

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“PROPUESTA DE MODELO DE DETERIORO POR CARBONATACIÓN DE
ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO INFLUENCIADO POR LA
VARIABILIDAD CLIMÁTICA”**

POR

HÉCTOR GERARDO CAMPOS SILVA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y
ESTRUCTURAS**

NOVIEMBRE, 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“PROPUESTA DE MODELO DE DETERIORO POR CARBONATACIÓN DE
ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO INFLUENCIADO POR LA
VARIABILIDAD CLIMÁTICA”**

POR

HÉCTOR GERARDO CAMPOS SILVA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y
ESTRUCTURAS**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL**

**CO-DIRECTORES DE TESIS
DR. PEDRO GARCÉS TERRADILLOS
DR. PEDRO CASTRO BORGES**

NOVIEMBRE, 2015



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Cd. Universitaria a 18 de noviembre de 2015

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirección de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil - UANL
Presente:

Estimado Dr. Juárez

Por este medio le comunico que el M.C. Héctor Gerardo Campos Silva, pasante del Doctorado en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominado: **“Propuesta de modelo de deterioro por carbonatación de estructuras de concreto reforzado influenciado por la variabilidad climática”**, por lo que no tengo inconveniente en solicitarle que amablemente gire las instrucciones para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del Examen de Grado del M.C. Héctor Gerardo Campos Silva para cumplir con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra Institución.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente
“Alere Flammam Veritatis”

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Director de Tesis



*“Educación de clase mundial,
un compromiso social”*

FO-SEP-01

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León. México, C.P. 66455
Tels.: (81) 1442 4400 ext. 4447 y 4448, 8329 4000 ext. 7216 y 7234
<http://www.fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

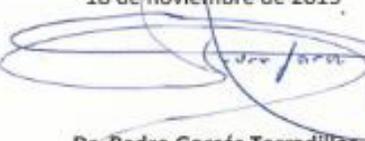
Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente:

Estimado Dr. Juárez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Revisor de la Tesis "Propuesta de modelo de deterioro por carbonatación de estructuras de concreto reforzado influenciado por la variabilidad climática", que presenta el M.C. Héctor Gerardo Campos Silva, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de tesis, dictamino que la misma es APROBADA.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente
18 de noviembre de 2015



DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro Garcés Terradillos
Universidad de Alicante
REVISOR



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Cd. Universitaria a 18 de noviembre de 2015

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente:

Estimado Dr. Juárez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Revisor de la Tesis **“Propuesta de modelo de deterioro por carbonatación de estructuras de concreto reforzado influenciado por la variabilidad climática”**, que presenta el M.C. Héctor Gerardo Campos Silva, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de tesis, dictamino que la misma es APROBADA.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente
“Alere Flammam Veritatis”

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
REVISOR



*“Educación de clase mundial,
un compromiso social”*

FO-SEP-01

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León. México, C.P. 66455
Tels.: (81) 1442 4400 ext. 4447 y 4448, 8329 4000 ext. 7216 y 7234
<http://www.fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Cd. Universitaria a 18 de noviembre de 2015

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente:

Estimado Dr. Juárez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Revisor de la Tesis **"Propuesta de modelo de deterioro por carbonatación de estructuras de concreto reforzado influenciado por la variabilidad climática"**, que presenta el M.C. Héctor Gerardo Campos Silva, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de tesis, dictamino que la misma es APROBADA.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente
"Alere Flammam Veritatis"

Dr. Javier Rodríguez González López
REVISOR



*"Educación de clase mundial,
un compromiso social"*

FO-SEP-01

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels.: (81) 1442 4400 ext. 4447 y 4448, 8329 4000 ext. 7216 y 7234
<http://www.fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx

"2015, Año del generalísimo José María Morelos y Pavón"



Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente:

Estimado Dr. Juárez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Revisor de la Tesis "Propuesta de modelo de deterioro por carbonatación de estructuras de concreto reforzado influenciado por la variabilidad climática", que presenta el M.C. Héctor Gerardo Campos Silva, como requisito parcial para obtener el grado de Doctoren Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de tesis, dictamino que la misma es APROBADA.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente

18 de noviembre de 2015

Dr. Pedro Castro Borges
Cinvestav IPN Unidad Mérida
REVISOR

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional-Unidad Mérida
Carretera antigua a Progreso Km 6, Col. Cordemex. CP. 97310, Mérida, Yucatán.
Tel. (999) 9 42 94 00; Fax (999) 9 81 29 23; E-mail pcastro@mda.cinvestav.mx

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme fuerza y vida para terminar este proyecto.

A mi Alma Mater la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por permitirme estar en sus aulas, darme el privilegio de formar parte como estudiante de una de las más prestigiadas instituciones del país.

A mi esposa y mi hijo por soportar las carencias durante el desarrollo de esta empresa y permitirme seguir con mi sueño.

A mis padres por todo su apoyo para conmigo y mi familia.

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a los profesores Dr. José Manuel Mendoza Rangel, Dr. Pedro Garcés Terradillos, Dr. Pedro Castro Borges y Dr. Emilio Zornoza directores de esta tesis, por su apoyo incondicional para el desarrollo de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Este trabajo fue llevado a cabo en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y en el departamento de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior en la Universidad de Alicante (UA), España. Bajo el auspicio del Dr. José Manuel Mendoza Rangel, el Dr. Pedro Garcés Terradillos, Dr. Pedro Castro Borges, el Dr. Emilio Zornoza, además, de personal técnico y de apoyo de la UANL y UA; Contando con el financiamiento del Conacyt: Beca Nacional Convocatoria: 290604 (No. de apoyo: 309129), Beca mixta: Beca 2012-2013 movilidad en el extranjero (290674), Proyecto Ciencia Básica: 155363, la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad de Alicante

Se agradece además, a la Ing. Armandina Valdez Cavazos, al Ing. Jaime Alejandro de la Garza Díaz y a la TSU. Leidy Esmeralda Baena Pérez de la Secretaria de Desarrollo Sustentable del gobierno del estado de N.L a través del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA). Así como al M. en C. Doroteo Treviño Puente e Ing. Sergio Marvin Galván Mancilla del Organismo de Cuenca Río Bravo de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), por facilitar el uso de instalaciones para colocar las probetas y proporcionar los datos hidrometeorológicos base de este estudio.

Finalmente, pero no por ello menos importantes. Se agradece a los Técnicos de laboratorio: Antonio Peinado(UA), Pedro Arias(UA), José Gabriel Sánchez (UA), Gumaro Tovar (UANL), Compañeros de ambas instituciones, a mi hermano MC. Aldo Rubén Campos Silva y a cualquier persona que involuntariamente haya omitido por la amistad y el apoyo prestado durante la realización de las pruebas de laboratorio.

DEDICATORIA

A Dios por la fuerza que me dio para terminar este proyecto.

A mi Hijo Humberto y mi esposa Angélica por su paciencia y comprensión.

A mis padres por sus consejos.

A mi hermano por su amistad

A mi abuela Estefana por sus oraciones.

A mí querido asesor por su infinita paciencia.

CONTENIDO

	página
Agradecimientos	i
Agradecimientos institucionales	ii
Dedicatoria	iii
Contenido	iv
Índice	v
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xix
Índice de ecuaciones	xxiii
Resumen	xxxii

ÍNDICE

Tema	página
Capítulo I - INTRODUCCIÓN	1
1.1.- La corrosión en el concreto.	1
1.1.1.- Corrosión por carbonatación.	2
1.1.1.1.- Incremento en las concentraciones de CO ₂ y el Cambio climático.	5
1.1.2.- Corrosión por ingreso del ión cloruro.	7
1.2.- Técnicas para monitorear la corrosión.	10
1.2.1.- Técnicas no electroquímicas.	10
1.2.2.- Técnicas electroquímicas.	11
1.2.2.1.- Registro del potencial de corrosión de las armaduras.	12
1.2.2.2.- Técnica de resistencia a polarización (Rp).	12
1.2.3.- Monitoreo del avance en el frente de carbonatación.	13
1.3. Modelos de predicción de la vida útil de las estructuras.	14
1.4.- Reflexiones de la introducción.	16
Capítulo II - ANTECEDENTES	17
2.1.- La industria del cemento y la búsqueda de la sustentabilidad.	17
2.1.1.- Efectos de la ceniza volante dentro del concreto.	19
2.1.1.1.- Actividad puzolánica.	20
2.1.1.2.- Microestructura de concretos con ceniza volante.	21
2.1.1.3.- Resistencia de los concretos con Ceniza volante al ataque por ión cloruro.	23
2.1.1.4.- Resistencia de los concretos con Ceniza volante ante el ataque por carbonatación.	27
2.1.1.5.- Resistencia a compresión de los concretos con Ceniza volante.	28
2.2.- Modelos de predicción de la vida útil de las estructuras.	30
2.2.1.- La ecuación de la raíz cuadrada del tiempo.	30
2.2.2.- Modelos para predecir el avance en el frente de carbonatación basados en la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo.	33
2.2.3.- Reflexiones acerca de los modelos usados para predecir el avance en el frente de carbonatación basados en la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo.	57

Tema	página
JUSTIFICACIÓN	59
HIPÓTESIS	62
OBJETIVOS	63
Capítulo III - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	64
3.1.1.- Materiales.	65
3.1.2.- Arena y grava	66
3.1.3.- Agua.	66
3.1.4.- Cemento.	67
3.1.5.- Ceniza volante.	67
3.1.6.- Acero.	68
3.2.-Probetas	68
3.2.1.-Probetas de laboratorio.	68
3.2.2.-Probetas para exposición natural.	70
3.2.3.- Preparación de los aceros a monitorear.	71
3.3.- Elaboración de probetas	72
3.3.1.- Elaboración de probetas de laboratorio	72
3.3.2.- Elaboración de probetas de exposición natural.	74
3.3.3.- Proceso de elaboración de las probetas.	74
3.3.3.1.- Caracterización de ingredientes.	74
3.3.3.2.- Pruebas de tanteo para definir proporciones de los concretos.	75
3.3.3.3.- Mezclas de concreto definitivas.	75
3.4.- Curado del concreto.	76
3.5.- Condiciones de exposición.	77
3.5.1.- Condiciones de las probetas sometidas al ataque de CO ₂ .	77
3.5.2.- Exposición de probetas con ión cloruro incluido en el agua de mezcla.	78
3.5.3.- Condiciones de las probetas sometidas al ataque de cloruros.	79
3.5.4.- Sitios de exposición natural.	80
3.6.- Ensayos de laboratorio.	81
3.6.1.- Potenciales de corrosión (E_{corr}) e intensidad de corrosión (I_{corr}) - resistencia de polarización.	81
3.6.2.- Determinación del coeficiente de migración de cloruros.	83

Tema	página
3.7.- Ensayos de probetas en exposición natural.	85
3.7.1.- Ensayos de resistencia a compresión.	85
3.7.2.-Ensayos de velocidad de corrosión instantánea.	86
3.7.3.-Ensayos de monitoreo en el avance del frente de carbonatación.	87
3.8.- Análisis de los parámetros climáticos de las zonas en estudio.	87
3.8.1.- Estaciones del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) de la Secretaria de Desarrollo Sustentable del Gobierno de Nuevo León.	87
3.8.2.- Estaciones del Organismo de Cuenca Río Bravo de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).	89
Capítulo IV - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	91
4.1.- Resultados de la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en concretos con adiciones sometidos a un ataque por carbonatación acelerada.	91
4.2.- Resultados de la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en concretos con adiciones expuestos a cloruros, mediante inmersión parcial en solución de agua con cloruro de sodio 0.5 M.	95
4.3.- Efecto de la sustitución de ceniza volante en la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en concretos con adiciones minerales sometidos a un ataque por cloruros, mediante la inclusión de cloruro de sodio en el agua de mezcla.	99
4.3.1.- Efecto de la adición de Ceniza Volante en la velocidad de corrosión de probetas con ión cloruro añadido en el agua de mezcla.	102
4.4.- Resultados de coeficientes de migración norma NT BUILD 492.	105
4.5.- Resultados de las probetas sujetas exposición natural.	108
4.5.1.- Resultados de las pruebas en estado fresco.	108
4.5.2.- Resultados de la prueba de resistencia a compresión.	110
4.5.3.- Resultados del avance en el frente de carbonatación en los sitios de estudio.	111
4.5.3.1.- Comparativa del avance en el frente de carbonatación en función de la relación a/mc y el contenido de CV para los sitios de estudio.	113
4.5.4.- Observación de los parámetros climáticos de las zonas en estudio.	115
4.6.- Propuesta de ecuación para predecir la profundidad de carbonatación que tome en cuenta la variabilidad de los factores climáticos.	120
4.6.1.- Factores seleccionados para la ecuación propuesta.	122
4.6.2.- Ecuación propuesta.	130
4.6.3.- Verificación de las unidades de la ecuación propuesta.	134

Tema	página
4.6.4.- Ejemplo numérico de la ecuación propuesta.	135
4.6.4.1.- Cálculo del coeficiente de difusión, D_{0,CO_2} .	135
4.6.4.2.- Cálculo del efecto en el cambio de temperatura, $\exp^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)}$.	135
4.6.4.3.-Cálculo del factor de envejecimiento, $(t_a)^{-nd,CO_2}$.	138
4.6.4.4.-Cálculo de k_{urban} .	138
4.6.4.5.-Cálculo de la Concentración de CO_2 dependiente del tiempo, $C_{CO_2}(t)$ (kg/m^3).	139
4.6.4.6.- Relación a/mc.	140
4.6.4.7.- Concentración de material carbonatable, $Ca(OH)_{2_{pHi}}$.	140
4.6.4.8.- Cálculo de t_c (segundos).	141
4.6.4.8.1.- Cálculo de tiempo de precipitación.	141
4.6.4.8.2.- Cálculo de tiempo de exposición a humedad de carbonatación despreciable.	143
4.6.4.8.3.- Cálculo de tiempo de exposición a humedad de carbonatación media.	145
4.7.- Verificación de la ecuación propuesta.	147
CAPÍTULO V - CONCLUSIONES	165
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	167
Anexo 1. Comparativas del avance en el frente de carbonatación por sitio de exposición, para una misma relación a/mc; variando el contenido de CV.	168
Anexo 2. Comparativas del avance en el frente de carbonatación por sitio de exposición, para un mismo contenido de CV; variando la relación a/mc.	173
Anexo 3. Comparativas del avance en el frente de carbonatación en los sitios de estudio.	178
Anexo 4. Cálculo de la concentración de portlandita para cada una de las mezclas de estudio.	183
Anexo 5. Comparativas de la predicción de la ecuación propuesta.	184
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	198

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	página
Figura 1.1. Elementos constituyentes de la celda de corrosión.	2
Figura 1.2. Diagrama de Pourbaix mostrando el pH del hierro frente a potenciales de distintos electrodos.	3
Figura 1.3. Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo.	4
Figura 1.4. Estimado de la concentración de CO ₂ en la atmosfera terrestre durante los últimos 400,000 años.	5
Figura 1.5. Variación de las temperaturas globales desde 1860.	6
Figura 1.6. Imagen de probetas de concreto a las que se les monitorea el avance en el frente de carbonatación.	14
Figura 2.1. Evolución de la porosidad total en pastas de cemento con diferentes grados de sustitución del clinker por ceniza volante (hasta el 60%) hasta 365 días.	22
Figura 2.2. Variación del coeficiente de migración de cloruros hasta 90 días en concretos con diferentes contenidos de ceniza volante.	24
Figura 2.3. Modelo de vida útil de Tuutti para corrosión de armaduras.	25
Figura 2.4. Resistencia a compresión en pastas de cemento en función su contenido de ceniza volante (hasta el 30%), a la edad de 28 días y curadas durante su fraguado y endurecimiento sumergidas en agua a 25°C.	28
Figura 2.5. Evolución de la resistencia a compresión hasta 90 días observada por Chindaprasirt et al. en pastas de cemento portland y con una adición de ceniza volante de un 20% y un 40%.	29
Figura 2.6. Esquema del proceso de difusión de acuerdo a la ley de Fick.	31
Figura 2.7. Esquema del proceso de difusión unidimensional.	32
Figura 2.8. Carbonatación durante el proceso de secado y mojado (a), comparado con carbonatación si no ocurre el proceso de mojado (b). Profundidad de secado en cada ciclo (c).	35
Figura 2.9. Estimados de variación de las concentraciones de CO ₂ .	49

Figura	página
Figura 3.1. Matriz de mezclas utilizadas en el experimento.	65
Figura 3.2. Agregado utilizado para las probetas de laboratorio (izquierda) y de exposición natural (derecha) durante el estudio.	66
Figura 3.3. Esquema de fabricación de la probeta de concreto (propuesta por el Dr. P. Castro).	69
Figura 3.4. Detalle de la construcción de las probetas de concreto con acero embebido.	70
Figura 3.5. Detalle del habilitado de los electrodos de óxido de titanio; así como la verificación de la continuidad de la conexión necesaria para su instalación dentro de las probetas y el monitoreo.	71
Figura 3.6. Limpieza y pesaje de los electrodos.	71
Figura 3.7. Electrodo de trabajo posterior a su habilitado.	72
Figura 3.8. Mezcla de probetas para corrosión.	73
Figura 3.9. Colocación de electrodos.	73
Figura 3.10. Mezcla realizada para las probetas de exposición natural.	74
Figura 3.11. Probetas colocadas en campo.	74
Figura 3.12. Verificación de la prueba de revenimiento en las mezclas elaboradas para las probetas de exposición natural.	75
Figura 3.13. Descimbrado de las probetas de concreto elaboradas para exposición natural.	76
Figura 3.14. Curado de las probetas elaboradas para exposición natural.	77
Figura 3.15. Probetas Expuestas a carbonatación.	78
Figura 3.16. Probetas elaboradas con ión cloruro añadido en el agua de mezcla durante los primeros días de su monitoreo.	79
Figura 3.17. Esquema de la probeta sometida al proceso de ataque por agua de mar sintética.	79
Figura 3.18. Estación hidrometeorológica del Sistema Integral de monitoreo ambiental (SIMA) de la Secretaria de Desarrollo Sustentable, Gobierno del Estado de Nuevo León. Ubicada dentro del parque La pastora, Guadalupe, Nuevo León.	80
Figura 3.19. Oficinas del Organismo de Cuenca Río Bravo de la Comisión Nacional del agua (CONAGUA), Monterrey, Nuevo León.	80

Figura	página
Figura 3.20. Techado del laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil (FIC), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), San Nicolás de los Garza, Nuevo León.	81
Figura 3.21. Esquema de la toma de medidas.	82
Figura 3.22. Fotos de la toma de medidas.	82
Figura 3.23. Probetas de concreto para determinar coeficiente de migración.	84
Fig. 3.24. Perfil de penetración de cloruros en concreto: a) Medida de la profundidad de penetración de cloruros en un corte axial de la muestra, b) ejemplo de una muestra ensayada.	85
Figura 3.25. Imagen de la prensa de ensayo Modelo ADR-Auto range, mca. Ele international.	86
Figura 3.26. Imagen del ensaye de Rp de las probetas expuestas a carbonatación natural.	86
Figura 3.27. Imágenes de rodajas de probetas expuestas a carbonatación natural rociadas con fenolftaleína.	87
Figura 3.28. Ubicación de los sitios de las estaciones de monitoreo de SIMA. Adaptado de la página en internet de SIMA.	88
Figura 3.29. Croquis de ubicación de las estaciones de monitoreo ambiental de CONAGUA.	89
Figura 4.1. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a carbonatación acelerada. Relación a/mc = 0.46.	93
Figura 4.2. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a carbonatación acelerada. Relación a/mc = 0.59.	93
Figura 4.3. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a carbonatación acelerada. Relación a/mc = 0.70.	94
Figura 4.4. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a ataque por cloruros externos. Relación a/mc = 0.46.	97
Figura 4.5. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a ataque por cloruros externos. Relación a/mc = 0.59.	98

Figura	página
Figura 4.6. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a ataque por cloruros externos (Agua de mar sintética). Relación a/mc 0.70.	98
Figura 4.7. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros internos (cloruro de sodio añadido en el agua de mezcla). Contenido de Ceniza volante del 0%.	100
Figura 4.8. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros internos (cloruro de sodio añadido en el agua de mezcla). Contenido de Ceniza volante del 25%.	101
Figura 4.9. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros internos (cloruro de sodio añadido en el agua de mezcla). Contenido de Ceniza volante del 50%.	101
Figura 4.10. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros añadidos en el agua de mezcla; Comparativa variando el contenido de CV para un porcentaje de adición de ión cloruro del 1%.	103
Figura 4.11. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros añadidos en el agua de mezcla; Comparativa variando el contenido de CV para un porcentaje de adición de ión cloruro del 2%.	104
Figura 4.12. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros añadidos en el agua de mezcla; Comparativa variando el contenido de CV para un porcentaje de adición de ión cloruro del 4%.	104
Figuras 4.13 y 4.14. Habilitado de las probetas previo al ensayo.	106
Figura 4.15. Configuración del monitoreo donde las probetas son sometidas a una corriente eléctrica inducida por una fuente de poder. (Fuente: adaptado de la propia norma NT BUILD 492).	106
Figura 4.16. Imágenes del monitoreo donde las probetas son sometidas a una corriente eléctrica inducida por una fuente de poder.	106
Figura 4.17. Comparación de los coeficientes de migración obtenidos en cada una de las nueve mezclas de estudio.	107

