. 123-129.
- 47) Khunthongkeaw J., Tangtermsirikul S., Leelawat T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, Construction and Building Materials, 2006, pp. 744-753.
- 48) Tuutti K.- Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Sweden, 1982.
- 49) Montani Rick, La carbonatación, enemigo olvidado del concreto.- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Revista Construcción y Tecnología, México, Diciembre 2000.
- 50) Groves G.W., Brough A., Richardson I.G. et al., Progressive changes in the structure of hardened C₃S cement pastes due to carbonation. Journal of the American Ceramic Society, 1991, pp. 2891–2896.
- 51) Castellote Marta, Fernandez Lorenzo, Andrade Carmen, Alonso Cruz, Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations, Material and Structures, RILEM 2007.
- 52) Vera R., Villarroel M., Delgado D., Carvajal A.M., De Barbieri F. y Troconis O. : DURACON: Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto. Parte 2. Resultados de Chile después

- de 5 años de Exposición, Revista de la Construcción, Vol. 8, 2009, pp. 13 – 23.
- 53) Moreno E. I., Ayuso-Blanco F., Torres-Acosta A. A. y Troconis-Rincón O. Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (proyecto DURACON). Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-3, 2009, pp. 53-60.
- 54) <http://www.cruzazul.com.mx/2008/producto/tiposCemento.aspx#2>, Agosto 2011.
- 55) <http://www.cmoctezuma.com.mx/dosifica.htm>, Agosto 2011.
- 56) Guía comercial de Apasco, 2006.
- 57) Moreno Eric I. (2006). **Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 10-3, pp.5-12, ISSN: 1665-529X
- 58) <http://www.me.go.kr>, 1996.
- 59) Alonso C., Andrade C., “Life time of rebars in carbonated concrete” 10o Congreso de corrosión Europeo, Trabajo No. 165, Barcelona, España, 1993.
- 60) Andrade C., Alonso C., Pettersson K., Sommerville G., y Tuutti K., “The practical assessment of damage due to corrosion”, en Proceedings, Concrete Across Borders, Vol. I, Odense, Dinamarca, 1994 :pp. 337-350
- 61) Steffens Alexander, Dinkler Dieter, Ahrens Hermann, “Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures”, Institute for Structural Analysis, Cement and Concrete Research, 2002, pp. 935 – 941.
- 62) Sulapha P., Wong S.F., Wee T.H., Swaddiwudhipong S., Carbonation of concrete containing mineral admixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003;15(2):134–43.

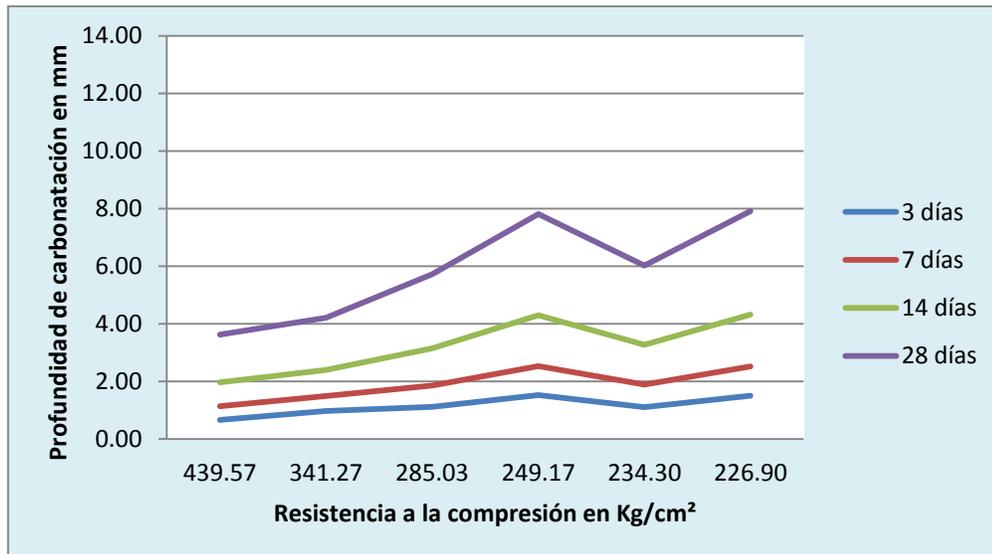
- 63) Wee T.H., Suryavanshi A.K., Logendran D., Pore structure controlling the carbonation of a hardened cement matrix blended with mineral admixture. *Advances Cement Research*, 1999; 11(2):81–95.
- 64) Castro P., Sanjuan M.A., Ganesca J., Carbonation of concrete in Mexico Gulf. *Building and Environment*, 2000, pp.145-149.

Profundidad de carbonatación vs Resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de CO₂, para los cementos CPO y CPC (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

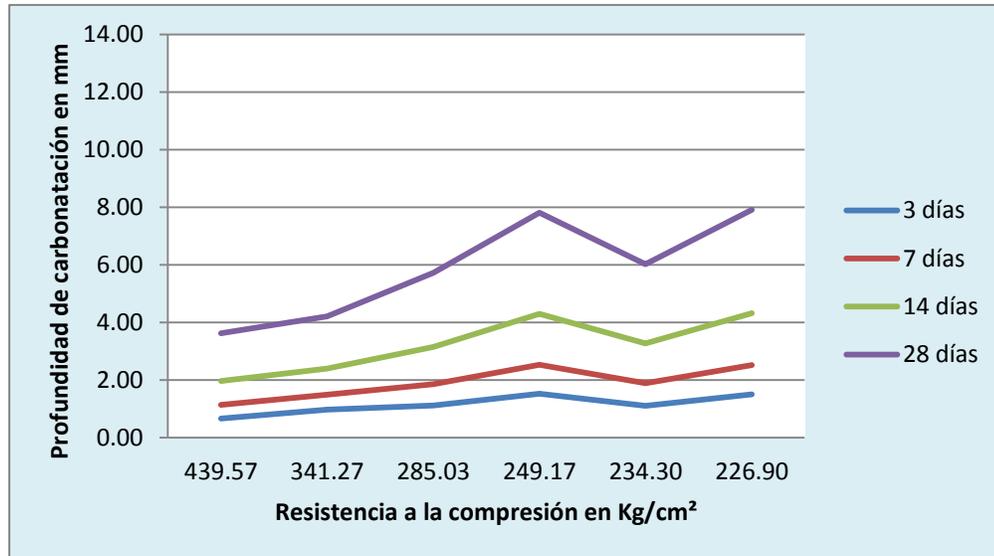
Concentración a 4 % de CO₂.



Concentración a 5 % de CO₂.