Figura	página
Figuras 4.18. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural en la estación de La Pastora.	113
Figuras 4.19. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural en la estación de CONAGUA.	114
Figura 4.20. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural en la estación Universidad.	114
Figura 4.21. Temperaturas promedio históricas de las estaciones de SIMA.	116
Figura 4.22. Temperaturas máximas históricas de las estaciones de SIMA.	117
Figura 4.23. Temperaturas mínimas históricas de las estaciones de SIMA.	117
Figura 4.24. Precipitación histórica mensual de las estaciones de SIMA.	117
Figura 4.25. Porcentaje de humedad relativa histórica de las estaciones de SIMA.	118
Figura 4.26. Temp. promedio medidas en estaciones de Conagua (jul. 2009-2011).	119
Figura 4.27. Temp. máximas medidas en estaciones de Conagua (jul. 2009-2011).	119
Figura 4.28. Temp. mínimas medidas en estaciones de Conagua (jul. 2009-2011).	119
Figura 4.29. Representación esquemática de la velocidad de carbonatación del concreto	128
Figura 4.30. Temperaturas promedio históricas mensuales de la estación sureste.	136
Figura 4.31. Temperaturas promedio históricas anuales de la estación sureste.	136
Figura 4.32. Cálculo de la variación de los días con precipitación. Histórico de días con precipitación superior a 10 mm, Estación sureste.	143
Figura 4.33. Cálculo de la variación de los días con $HR < 20\%$, $HR > 75\%$ (Carbonatación despreciable), Estación sureste.	144
Figura 4.34. Cálculo de la variación de los días con $25\% \leq HR \leq 49\%$, velocidad de carbonatación media, Estación sureste.	146

Figura	página
Figura A1.1. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.46; Variando el contenido de CV. Est. de La Pastora.	168
Figura A1.2. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.46; Variando el contenido de CV. Est. de CONAGUA.	168
Figura A1.3. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.46; Variando el contenido de CV. Estación Universidad.	169
Figura A1.4. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.59; Variando el contenido de CV. Estación de La Pastora.	169
Figura A1.5. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.59; Variando el contenido de CV. Estación de CONAGUA.	170
Figura A1.6. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.59; Variando el contenido de CV. Estación Universidad.	170
Figura A1.7. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.70; Variando el contenido de CV. Estación de La Pastora.	171
Figura A1.8. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.70; Variando el contenido de CV. Estación de CONAGUA.	171
Figura A1.9. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.70; Variando el contenido de CV. Estación Universidad.	172
Figura A2.1. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 0%; Variando la relación a/mc. Estación de La Pastora.	173
Figura A2.2. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 0%; Variando la relación a/mc. Est. de CONAGUA.	173
Figura A2.3. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 0%; Variando la relación a/mc. Estación Universidad.	174

Figura	página
Figura A2.4. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 25%; Variando la relación a/mc. Estación de La Pastora.	174
Figura A2.5. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 25%; Variando la relación a/mc. Estación de CONAGUA.	175
Figura A2.6. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 25%; Variando la relación a/mc. Estación Universidad.	175
Figura A2.7. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 50%; Variando la relación a/mc. Estación de La Pastora.	176
Figura A2.8. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 50%; Variando la relación a/mc. Estación de CONAGUA.	176
Figura A2.9. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 50%; Variando la relación a/mc. Estación Universidad.	177
Figura A3.1. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc = 0.46 y un contenido de CV del 0%.	178
Figura A3.2. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc = 0.46 y un contenido de CV del 25%.	179
Figura A3.3. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc = 0.46 y un contenido de CV del 50%.	179
Figura A3.4. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc = 0.59 y un contenido de CV del 0%.	180
Figura A3.5. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc = 0.59 y un contenido de CV del 25%.	180
Figura A3.6. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc = 0.59 y un contenido de CV del 50%.	181

Figura	página
Figura A3.7. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$ y un contenido de CV del 0%.	181
Figura A3.8. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$ y un contenido de CV del 25%.	182
Figura A3.9. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$ y un contenido de CV del 50%.	182
Figura A5.1. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 0% de CV. Estación de La Pastora.	184
Figura A5.2. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 25% de CV. Estación de La Pastora.	185
Figura A5.3. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 50% de CV. Estación de La Pastora.	185
Figura A5.4. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 0% de CV. Estación de La Pastora.	186
Figura A5.5. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 25% de CV. Estación de La Pastora.	186
Figura A5.6. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 50% de CV. Estación de La Pastora.	187
Figura A5.7. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 0% de CV. Estación de La Pastora.	187
Figura A5.8. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 25% de CV. Estación de La Pastora.	188
Figura A5.9. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 50% de CV. Estación de La Pastora.	188

Figura	página
Figura A5.10. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.46 y 0% de CV. Estación de Conagua.	189
Figura A5.11. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.46 y 25% de CV. Estación de Conagua.	189
Figura A5.12. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.46 y 50% de CV. Estación de Conagua.	190
Figura A5.13. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.59 y 0% de CV. Estación de Conagua.	190
Figura A5.14. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.59 y 25% de CV. Estación de Conagua.	191
Figura A5.15. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.59 y 50% de CV. Estación de Conagua.	191
Figura A5.16. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.70 y 0% de CV. Estación de Conagua.	192
Figura A5.17. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.70 y 25% de CV. Estación de Conagua.	192
Figura A5.18. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.70 y 50% de CV. Estación de Conagua.	193
Figura A5.19. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.46 y 0% de CV. Estación Universidad.	193
Figura A5.20. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.46 y 25% de CV. Estación Universidad.	194
Figura A5.21. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.46 y 50% de CV. Estación Universidad.	194

Figura	página
Figura A5.22. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.59 y 0% de CV. Estación Universidad.	195
Figura A5.23. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.59 y 25% de CV. Estación Universidad.	195
Figura A5.24. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.59 y 50% de CV. Estación Universidad.	196
Figura A5.25. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.70 y 0% de CV. Estación Universidad.	196
Figura A5.26. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.70 y 25% de CV. Estación Universidad.	197
Figura A5.27. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.70 y 50% de CV. Estación Universidad.	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	página
Tabla 1.1. Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa.	4
Tabla 1.2. Principales contribuciones de diferentes autores y códigos a los modelos de vida de servicio.	14
Tabla 2.1. Comparativa de los coeficientes de difusión de cloruros ($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) para un concreto de cemento portland y otro con un 25% de ceniza volante, después de 6 meses de endurecimiento a 20°C y 100% HR.	27
Tabla 2.2. Recomendaciones en función del tipo de exposición.	46
Tabla 2.3. Valores de k_1 y n en función del tipo de exposición.	46
Tabla 2.4. Valores de D_1 y n_d en función de la relación a/c.	49
Tabla 2.5. Valores de k_1 y n en función del tipo de exposición.	51
Tabla 2.6. Relación de trabajos que presentan ecuaciones semejantes a las discutidas en esta tesis.	53
Tabla 3.1. Cuantificación de materiales por mezcla.	65
Tabla 3.2. Análisis químico del agua utilizada.	67
Tabla 3.3. Composición química de las CV empleadas en las probetas de laboratorio, expresada en %.	68
Tabla 3.4. Composición del acero de refuerzo empleado.	68
Tabla 3.5. Descripción de la ubicación de los sitios de las estaciones de monitoreo de SIMA. Adaptado de la página en internet de SIMA.	88
Tabla 3.6. Número de identificación y municipio de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas de la CONAGUA para este estudio.	90
Tabla 4.1. Análisis de los resultados de Migración de cloruros (NT build 492) a 56 días.	107
Tabla 4.2. Pruebas en estado fresco de las probetas en exposición natural.	109
Tabla 4.3. Resultados de la prueba de resistencia a compresión a 28 días y 1 año de exposición natural.	110

Tabla	página
Tabla 4.4. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural en la estación de la Pastora.	111
Tabla 4.5. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural en la estación de CONAGUA.	112
Tabla 4.6. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural en la estación Universidad.	112
Tabla 4.7. Efecto de la temperatura en el incremento del coeficiente de difusión D_0 .	124
Tabla 4.8. Propuestas de predicción del avance en el frente de carbonatación de Yoon, Stewart y Bastidas-Arteaga.	131
Tabla 4.9. Valores de D_1 y n_d en función de la relación a/c .	135
Tabla 4.10. Cálculo de promedios de temperatura para el año 2012, estación sureste.	137
Tabla 4.11. Valores de D_1 y n_d en función de la relación a/c .	138
Tabla 4.12. Cálculo de la variación de los días con precipitación. Estación sureste.	142
Tabla 4.13. Cálculo de la variación de los días con $HR < 20\%$, $HR > 75\%$ Carbonatación despreciable. Estación sureste.	144
Tabla 4.14. Cálculo de la variación de los días con $25\% \leq HR \leq 49\%$ Carbonatación media. Estación sureste.	145
Tabla 4.15. Valores seleccionados y obtenidos para los parámetros de la propuesta en función tipo de mezcla.	148
Tabla 4.16. Valores seleccionados y obtenidos para los parámetros de la propuesta en función del sitio de exposición.	149
Tabla 4.17. Temperatura promedio calculada para cada uno de los periodos y sitios de estudio.	149
Tabla 4.18. Estimación del efecto de la temperatura en el coeficiente de difusión D_{0,CO_2} .	150
Tabla 4.19. Estimación de la concentración promedio de bióxido de carbono (C_{CO_2} , en ppm) para cada uno de los periodos y sitios de estudio.	150

Tabla	página
Tabla 4.20. Estimación de la concentración promedio de bióxido de carbono (C_{CO_2} , en kg/m^3) para cada uno de los periodos y sitios de estudio.	151
Tabla 4.21. Estimación del factor de envejecimiento $(t_a)^{-nd,CO_2}$.	152
Tabla 4.22. Resumen del cálculo del tiempo de precipitación t_p para cada uno de los sitios y periodos de estudio.	153
Tabla 4.23. Resumen del cálculo del tiempo de humedad relativa de velocidad carbonatación de baja t_{HRBC} ($HR < 20\%$, $HR > 75\%$) para cada uno de los sitios y periodos de estudio.	153
Tabla 4.24. Resumen del cálculo del tiempo de humedad relativa de velocidad de carbonatación media t_{HRMC} ($25\% \leq HR \leq 49\%$) para cada uno de los sitios y periodos de estudio.	153
Tabla 4.25. Resumen del cálculo del tiempo efectivo de carbonatación t_e (días).	154
Tabla 4.26. Resumen del cálculo del tiempo efectivo de carbonatación t_e (segundos).	154
Tabla 4.27. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación propuesta, Estación de La Pastora.	155
Tabla 4.28. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, Estación de La Pastora.	156
Tabla 4.29. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación propuesta, Estación de Conagua.	157
Tabla 4.30. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, Estación de Conagua.	158
Tabla 4.31. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación propuesta, Estación Universidad.	159
Tabla 4.32. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, Estación Universidad.	160

Tabla	página
Tabla 4.33. Comparativa de las diferencias obtenidas a través de la ecuación propuesta y la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los datos medidos, Estación de La Pastora.	161
Tabla 4.34. Comparativa de las diferencias obtenidas a través de la ecuación propuesta y la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los datos medidos, Estación de La Conagua.	162
Tabla 4.35. Comparativa de las diferencias obtenidas a través de la ecuación propuesta y la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los datos medidos, Estación Universidad.	163
Tabla A4.1. Resultados de las mediciones de pH de las mezclas en estudio.	183

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	página
$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeOH}^+ + \text{H}^+$ ecuación 1.1	9
$4\text{FeCl}_2(\text{aq}) + \text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeOOH} + 8\text{HCl}(\text{aq})$ ecuación 1.2	9
$J = -D \frac{\partial n}{\partial x}$ ecuación 2.1	30
$JS - J'S = \frac{\partial J}{\partial x} S dx$ ecuación 2.2	31
$(S dx) \frac{\partial n}{\partial t}$ ecuación 2.3	31
$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial n}{\partial x} \right) = \frac{\partial n}{\partial t}$ ecuación 2.4	31
$\frac{1}{D} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$ ecuación 2.5	31
$n(x, t) = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right)$ ecuación 2.6	32
$\int_{-\infty}^{\infty} n(x, t) dx = 2 \int_0^{\infty} \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) dx = M$ ecuación 2.7	32
$\int_0^{\infty} \exp(-\alpha x^2) dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$ ecuación 2.8	32
$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{M} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 n(x, t) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} x^2 \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) dx$ ecuación 2.9	32

Ecuación	página
$\int_0^{\infty} x^2 \exp(-\alpha x^2) dx$ $= \frac{1}{2\alpha} \left(-x \exp(-\alpha x^2) \Big _0^{\infty} + \int_0^{\infty} \exp(-\alpha x^2) dx \right)$ $= \frac{1}{4\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.10</p>	32
$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} x^2 \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) dx = 2Dt$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.11</p>	32
$\sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{2Dt}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.12</p>	32
$x = K\sqrt{t}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.13</p>	33, 57
$X_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^c [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0} t}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.14</p>	33, 43
$x_{CO_2} = \sqrt{2D_{CO_2} \frac{C_{CO_2}}{C_{Ca}} \sqrt{t}} = k\sqrt{t}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.15</p>	34
$\frac{dx_{CO_2}}{dt} = \frac{C_{CO_2}}{C_{Ca}} \frac{1}{R_{CO_2}}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.16</p>	35
$R_{CO_2} = \int_{x=0}^{x=x_{CO_2}} \frac{dx}{D_{CO_2}(RH(x))}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.17</p>	35
$d = (kt^{0.5})/S$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.18</p>	36
$x = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W}{r_c C} - 0.34} \frac{C_0}{r_{HD} r_c C} \sqrt{t}$ <p style="text-align: center;">ecuación 2.19</p>	37

Ecuación	página
$x = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/B^* - 0.34}{\alpha k' C}} C_0^n \sqrt{t}$ ecuación 2.20	37
$k' = 1 - \beta k$ ecuación 2.21	37
$W/B^* = \frac{W}{C + F'}$ (Para concretos con alto contenidos de ceniza volante) ecuación 2.22	37
$W/B^* = \frac{1 - M}{1 - m} \frac{W}{C + F'}$ (Para concretos con bajos contenidos de CV) ecuación 2.23	38
$M = (C_1 - 0.93S_1 - 0.55A_1 - 0.35F_1 - 0.70\hat{S}_1) / (0.93(S_2 - S_1) + 0.55(A_2 - A_1) + 0.35(F_2 - F_1) + 0.70((\hat{S}_2 - \hat{S}_1) - (C_2 - C_1))$ ecuación 2.24	38
$x = \sqrt{\frac{2Dc}{a}} \sqrt{t}$ ecuación 2.25	38
$x = A\sqrt{t}$ ecuación 2.26	38
Donde $A = \sqrt{\frac{2Dc}{a}}$ ecuación 2.27	39
$\frac{C_s}{C_x} = \sqrt{\pi} \frac{x\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{x\sqrt{t}}{2\sqrt{D}}\right)$ ecuación 2.28	39
$C_x = \frac{C_a HD c}{56}$ ecuación 2.29	39
$x_n = \sqrt{\frac{2Dc}{a} (c_1 - c_2) \left[t_{d1} - t_{d2} - \left(\frac{x_1}{b}\right)^2 + t_{d3} - \left(\frac{x_2}{b}\right)^2 \dots + t_{dn} - \left(\frac{x_{n-1}}{b}\right)^2 \right]}$ ecuación 2.30	40
$a = Ca HD c \ 44/66 \quad y \quad b = \sqrt{(2D_v/b)(c_3 - c_4)}$ ecuación 2.31	40

Ecuación	página
$x = 64 \frac{K^{0.4} t^{0.5}}{c^{0.5}}$ ecuación 2.32	40
$x = kT_{ini}^n$ ecuación 2.33	41
$n = 0.02536 + 0.01785r - 0.0001623r^2$ ecuación 2.34	41
$x^2 = \frac{2D}{a} (C_1 - C_2)t$ ecuación 2.35	41
$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}}{a} C_{CO_2} t}$ ecuación 2.36	42
$X_c = K\sqrt{t}$ ecuación 2.37	42
$a = 0.75 x C_e x CaO x \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} (kg m^{-3})$ ecuación 2.38	42, 48, 52, 129.
$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(RH, t)}{a(C_{CO_2})} C_{CO_2}(t) \left(\frac{t_o}{t}\right)^{n_m}}$ ecuación 2.39	42
$x_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^{C_0} [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 3[C_2S]^0} t}$ ecuación 2.40	43
$x_c = \sqrt{\frac{2D_e [CO_2]_0 t}{[CH] + 3[CSH]}}$ ecuación 2.41	44
$D_e = A \left(\frac{\varepsilon_c}{\frac{C}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_p} + \frac{W}{\rho_w}} \right)^a \left(1 - \frac{RH}{100} \right)^b$ ecuación 2.42	44
$x_c = \frac{1}{16.75} \frac{\rho_c}{\rho_w} \frac{W/C - 0.3}{1 + (\rho_c/\rho_w)(W/C)} (1 - H_{ext})$ ecuación 2.43	44
$x = \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_c W}{\rho_w C} + \frac{\rho_c G}{\rho_G C} \right) y_{CO_2} t}$ ecuación 2.44	45

Ecuación	página
$x = \sqrt{2 \frac{D}{a} \Delta C t \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n}$ ecuación 2.45	45
$x = \sqrt{2 \frac{D}{a} \Delta C t}$ ecuación 2.46	46
$R_{C65} = \frac{a}{D}$ ecuación 2.47	46
$R_{C65} = \frac{2C_{acel} t_1}{x_1^2}$ ecuación 2.48	47
$x = \sqrt{\frac{2 x \Delta C}{R_{C65}} t \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n}$ ecuación 2.49	47
$Q dx_c = \frac{D_{CO_2} P_{CO_2}}{RT} x_c dt$ ecuación 2.50	47
$x_c = \frac{\sqrt{2D_{CO_2} P_{CO_2} t}}{Q R T}$ ecuación 2.51	48
$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}^0 P_0 t}{RT \left(1 - \beta C_2 \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n\right) \left(\frac{\varphi_p C_2}{n+1} \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n + Q1\right)}}$ ecuación 2.52	48
$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a}} k_{urban} C_{CO_2}(t - 1999) \left(\frac{t_0}{t-1999}\right)^{n_m} \quad t \geq 2000$ ecuación 2.53	48
$D_{CO_2}(t) = D_1(t - 1999)^{-n_d}$ ecuación 2.54	48
$\alpha_H \approx 1 - e^{-3.38w/c}$ ecuación 2.55	50
$f_T(t) \approx e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{av}(t)}\right)}$ Siendo $T_{av}(t) = \frac{\sum_{i=2000}^t T(t)}{t-1999}$ ecuación 2.56	50
$x_c(t) \approx \sqrt{\frac{2f_t(t)D_{CO_2}(t)}{a}} k_{urban} \int_{2000}^t C_{CO_2}(t) dt \left(\frac{1}{t-1999}\right)^{n_m}$ $t \geq 2000$ ecuación 2.57	50

Ecuación	página
$x = \sqrt{\left(\frac{(2xct)}{R_{c65}}\right)} \left[\sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{1}{t}\right)^n\right]$ ecuación 2.58	50
$R_{c65} = 0.0016 f_{cm}^{3.106}$ para CEM I; CEM II/A ecuación 2.59	51
$R_{c65} = 0.0018 f_{cm}^{2.862}$ para CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V ecuación 2.60	51
$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} C_{CO_2} t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}}$ ecuación 2.61	52
$D_{CO_2}(t) = D_1 t^{-n_a}$ ecuación 2.62	52
$x_c(t) \approx \sqrt{\frac{2f_T(t)D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} \int_0^t C_{CO_2}(t) dt \left(\frac{1}{t}\right)^{n_m}}$ ecuación 2.63	52
$\phi(t) = \phi_0 + \left(\frac{\phi_{ta} - \phi_0}{t_a}\right) t$ ecuación 2.64	52
$R(t) = R_0 + \left(\frac{R_{ta} - R_0}{t_a}\right) [t]/t_a$ ecuación 2.65	52
$k(t) = \phi(t) + \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{2} \sin\left(\frac{t - [t]}{1 - R(t)} \pi\right)$ ecuación 2.66	53
$k(t) = \phi(t) - \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{2} \sin\left(\frac{t - [t]}{1 - R(t)} \pi\right)$ ecuación 2.67	53
$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$ ecuación 3.1	82
$Q_t = \int I_{corr} \cdot dt$ ecuación 3.2	83
$M = \frac{E_q \cdot Q_t}{96500}$ ecuación 3.3	83

Ecuación	página
$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} (x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L X_d}{U - 2}})$ <p style="text-align: center;">ecuación 3.4</p>	85
$x = \sqrt{\frac{2Dct}{a}} \quad \text{Siendo: } K = \frac{2Dc}{a}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.1</p>	121
$x = \sqrt{\frac{2(D_{CO_2})(\text{Factores Ambientales})}{(\text{factores del Material})} t}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.2</p>	121
$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,CO_2})}{a} \sqrt[2]{t}}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.3</p>	122
$D = D_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$ <p style="text-align: center;">Ecuación 4.4</p>	123
$D = D_0 \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T}\right)\right)$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.5</p>	123
$T_{prom}(t) = \frac{T_{ini} + (k_T t_a + T_{ini})}{2}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.6</p>	124, 132, 135, 137
$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,CO_2}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right)}{a} \sqrt[2]{t}}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.7</p>	125
$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,CO_2}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-nd,CO_2}}{a} \sqrt[2]{t}}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.8</p>	125
$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,CO_2}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-nd,CO_2} * k_{urban}}{a} \sqrt[2]{t}}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.9</p>	126
$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,CO_2}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-nd,CO_2} * k_{urban} * C_{CO_2}(t)}{a} \sqrt[2]{t}}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.10</p>	127

Ecuación	página
$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp^{\frac{E}{R}(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)})} * (t_a)^{-nd,co_2} * k_{urban} * C_{co_2}(t)}{a}} \sqrt[2]{t_e}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.11</p>	128
$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp^{\frac{E}{R}(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)})} * (t_a)^{-nd,co_2} * k_{urban} * C_{co_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_2_{pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.12</p>	130, 132, 133, 135
$C_{co_2}(t) = [0.0019 \times 10^{-3}] * \left[\frac{C_{co_2,t_0} + (C_{co_2,t_0} + 1.5(t_a))}{2} \right]$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.13</p>	132
$t_e = t_d - t_p - t_{HRBC} - \frac{1}{2} t_{HRMC}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.14</p>	133, 146
$t_p = (k_p * t_a + t_{p0} * t_a)$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.15</p>	133, 143
$t_{HRBC} = [(k_{HRbc} * t_a + t_{HRbc0} * t_a) - (t_p)]$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.16</p>	133, 143, 144
$t_{HRMC} = [(k_{HRmc} * t_a + t_{HRmco} * t_a)]$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.17</p>	133, 145, 146
$\exp^{\frac{E}{R}(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)})}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.18</p>	137
$(t_a)^{-nd,co_2}$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.19</p>	138
$C_{co_2}(t) = [0.0019 \times 10^{-3}] * \left[\frac{C_{co_2,t_0} + (C_{co_2,t_0} + 1.5(t_a))}{2} \right]$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.20</p>	139
$pOH + pH = 14$ <p style="text-align: center;">ecuación 4.21</p>	140

RESUMEN

El predecir la vida de servicio de una estructura de concreto reforzado ante unas condiciones climáticas determinadas es un tema complicado, la evolución en este tema ha sido lenta debido a la gran cantidad de variables que entran en juego, tales como los factores ambientales a los que se expone la estructura. El problema se complica con la generalización del uso de adiciones minerales en sustitución de cemento portland, ya que si bien ofrecen diversas ventajas técnicas, mecánicas y de sustentabilidad a los concretos, debido a la gran cantidad de adiciones minerales factibles a ser utilizadas y a los distintos porcentajes de uso de las mismas es complicado definir desempeños ante los distintos ambientes a los que finalmente estarán expuestas las estructuras. En este sentido aún queda la duda sobre el porcentaje máximo de cemento portland viable a ser sustituido por las adiciones minerales sin detrimento en la durabilidad de los elementos estructurales de concreto.

El presente proyecto busca generar conocimiento en la predicción de la vida servicio de las estructuras de concreto reforzado frente a corrosión por carbonatación, tomando en cuenta el escenario actual de variabilidad climática e incremento en las concentraciones de bióxido de carbono (CO₂). Para lo cual se seleccionaron 3 relaciones agua/material cementante: 0.46, 0.59 y 0.70 y tres contenidos de sustitución de ceniza volante: 0%, 25% y 50%.

El diseño experimental consistió en la comparación de las distintas matrices seleccionadas en el laboratorio ante efectos de carbonatación acelerada, ataque por cloruros mediante inmersión en agua de mar sintética e inclusión de ión cloruro en el agua de mezcla a través de la técnica de resistencia a la polarización y la prueba de migración de cloruros NT BUILD 492. Lo anterior con la finalidad de establecer los posibles comportamientos de las distintas mezclas ante una exposición natural. Donde los resultados mostraron un buen desempeño de las mezclas con sustitución, que igualaron y en algunos casos superaron la resistencia de la mezcla patrón ante el ataque de dichos agentes.

Se procedió, además, a la reproducción para el monitoreo del avance en el frente de carbonatación de probetas en campo situados en tres sitios de la Cd. de Monterrey, a fin de tener datos que junto con los historiales climáticos locales previamente tratados, permitieron calibrar el modelo de predicción de deterioro por carbonatación de estructuras de concreto propuesto en este trabajo.

Finalmente, la información recopilada en este trabajo podrá servir de base para el posterior desarrollo y refinamiento de modelos de deterioro específicos; Y de esta manera, establecer parámetros para diseñar obras de concreto armado durables, así como estrategias de reparación adecuadas para las construcciones existentes, lo que repercutirá en un decremento sustancioso en las pérdidas económicas debidas a la corrosión por carbonatación.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

El concreto como material de construcción ha sido ampliamente utilizado en el mundo debido a su relativo bajo costo, gran resistencia a compresión y capacidad de moldearse [1]. Sin embargo, es un material que sufre el ataque de diferentes agentes propios del ambiente como es la carbonatación producida por el bióxido de carbono (CO₂) o el ingreso de cloruros propios del agua de mar que provocan la corrosión del acero de refuerzo [2]. Dichos problemas son muy importantes desde el punto de vista económico [3-5] y poco sustentable debido a la necesidad de reparar e inclusive sustituir estructuras antes de tiempo.

La problemática de la corrosión de estructuras ha ocasionado la actual existencia de numerosos estudios dirigidos a su investigación, mismos que se pueden apreciar en publicaciones de revistas especializadas, congresos y secciones de trabajo [6]. Las diversas líneas de búsqueda han estado encaminadas al estudio de las causas y mecanismos de deterioro, desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y control (tanto a nivel de laboratorio como “in situ”) y al empleo de métodos de protección [7]. Pero, últimamente se ha desarrollado 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 [8]. No obstante, aún no se ha generado un modelo de predicción definitivo y los actuales tienen muchas áreas de oportunidad de las cuales se hablará más adelante.

1.1.- La corrosión en el concreto.

De manera general, se puede definir corrosión como la degradación de un material, pero si lo particularizamos al acero embebido en concreto, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales [7]:

- a) Un ánodo, donde ocurre la oxidación
- b) Un cátodo, donde ocurre la reducción
- c) Un conductor metálico, por donde fluyen los electrones
- d) Un electrolito; en este caso, la solución dentro de los poros del concreto.

La Figura 1.1. Muestra el proceso de corrosión en el concreto reforzado.

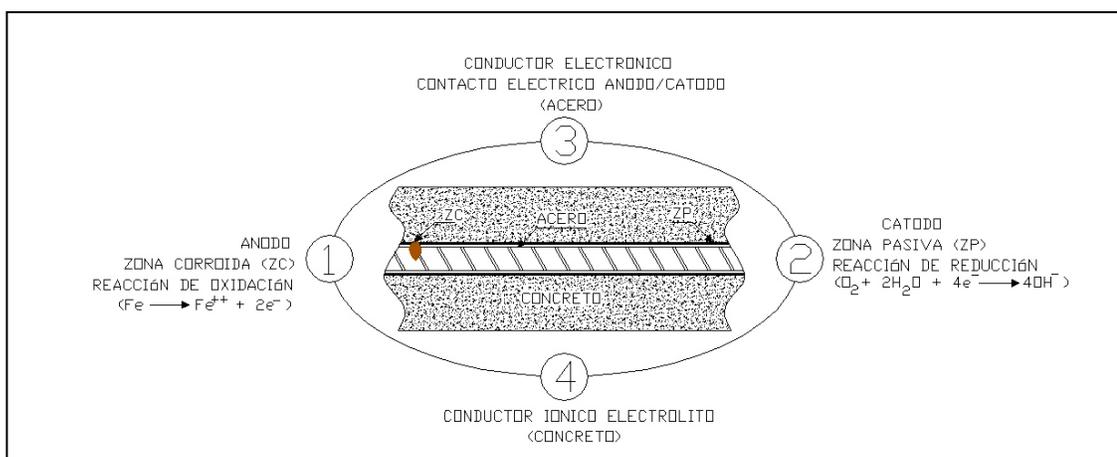


Figura 1.1. Elementos constituyentes de la celda de corrosión [7].

Sin embargo, la alta alcalinidad del concreto produce una capa de óxido en la superficie del acero que impide que el acero continúe corroyéndose [9]. Por lo tanto, el pH básico del concreto protege al acero proporcionando un medio donde la velocidad de corrosión es prácticamente nula (Estado de pasividad). Además, el concreto sirve de capa física protectora que disminuye la llegada de diversos agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) al acero, mismos que pueden despasivarlo e iniciar su corrosión.

No obstante, agentes químicos como los cloruros o el dióxido de carbono de un ambiente urbano, se pueden acumular en la superficie del concreto y lentamente ser transportados a través del recubrimiento de concreto hasta llegar al acero [10,11]. Entonces el estado pasivo puede perderse.

1.1.1.- Corrosión por carbonatación.

Como ya se mencionó de manera general en las líneas superiores, el hidróxido de calcio y los hidróxidos de sodio y potasio por su alta alcalinidad, permiten de acuerdo al

diagrama de Pourbaix [12] (Ver Figura 1.2), la formación de una capa pasiva de óxido de hierro en el acero de refuerzo embebido en concreto, que lo cubre y protege de la corrosión. Para la permanencia de dicha capa es necesario que el concreto conserve dicha alcalinidad, sin embargo, ante el ingreso de CO_2 y la posterior carbonatación de la matriz, el acero pierde esta capa pasiva y comienza la corrosión. Se considera necesario un pH menor a 9 para que se inicie este efecto [13].

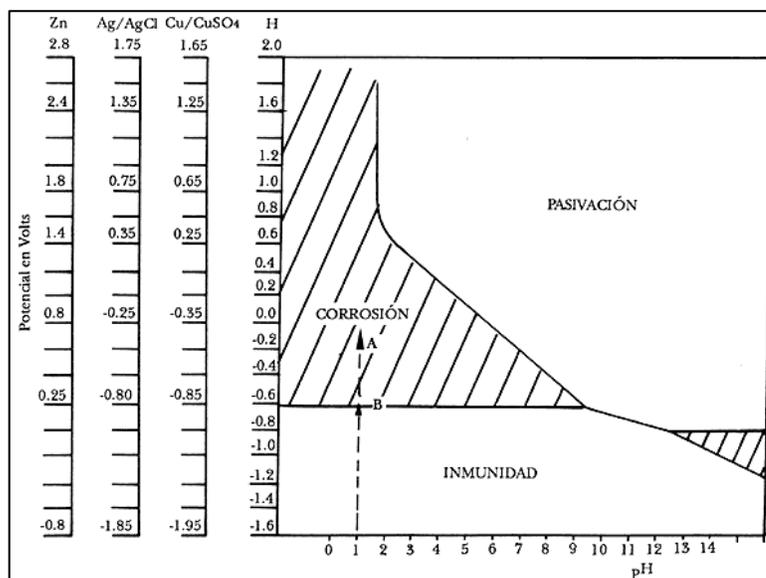


Figura 1.2. Diagrama de Pourbaix mostrando el pH del hierro frente a potenciales de distintos electrodos [14].

La pérdida de alcalinidad del concreto denominada como carbonatación es un problema que actualmente afecta a muchas estructuras en el planeta (especialmente en ciudades industriales [15]), este fenómeno ocurre principalmente, cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte al hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino [16]. La Figura 1.3. Muestra de manera esquemática el proceso de carbonatación del concreto.

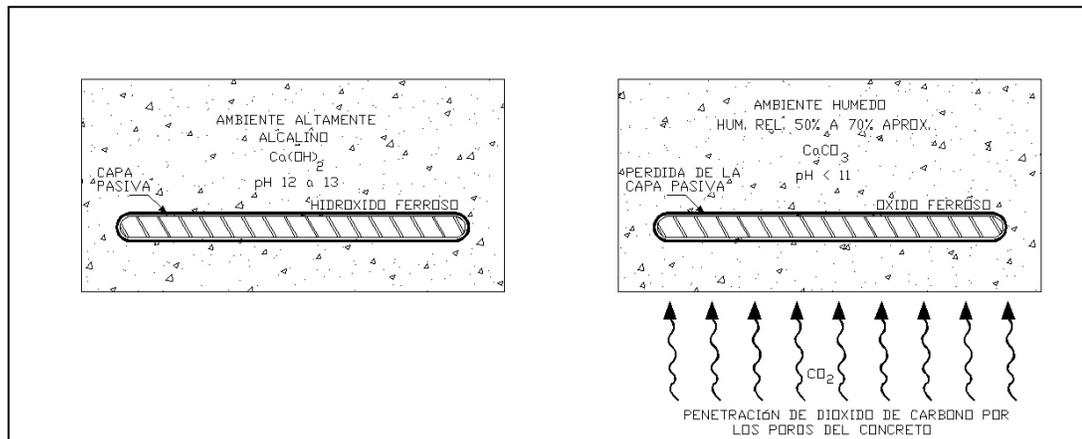


Figura 1.3. Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo [13].

Los factores que afectan el avance de la carbonatación son: el contenido de humedad; el contenido de CO₂, Cl⁻, y SO₂ en el ambiente atmosférico así como la permeabilidad del concreto.

Un factor muy importante para que exista carbonatación es la humedad relativa ambiental. Se ha encontrado que para valores en el intervalo de 50 - 70% dicho fenómeno ocurre con mayor rapidez [17]; ya que 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. La Tabla 1.1 muestra el efecto de la humedad relativa en el ingreso de CO₂ en el concreto.

Tabla 1.1. Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa [17].

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

La permeabilidad del concreto es otro factor que se debe de controlar, ya que un concreto muy permeable se carbonatará rápidamente, por tener poca resistencia a la penetración de los fluidos. Para obtener un concreto poco permeable son necesarios

agregados de buena calidad, una pasta de cemento con relación agua/cemento baja y la inclusión de puzolanas [18].

Por otro lado, para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña concentración de CO_2 , que normalmente se encuentra en la atmósfera (0.03%) [19]. Dicho contenido, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar ya que existen grandes diferencias entre una zona urbana y una zona rural, siendo mayor el contenido de este gas en la zona urbana.

1.1.1.1.- Incremento en las concentraciones de CO_2 y el Cambio climático.

Las concentraciones atmosféricas de CO_2 normalmente son expresadas en unidades de partes por millón por volumen (ppmv). Desde el inicio de la revolución industrial a finales de 1700s, la concentración de CO_2 en la atmosfera se ha incrementado por alrededor de 100 ppm (de 280 ppm a 380 ppm) [20]. Está estimado que el 64% del CO_2 en la atmosfera es debido al quemado de combustibles fósiles [21]. La Figura 1.4 muestra el crecimiento estimado en las concentraciones de CO_2 atmosféricas.

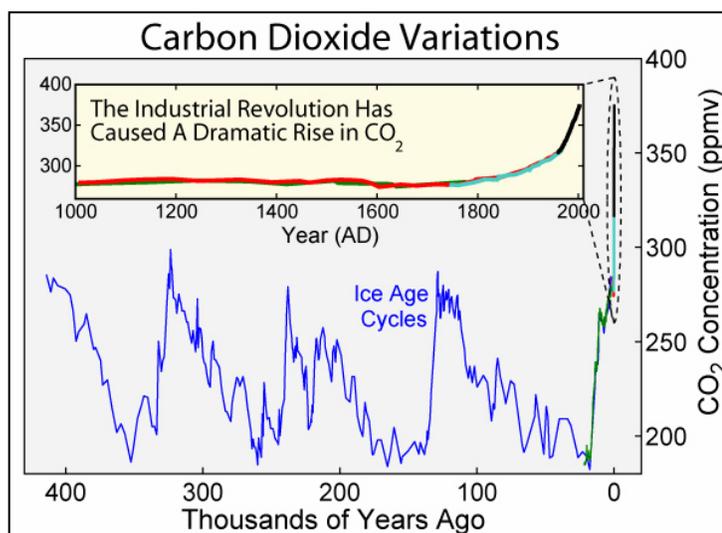


Figura 1.4. Estimado de la concentración de CO_2 en la atmosfera terrestre durante los últimos 400,000 años [21,22].

Tomando en cuenta que la cantidad de CO₂ se ha incrementado en el ambiente a partir de la revolución industrial, sería aceptable esperar que las estructuras se deterioraran más rápido por causa de este agente. Por otra parte, es necesario mencionar que el incremento de las cantidades de CO₂ en el ambiente está ligado al fenómeno conocido como “calentamiento global” en el que la temperatura del planeta se ve incrementada. La Figura 1.5 muestra la estimación de la variación de las temperaturas globales desde 1860.

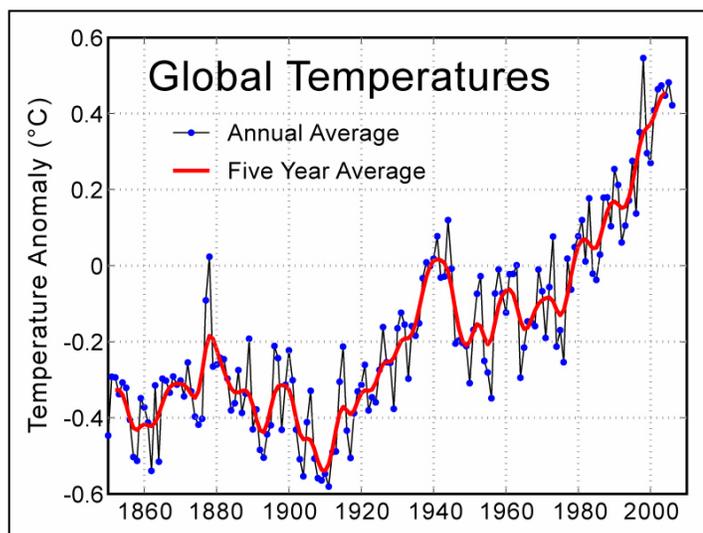


Figura 1.5. Variación de las temperaturas globales desde 1860 [21,22].

En la misma línea el panel intergubernamental para el cambio climático (IPCC por sus siglas en Inglés) [23] a través del quinto informe de evaluación “Cambio Climático 2013”, define al “cambio climático” como: “un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo, mediante el uso de pruebas estadísticas) por los cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, típicamente décadas o más. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o fuerzas externas como moduladores de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo”. Además, este mismo reporte menciona que este cambio en el clima ha provocado que la temperatura media de la superficie (es decir, el promedio de la temperatura del aire cerca de la superficie de la tierra y de la temperatura de la superficie del mar) haya subido desde 1861. Durante el siglo XX, el aumento ha sido de 0.6 ± 0.2 °C.

Las pruebas del cambio climático incluyen aumentos observados en el promedio del aire y la temperatura de los océanos, el derretimiento generalizado de la nieve, y el aumento del nivel del mar [24-27].

Pero ¿qué efecto está causado o causará el cambio climático a las estructuras de concreto? La respuesta está en el aire, lo esperado es que debido al incremento en las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera y el aumento en la temperatura asociado, se generará un mayor deterioro de los elementos de concreto reforzado.

No obstante, hoy en día es difícil precisar como el cambio climático afectará el proceso de deterioro en estructuras de concreto; esto debido a que como lo plantea el IPCC, 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 que incluyan las condiciones microclimáticas y los parámetros del material.

Ante esto, diferentes investigadores [28-31] han demostrado que las características mecánicas de las estructuras no son el único indicador de la durabilidad de las estructuras de concreto, para predecir dicha propiedad es también importante tomar en cuenta el medio en el que van a estar inmersas [32]. Siendo observado 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, afectando la velocidad de carbonatación, además la carga ambiental localizada puede crear microclimas donde el desempeño de un elemento de concreto sea diferente de una región a otra [29]. Por lo cual es motivo de esta investigación aportar información que ayude a conocer mejor este fenómeno y desarrollar o particularizar modelos de durabilidad de estructuras de concreto.

1.1.2.- Corrosión por ingreso del ión cloruro.

Los cloruros pueden penetrar en el concreto según los siguientes mecanismos: permeabilidad, capilaridad, absorción y difusión. La permeabilidad y la absorción son

mecanismos de transporte muy rápido, mientras que la difusión es mucho más lenta. La importancia relativa de cada uno de estos mecanismos de penetración vendrá dada por las condiciones de exposición, el contenido de humedad del concreto y la estructura de poros.

En estructuras de concreto reforzado expuestas agua con cloruros, los ciclos de humectación y desecación de la superficie del concreto producen un aumento de éstos en la capa superficial. Al principio del período de humectación, una cantidad relativamente elevada de agua con cloruros penetra en el concreto por succión capilar. Durante el período de secado, el agua se evapora y los cloruros permanecen en el concreto. Este proceso puede causar un elevado aumento de cloruros en la zona de secado y humectación del concreto. Posteriormente los cloruros continúan su ingreso hasta el acero de refuerzo por fenómenos de succión, adsorción y difusión.