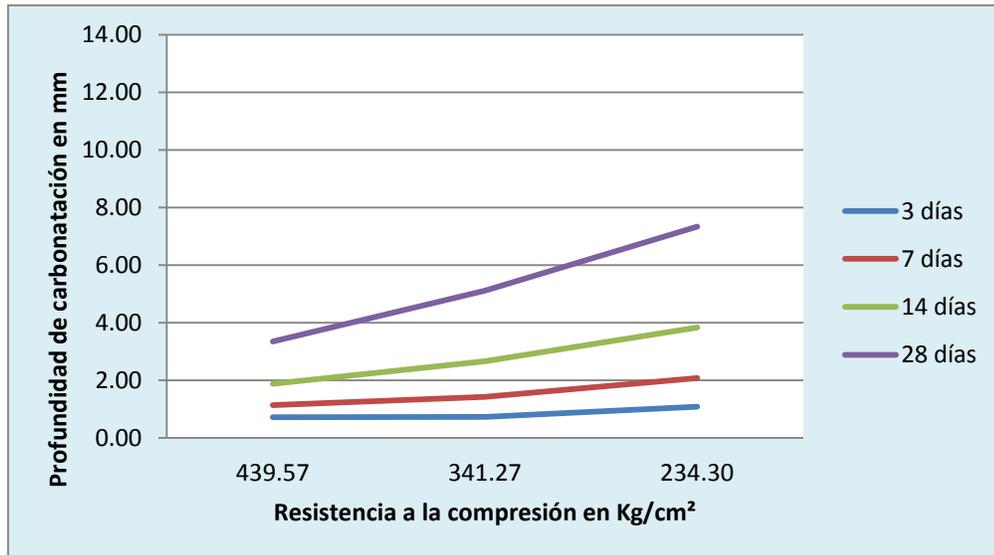


Concentración a 6 % de CO₂.

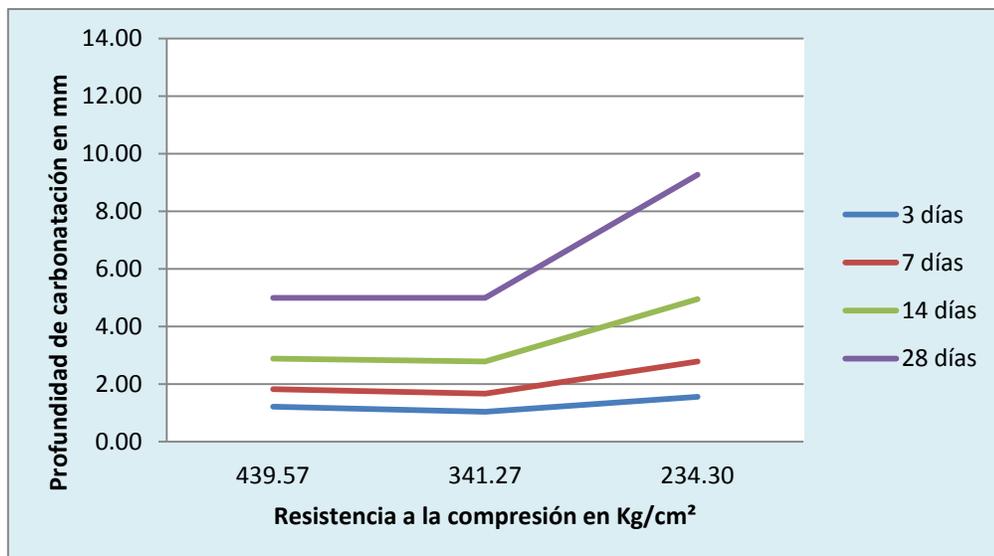


Profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPO (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

Concentración a 4 % de CO₂.

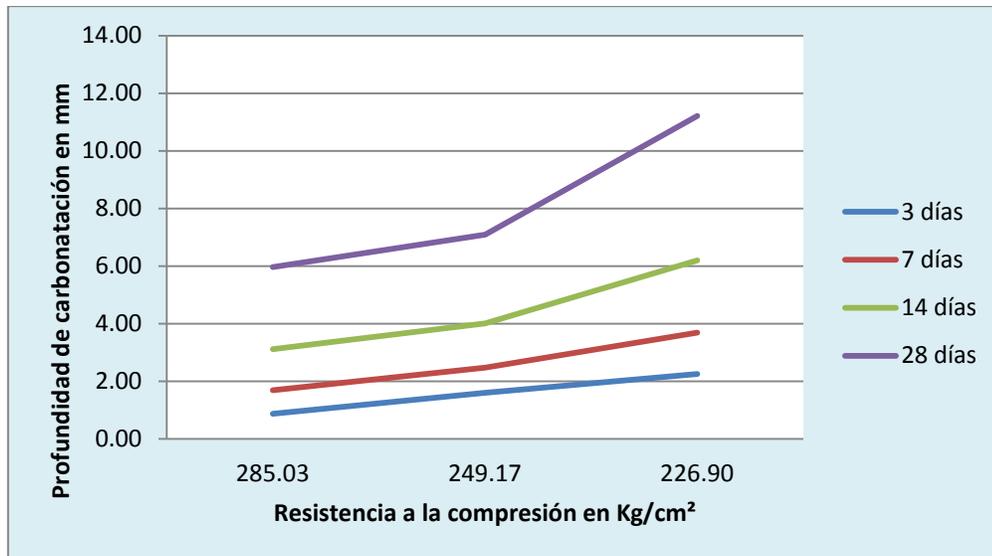


Concentración a 5% de CO₂.

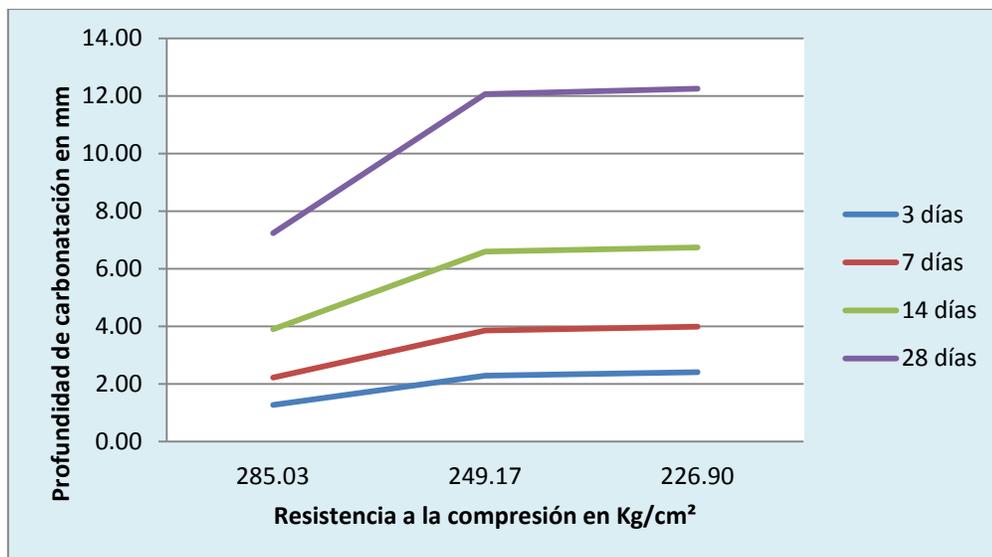


Profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPC (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

Concentración a 4 % de CO₂.