Sin embargo, las fases de aluminio presentes en la pasta muestran afinidad para enlazarse con el ión cloruro que ingresa al concreto, ralentizando su ingreso hasta el acero. Generando los siguientes compuestos: el monocloro aluminato hidratado o sal de Friedel, de fórmula $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ y el tricloroaluminato $C_3A.3CaCl_2.30H_2O$. En condiciones normales de concentración del ión cloruro, solo ocurre la formación de sal de Friedel [33].

El ión cloruro también puede ser adsorbido físicamente en los poros; Pero una porción del total de cloruros existentes en la pasta de concreto (cloruros totales), continua su ingreso hasta el acero sin enlazarse o ser adsorbidos, dichos cloruros son mencionados en la literatura como cloruros libres. Ocurriendo de esta forma, la existencia de tres tipos de cloruros: los cloruros libres, los cloruros adsorbidos y los cloruros enlazados, la proporción de equilibrio en que cada uno de estos se encuentra en la masa de concreto aún continua en discusión. De igual manera, es aceptado que solo los cloruros libres son capaces de corroer el acero de refuerzo y que los cloruros enlazados o adsorbidos pueden convertirse en cloruros libres sí se dan las condiciones necesarias.

Los cloruros libres de la solución de los poros del concreto en la zona cercana al

acero de refuerzo, pueden provocar, sí se encuentran en la cantidad suficiente, roturas localizadas en puntos debilitados de la capa protectora del acero.

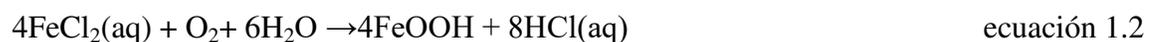
El ión Cl^- penetra en la película de óxido, a través de los poros u otros defectos con mayor facilidad que otros iones, como por ejemplo el SO_4^{2-} , o puede dispersar en forma coloidal la película de óxido e incrementar su permeabilidad. Se forman así, diminutos ánodos de metal activo rodeados por grandes áreas catódicas de metal pasivo.

El ataque por cloruros comienza con la picadura en los puntos débiles de la interfase acero-concreto. Un punto débil se puede generar debido a una caída local del pH, a un hueco de aire por mala compactación, a una fisura del concreto o a un defecto de la superficie del acero. La formación de ánodos locales en los puntos débiles crea diferencias de potencial que atraen cloruros. Al eliminar oxígeno en el comienzo de la picadura, la superficie de acero situada bajo los productos sólidos de la corrosión se acidifica, según la siguiente ecuación:



Varios mecanismos podrían contribuir al efecto catalítico de los iones cloruro. Los iones cloruro forman complejos solubles con los iones hierro, lo que favorece la disolución del óxido de hierro. La formación de complejos de cloro podría consumir los iones de hierro libres presentes en la solución, y cambiar el equilibrio de las ecuaciones de formación de la capa pasiva, provocando la disolución del óxido de hierro. La presencia de iones cloruro además aumenta la solubilidad de la capa pasiva, lo que acelera su disolución.

El efecto catalítico de los cloruros es mayor en el concreto con presencia de oxígeno, debido a la descomposición de los complejos de cloro al difundirse de la picadura de corrosión pobre en oxígeno al concreto rico en oxígeno. Los complejos de cloro no son estables en presencia de oxígeno, según se describe en la siguiente ecuación:



El resultado es una acidificación mayor y una liberación de iones cloruro. Ambos efectos aceleran la corrosión. Se han detectado valores del pH de 1,0 en las picaduras; En semejante pH, la disolución ácida del acero puede ser mucho más rápida que la corrosión electroquímica. Esta característica es lo que diferencia la corrosión localizada de la galvánica, la corrosión se acelera en la picadura o en la hendidura al producirse ésta. Incluso en algunos casos, el nivel de cloruros no es lo suficientemente elevado como para provocar la corrosión por picaduras de la armadura, pero sí como para iniciar la corrosión por hendidura en la interfase entre barra y concreto; el mecanismo de esta corrosión podría seguir debiéndose a la disolución, la acidificación local por la hidrólisis de los iones hierro y los procesos de acumulación de cloruros.

Los iones hidroxilo, actúan en contra de este proceso reparando la capa dañada, pero la rotura de la capa es irreversible para una determinada relación cloruro/hidroxilo crítica, y entonces se produce la corrosión por picadura. La corrosión en las picaduras (ánodos) se produce electrolíticamente por reacciones catódicas en el área adyacente de acero sin corroer (cátodo). Como normalmente el área catódica es mayor que la anódica, la corrosión en las picaduras es intensa.

1.2.- Técnicas para monitorear la corrosión.

Para medir la corrosión existen diversos métodos, que se pueden agrupar en dos grupos: técnicas electroquímicas y técnicas no electroquímicas.

1.2.1.- Técnicas no electroquímicas.

La forma más tradicional para analizar la corrosión de las armaduras es la determinación de la pérdida de peso gravimétrica. Ésta era la única técnica que permitía conocer lo que ocurría en las armaduras en el proceso de corrosión, hasta que empezó a investigarse la posibilidad de conocer el estado de dichas armaduras mediante métodos electroquímicos.

La técnica, consiste en pesar las barras de acero antes de introducirlas en el concreto y someterlas a un ambiente agresivo. Una vez sometidas las probetas a las condiciones establecidas por el ensayo, se rompen, se extraen los aceros y se vuelven a

pesar. Por diferencia de pesos entre el estado inicial y el final se conoce la pérdida de masa sufrida en el acero como consecuencia de la corrosión. Esta técnica consideraba que la pérdida de peso es constante a lo largo de la vida de la probeta y, por tanto, la intensidad de corrosión también.

El resultado de considerar constante la densidad de corriente de corrosión no corresponde a la realidad del fenómeno, ya que las dos fases de la que consta la cinética de corrosión: la iniciación y la propagación, tienen valores de densidad de corriente de corrosión muy distintos.

1.2.2.- Técnicas electroquímicas.

A partir de la década de los 70's, se comenzó con la aplicación de medidas de potenciales electroquímicos, de resistencia de polarización [34] y de impedancia al análisis de la corrosión en concreto reforzado.

Las técnicas electroquímicas buscan interpretar las variables que intervienen en el proceso electroquímico en el momento en que se desarrolla el fenómeno. La principal ventaja de la aplicación de los métodos electroquímicos en lugar de los métodos gravimétricos tradicionales, es que permite determinar los valores instantáneos de la velocidad de corrosión mediante un proceso en el que se rompe un menor número de probetas, puesto que algunos de estos métodos son no destructivos.

Lo que se pretende con la utilización de estas técnicas es provocar una perturbación en el sistema que se corroe y medir la respuesta electroquímica. Cuando la perturbación es muy pequeña, el sistema se recupera y la técnica es no destructiva, en cambio, si la perturbación es muy grande el sistema no se recupera provocando su alteración.

Las técnicas que se emplean con mayor frecuencia en el concreto o en sistemas que lo simulan, son: curvas de polarización, resistencia de polarización, medidas de intensidad galvánica, medidas de impedancia, registro del potencial de corrosión y medidas de la resistividad. Existen también técnicas que empiezan a tener cierta aplicación, tales como el ruido electroquímico y el análisis de armónicos.

1.2.2.1.- Registro del potencial de corrosión de las armaduras.

Desde hace tiempo, se ha utilizado el registro del potencial de corrosión de las armaduras embebidas en el concreto o en el mortero, puesto que se trata de una técnica simple, rápida y que requiere de una instrumentación muy sencilla [3].

El valor del potencial junto con el pH del medio, da una idea cualitativa de la corrosión de las armaduras a través de las diagramas de potencial - pH (diagramas de Pourbaix, Figura 1.2).

De esta forma, los riesgos de corrosión grave quedan asociados al estado activo, mientras que la garantía de durabilidad al estado pasivo o a las condiciones de inmunidad de dichos diagramas.

Hay que tener en cuenta, que la técnica permite determinar dónde puede haber corrosión en el momento de la medida, pero no el grado de ataque ya sufrido por la estructura ni tampoco la vida remanente en servicio.

Según experiencias realizadas a finales de la década de los 80, del siglo XX [3], cuando se modifica un solo factor de corrosión, manteniéndose el resto constante, la relación entre el potencial y la velocidad de corrosión resulta válida para una estructura determinada, pero se producen grandes dispersiones entre ambas variables cuando el número de factores de corrosión que cambian de una situación a otra aumenta. En las estructuras reales, todavía es la técnica más utilizada para tener una idea de posible corrosión.

1.2.2.2.- Técnica de resistencia a polarización (R_p).

La resistencia a la polarización es una técnica que fue descrita a finales de la década de los 50, del siglo XX [34], se trata de una técnica cuantitativa y no destructiva, que permite la estimación de la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un medio.

El cálculo de la velocidad instantánea de corrosión se realiza utilizando corriente continua y midiendo la variación de potencial en función de la intensidad de corriente,

con esta técnica es posible conocer la velocidad instantánea de corrosión y si integramos la curva de intensidad de corrosión en función del tiempo, obtendremos la intensidad total de corrosión.

Esta técnica ha sido aplicada a probetas de concreto armado por Andrade [34,35], quién además, encontró una relación cuantitativa aceptable entre las estimaciones electroquímicas y gravimétricas.

La ventaja de este método, reside en que las polarizaciones aplicadas son tan pequeñas que no alteran prácticamente el electrodo en el proceso de medida. Por tanto, una sola probeta permite innumerables medidas y seguir el proceso de evolución con el tiempo. Ciertamente, es un método aproximado, pero lo suficientemente exacto, para diferenciar las condiciones aceptables de las inadmisibles, puesto que el margen de error sólo aparece cuando las probetas están en el estado pasivo.

Debido a la sencillez de esta técnica, se está empleando para medir la cinética de corrosión de estructuras reales [36,37]. La dificultad de este método reside en determinar el área del contra-electrodo que recibe la señal eléctrica, pero se supera utilizando un contra-electrodo de área menor que las del acero de la estructura a medir. La principal utilidad del método, es que determinando la velocidad instantánea de corrosión en función del tiempo, es posible determinar la vida residual de la estructura.

1.2.3.- Monitoreo del avance en el frente de carbonatación.

El monitoreo del avance en el frente de carbonatación se realiza comúnmente a través de un indicador colorimétrico a base de una solución alcohólica de fenolftaleína rociada sobre una superficie recién expuesta del concreto. Sin embargo, esta técnica sólo indica un valor aproximado de pH, ya que 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 por encima de 10. El procedimiento consiste en hacer un corte o extraer un corazón de elemento de concreto para ser rociado con la solución indicadora, lo cual indicará la zona carbonatada. Un conjunto de mediciones periódicas permitirá determinar la velocidad de avance del frente de carbonatación. La Figura 1.6 muestra probetas de

concreto a las que se les realizó dicho procedimiento.



Figura 1.6. Imagen de probetas de concreto a las que se les monitoreo el avance en el frente de carbonatación.

1.3. Modelos de predicción de la vida útil de las estructuras.

Es indudable que teniendo definiciones más completas de durabilidad y vida de servicio acordes a la situación geográfica y condición climática de cada sitio, los modelos serán más precisos en sus predicciones. La Tabla 1.2 enumera las principales contribuciones de diferentes autores y códigos a los modelos de vida de servicio.

Tabla 1.2. Principales contribuciones de diferentes autores y códigos a los modelos de vida de servicio [6].

Autor	Contribución	Año
Tuutti	Modelo esquemático (enfoque de vida de servicio) con periodos de iniciación y propagación.	1982
Masters	Sistema de requerimientos para la predicción de vida de servicio.	1987
Instituto Británico de Estandarización	La predicción de vida de servicio de una construcción deberá ser evaluada por: referencias a experiencias previas con construcciones iguales o similares; por interpolación de pruebas aceleradas.	1992
C. Andrade	Modelo esquemático que incluye una etapa con factor de seguridad.	1994
Asociación de estandarización Canadiense	Predicción de vida de servicio asumiendo condiciones ambientales e instalaciones, procedimientos de operación y mantenimiento.	1995
Sarja y Vesikan	Degradación, desempeño, vida de servicio, y modelos de durabilidad determinísticos y estocásticos.	1996

Autor	Contribución	Año
Paulo Helene	Predicción de vida de servicio mediante un modelo esquemático con nuevas etapas.	1997
K. Pettersson	Vida de servicio por corrosión inducida por cloruros en concretos fracturados de alta resistencia.	1998
R. de Coss, G. Murrieta, P. Castro	Efecto de los ciclos climáticos sobre la difusión de cloruros en concretos porosos.	1998
Siemes, T. Edwarsen C.	Método probabilístico de predicción del comportamiento de las estructuras de concreto. Define cuatro etapas: despasivación, fractura, desconchamiento y colapso.	1999
S. Caré y E. Hervé	Predicción del coeficiente de difusión de cloruros en concretos basado en las proporciones de la mezcla.	2000
Siemes, T. de Vries, H.	Modelo refinado de cinco etapas para el concreto: despasivación, fractura, desconchamiento, pérdida de adherencia y colapso.	2002
Steen Rostam	Modelar los mecanismos de deterioración, es necesario el tratamiento probabilístico de incertidumbres, la vida de servicio afecta a todas las partes involucradas.	2003
CIB W80 RILEN 175 SLM	Modelos sugeridos, entre ellos, modelos determinísticos o método de los factores.	2004
A. Lindvall	Modelos para acciones ambientales sobre estructuras de concreto reforzado.	2005
Jieying Zhang, Zoubir Lounis	Análisis sensitivo de un modelo simplificado de iniciación de corrosión basado en la difusión en estructuras de concreto expuestas a cloruros.	2006
P. Castro – Borges y P. Helene	Enfoque de vida de servicio a través de un nuevo modelo esquemático que toma en cuenta más etapas.	2007
V. Baroghel-Bouny, Thai Luang Nguyen	Enfoque que propone modelo esquemático multi-nivel.	2008

Sin embargo, debido a los efectos del cambio climático, cada vez resulta más difícil predecir en su totalidad la vida de servicio de las estructuras, ya que sería complicado incluir en un modelo, los cambios en el medio ambiente que está en constante evolución y, por tal motivo, las afectaciones sobre las estructuras serán diferentes a través del tiempo [6].

1.4.- Reflexiones de la introducción.

Como se ha mencionado en este capítulo, A pesar de la versatilidad y potencialidad del concreto reforzado, las estructuras elaboradas con este material generan cuantiosas pérdidas económicas y en casos extremos pérdidas humanas debido al deterioro de las mismas. Estos gastos, pueden ser disminuidos si establecemos adecuadamente los tiempos de reparación de las estructuras de concreto reforzado.

Durante el capítulo, fueron mencionados los dos principales mecanismos de deterioro de estructuras de concreto: la carbonatación de la matriz y el ingreso del ión cloruro, se comentaron distintas técnicas de monitoreo de la corrosión, así como, el aporte de los diversos autores a los modelos de predicción de vida útil. Lo anterior con la finalidad de presentar una generalidad de los temas a tratar en este trabajo.

Capítulo II

ANTECEDENTES

Como ya se ha mencionado anteriormente, la presente investigación propone un método de predicción del avance en el frente de carbonatación para estructuras de concreto reforzado. Razón por la cual, en este capítulo ahondaremos en los estudios previos que permitieron desarrollarla, mencionando el conocimiento existente de los mecanismos de deterioro y propuestas de predicción anteriores, mismas, que apoyadas con resultados experimentales que utilizaron las pruebas descritas en la parte de introducción, permitieron desarrollar la propuesta mencionada.

2.1.- La industria del cemento y la búsqueda de la sustentabilidad.

El consumo de cemento se ha convertido en un indicador de crecimiento socioeconómico [38]; no obstante, por razones ecológicas existe una tendencia orientada a transformar la industria del cemento, ya que la producción de cada tonelada de clínker de cemento portland libera aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono al ambiente (0.8 ton de CO₂ para las plantas más eficientes) [39,40].

De acuerdo a la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), entre 900 y 1100 kg de CO₂ son emitidos por cada 1000 kg de cemento portland producido, dependiendo esto del tipo de combustible, los ingredientes crudos usados y la eficiencia energética de la planta de cemento [41]. Por su parte la Portland Cement Association (PCA), reporta que en promedio 927 kg de CO₂ son expulsados a la atmósfera por cada 1000 kg de cemento portland [42].

En la producción de concreto se utiliza alrededor de un 7% a 15% de cemento por peso, lo que resulta en una emisión de CO₂ aproximada de 100 a 300 kg por cada metro cúbico de concreto. Cantidad que está directamente relacionada con el monto de cemento portland usado [43]. Cabe hacer mención, que una significativa proporción de CO₂ es reabsorbido dentro del concreto durante su vida útil a través de la carbonatación que afecta la durabilidad de la estructura. Se estima que entre 33% y 57% del CO₂ emitido de la calcinación será reabsorbido a través de la carbonatación de las superficies

de concreto en cerca de 100 años [44].

El actual escenario indica un incremento en las necesidades de cemento y ante la gran cantidad de insumos requeridos para la producción de este material, no sólo de combustibles, sino también de materias primas, permite predecir que las industrias del cemento portland y del concreto deben evolucionar con el fin de contribuir a mitigar el deterioro del ambiente.

En este sentido se ha propuesto que el concreto deberá certificarse para satisfacer la calidad y la durabilidad requeridas [45], para ello el reto consiste en implementar un mejor control de calidad bajo una tecnología de concreto avanzada que esté soportada en un mayor conocimiento científico [46]. Ante esto, los cementos compuestos destacan por su característica de contribuir a la reducción de emisión de CO₂, en ellos los materiales cementantes complementarios tales como: las escorias granuladas del alto horno, el humo de sílice y las cenizas volantes permiten que la industria sustituya grandes cantidades de cemento portland por unidad de volumen de concreto [47], reduciendo por consiguiente la generación de gases contaminantes y contribuyendo a generar procesos sustentables [48].

Estos subproductos industriales que de otra manera terminarían en grandes depósitos vertidos como basura son llamados de varias maneras pero en esta ocasión los nombraremos adiciones minerales.

El uso de las adiciones minerales en combinación con el cemento portland mejoran las propiedades tanto en estado fresco como endurecido de los concretos; incrementando la resistencia final y la durabilidad de los mismos, además, reducen las emisiones de CO₂ hasta en un 70%, pero los valores típicos de sustitución sin desmejorar sus características tecnológicas rondan de 15 a 40% [49].

No obstante, al ser el proceso de endurecimiento más lento que el del cemento portland y consumir portlandita (Ca(OH)₂) durante su hidratación, difícilmente se logran las mismas resistencias a edades tempranas y queda la duda razonable sobre consumo máximo de adición sin afectar la durabilidad final ante el ingreso del CO₂.

También es cierto que es común encontramos con adiciones minerales con distinto grado de fase vítrea, lo que provoca que recurrentemente sea necesaria una activación de las mismas antes de poder ser usadas con resultados satisfactorios.

Los estudios actuales en este campo están encaminados a desarrollar concretos con la mayor cantidad de adiciones minerales posible (entre ellas la ceniza volante); Esto debido a las propiedades benéficas que influyen en el concreto y a la economía que se logra al ahorrar la mayor cantidad posible de cemento.

Conscientes, de que sí logramos fabricar un concreto más durable obtendremos menos costos de mantenimiento y reemplazo cuando lo comparamos con otros productos de construcción; contribuyendo de esta manera, al valor ambiental del material; La presente investigación evaluó en laboratorio el comportamiento de nueve matrices cementantes base cemento portland, considerando tres relaciones agua/material cementante (0.46, 0.59 y 0.70) y tres porcentajes de sustitución (0%, 25% y 50%) de ceniza volante procedente de la Central térmica de Andorra (Teruel, Aragón, España) a fin de determinar su comportamiento después de un considerable tiempo de curado (56 días) ante efectos de carbonatación, ataque por cloruros mediante inmersión en agua de mar sintética e inclusión de ión cloruro en el agua de mezcla a través de la técnica de resistencia a la polarización y la prueba de migración de cloruros NT BUILD 492.

Finalmente, es interesante mencionar que en la literatura consultada existen datos que se contraponen entre sí. Por tal motivo, la finalidad de esta investigación es aportar conocimiento basado en una investigación rigurosa, sobre la durabilidad de este tipo de concretos, ofreciendo una perspectiva completa de las mezclas seleccionadas ante los dos mecanismos de corrosión más comunes: cloruros y carbonatación.

2.1.1.- Efectos de la ceniza volante dentro del concreto.

La ceniza volante, es el desecho de la quema de carbón en las plantas generadoras de electricidad, donde generalmente de un 15% a un 20% del carbón quemado toma la forma de ceniza volante. En un principio, la ceniza volante era enviada a depósitos para ser confinada o simplemente depositada en enormes espacios al aire

libre contaminando de esta forma el ambiente, sin embargo, hoy en día en varios países una significativa porción está incluida en el concreto. En 1989, una encuesta de la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), mostró que el promedio de la cantidad de ceniza volante usada por metro cubico de concreto era aproximadamente de 50 kg; En 2002, este número se incrementó a alrededor de 80 kg, esencialmente reemplazando al cemento portland.