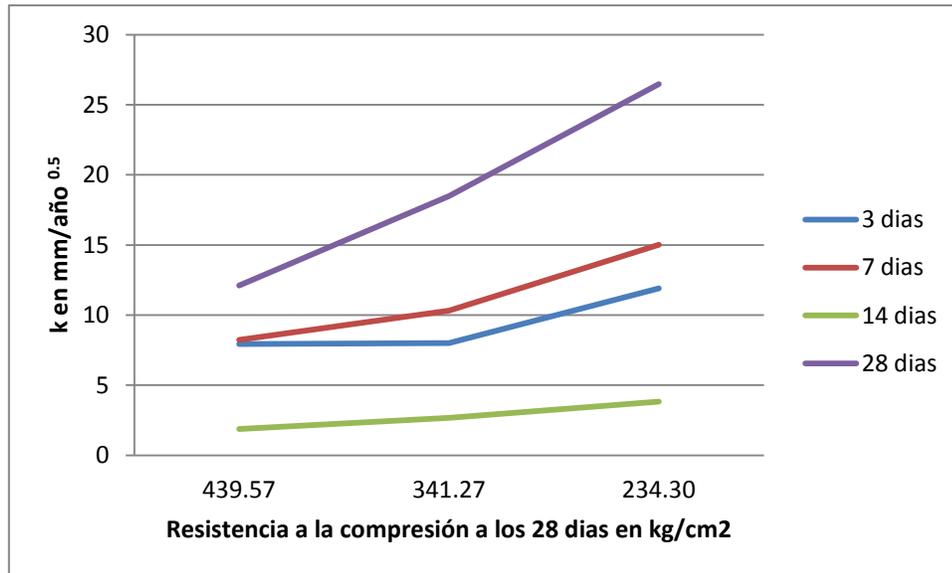


Concentración a 5 % de CO₂.

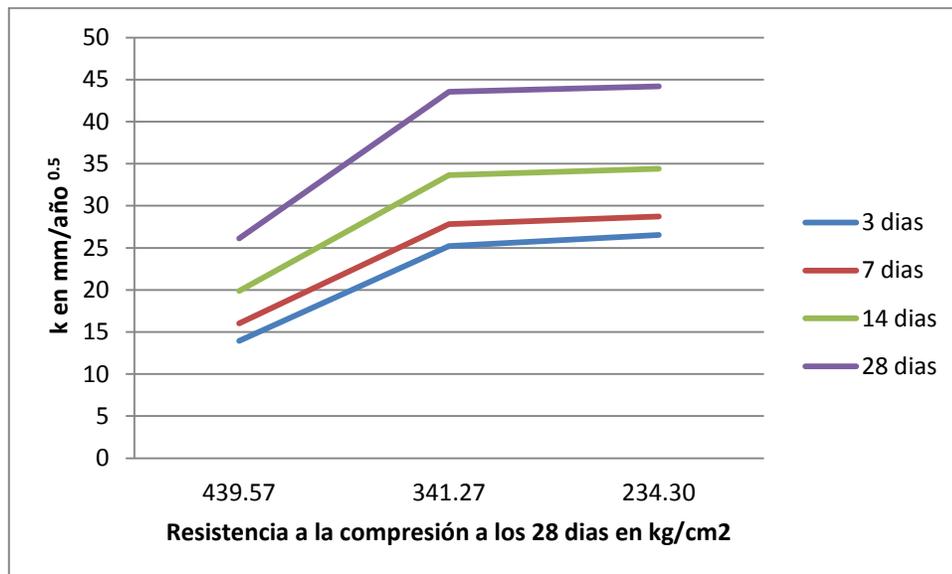


Coeficiente de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPO (Relación a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

Concentración a 4 % de CO₂.

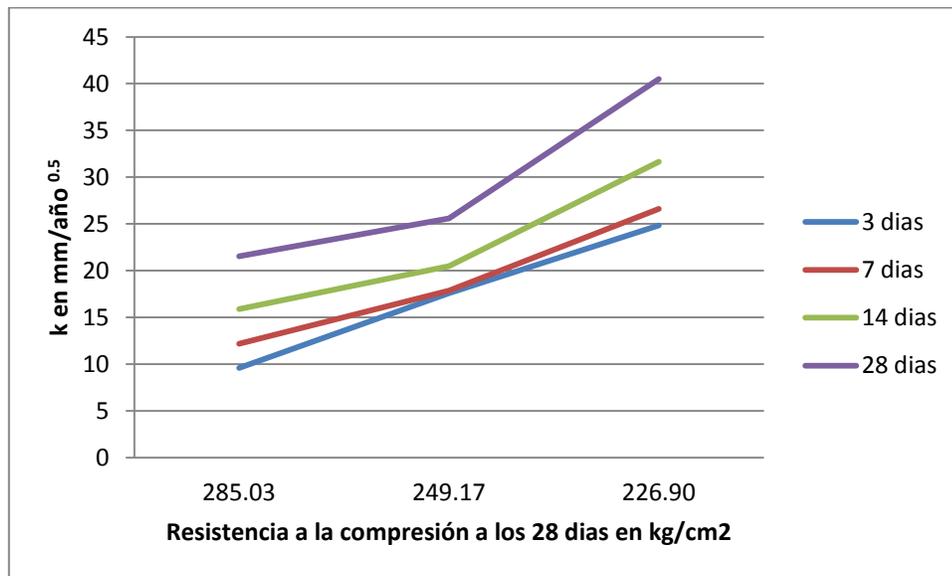


Concentración a 5 % de CO₂.

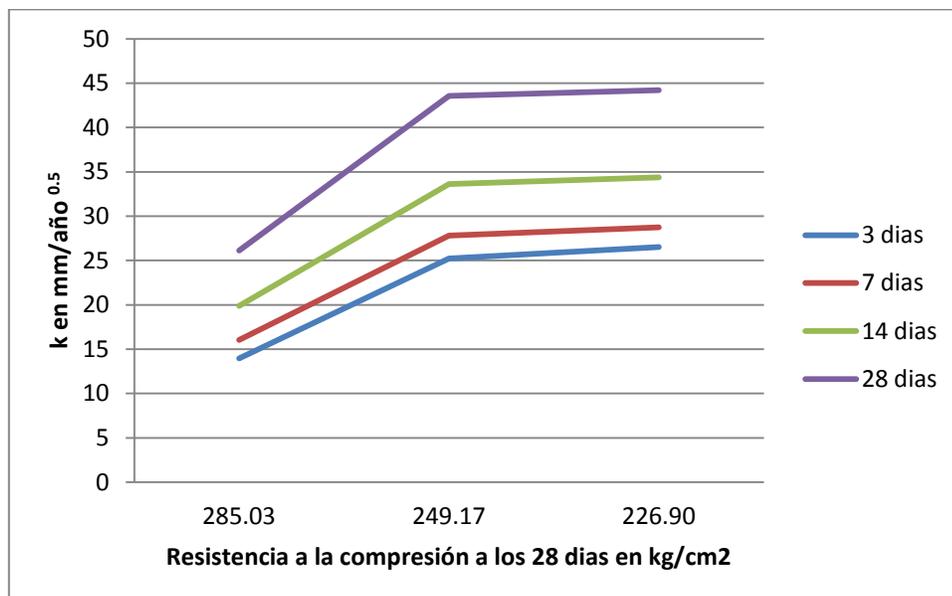


Coeficiente de carbonatación vs la resistencia a la compresión en un ambiente acelerado de CO₂, para especímenes realizados con cemento tipo CPC (Relación a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

Concentración a 4 % de CO₂.

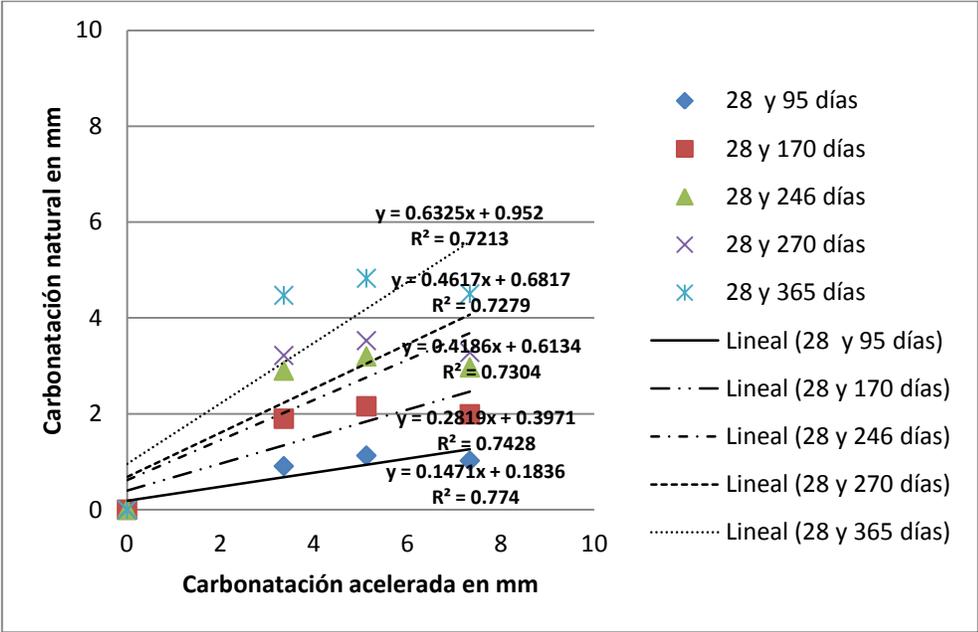


Concentración a 5 % de CO₂.

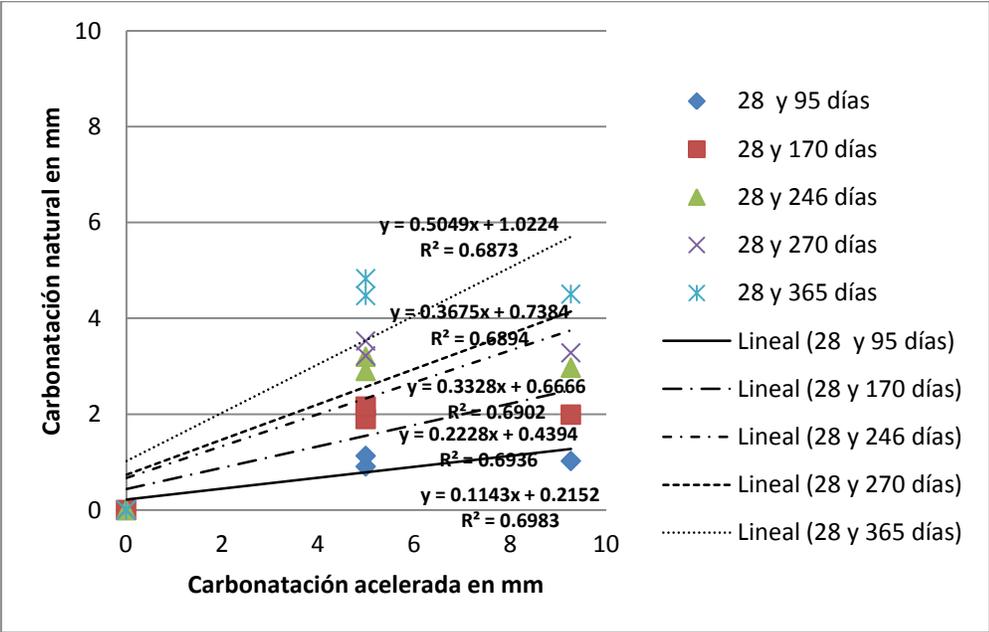


Carbonatación natural vs carbonatación acelerada para una concentración de CO₂, para especímenes realizados con cemento CPO y relaciones a/c de 0.6, 0.7 y 0.8.

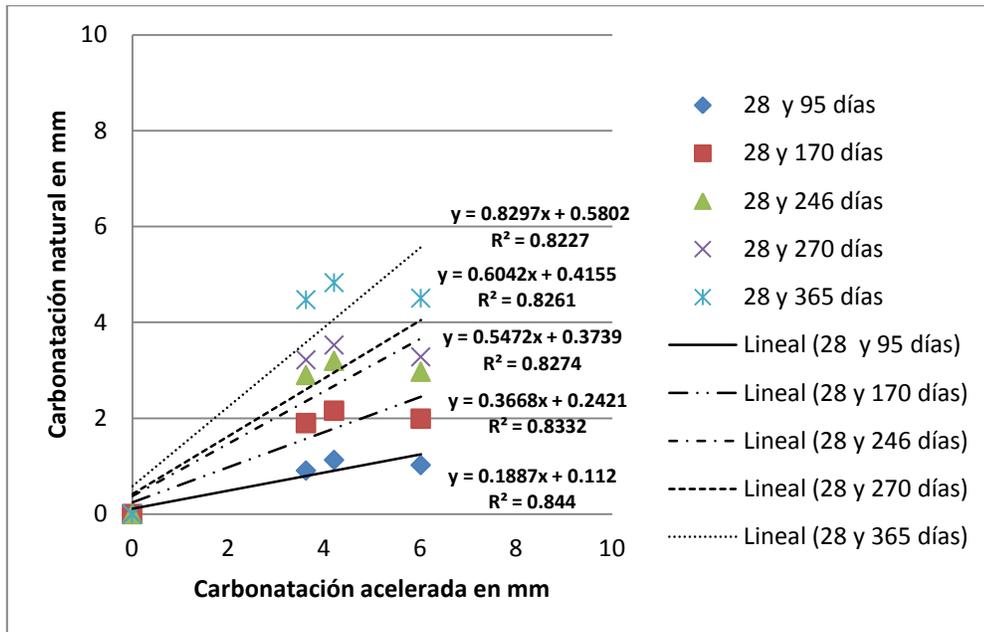
Concentración a 4 % de CO₂.