La ceniza volante mejora la trabajabilidad en estado fresco, reduce el calor de hidratación y el agrietamiento [50,51]; Razón por la cual, estos cementos son aptos para ser empleados en elementos de concretos masivos. En su composición, la existencia de adiciones activas que contienen SiO_2 y Al_2O_3 permite a la ceniza volante reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que se encuentra en el cemento, dando lugar a silicatos cálcicos hidratados y aluminatos cálcicos hidratados, ambos con características conglomerantes [51-55]. Por lo tanto, el empleo de estas adiciones activas también se traduce en una mejora de las propiedades de los concretos respecto a los fabricados con cemento portland. Un ejemplo de ello, es la reducción de forma considerable del coeficiente difusión de cloruros en concretos, especialmente a mayores edades [52,53,56-58] como consecuencia del refinamiento de la microestructura y la densificación de la pasta de cemento [52,53,56-67].

No obstante, se espera que su uso se vea reducido en el futuro a causa de las nuevas tecnologías que se están empleando en las centrales térmicas. Por otro lado, autores apuntan [55] que a medida que aumenta el contenido de ceniza, se reduce el desarrollo de la reacción puzolánica, al no haber suficiente hidróxido de calcio en el sistema para reaccionar con la totalidad de la ceniza volante disponible. Por lo tanto, en este contexto se produciría el desarrollo de una microestructura porosa y habría que establecer el contenido más adecuado de ceniza volante según cada caso.

2.1.1.1.- Actividad puzolánica.

Hasta el momento se han realizado numerosas investigaciones acerca de la actividad de las cenizas volantes, entre las que destaca la llevada a cabo por Wang et al. [55]. Estos autores plantean la hipótesis de que las reacciones de hidratación del clinker

y las reacciones puzolánicas entre los componentes de las cenizas volantes y el Ca(OH)_2 se aceleran una a otra. Por lo que el efecto activo de la ceniza volante se compone de dos partes, por un lado la propia actividad puzolánica de la ceniza volante y por otro el papel que ésta desempeña al estimular la hidratación del cemento. Según este trabajo, si no se añade ceniza volante, únicamente tres cuartas partes del cemento se hidratan al cabo de 1 año de endurecimiento, mientras que si se añade un 60% de ceniza, al cabo de 90 días todo el cemento se ha hidratado, por lo que al aumentar el contenido de ceniza volante, aumenta el grado de hidratación del cemento. De todos modos, esto parece lógico, ya que al tener una menor cantidad de clinker, es normal que se necesite menos tiempo para que se hidrate. En cambio, si la cantidad de clinker es elevada, es lógico pensar que sean necesarios mayores tiempos para que se hidrate totalmente. Wang et al. [55], también apuntan que a medida que aumenta el contenido de ceniza, se reduce el desarrollo de la reacción puzolánica, al no haber suficiente Ca(OH)_2 en el sistema para reaccionar con la totalidad de la ceniza volante disponible.

2.1.1.2.- Microestructura de concretos con ceniza volante.

Como ya se mencionó anteriormente, el empleo de ceniza volante conlleva una serie de cambios en la microestructura de morteros y concretos, que a su vez también afectan a su durabilidad y propiedades mecánicas.

La red de poros de los concretos con adición de ceniza volante es menos refinada a edades tempranas que la de los concretos de cemento portland. No obstante, a edades mayores, se va produciendo una reducción del volumen de los poros de mayor tamaño, lo que se traduce en un progresivo refinamiento de la red porosa [52,53,59,60], dando lugar una microestructura más uniforme que mejora sus propiedades, tales como durabilidad e impermeabilidad [68]. Esta densificación de la red de poros en concretos con ceniza se debe a la formación de silicatos cálcicos hidratados (fases C-S-H) adicionales como producto de las reacciones puzolánicas [56,69]. En la reacción de la ceniza volante con el Ca(OH)_2 también se fijan pequeñas cantidades de agua [54].

El refinamiento de la estructura porosa, se traduce en que el porcentaje de poros de gel (1-10 nm) sea más elevado, mientras que la porosidad capilar (10 nm-1 μm) disminuya de forma significativa [52,60]. Esta circunstancia es importante desde el punto de vista de la durabilidad de los concretos, ya que la porosidad capilar es aquella accesible al agua, y por tanto la que es accesible a los agentes agresivos. El contenido de ceniza volante influye de forma importante en la distribución de los poros por tamaños, de tal modo que los tamaños de poros disminuyen a medida que se incrementa este contenido [68,70]. Además, los coeficientes de absorción capilar y la permeabilidad se verán considerablemente reducidos con el tiempo como consecuencia del desarrollo de las reacciones puzolánicas [71].

A pesar de las diferencias en la estructura de poros, la porosidad total no se ve influenciada sustancialmente por la adición de ceniza volante [52], aunque algunas fuentes indican que se puede producir un aumento de esta porosidad [54], sobre todo en función de la composición y propiedades físicas de la ceniza empleada como adición [60], ya que éstas pueden variar en función de la fuente de procedencia [72]. En la Figura 2.1, elaborada a partir de las investigaciones de Wang et al. [55], se puede observar el aumento de la porosidad total en pastas de cemento a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante, y como independientemente de ese contenido, la porosidad total disminuye con la edad.

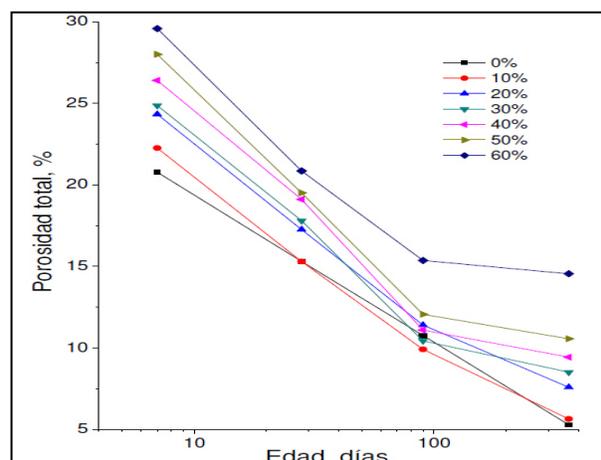


Figura 2.1. Evolución de la porosidad total en pastas de cemento con diferentes grados de sustitución del clinker por ceniza volante (hasta el 60%) hasta 365 días. La gráfica está elaborada a partir de los datos publicados por Wang et al [55].

Al igual que ocurre con las escorias de alto horno, la adición de cenizas volantes también produce una reducción importante de la zona de transición entre el agregado y la matriz de cemento o entre ésta y las armaduras de acero [52].

Esta reducción de la zona de transición es consecuencia de la mayor densidad de la matriz de cemento, a causa de la presencia de un mayor volumen de poros más finos que permiten un mejor empaquetamiento de las partículas, evitando segregaciones en esta zona [52].

Resulta de interés comentar como el a medida que aumenta el grado de finura de la ceniza volante, más densa es la estructura porosa de la pasta, lo cual repercute en su durabilidad y propiedades mecánicas [53,68].

Una vez se ha explicado cómo afecta la adición de ceniza volante a la absorción capilar y a la porosidad efectiva, se va exponer como se traducen estos efectos en la resistencia al ataque de diferentes agentes agresivos.

2.1.1.3.- Resistencia de los concretos con Ceniza volante al ataque por ión cloruro.

En lo que atañe a la difusión de iones cloruro, el uso de concretos con ceniza volante tiene unos efectos importantes. Concretamente, se reduce de forma considerable el coeficiente difusión de cloruros, especialmente a mayores edades, debido fundamentalmente al refinamiento de la microestructura y a la densificación de la pasta [52,53,56-58]. En la Figura 2.2 se representa el descenso del coeficiente de migración de cloruros a medida que aumenta el contenido de ceniza volante. Según Leng et al. [56], las razones por las que la adición de ceniza volante trae consigo un significativo descenso del coeficiente de difusión de cloruros son las siguientes:

- La ceniza volante mejora la distribución de poros por tamaños y la morfología de los poros en el concreto.
- Como producto de las reacciones puzolánicas de la ceniza volante se forma más gel C-S-H, el cual tiene más capacidad para absorber los iones cloruro y para bloquear los posibles caminos en la estructura porosa por los que se lleva a cabo la difusión.

- El número total de iones Ca^{2+} , Al^{3+} , AlOH^{2+} y Si^{4+} en los concretos de ceniza volante es mayor que en los cemento portland, y su concentración también es más elevada. Estos iones poseen una menor habilidad de difusión y restringen el movimiento de los iones cloruro.

- La ceniza volante contiene más C_3A , el cual puede absorber más iones cloruro para formar sal de Friedel ($\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

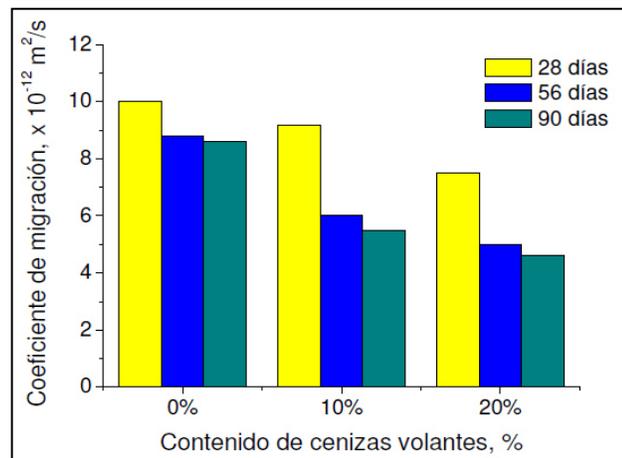


Figura 2.2. Variación del coeficiente de migración de cloruros hasta 90 días en concretos con diferentes contenidos de ceniza volante. Destaca la reducción que produce en este coeficiente el empleo de ceniza volante. La figura se ha extraído de Jain et al [57].

Leng et al. [56], además, indican que los principales caminos para que se produzca la difusión de los iones cloruro en el concreto son los poros interconectados en la pasta, los poros interconectados en el agregado y los poros interconectados en la interfase entre la pasta y el agregado. Generalmente, la permeabilidad del agregado es significativamente más baja que la de la pasta hidratada, así que si la interfase entre el agregado y la pasta no tiene aparentes deficiencias, la mayor difusión se producirá en la pasta. Al emplear ceniza volante en el cemento, se aumenta la compacidad de la pasta, reduciendo de este modo la difusión de cloruros.

Del mismo modo, Leng et al. [56], también apuntan que el coeficiente de difusión de cloruros en concretos con ceniza volante está por debajo de $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$. Esta reducción del coeficiente de difusión de cloruros trae consigo un efecto benéfico importante en la protección de las armaduras respecto a la corrosión inducida por

cloruros, ya que se produce un alargamiento del período de iniciación de la corrosión en el diagrama de Tuutti (Ver Figura 2.3). Esto significa, que se incrementa el tiempo necesario para que los iones cloruro alcancen las armaduras de acero, así como el contenido total de cloruros necesarios para que se produzca corrosión (debido a la mayor capacidad de combinación de cloruros por parte de las cenizas volantes), reduciendo considerablemente el riesgo de que ésta se produzca [52,73] e incrementando la vida útil de las estructuras de concretos con ceniza volante.

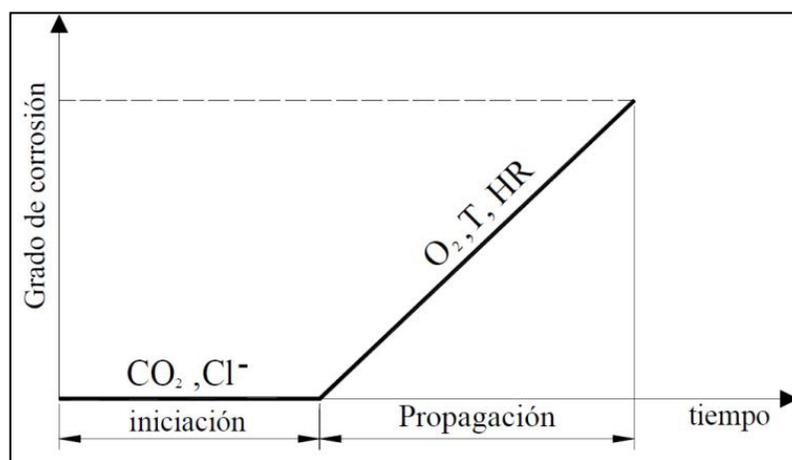


Figura 2.3. Modelo de vida útil de Tuutti para corrosión de armaduras [74].

Esta mayor resistencia frente a la penetración de iones cloruro en los concretos con ceniza volante, ha sido demostrada tanto en numerosas investigaciones realizadas en laboratorio [52,56] como en ambientes y estructuras reales [73,75-78]. Como ejemplo, destacan los trabajos de Thomas et al. [73], en los que bloques de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante (hasta un 50%) fueron expuestos al ambiente de la zona de carrera de mareas en el estuario del Támesis en el Reino Unido, después de 28 días sometidos a un amplio rango de condiciones de curado (temperaturas comprendidas entre 5 y 20°C, y humedades relativas entre 60% y 90%). Al cabo de 10 años, los niveles de cloruros en los concretos con ceniza eran muy reducidos en comparación con los de cemento portland. Además, también concluyeron que las diferentes condiciones de curado hasta 28 días tuvieron un efecto muy pequeño en los perfiles de cloruros a largo plazo, debido a la mayor influencia de la prolongada exposición al ambiente marino.

En otras publicaciones [52], se ilustra el efecto de la adición de ceniza volante en la resistencia al ingreso de cloruros del concreto comparándolo con el efecto que tiene la relación a/c , ya que es uno de los parámetros más utilizados tradicionalmente para estimar la calidad del concreto. Si se comparan los coeficientes de difusión de cloruros en dos concretos de cemento portland mezclados con relaciones a/c 0.55 y 0.40 (véase Tabla 2.1), después de 6 meses de endurecimiento en cámara húmeda, este coeficiente es aproximadamente un 60% inferior en el concreto de relación a/c 0.40 ($4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) respecto al de 0.55 ($10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) [52]. No obstante, comparando en las mismas condiciones (edad y ambiente de endurecimiento) un concreto con un 25% de ceniza volante (similar al actual CEM II/B-V 42,5) y un concreto de cemento portland, ambos con relación a/c 0.4, el coeficiente de difusión de cloruros es un 95% inferior en el concreto con ceniza ($0.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) respecto al de cemento portland ($4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) [52]. Otros trabajos [79], indican que al cabo de 75 días bajo condiciones de laboratorio (20°C y 100% HR), los coeficientes de difusión de cloruros era iguales o menores para los cementos con mayor contenido de ceniza volante, respecto a los que presentaban menores contenidos. En base a todos estos datos, se manifiesta claramente que la adición de ceniza volante tiene una mayor influencia en la resistencia al ingreso de cloruros que la relación a/c .

Con ello, se demuestra que empleando cementos con ceniza se pueden construir estructuras de concreto armado durables con nada más que el concreto para proteger el acero, incluso en los ambientes naturales más agresivos [52].

Finalmente, hay que hacer hincapié en que los efectos de la adición de ceniza volante en la resistencia al ingreso de cloruros y el consiguiente incremento del período de iniciación de la corrosión, son muy dependientes de la cantidad de adición empleada. Por lo tanto, para que haya efectos destacables, es necesario añadir elevados porcentajes de ceniza, hasta en torno al 50% [52,56,73].

Tabla 2.1. Comparativa de los coeficientes de difusión de cloruros ($\times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) para un concreto de cemento portland y otro con un 25% de ceniza volante, después de 6 meses de endurecimiento a 20°C y 100% HR [52].

Relación a/c	Cemento portland CEM I 42.5 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	Cemento con ceniza volante CEM II/B-V 42.5 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)
0.4	4	0.2
0.55	10	0.5

2.1.1.4.- Resistencia de los concretos con Ceniza volante ante el ataque por carbonatación.

La carbonatación es uno de los principales inconvenientes del uso de cementos con adiciones, tanto de cenizas volantes como de escorias de alto horno, debido a su mayor tasa de carbonatación respecto a la observada en el cemento portland [52,78], quedando, nuevamente, la duda sobre el uso máximo de adición sin afectar la durabilidad final.

Según Bamforth [78], esto se debe a que las comparaciones entre la resistencia a la carbonatación de los cementos con cenizas volantes y la del cemento portland se realizan para las mismas relaciones a/c. Este autor indica que si estos estudios se realizan en ambientes donde el secado sea lento y sí se considera el mismo grado de resistencia mecánica, en lugar de la misma relación a/c, la diferencia a largo plazo (por ejemplo a varios años) es menos pronunciada, habiendo pequeña o no habiendo diferencia en las profundidades de carbonatación entre los cementos con ceniza volante y el cemento portland. Bijen [52] también indica al respecto algo similar, concretamente afirma que mientras se mantenga un elevado contenido en humedad en los concretos con cenizas, sus profundidades de carbonatación serán similares a las del cemento portland, tal como se ha observado en numerosas estructuras reales. No obstante, los estudios de Bamforth [78] en concretos con un 30% de ceniza volante, endurecidos a la intemperie en Bahrein (Golfo Pérsico), bajo las condiciones de un clima cálido, han detectado que la carbonatación de estos concretos se produce más rápidamente que para los de cemento portland. El citado autor atribuye estos resultados al secado más rápido que

experimentan los concretos en las condiciones más calurosas del Golfo Pérsico, que trae consigo un contenido menor de humedad en el concreto.

2.1.1.5.- Resistencia a compresión de los concretos con Ceniza volante.

La composición y las propiedades físicas de las cenizas volantes influyen también en las propiedades resistentes de los concretos [71,72]. Por su parte, la composición química de las cenizas varía dependiendo de la fuente de donde procedan, mientras que en las propiedades físicas, el grado de finura de las cenizas volantes desempeña un papel importante en el desarrollo de resistencias mecánicas, de tal modo, que la adición de cenizas más refinadas mejora estas resistencias [71].

Por lo que respecta a las propiedades resistentes de los concretos de cementos con adición de ceniza volante, se ha observado que a edades tempranas las resistencias a compresión de estos concretos con ceniza son mucho menores que las de cemento portland [51,54,80]. Además, a medida que aumenta el contenido de ceniza, la resistencia a compresión a 28 días decrece tanto en pastas como en morteros y concretos [51,58]. Tal como se puede consultar en la Figura 2.4 Demirboga [80] apunta que la resistencia a compresión en concretos con entre un 20% y un 30% de ceniza volante es un 25% menor a 28 días que la de los de cemento portland.

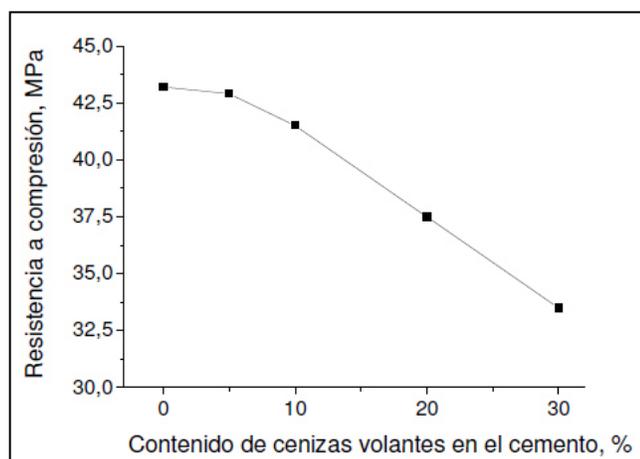


Figura 2.4. Resistencia a compresión en pastas de cemento en función su contenido de ceniza volante (hasta el 30%), a la edad de 28 días y curadas durante su fraguado y endurecimiento sumergidas en agua a 25°C. La gráfica ha sido elaborada a partir de los datos indicados por Nochaiya et al. [51].

No obstante, a medida que se incrementa el tiempo de endurecimiento, los concretos con ceniza volante experimentan una importante ganancia de resistencia a compresión [54,80]. Según Papadakis [54], al cabo de 6 meses de endurecimiento, los morteros con grados de sustitución de clinker por ceniza del 10% y del 20% presentaban una resistencia a compresión superior a la de los morteros de cemento portland. En el caso de los morteros con un 30% de ceniza volante, era necesario 1 año de endurecimiento para superar las resistencias a compresión de los morteros de cemento portland. En las investigaciones de Demirboga [80] se acortan más estos tiempos, y por ejemplo se indica que a 56 días de endurecimiento los concretos con un 20% de ceniza ya tienen más resistencia a compresión que los de cemento portland. A modo ilustrativo, se incluye la Figura 2.5 donde se representa la evolución de la resistencia a compresión hasta 90 días observada por Chindaprasirt et al. [60]. En pastas de cemento portland y con una adición de ceniza volante de un 20% y un 40%. Destaca el hecho de que a 90 días la resistencia a compresión del cemento con un 40% de ceniza es el doble de la que presentaba a 7 días.