Concentración a 5 % de CO₂.

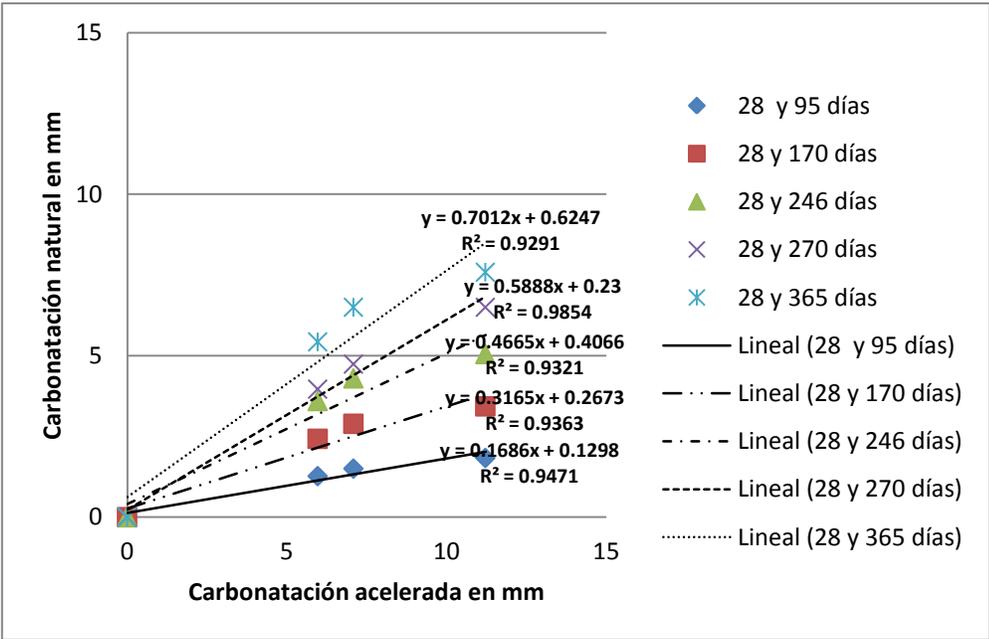


Concentración a 6 % de CO₂.

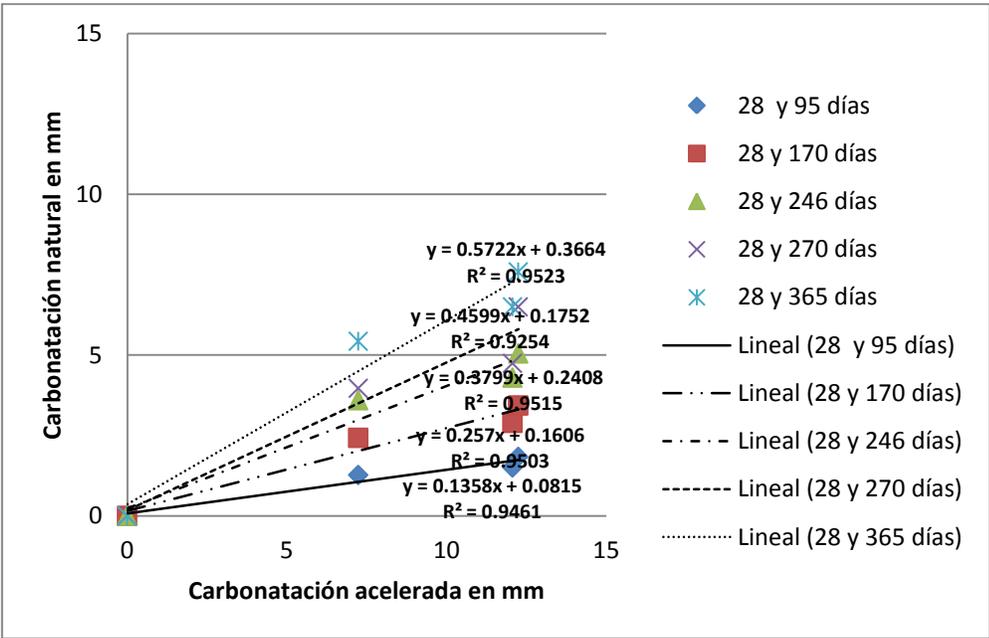


Carbonatación natural vs carbonatación acelerada para una concentración de CO₂, para especímenes realizados con cemento CPC y relaciones a/c de 0.6, 0.7 y 0.8.

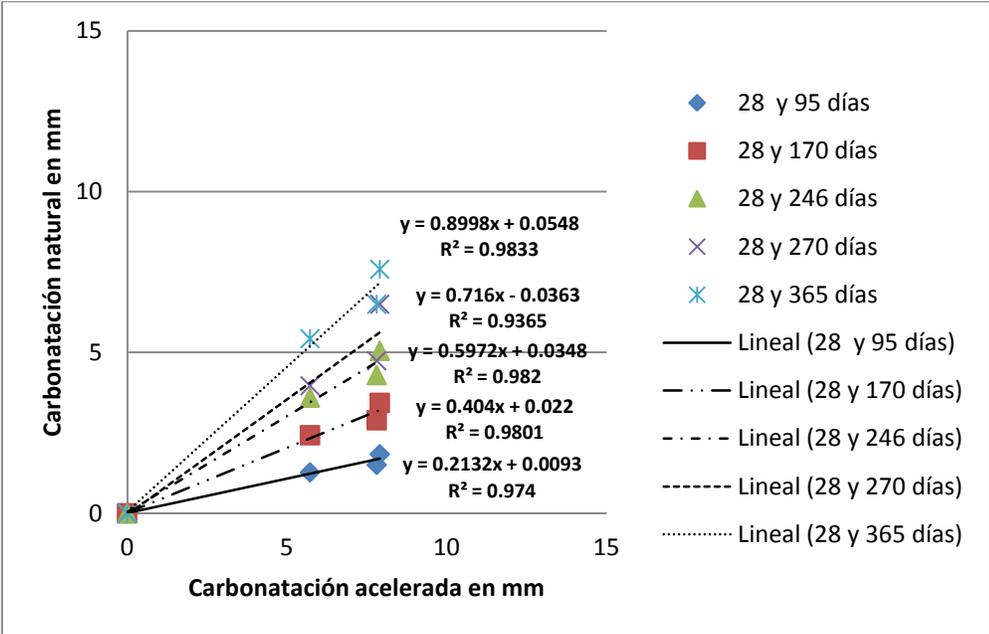
Concentración a 4 % de CO₂.



Concentración a 5 % de CO₂.

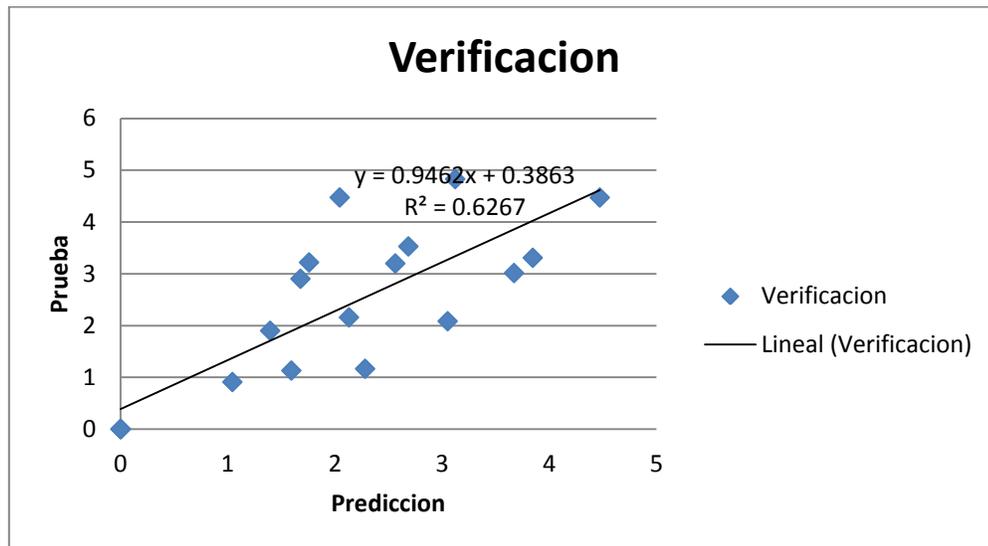


Concentración a 6 % de CO₂.

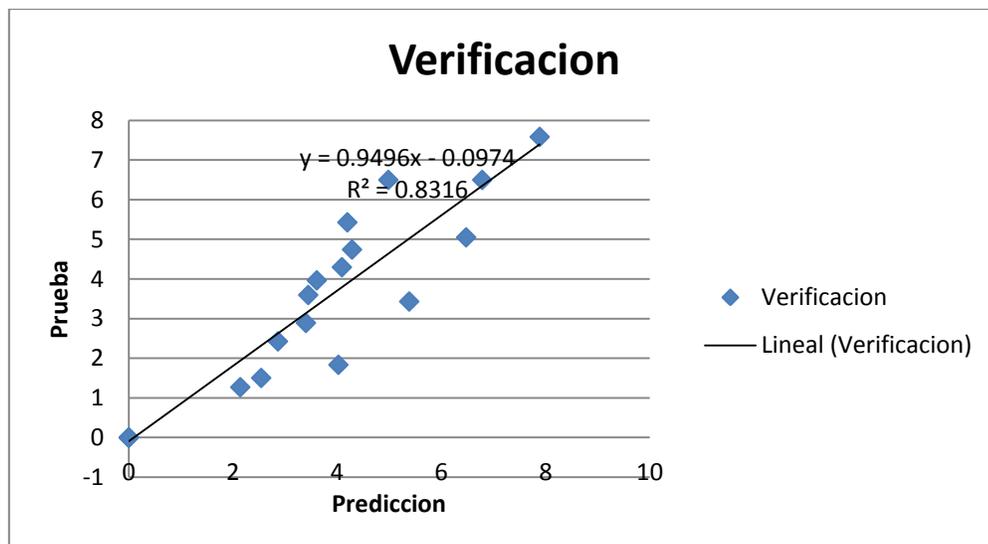


Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 4% de CO₂ (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

CPO

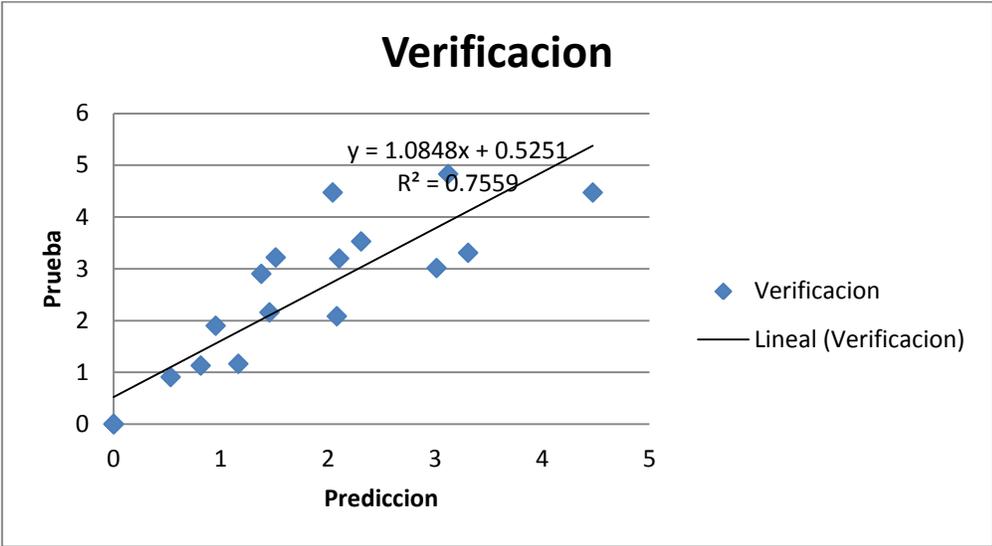


CPC

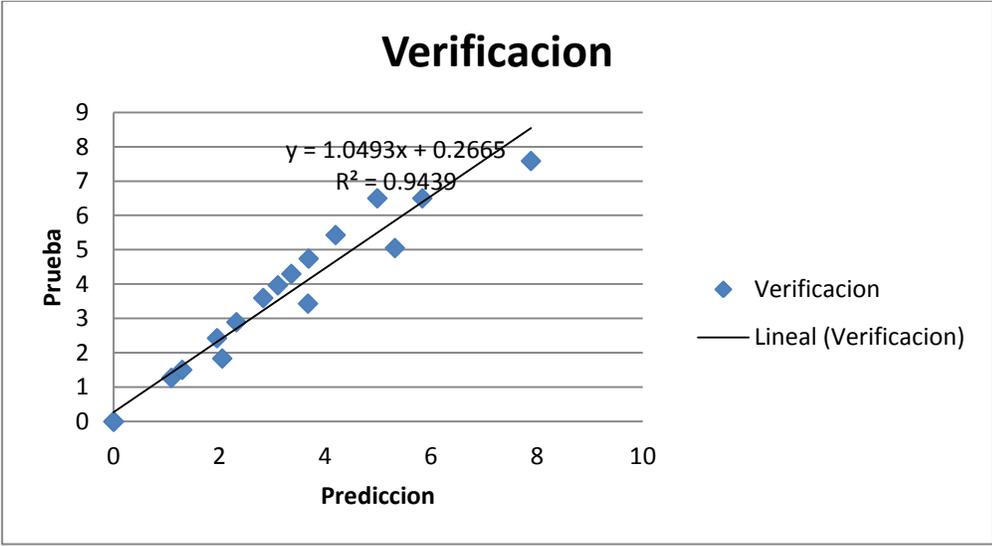


Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción lineal a una concentración de 4% de CO₂ (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