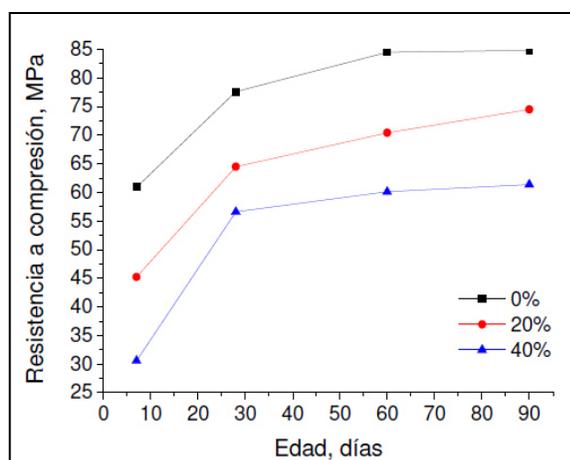


Figura 2.5. Evolución de la resistencia a compresión hasta 90 días observada por Chindaprasirt et al. [60] en pastas de cemento portland y con una adición de ceniza volante de un 20% y un 40%.

Esta ganancia más tardía de resistencias en los cementos con ceniza volante está relacionada con la evolución de su red porosa, y se justifica por el retardo que tiene el desarrollo de las reacciones puzolánicas de la ceniza volante [51,54], que ya fue ampliamente descrito al hablar de la microestructura de los cementos con esta adición.

2.2.- Modelos de predicción de la vida útil de las estructuras.

Es indudable que teniendo definiciones más completas de durabilidad y vida de servicio acordes a la situación geográfica y condición climática de cada sitio, los modelos serán más precisos en sus predicciones [6].

Sin embargo, debido a los efectos del cambio climático, cada vez resulta más difícil predecir en la vida de servicio de las estructuras, ya que es complicado incluir en un modelo, los cambios en el medio ambiente que está en constante evolución y, por tal motivo, las afectaciones sobre las estructuras serán diferentes a través del tiempo [6].

2.2.1.- La ecuación de la raíz cuadrada del tiempo.

La carbonatación en concreto es considerada un fenómeno de difusión, donde el CO₂ va penetrando del exterior al interior debido a la diferencia de concentraciones entre dos puntos del medio.

Entonces, como la concentración de CO₂ varía con la posición a lo largo del eje X, si nombramos J al número efectivo de partículas que atraviesan en la unidad de tiempo un área unitaria perpendicular a la dirección en la que tiene lugar la difusión. La ley de Fick afirma que la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración (ecuación 2.1).

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad \text{ecuación 2.1}$$

Donde, D (coeficiente de difusión), es decir, la constante de proporcionalidad que depende tanto del soluto como del medio en el que se disuelve. Por su parte, la Figura 2.6. Muestra de manera esquemática el fenómeno de difusión mencionado.

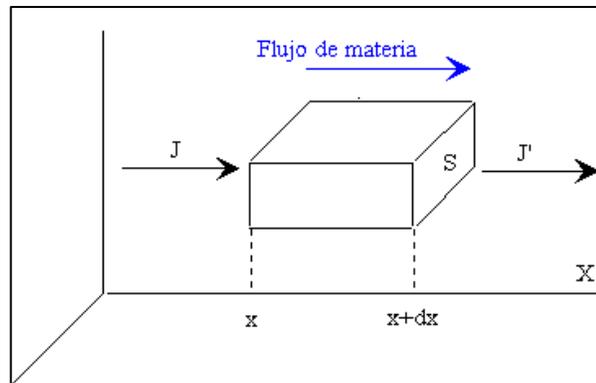


Figura 2.6. Esquema del proceso de difusión de acuerdo a la ley de Fick.

La acumulación de partículas en la unidad de tiempo que se produce en el elemento de volumen Sdx es igual a la diferencia entre el flujo entrante J_S , menos el flujo saliente $J'S$, (ver ecuación 2.2).

$$JS - J'S = \frac{\partial J}{\partial x} Sdx \quad \text{ecuación 2.2}$$

Por su parte, la acumulación de partículas en la unidad de tiempo es:

$$(Sdx) \frac{\partial n}{\partial t} \quad \text{ecuación 2.3}$$

Si Igualamos la ecuación 2.2 y la ecuación 2.3 y utilizamos la Ley de Fick obtenemos la ecuación 2.4:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial n}{\partial x} \right) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad \text{ecuación 2.4}$$

Ahora, si el coeficiente de difusión D no depende de la concentración, obtenemos la ecuación diferencial en derivadas parciales que describe el fenómeno de la difusión:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad \text{ecuación 2.5}$$

Considerando el problema como un fenómeno de difusión unidimensional donde una masa M de soluto está situada en el origen de un medio unidimensional representado por el eje X (Ver Figura 2.7), la solución de la ecuación diferencial da la concentración en los puntos x del medio en cada instante de tiempo t (ecuación 2.6).

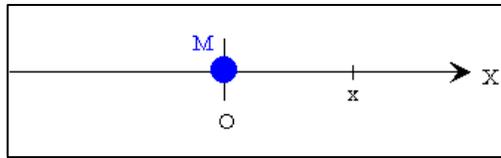


Figura 2.7. Esquema del proceso de difusión unidimensional.

$$n(x, t) = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad \text{ecuación 2.6}$$

Si integramos y aplicamos límites, puede comprobarse:

$$\int_{-\infty}^{\infty} n(x, t) dx = 2 \int_0^{\infty} \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) dx = M \quad \text{ecuación 2.7}$$

Teniendo como resultado:

$$\int_0^{\infty} \exp(-\alpha x^2) dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad \text{ecuación 2.8}$$

Que si es aplicado al fenómeno de desplazamiento en un medio cuadrático, obtenemos:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{M} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 n(x, t) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} x^2 \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) dx \quad \text{ecuación 2.9}$$

Integramos por partes y obtenemos:

$$\int_0^{\infty} x^2 \exp(-\alpha x^2) dx = \frac{1}{2\alpha} \left(-x \exp(-\alpha x^2) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} \exp(-\alpha x^2) dx \right) = \frac{1}{4\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$$

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} x^2 \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) dx = 2Dt \quad \text{ecuación 2.10 y 2.11}$$

Finalmente, debajo de cada curva, se traza un segmento cuya longitud es igual al doble de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los desplazamientos de las partículas y mide la extensión efectiva de las partículas en el medio (ecuación 2.12).

$$\sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{2Dt} \quad \text{ecuación 2.12}$$

Que es la conocida ecuación de “K” por la raíz cuadrada del tiempo:

$$x = K\sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.13}$$

Es necesario hacer mención, que aunque por simplificación el factor K aparenta ser un valor fijo, en la realidad depende una buena cantidad de factores que incluyen tanto las propiedades del material como las condiciones de exposición; Factores que inclusive son variables en función del tiempo.

2.2.2.- Modelos para predecir el avance en el frente de carbonatación basados en la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo.

En esencia, las propuestas para predecir el fenómeno de carbonatación en las estructuras de concreto se enfocan en desglosar en factores el coeficiente de difusión K. De esta manera, al incluir de manera independiente mayor cantidad de variables, se logra en algunos casos una mejor aproximación. Con la intención de conceptualizar de manera adecuada la evolución de las propuestas de predicción del avance de carbonatación, a continuación se describen las propuestas encontradas en la literatura:

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
1991	Vagelis G. Papadakis, Costas G. Vayenas y Michael N. Fardis [81].	Fundamental Modeling and Experimental Investigación of Concrete carbonation	ACI Materials Journal

Los autores proponen:

$$Xc = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^c [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}} t \quad \text{ecuación 2.14}$$

Dónde:

Xc = profundidad de carbonatación; No indica unidades, aparentemente está en m.

D_{e,CO_2}^c = difusividad efectiva del CO_2 en m^2/s .

$[CO_2]^0$ = concentración molar de CO_2 en la fase gaseosa de los poros en moles por unidad de volumen de poro de aire.

$[Ca(OH)_2]^0$ = concentración de portlandita en moles por unidad de volumen de concreto.

$[CSH]^0$ = concentración de silicatos de calcio hidratados en moles por unidad de volumen de concreto.

$3[C_3S]^0$ = concentración de silicato tricálcico en moles por unidad de volumen de concreto.

$[C_2S]^0$ = concentración de silicato dicálcico en moles por unidad de volumen de concreto.

Esta ecuación es de las pocas que considera en su denominador la totalidad de la concentración molar de CaO en la forma de materiales carbonatables. Los autores además, describen y modelan de manera muy adecuada los procesos de carbonatación de las fases balanceando masas para lograr un equilibrio de las velocidades de reacción. No obstante, la utilización de la ecuación se vuelve relativamente complicada ante la necesidad de establecer las concentraciones de entrada.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
1996	Lars-Olof Nilsson [82].	Interaction between microclimate and concrete - a prerequisite for deterioration	Construction and Building Materials

El objetivo del artículo se centra en el efecto de los microclimas en la penetración de los agentes agresivos. Los autores presentan, aunque sin indicar su fuente, la siguiente ecuación:

$$x_{CO_2} = \sqrt{2D_{CO_2} \frac{C_{CO_2}}{C_{Ca}}} \sqrt{t} = k\sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.15}$$

Dónde:

x_{CO_2} = profundidad de carbonatación debido a CO₂

D_{CO_2} = coeficiente de difusión de CO₂

C_{CO_2} = concentración de dióxido de carbono

C_{Ca} = cantidad de materia carbonatable

t = tiempo

Los autores no indican unidades.

En su trabajo mencionan que debido a las variaciones climáticas, que no son tomadas en cuenta, la ecuación 2.15 no es del todo válida y otro procedimiento debe ser usado. Además, señalan que Bakker [83] y Hergenröder [84] *proponen excluir de la solución los periodos de tiempo donde el concreto está muy húmedo para que ocurra el proceso de difusión*. Véase la Figura 2.8.

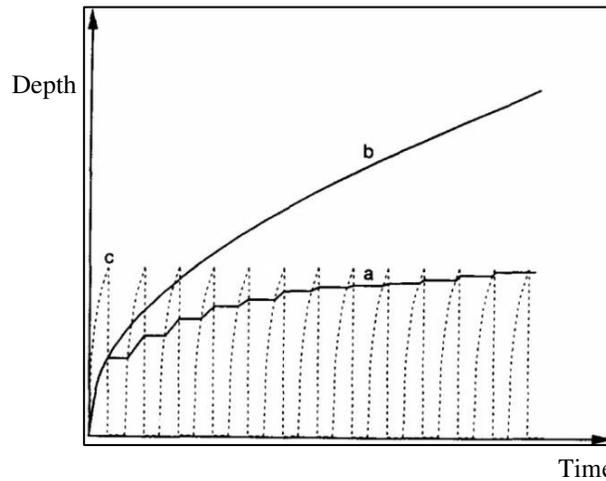


Figura 2.8. Carbonatación durante el proceso de secado y mojado (a), comparado con carbonatación si no ocurre el proceso de mojado (b). Profundidad de secado en cada ciclo (c).

De acuerdo a los autores [83,84], si se toman en cuenta las variaciones climáticas, de manera general, se puede describir una mejor aproximación al proceso mediante la ecuación:

$$\frac{dx_{CO_2}}{dt} = \frac{C_{CO_2}}{C_{Ca}} \frac{1}{R_{CO_2}} \quad \text{ecuación 2.16}$$

Donde R_{CO_2} es la resistencia a la difusión del CO_2 dependiente de la humedad para un concreto con un espesor x_{CO_2} .

Entonces:

$$R_{CO_2} = \int_{x=0}^{x=x_{CO_2}} \frac{dx}{D_{CO_2}(RH(x))} \quad \text{ecuación 2.17}$$

Además, se menciona que el coeficiente de difusión D_{CO_2} varía con el contenido de humedad (RH) del concreto carbonatado e inclusive el monto de material carbonatable, también puede aparecer como función del Contenido de humedad (RH). Lo cual ofrece un acercamiento cuando tenemos variaciones climáticas en el estudio.

No obstante, continuamos con la incertidumbre en el cálculo de la cantidad de material carbonatable y aunque ya se incluyen factores climáticos, la solución solo se presenta de manera esquemática.

Por su parte, la idea de excluir el tiempo en el que la estructura se encuentra en condiciones donde teóricamente la carbonatación no ocurre ha servido de base para la propuesta de este trabajo; La manera en cómo ha sido rescatada esta idea será discutida más adelante.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
1999	S. K. Roy, K. B. Poh, D. O. Northwood [85].	Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies	Building and Environment

El trabajo reporta ensayos acelerados de durabilidad que fueron diseñados para examinar los efectos de los niveles de humedad, grado de concreto y tamaño de poro en la profundidad de carbonatación. En su discusión mencionan la siguiente ecuación que fue propuesta por Brown [86].

$$d = (kt^{0.5})/S \quad \text{ecuación 2.18}$$

Dónde:

d = profundidad de carbonatación en mm.

k = constante de velocidad de carbonatación mm/año^{1/2}

t = tiempo en años

S = resistencia a compresión (el autor no aclara las unidades, probablemente son MPa)

Aunque el autor realiza comparaciones de sus mezclas, no muestra de manera clara la validez de la ecuación, dejando la duda sobre la compatibilidad de las unidades utilizadas en la formula.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2000	Linhua Jiang, Baoyu Lin, Yuebo Cai [87].	A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete	Cement and Concrete Research

Los autores presentan un modelo para estimar la velocidad de carbonatación que considera el efecto de la ceniza volante utilizada en grandes cantidades dentro del concreto. Partiendo del modelo presentado por Jiang et al. [88]:

$$x = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W}{r_c C} - 0.34} \sqrt{\frac{C_0}{r_{HD} r_c C}} \sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.19}$$

Dónde:

x = es la profundidad de carbonatación (mm)

RH = es la humedad relativa

W = es el contenido de agua (kg/m^3)

C = es el contenido de cemento (kg/m^3)

C_0 = es la concentración de CO_2 en %

r_{HD} = es el coeficiente de grado de hidratación

r_c = coeficiente del tipo de cemento

t = tiempo de exposición en días

El propio autor menciona que dicha ecuación no es del todo válida para concretos con alto contenido de ceniza volante, debido a que los grados de hidratación son muy distintos de un cemento convencional, a lo cual propone la siguiente ecuación:

$$x = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/B^* - 0.34}{\alpha k' C}} C_0^n \sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.20}$$

Dónde:

x = es la profundidad de carbonatación (mm)

RH = es la humedad relativa

α = es el grado de hidratación del cemento

C_0 = es la concentración de CO_2 en %

t = tiempo de exposición en días

C = es el contenido de cemento (kg/m^3)

n = parámetro relativo al sistema de poro del concreto, su valor fluctúa entre 2.0 y 2.1

k' = coeficiente relativo a la reactividad de carbonatación que se calcula a partir de:

$$k' = 1 - \beta k \quad \text{ecuación 2.21}$$

β = es el grado de hidratación de la ceniza volante

k = no se indica implícitamente

W/B^* = es la relación efectiva de agua/cemento que se puede calcular a través de:

$$W/B^* = \frac{W}{C+F'} \quad \text{(Para concretos con alto contenidos de ceniza volante)} \quad \text{ecuación 2.22}$$

Dónde:

W = es el contenido de agua (kg/m^3)

C = es el contenido de cemento (kg/m^3)

F' = es el contenido de Ceniza volante que puede hidratarse

$$O \quad W/B^* = \frac{1-M}{1-m} \frac{W}{C+F'} \quad \text{ecuación 2.23}$$

(Para concretos con bajos contenidos de CV)

Dónde:

m = es el contenido de ceniza volante en %

M = es el máximo contenido de ceniza volante que puede ser hidratado en %, el cual se obtiene mediante la ecuación 2.24:

$$M = (C_1 - 0.93S_1 - 0.55A_1 - 0.35F_1 - 0.70\hat{S}_1) / (0.93(S_2 - S_1) + 0.55(A_2 - A_1) + 0.35(F_2 - F_1) + 0.70((\hat{S}_2 - \hat{S}_1) - (C_2 - C_1))) \quad \text{ecuación 2.24}$$

Donde, C_1 , S_1 , A_1 , F_1 y \hat{S}_1 son los contenidos de CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y SO₃ en el cemento respectivamente. Y C_2 , S_2 , A_2 , F_2 y \hat{S}_2 son los contenidos de CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y SO₃ en la ceniza.

El problema se presenta debido a la aparición de factores a suponer, así como lo complicado de la determinación de los grados de hidratación y contenidos de materiales del cemento y la ceniza volante en cada caso.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2002	Yves F. Houst, Folker H. Wittmann [89].	Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation	Cement and Concrete Research

Los autores realizan una comparativa entre los perfiles de carbonatación formados para distintos tipos de concreto, rescatando la siguiente ecuación que es la aplicación de la primera ley de Fick después de la integración, de acuerdo a Kropp [90]:

$$x = \sqrt{\frac{2Dc}{a}} \sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.25}$$

Dónde:

x, es la profundidad de carbonatación para un tiempo “t”, D es la difusividad efectiva del CO₂ en el concreto, c es la concentración del CO₂ en la atmosfera y a es la concentración de los compuestos reactivos. Escrita de otra forma tenemos la misma ecuación de la raíz cuadrada del tiempo:

$$x = A\sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.26}$$

$$\text{Donde } A = \sqrt{\frac{2Dc}{a}} \quad \text{ecuación 2.27}$$

No obstante, el propio autor menciona que para aplicar la primera ley de Fick se realizan varias simplificaciones, por ejemplo el caso de D que no es constante y además, depende de un buen número de factores como el grado de hidratación, la temperatura y las propiedades intrínsecas del concreto.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2003	M. A. Sanjuán, C. Andrade and M. Cheyrezy [91].	Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions	Advances in Cement Research

El objetivo del artículo es establecer una comparación entre los ensayos de carbonatación acelerados y naturales; Para la etapa de comparación fueron seleccionados tres modelos:

El primero propuesto por Tuutti [17] uno de los más antiguos modelos teóricos de fronteras móviles, donde es posible calcular el coeficiente de difusión D_{CO_2} que posteriormente es usado para calcular la carbonatación a cualquier tiempo:

$$\frac{c_s}{c_x} = \sqrt{\pi} \frac{x\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} \exp\left(\frac{x^2}{2Dt}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{x\sqrt{t}}{2\sqrt{D}}\right) \quad \text{ecuación 2.28}$$

Dónde:

C_s = es la concentración de CO_2 en el ambiente, ($kmol/m^3$)

C_x = es la concentración de CO_2 en la discontinuidad, ($kmol/m^3$)

D = es el coeficiente de difusión del CO_2 (cm^2/s)

El modelo asume difusión no estacionaria y que el coeficiente D_{CO_2} varia únicamente en función de la humedad en el concreto, razón por la cual Tuutti ofrece diagramas de difusión de oxígeno como función de la humedad relativa (RH).

Para el cálculo del material alcalino en el concreto, se propone la siguiente formula:

$$C_x = \frac{C_a HD c}{56} \quad \text{ecuación 2.29}$$

Dónde:

C_a = es la concentración de CaO en el cemento (kmol/m^3)

HD = es el grado de hidratación adimensional

c = es el monto de cemento por metro cubico de concreto, 56 es la fórmula del peso del CaO.

El segundo modelo, que presenta este artículo fue propuesto por Bakker [83] y asume condiciones de flujo estacionario quedando formulado de la siguiente manera:

$$x_n = \sqrt{\frac{2D_c}{a}(c_1 - c_2) \left[t_{d1} - t_{d2} - \left(\frac{x_1}{b}\right)^2 + t_{d3} - \left(\frac{x_2}{b}\right)^2 \dots + t_{dn} - \left(\frac{x_{n-1}}{b}\right)^2 \right]} \quad \text{ecuación 2.30}$$

Dónde:

$$a = Ca HD c \ 44/66 \quad y \quad b = \sqrt{(2D_v/b)(c_3 - c_4)} \quad \text{ecuación 2.31}$$

x es la profundidad de carbonatación en metros; a es la concentración de CaO en el concreto (mol/kg); b es el agua evaporable del concreto (kg/m^3); D_c es el coeficiente de difusión del CO_2 (m^2/s) para una humedad relativa (RH) dada; D_v es el coeficiente de difusión del vapor de agua en el concreto (m^2/s); $C_1 - C_2$ es la diferencia de concentración de CO_2 entre la atmosfera y el concreto (mol/kg); $C_3 - C_4$ es la diferencia de concentración de humedad entre el aire y el concreto (mol/kg); finalmente t es el tiempo en años.

Este modelo toma en cuenta la diferencia de humedad y considera que la carbonatación solo progresa cuando el concreto está seco.

Finalmente, el tercero es una relación empírica propuesta por Parrot [92]:

$$x = 64 \frac{k^{0.4} t^{0.5}}{c^{0.5}} \quad \text{ecuación 2.32}$$

Donde, c es la concentración de CaO en el concreto (mol/kg); x es la profundidad de carbonatación en m; k el coeficiente de permeabilidad a oxígeno en m^2/s y t es el tiempo en años.

Los tres modelos ofrecen una forma relativamente sencilla de calcular la profundidad de carbonatación, sin embargo, no consideran de manera adecuada los cambios de clima en un concreto real. No obstante, Bakker busca una aproximación al tomar en cuenta la diferencia de humedad.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2003	Woo-Yong Jung, Young-Soo Yoon, Young-Moo Sohn [93].	Predicting the remaining service life of land concrete by Steel corrosion	Cement and Concrete Research

El estudio busca estimar la vida residual de servicio de distintas estructuras. Los autores presentan la siguiente ecuación, que no es más que otra forma de la ecuación de $x = k\sqrt{t}$. Sin embargo, hace su aparición el exponente n, propuesto por Parrot [3,94] y que depende de la humedad relativa:

$$x = kT_{ini}^n \quad \text{ecuación 2.33}$$

$$n = 0.02536 + 0.01785r - 0.0001623r^2 \quad \text{ecuación 2.34}$$

El autor enumera los factores de los cuales depende K, como son: el tipo de cemento, la relación a/c y la humedad relativa, entre otros. Menciona que r es el valor de la humedad relativa, pero n = 0.5 cuando la r (HR) es menor que 60%.

Esta es una ecuación muy sencilla que toma en cuenta las condiciones de humedad, sin embargo, las variables de las cuales depende K se consideran constantes, lo cual en una estructura real no ocurre.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2007	In-Seok Yoon, Oguzhan Copuroglu, Ki-Bong Park [30].	Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete	Atmospheric Environment

El autor es el primero de la bibliografía consultada que incluye el efecto del cambio climático en la carbonatación, su trabajo sentó precedente en trabajos futuros. Su exposición, parte del modelo de difusión de CO₂ propuesto por CEB (1997) [95] que se basa en la primera ley de Fick que a continuación se muestra:

$$x^2 = \frac{2D}{a} (C_1 - C_2)t \quad \text{ecuación 2.35}$$

Menciona, además, que si se asume que el frente de carbonatación es igual que la

profundidad de carbonatación y que la concentración de CO₂ al final de la profundidad de carbonatación es igual a cero, obtenemos la siguiente simplificación:

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}}{a}} C_{CO_2} t \quad \text{ecuación 2.36}$$

Dónde:

X_c = profundidad de carbonatación (cm)

D_{CO_2} = coeficiente de difusión de CO₂ (cm²s⁻¹)

C_{CO_2} = concentración atmosférica de CO₂ (g cm⁻³)

a = cantidad de CO₂ para completa carbonatación

t = tiempo en segundos

La ecuación anterior es nuevamente una variante aunque mucho más sofisticada de la ecuación de K por la raíz cuadrada del tiempo:

$$X_c = K\sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.37}$$

Donde “a” es función de la capacidad de enlace del CO₂ y puede ser calculada como la relación entre el CaO en el cemento y el grado de hidratación en condiciones atmosféricas, tal como se muestra en la ecuación:

$$a = 0.75 \times C_e \times CaO \times \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \text{ (kg m}^{-3}\text{)} \quad \text{ecuación 2.38}$$

Dónde:

C_e = contenido de cemento (kg m⁻³)

CaO = contenido de CaO en el cemento (kg m⁻³)

α_H = grado de hidratación

M = las respectivas masas molares del CO₂ (44 g/mol) y del CaO (56 g/mol)

En su propuesta, el autor incluye el siguiente factor $\left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}$ que toma en cuenta el efecto del micro clima en la estructura donde, básicamente considera los periodos de mojado y secado en la estructura, propone, además, incluir el efecto de la humedad relativa en función del tiempo y hacer también la concentración atmosférica de CO₂ (C_{CO_2}) dependiente del tiempo. Dejando la ecuación propuesta de la siguiente manera:

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(RH,t)}{a(C_{CO_2})}} C_{CO_2}(t) t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m} \quad \text{ecuación 2.39}$$

Donde n_m es un factor de edad de las condiciones micro-climáticas, asociado a la

frecuencia de los ciclos de humedecimiento y secado ($n_m = 0$ para estructuras exteriores protegidas, $n_m = 0.3$ para estructuras exteriores sin protección), t_0 es el periodo de referencia, por ejemplo 1 año.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2009	Emmanuel Rozière, Ahmed Loukili, Francois Cussigh [96].	A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation	Construction and Building Materials

En su trabajo propone una metodología base para el diseño por durabilidad del concreto expuesto a carbonatación, asimismo, recupera la ecuación propuesta por Vagelis G. Papadakis (1991) [81]. Sin embargo, equivoca los coeficientes usados en el denominador.

La siguiente es la ecuación que aparece en el artículo publicado por Emmanuel Rozière, citando a Vagelis G. Papadakis:

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^c [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 0[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 0[C_2S]^0}} t \quad \text{ecuación 2.40}$$

Mientras que la ecuación que originalmente publico Vagelis G. Papadakis [81] es la siguiente:

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^c [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}} t \quad \text{ecuación 2.14}$$

Dicha ecuación ya ha sido presentada y discutida en páginas anteriores de este capítulo.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2009	Xiao-Yong Wang, Han-Seung Lee [97].	A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash	Construction and Building Materials

El autor presenta un modelo numérico para predecir la profundidad de carbonatación de concreto que contiene ceniza volante con bajo contenido de calcio, la

ecuación se desarrolla de manera similar a Papadakis, sin embargo, requiere de parámetros obtenidos mediante regresión lineal de valores experimentales para su implementación.

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_e [CO_2]_0 t}{[CH] + 3[CSH]}} \quad \text{ecuación 2.41}$$

Dónde:

D_e = es el coeficiente de difusión efectivo del CO_2 .

$[CO_2]$ = es la concentración molar de CO_2 en el ambiente.

$[CH]$ = es la concentración molar de $Ca(OH)_2$

$[CSH]$ = concentración molar de Silicatos de calcio hidratado

x_c = es la profundidad de carbonatación en (m)

t = tiempo en segundos

$$D_e = A \left(\frac{\varepsilon_c}{\frac{c}{\rho_c} + \frac{p}{\rho_p} + \frac{w}{\rho_w}} \right)^a \left(1 - \frac{RH}{100} \right)^b \quad \text{ecuación 2.42}$$

Dónde: RH es la humedad relativa; ρ_c , ρ_p y ρ_w son las densidades del cemento, la ceniza volante y el agua respectivamente; A, a y b son parámetros que deben ser obtenidos mediante regresión en resultados experimentales de carbonatación.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2010	David Conciatori, Francine Laferriere, Eugen Brühwiler [98].	Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering termal and carbonation state for real climate	Cement and Concrete Research

El autor utiliza el modelo de transporte “TransChlor”, que puede ser usado para fenómenos de temperatura, carbonatación, penetración de agua e ingreso de ión cloruro.

En la obtención de la propuesta, dicho modelo (“TransChlor”) fue calibrado usando datos experimentales de movimiento de agua en concretos de diferentes porosidades bajo diversas condiciones micro-climáticas. La ecuación resultante para carbonatación es la siguiente:

$$x_c = \frac{1}{16.75} \frac{\rho_c}{\rho_w} \frac{W/C - 0.3}{1 + (\rho_c/\rho_w)(W/C)} (1 - H_{ext}) \quad \text{ecuación 2.43}$$

$$x \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_c W}{\rho_w C} + \frac{\rho_c G}{\rho_G C}\right) y_{CO_2} t} \quad \text{ecuación 2.44}$$

Dónde:

W = cantidad de agua de mezcla con respecto al volumen de concreto (kg/m^3).

ρ_c = densidad de cemento (kg/m^3).

ρ_G = densidad del agregado (kg/m^3).

ρ_w = densidad del agua (kg/m^3).

y_{CO_2} = concentración del dióxido de carbono en el aire.

Aunque la ecuación aparenta ser sencilla, requiere del cálculo de distintas propiedades del material. El autor indica que para la calibración del modelo tomo en cuenta las velocidades de penetración a distintos ambientes, sin embargo, estos datos no se ven reflejados en la ecuación final, donde aparentemente la profundidad de carbonatación solo depende de las propiedades del material.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2010	P. F. Marqués, A. Costa [99].	Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. Performance-based methodologies	Construction and Building Materials

El autor rescata la ecuación propuesta por el CEB Bulletin 238 [95]:

$$x = \sqrt{2 \frac{D}{a} \Delta C t \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n} \quad \text{ecuación 2.45}$$

Donde, x es la profundidad de carbonatación (m); D es el coeficiente de difusión del CO_2 a través del concreto carbonatado en equilibrio con un ambiente de 65% de HR y 20°C ($\text{m}^2/\text{año}$); a es el monto de CO_2 que origina la carbonatación de los componentes del concreto en unidad de volumen, que depende del tipo y cantidad de cemento (kg/m^3); ΔC es la diferencia entre la concentración exterior e interior de CO_2 (kg/m^3), k_0 es la constante que considera las condiciones de ensayo = 3; k_1 es la constante que toma en cuenta los cambios en la humedad relativa (ver Tabla 2.2 y 2.3); k_2 es la constante que toma en cuenta las condiciones de curado: curado estándar = 1 y curado 3 días = 0.25; t es el tiempo en años, t_0 es el periodo de referencia = 1 año, n es el factor que toma en cuenta los periodos de humedecimiento y secado de manera parecida a Yoon [30].

Tabla 2.2. Recomendaciones en función del tipo de exposición.

Tipo de cemento	CEM I (Referencia); CEM II/A				CEM II/B; CEM III/A; CEM IV; CEM V/A			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Tipo de exposición	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Recubrimiento mínimo nominal (mm)	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima relación a/c	0.65	0.65	0.60	0.60	0.65	0.65	0.55	0.55
Mínima dosificación de C (kg/m ³)	240	240	280	280	260	260	300	300
Mínima clase de resistencia	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
	LC25/28	LC25/28	LC30/33	LC30/33	LC25/28	LC25/28	LC30/33	LC30/33

Tabla 2.3. Valores de k_1 y n en función del tipo de exposición.

Parámetro	XC1	XC2	XC3	XC4
k_1	1.00	0.20	0.77	0.41
n	0	0.183	0.02	0.085

No obstante, si consideramos un flujo de CO₂ estacionario, la ecuación se puede simplificar de la siguiente manera:

$$x = \sqrt{2 \frac{D}{a} \Delta C t} \quad \text{ecuación 2.46}$$

La especificación del LNEC E465 [100] introdujo el término de R_{c65} , que es igual a la relación entre el monto de CO₂ necesario para la completa carbonatación del concreto por unidad de volumen y el coeficiente de difusión:

$$R_{c65} = \frac{a}{D} \quad \text{ecuación 2.47}$$

Utilizando valores obtenidos en laboratorio de ensayos de carbonatación acelerada con una concentración de CO₂ $C_{\text{accel}} = 90 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ y estableciendo la duración de la prueba como t_1 y la profundidad de carbonatación resultante como x_1

tenemos la siguiente ecuación para R_{c65} :

$$R_{c65} = \frac{2C_{accl}t_1}{x_1^2} \quad \text{ecuación 2.48}$$

Finalmente, otra forma de escribir la ecuación inicial es:

$$x = \sqrt{\frac{2x\Delta C}{R_{c65}}} t \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad \text{ecuación 2.49}$$

La principal incertidumbre de esta ecuación es la validez de la extrapolación de los ensayos acelerados a valores de carbonatación natural, además, que los coeficientes k_1 , k_2 y k_3 toman valores fijos de parámetros cambiantes.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2010	N. Hyvert, A Sellier, F. Duprat, P. Rougeu, P. Francisco [101].	Dependency of C-S-H carbonation rate on CO ₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation	Cement and Concrete Research

El autor parte del siguiente ecuación diferencial donde para poder obtener la profundidad de carbonatación, considera el balance de masa del CO₂ con un comportamiento del mismo como un gas ideal.

$$Q dx_c = \frac{D_{CO_2} P_{CO_2}}{RT} \frac{dt}{x_c} \quad \text{ecuación 2.50}$$

Donde

Q = cantidad de calcio carbonatable (mol/m³ de material)

x_c = profundidad de carbonatación (m)

D_{CO_2} = coeficiente de difusión de CO₂ en concretos carbonatados.

P_{CO_2} = Presión del CO₂ en la superficie de concreto (Pa)

t = tiempo (s)

R = constante de los gases perfectos (J/mol/K)

T = temperatura (K)

Si consideramos, que en esta ecuación el CO₂ alcanza el frente de carbonatación (x_c) durante el tiempo dt transformando completamente el CaO en calcita por la reacción de carbonatación. Tenemos un gradiente de presión constante entre 0 y x_c e igual a $\frac{P_{CO_2}}{x_c}$;

que aplicando fronteras permite obtener la siguiente ecuación:

$$x_c = \frac{\sqrt{2D_{CO_2}P_{CO_2}t}}{QRT} \quad \text{ecuación 2.51}$$

Finalmente, el autor continúa con su demostración y exposición de resultados experimentales hasta que propone la siguiente ecuación:

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}^0 P_0 t}{RT \left(1 - \beta C_2 \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n\right) \left(\frac{\varphi P C_2}{n+1} \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n + Q1\right)}} \quad \text{ecuación 2.52}$$

La cual todavía es función de la raíz cuadrada del tiempo, sin embargo ya no es una función directa de la raíz cuadrada de la presión del CO₂ en el poro. El autor menciona que esta es la gran diferencia y realce de su modelo dado que la presión actúa de manera diferente en la cinética que en la ecuación de partida.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2011	Mark G. Stewart, Xiaoming Wang, Minh N. Nguyen [102].	Climate Change impact and risks of concrete infrastructure deterioration	Engineering Structures

El autor utiliza el modelo recomendado por Duracrete y Yoon et al [30], pero corregido por su k_{urban} y definiendo t en años a partir del 2000. De tal manera, que su ecuación termina de la siguiente manera:

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} C_{CO_2}(t - 1999) \left(\frac{t_0}{t-1999}\right)^{n_m}} \quad t \geq 2000 \quad \text{ecuación 2.53}$$

$$D_{CO_2}(t) = D_1(t - 1999)^{-n_d} \quad \text{ecuación 2.54}$$

$$a = 0.75 C_e C_a O \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad \text{ecuación 2.38}$$

Donde, $C_{CO_2}(t)$ es la concentración por masa dependiente del tiempo del CO₂ (10^{-3} kg/m³) con $\mu_{CO_2}(t)$ y COV igual a $\sigma_{CO_2}(t) / \mu_{CO_2}(t)$ que se obtiene de la Figura 2.9, usando el factor de conversión 1ppm = 0.0019×10^{-3} kg/m³; k_{urban} es el factor que toma en cuenta el incremento de los niveles de CO₂ en ambientes urbanos; $D_{CO_2}(t)$ es el coeficiente de difusión del concreto; D_1 es el coeficiente de difusión después de 1 año;

n_d es el factor de edad para el coeficiente de difusión de CO_2 ; t_0 es igual a 1 año; C_e es el contenido de cemento (kg/m^3); CaO es el contenido de CaO en el cemento (0.65); α_H es el grado de hidratación; M_{CaO} la masa molar del CaO (56 g/mol); M_{CO_2} la masa molar del CO_2 (44 g/mol). El factor de edad para condiciones micro climáticas (n_m) asociado con la frecuencia de los ciclos de humedecido y secado es $n_m = 0$ para estructuras exteriores cubiertas y $n_m = 0.12$ para estructuras exteriores sin cubiertas.

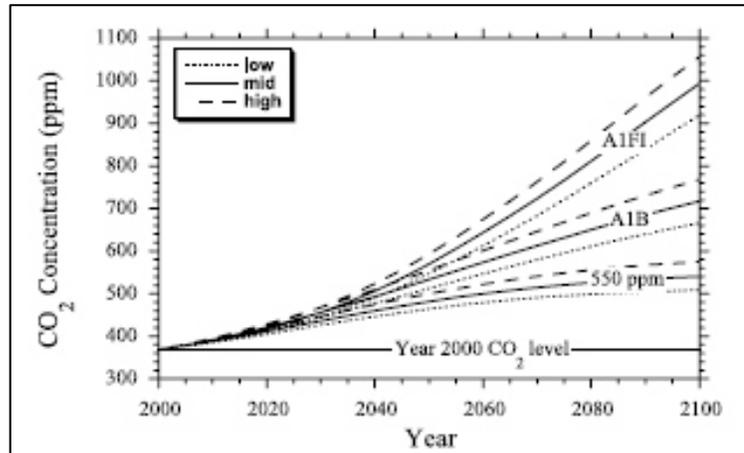


Figura 2.9. Estimados de variación de las concentraciones de CO_2 [102].

Los principales valores de D_1 y n_d son tomados de la Tabla 2.4 reportada por Yoon [30] que provee un estimado de máximo (un 95 percentil) de valores para D_1 y n_d . La desviación estándar para D_1 es aproximadamente 0.15 y COV para n_d es aproximadamente 0.12 para todas las relaciones a/c. El coeficiente de difusión D_1 menor de $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ es apropiado para un concreto de buena calidad. Cabe mencionar que los parámetros anteriores están basados en una $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $\text{RH} = 65\%$.

Tabla 2.4. Valores de D_1 y n_d en función de la relación a/c [102].

a/c	$D_1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	n_d
0.45	0.65	0.218
0.50	1.24	0.235
0.55	2.22	0.240

Nota: para valores intermedios use interpolación lineal.

El grado de hidratación de un cemento portland ordinario mayor de 400 días es:

$$\alpha_H \approx 1 - e^{-3.38w/c} \quad \text{ecuación 2.55}$$

El efecto de la temperatura en el coeficiente de difusión es modelado usando la ley de Arrhenius, donde el cambio en la temperatura dependiente del tiempo que afecta el coeficiente de difusión tomando como referencia una temperatura de 20 °C es:

$$f_T(t) \approx e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T_{av}(t)} \right)} \quad \text{Siendo } T_{av}(t) = \frac{\sum_{i=2000}^t T(t)}{t-1999} \quad \text{ecuación 2.56}$$

Donde T(t) es la temperatura (°C) en el tiempo t, E es la energía de activación del proceso de difusión (40 kJ/mol) y R es la constante del gas (8.314 x 10⁻³ kJ/mol K).

Finalmente, ellos reescriben la ecuación de Yoon de la siguiente manera:

$$x_c(t) \approx \sqrt{\frac{2f_t(t)D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} \int_{2000}^t C_{CO_2}(t) dt} \left(\frac{1}{t-1999} \right)^{n_m} \quad \text{ecuación 2.57}$$

$$t \geq 2000$$

La ecuación está relativamente completa, sin embargo el cálculo de “a” provoca que las propiedades del material pasen a segunda importancia, el problema se presenta debido a la necesidad de realizar una integración de las concentraciones de CO₂ en función del tiempo; Y que la ecuación está considerada para un tiempo inicial a partir del año 2000.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2012	I. Monteiro, F. A. Branco, J. de Brito, R. Neves [103].	Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures	Construction and building materials

El autor referencia su ecuación a la investigación del laboratorio nacional portugués de Ingeniería Civil, el cual preparó la especificación del LNEC E-465 [100], que presenta la siguiente ecuación, mismas, que ya ha sido discutida en esta tesis.

$$x = \sqrt{\left(\frac{2 x c x t}{R_{c65}} \right)} \left[\sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{1}{t} \right)^n \right] \quad \text{ecuación 2.58}$$

Donde x es la profundidad de carbonatación (m); c es la concentración ambiental de dióxido de carbono (kg/m^3); R_{c65} es el coeficiente de resistencia a la carbonatación ($\text{kg}/\text{año}/\text{m}^5$); k_0 es un factor igual a 3.0 cuando las condiciones de ensayo se apegan a LNEC E-391; k_1 es un factor dependiente de la exposición (ver la Tabla 2.5); k_2 es la constante que toma en cuenta las condiciones de curado: curado estándar = 1 y curado 3 días o con cimbra aislada = 0.25; t es el tiempo en años.

Tabla 2.5. Valores de k_1 y n en función del tipo de exposición.

	XC1	XC2	XC3	XC4
k_1	1.0	0.20	0.77	0.41
n	0	0.183	0.02	0.085

Valores de los parámetros k_1 y n .

El coeficiente de resistencia a la carbonatación (R_{c65}) es determinado por ensayos acelerados de carbonatación, sin embargo, Gonçalves [104] presenta una relación del R_{c65} en función de la resistencia a carbonatación de la siguiente manera:

$$R_{c65} = 0.0016 f_{cm}^{3.106} \text{ para CEM I; CEM II/A} \quad \text{ecuación 2.59}$$

$$R_{c65} = 0.0018 f_{cm}^{2.862} \text{ para CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V} \quad \text{ecuación 2.60}$$

Dónde: R_{c65} está en $\text{kg}/\text{año}/\text{m}^5$ y f_{cm} es la resistencia en MPa.

La principal aportación de este artículo es que presenta una propuesta para obtener el factor de R_{c65} sin necesidad de realizar ensayos acelerados. Por su parte la ecuación de carbonatación ya ha sido discutida en líneas superiores.

Año	Autor	Título del trabajo	Revista
2013	Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs, Mark G. Stewart, Xiaoming Wang [28].	Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach	Engineering Structures

Los autores retoman la propuesta de Vuille M. (2003) [105], pero corregido por

la k_{urban} .