CPO

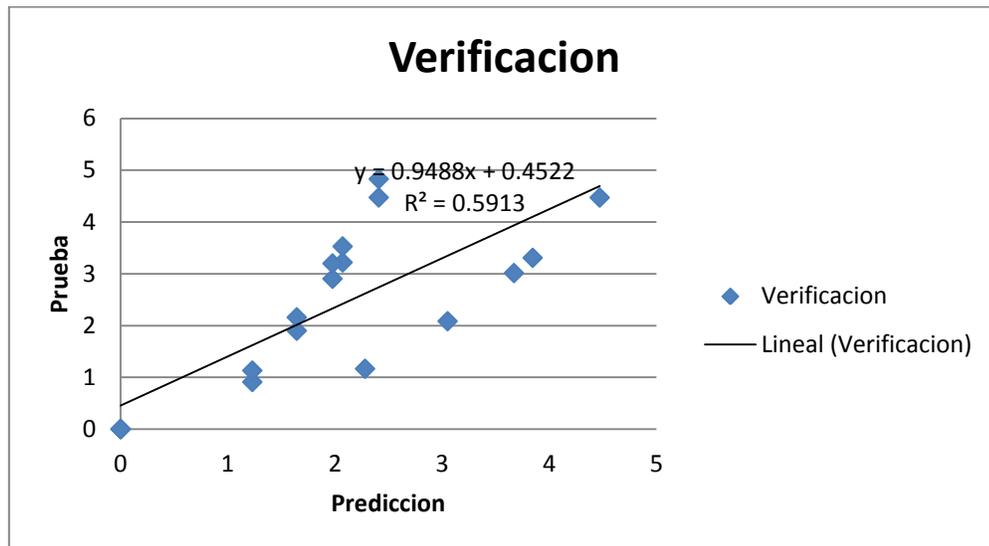


CPC

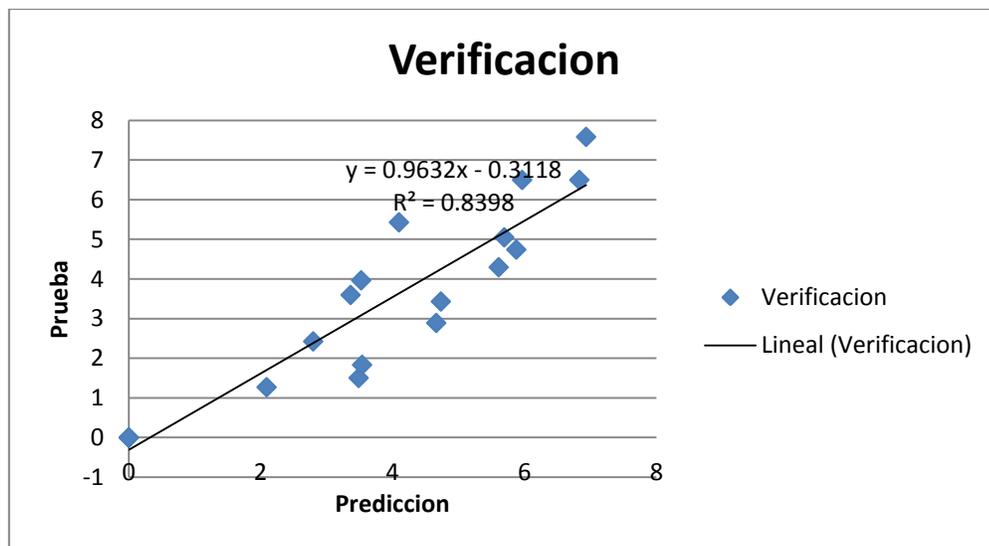


Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 5% de CO₂ (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