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} C_{CO_2} t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}} \quad \text{ecuación 2.61}$$

$$D_{CO_2}(t) = D_1 t^{-n_d} \quad \text{ecuación 2.62}$$

$$a = 0.75 C_e C_a O \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad \text{ecuación 2.38}$$

Donde, $C_{CO_2}(t)$ es la concentración por masa dependiente del tiempo del CO_2 (10^{-3} kg/m^3); k_{urban} es el factor que toma en cuenta el incremento de los niveles de CO_2 en ambientes urbanos; $D_{CO_2}(t)$ es el coeficiente de difusión del concreto; D_1 es el coeficiente de difusión después de 1 año; n_d es el factor de edad para el coeficiente de difusión de CO_2 ; t_0 es igual a 1 año; C_e es el contenido de cemento (kg/m^3); CaO es el contenido de CaO en el cemento (0.65); α_H es el grado de hidratación; M_{CaO} la masa molar del CaO (56 g/mol); M_{CO_2} la masa molar del CO_2 (44 g/mol). El factor de edad para condiciones micro climáticas (n_m) asociado con la frecuencia de los ciclos de humedecido y secado es $n_m = 0$ para estructuras exteriores cubiertas.

Con $\mu_{CO_2}(t)$ y COV igual a $\sigma_{CO_2}(t) / \mu_{CO_2}(t)$ que se obtiene de la figura siguiente usando el factor de conversión $1\text{ppm} = 0.0019 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$;

Lo anterior es de manera similar al trabajo presentado por Mark G. Stewart (2011) [102] que además en la parte final de su trabajo muestra la siguiente ecuación, misma que nuevamente es rescatada por bastidas:

$$x_c(t) \approx \sqrt{\frac{2f_T(t)D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} \int_0^t C_{CO_2}(t) dt \left(\frac{1}{t}\right)^{n_m}} \quad \text{ecuación 2.63}$$

El aporte del trabajo está en el modelaje de las acciones del cambio climático tomando en cuenta tanto la temperatura como la humedad relativa, estableciendo las siguientes ecuaciones:

$$\phi(t) = \phi_0 + \left(\frac{\phi_{ta} - \phi_0}{t_a}\right) t \quad \text{ecuación 2.64}$$

$$R(t) = R_0 + \left(\frac{R_{ta} - R_0}{t_a}\right) [t]/t_a \quad \text{ecuación 2.65}$$

$$k(t) = \phi(t) + \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{2} \sin\left(\frac{t - [t]}{1 - R(t)} \pi\right) \quad \text{ecuación 2.66}$$

$$k(t) = \phi(t) - \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{2} \sin\left(\frac{t - [t]}{1 - R(t)} \pi\right) \quad \text{ecuación 2.67}$$

Sin embargo, la solución de las ecuaciones de variación climática requiere del cálculo matemático con software para poder llegar a una solución particular.

En la Tabla 2.6, se presenta otras publicaciones donde se resumen otras ecuaciones propuestas por distintos autores después del 2013, sin embargo, después de la revisión bibliográfica se determinó que dichas propuestas son muy parecidas a las discutidas anteriormente, razón por la cual ya no se describen de manera amplia.

Tabla 2.6. Relación de trabajos que presentan ecuaciones semejantes a las discutidas en esta tesis.

Año	Autor	Título del trabajo y Revista	Ecuación
2013	José B. Aguiar, Cristela Júnior [106].	Carbonation of Surface protected concrete, Construction and building materials	$x = \sqrt{\frac{2h}{R_{C65}}} \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n$
2013	Pedro Faustino Marques, Carlos Chastre, Angela Nunes [107].	Carbonation service life modeling of RC structures for concrete with portland and blended cements, Cement & Concrete Composites	$x = \sqrt{\frac{2 x \Delta C}{R_{C65}}} \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n$ $R_{C65} = \frac{2 x C_{accel} t_1}{x_1^2} = \frac{2 x C_{accel}}{k^2}$
2013	Matteo Guiglia, Maurizio Taliano [108].	Comp. of carb. depths measured on in-field exposed existing R. C. struc. with predictions made using fib-Model Code 2010, Cement & Concrete Composites	$x_c(t) = \sqrt{2k_e k_c R_{NAC,0}^{-1} C_s W(t) \sqrt{t}}$

Año	Autor	Título del trabajo y Revista	Ecuación
2013	G. Roa-Rodriguez, W. Aperador, Rosa Vera [109].	Software para el cálculo de la velocidad de deterioro de los hormigones sometidos a carbonatación, Rev. LatinAm. Metal. Mat.	$x = A\sqrt{t}$ $A = \sqrt{\frac{81.78 RH^{-0.386} T^{0.435} (w/b - 0.309) V_{CO_2}}{0.31 W_{ce} (1 - 4.48 F A_{\%} SiO_{2\%})}}$ $A = \sqrt{\frac{2D_{eCO_2}^{c} [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}}$
2013	A. Younsi, Ph. Turcry, A. Aït-Mokhtar, S. Staquet [110].	Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying, Cement and Concrete Research	$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} [CO_2]}{[CH]}} \sqrt{t}$ $D_{CO_2}(\Phi, S_1) = \Phi(1 - S_1)\tau D_{Air, CO_2}$
2014	Arto Köliö, Toni A. Pakkala, Jukka Lahdesivu, Mihkel Kiviste [111].	Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate, Engineering Structures	$x_c = \sqrt{2k_e k_c R_{NAC}^{-1} C_s} \sqrt{t} \left(\frac{t_0}{t}\right)^w$

Año	Autor	Título del trabajo y Revista	Ecuación
2014	Sotiris Demis, Maria P. Efstathiou, Vagelis G. Papadakis [112].	Computer-aided modeling of concrete service life, Cement & Concrete Composites	$x_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}(CO_2/100)t}{0.33CH + 0.214CSH}}$ $t_{cr,carb} = \frac{(0.33CH + 0.214CSH)c^2}{2D_{e,CO_2}(CO_2/100)}$ $D_{e,CO_2} = 6.1 \times 10^{-6} \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{air}}{1 - \frac{A}{d_A} - \varepsilon_{air}} \right)^3 (1 - RH/100)^{2.2}$
2014	Frédéric Duprat, Ngoc Tru Vu, Alain Sellier [113].	Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures, Construction and building materials	$Z_{c,pred}(t) = \sqrt{\frac{2P_0}{\varphi_p \left(CH_i + \frac{CSH_i}{n+1} + \left(\frac{P_0}{P_{atm}} \right)^n \right) RT \left(1 + \alpha CSH_i \left(\frac{P_0}{P_{atm}} \right)^n \right)} \frac{D_0}{t}}$
2014	Keun-Hyeok Yang, Eun-A Seo, Sun-Ho Tae [114].	Carbonation and CO ₂ uptake of concrete, Environmental Impact Assessment Review	$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a_{CO_2}(t)}} C_{CO_2} t \quad (\text{cm})$
2014	Mithun Saha, Matthew J. Eckelman [115].	Urban scale mapping of concrete degradation from projected climate change, Urban Climate	$x_c(t) = \sqrt{\left(\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} \right) k_{e,CO_2} C_{CO_2}(t) (t - t_0) \left(\frac{t_i,CO_2}{t - t_0} \right)^{n_m}}$ $t \geq 2000$ $D_{CO_2}(t) = f_t(t) D_{0,CO_2} (t - t_0)^{-n_{a,CO_2}}$ $f_t(t) \approx \exp\left(\frac{E}{R} - \frac{1}{273 + T_{avg}(t)} \right)$ $\alpha_H \approx 1 - e^{-3.38(w/c)}$

Año	Autor	Título del trabajo y Revista	Ecuación
2014	Philip Van den Heede, Nele De Belie [31].	A service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation, Construction and building materials	$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) =$ $a - \sqrt{2k_e k_c R_{NAC,0}^{-1} C_s \sqrt{t} W(t)}$ $k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100}\right)^{fe}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^{fe}} \right)^{ge}$
2015	B. G. Salvoldi, H. Beushausen, M. G. Alexander [116].	Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation, Construction and building materials	$x = \sqrt{\frac{2Dct}{a}}$ $x = \sqrt{\frac{2Dc\beta_D\beta_r t}{a}}$ $\beta_D = \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^2$ $x = A\sqrt{t}$ $A = \sqrt{\frac{2Dc\beta}{a}}$
2015	Thomas P. Hills, Fabiana Gordon, Nicholas H. Florin, Paul S. Fennell [117].	Statistical analysis of the carbonation rate of concrete, Cement and Concrete Research	$x = \sqrt{\frac{2D_{p_{ext}} t}{RTQ}} = k\sqrt{t}$ $k = \sqrt{\frac{2D_{p_{ext}} t}{RTQ}} = \sqrt{\frac{2D\phi_{CO_2}}{Q}}$

2.2.3.- *Reflexiones acerca de los modelos usados para predecir el avance en el frente de carbonatación basados en la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo.*

De la observación de las ecuaciones que han sido propuestas para estimar el avance en el frente de carbonatación es posible establecer:

- Aunque hay contados artículos donde se analiza el problema de manera estadística (los cuales no fueron presentados en este trabajo), la gran mayoría de las propuestas de la literatura hacen referencia a la solución de la ecuación diferencial conocida como la primera ley de Fick que de manera general se puede expresar como:

$$X = K\sqrt{t} \quad \text{ecuación 2.13}$$

- Donde K incluye una gran cantidad de factores tanto ambientales como del material, que la mayoría de los autores descomponen en coeficientes que pueden ser o no dependientes del tiempo u otros factores como la humedad relativa, la temperatura o los días de lluvia.
- Los modelos propuestos basados en la ecuación de la primera ley de Fick se dividen en dos grandes grupos:
 - a) Los modelos que priorizan las propiedades del material por encima de las condiciones de exposición [81,87,96,97]. Para lo cual se establecen relaciones entre la posible cantidad de material carbonatable en el concreto y el contenido de CO₂ ambiental. Y donde la incertidumbre aparece como consecuencia de la necesidad de establecer la hidratación de los compuestos cementantes; Lo cual, es muy complejo de modelar debido a la existencia de un amplio número de factores que afectan el proceso, y que pueden ser: la temperatura, humedad relativa, el tipo de cemento, uso de adiciones minerales, edad, entre otros.

Además, los cálculos necesarios para estimar los grados de hidratación requieren típicamente de pruebas de laboratorio o de estimar propiedades tales como la densidad de los materiales o composiciones química del cemento utilizado.

- b) Los modelos que priorizan las condiciones de exposición sobre las propiedades del material [3,28,30,83,94,102]. Donde nuevamente tenemos complicaciones

debido a la dificultad para modelar el clima y la estimación de la variación de agentes como el contenido de CO₂ atmosférico a través del tiempo.

Finalmente, se ha observado que cada autor prioriza los parámetros que considera más importantes para su propuesta. Sin embargo, aunque algunas propuestas podrían ser muy precisas en su estimación, todas conllevan una serie de datos o cálculos de entrada que sí no son valorados de manera aproximada complican la solución. Es así como algunas ecuaciones requieren de mediciones en laboratorio, análisis químicos o desarrollo de integrales que sin el apoyo del equipo de cómputo serían difíciles de resolver.

Otra problemática detectada es la dificultad de los modelos más elaborados para ser particularizados a una región y unas determinadas características. Dejando un vacío entre los modelos más exactos pero de difícil implementación y los modelos sencillos pero de poca precisión. Vacío que es intención de este trabajo resolver con la propuesta final.

JUSTIFICACIÓN

A pesar de la versatilidad y potencialidad del concreto reforzado, las estructuras elaboradas con este material generan cuantiosas pérdidas económicas y en casos extremos pérdidas humanas debido al deterioro de las mismas. Estos gastos, pueden ser disminuidos si establecemos adecuadamente los tiempos de reparación de las estructuras de concreto reforzado.

Dicho problema de durabilidad de estructuras es muy importante desde el punto de vista económico, si tomamos en cuenta que países industrializados gastan una considerable proporción de su producto interno bruto [3,4] en reparaciones; y sustentable si pensamos que es indeseable fabricar estructuras que en muy poco tiempo se han de reparar e inclusive sustituir debido al deterioro sufrido en estas por la corrosión.

Lo cual, 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 [118].

Debido a la creciente necesidad de infraestructura de todo tipo es muy importante determinar cuándo hay que repararlas para evitar un daño mayor que provoque la necesidad de sustituirlas, sin embargo las condiciones del ambiente son cambiantes y más en esta época. Razón por la cual es necesario investigar: los cambios que están sufriendo distintas zonas geográficas en materia de temperatura, precipitaciones y humedad relativa, así como el análisis de las consecuencias que esos cambios están provocando en la penetración de los agentes agresivos dentro del concreto y finalmente establecer una ecuación que correlacione dicho fenómeno para de esta manera establecer periodos de mantenimientos que incremente la vida útil de nuestras estructuras.

Ante esto, diferentes investigadores [28-31] han demostrado que las

características mecánicas de las estructuras no son el único indicador de la durabilidad de las estructuras de concreto, para predecir dicha propiedad es también importante tomar en cuenta el medio en el que van a estar inmersas [32]. Siendo observado que al realizarse ensayos en condiciones naturales y aceleradas, el alcance de la profundidad de carbonatación aumenta conforme existe mayor concentración de CO_2 , pero debido también al cambio climático los valores presentes de humedad podrían aumentar y decrecer, afectando la velocidad de carbonatación, además, la carga ambiental localizada puede crear microclimas donde el desempeño de un elemento de concreto sea diferente de una región a otra [29].

Este trabajo se justifica por la contribución al desarrollo económico y social, ya que una vez definida la influencia del medio ambiente en la infraestructura de concreto, se podrá diseñar de manera adecuada con criterios de durabilidad.

Por un lado, fue la finalidad de esta investigación aportar conocimiento basado en una investigación rigurosa, sobre la durabilidad de concretos con ceniza volante, ofreciendo una perspectiva completa de las mezclas seleccionadas ante los dos mecanismos de corrosión más comunes: cloruros y carbonatación.

Lo anterior debido a que los estudios actuales en este campo están encaminados a desarrollar concretos con la mayor cantidad de adiciones minerales posible (entre ellas, la ceniza volante); esto debido a las propiedades benéficas que influyen en el concreto y a la economía que se logra al ahorrar la mayor cantidad posible de cemento; sin embargo, es interesante mencionar la existencia de datos confusos o contrapuestos en la literatura.

Conscientes, de que si logramos fabricar un concreto más durable obtendremos menos costos de mantenimiento y reemplazo cuando lo comparamos con otros productos de construcción; contribuyendo de esta manera, al valor ambiental del material; La presente investigación realizó la evaluación en laboratorio del comportamiento de nueve matrices cementantes base cemento portland, considerando tres relaciones agua/material cementante (0.46, 0.59 y 0.70) y tres porcentajes de sustitución (0%, 25% y 50%) de ceniza volante procedente de la Central térmica de Andorra (Teruel, Aragón, España) a

fin de establecer su desempeño después de un considerable tiempo de curado (56 días) ante efectos de carbonatación , ataque por cloruros mediante inmersión en agua de mar sintética e inclusión de ión cloruro en el agua de mezcla a través de la técnica de resistencia a la polarización y la prueba de migración de cloruros NT BUILD 492.

En la misma línea, es motivo de esta investigación aportar información que ayude a conocer mejor el fenómeno de deterioro de estructuras de concreto frente a carbonatación y desarrollar o particularizar modelos que consideren los cambios ambientales de manera adecuada.

Lo anterior, debido a que se ha observado que cada autor prioriza los parámetros que considera más importantes para su propuesta. Sin embargo, aunque algunas propuestas podrían ser muy precisas en su estimación, conllevan una serie de datos o cálculos de entrada que si no son valorados de manera aproximada complican la solución, es así, como algunas ecuaciones requieren de mediciones en laboratorio, análisis químicos o desarrollo de integrales que sin el apoyo del equipo de cómputo serían difíciles de resolver. Existiendo una la dificultad de los modelos más elaborados para ser particularizados a una región y unas determinadas características; Y quedando un vacío entre los modelos más exactos pero de difícil implementación y los modelos sencillos pero de poca precisión. Vacío que es intención de este trabajo resolver con la propuesta final, en la cual se formuló una ecuación de deterioro por carbonatación de fácil particularización para distintos historiales climáticos, considerando tanto factores ambientales como propiedades del material para predecir el avance en el frente de carbonatación.

HIPÓTESIS

Es posible formular una ecuación de deterioro por carbonatación que sea de fácil particularización para distintos historiales climáticos, considerando tanto factores ambientales como propiedades del material para predecir el avance en el frente de carbonatación.

OBJETIVOS

Objetivo general.

Formular una ecuación de deterioro por carbonatación que prediga el avance en el frente de carbonatación. La cual considerará tanto factores ambientales como propiedades del material y será de fácil particularización para distintos historiales climáticos.

Objetivos particulares.

1.- Establecer una comparativa en laboratorio de las distintas matrices cementantes utilizadas frente a corrosión por carbonatación acelerada, ingreso de cloruros y cloruros añadidos en el agua de mezcla, afín de establecer posibles comportamientos de las mismas en exposición natural.

2.- En base a propuestas anteriores existentes en la literatura generar un modelo de predicción de deterioro por carbonatación de fácil particularización para distintos historiales climáticos, que tome en cuenta tanto factores ambientales como propiedades del material.

3.- Verificar la validez de la ecuación propuesta, en base a su comparación con mediciones de probetas en exposición natural.

Capítulo III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En los capítulos anteriores se presentó la generalidad de los temas a tratar en este trabajo, mencionando los dos principales mecanismos de deterioro las estructuras de concreto reforzado: la carbonatación de la matriz y el ingreso del ión cloruro. Así mismo, se comentaron las distintas técnicas de monitoreo de la corrosión. Se ahondó, además, en los estudios previos que permitieron desarrollar la propuesta de predicción del avance en el frente de carbonatación para estructuras de concreto reforzado, mencionando el conocimiento existente de los mecanismos de deterioro y propuestas de predicción anteriores. En este capítulo se describirán más a detalle las pruebas realizadas en la presente investigación mencionando cada una de las variables que se tomaron en cuenta.

Para esta investigación se seleccionaron tres relaciones agua/material cementante (a/mc): 0.46, 0.59 y 0.70 y tres contenidos de ceniza volante (CV): 0%, 25% y 50% en sustitución por peso de cemento portland. Posterior a su elaboración, se procedió al curado mediante cámara húmeda por 56 días. La Figura 3.1 muestra la matriz de mezclas utilizada y la Tabla 3.1 presenta la dosificación de cada uno de los concretos usados.

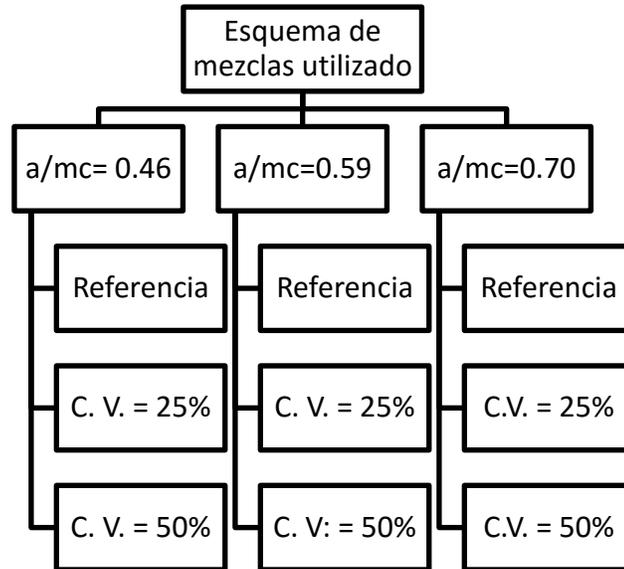


Figura 3.1. Matriz de mezclas utilizadas en el experimento.

Tabla 3.1. Cuantificación de materiales por mezcla.

Resistencia a la compresión esperada (MPa)	Contenido de agua (kg/m ³)	Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación a/mc	Contenido de arena (kg/cm ³)	Contenido de grava (kg/cm ³)
34.32	245.3	533	0.46	558	754
24.52	236.9	402	0.59	637	754
19.61	241.9	346	0.70	645	754

3.1.1.- Materiales.

Para la elaboración de las probetas de laboratorio se utilizó: Cemento portland (CEM II/B-L 32.5 R) de resistencia característica 32.5 N/mm², agregado procedente de cantera de tamaño máximo de 12 mm, agua de la red hidráulica local, barras de acero corrugado de diámetro 10 mm con una longitud aproximada 15 cm y ceniza volante (CV) procedente de la central térmica de Andorra (Teruel, Aragón, España). Por su parte, el diseño de las probetas en exposición natural se realizó cumpliendo los requisitos de la Norma ASTM C192 (Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Probetas de Concreto para Ensayo en Laboratorio), con Cemento portland Compuesto

(CPC 30R), Agregado calizo de la región y Ceniza volante procedente de la planta Carboeléctrica José López Portillo en Nava, Coahuila.

3.1.2.- Arena y grava

Para las probetas de laboratorio se utilizó arena 4/0 y grava 6/12 procedente de cantera, suministrada a granel en sacos de 1000 kg (