CPO

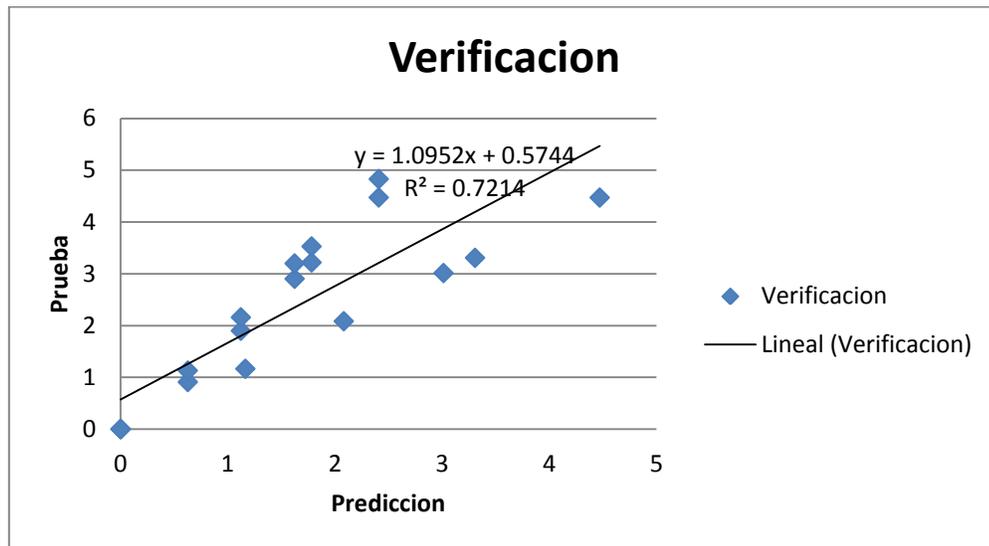


CPC

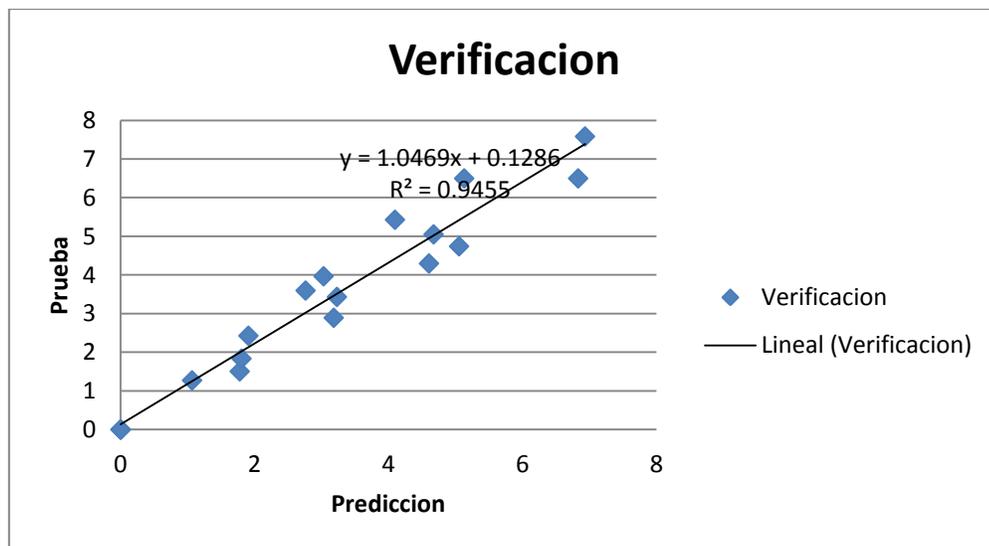


Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción lineal a una concentración de 5% de CO₂ (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

CPO

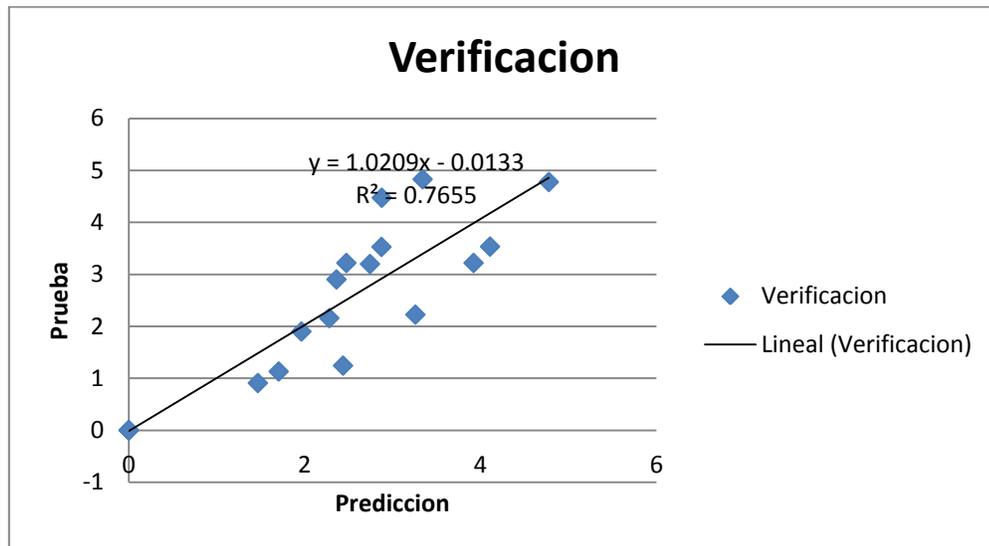


CPC

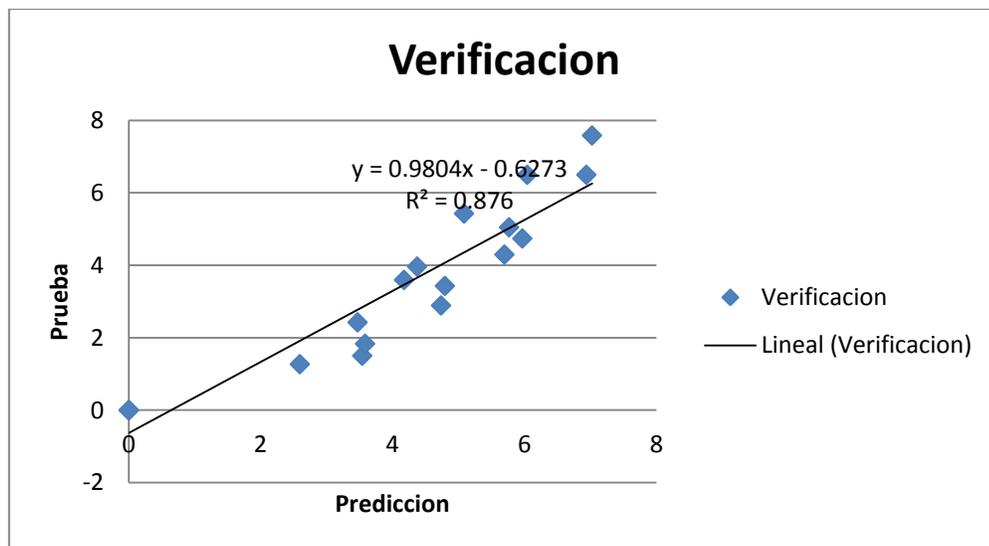


Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 6% de CO₂ (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

CPO

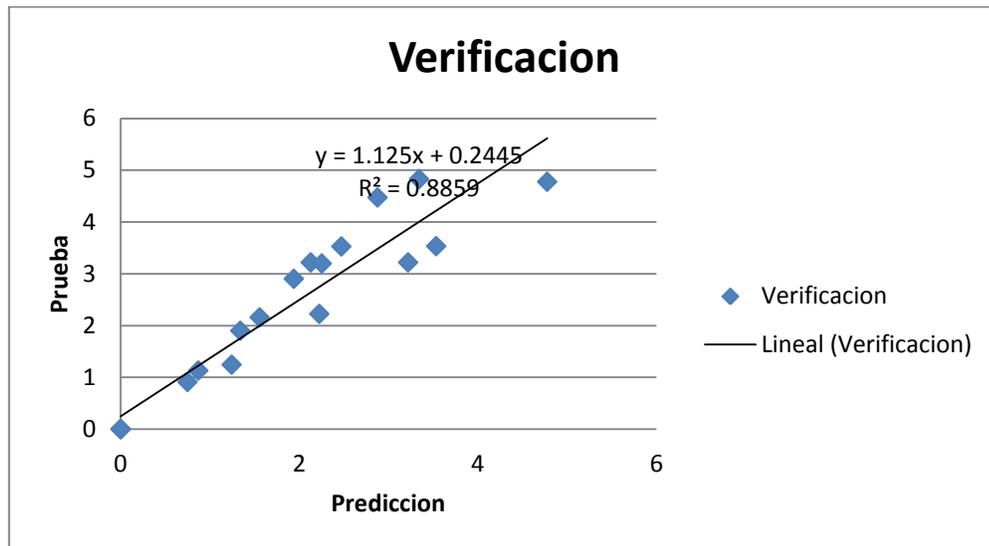


CPC



Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción lineal a una concentración de 6% de CO₂ (Rel. a/c 0.6, 0.7 y 0.8).

CPO



CPC

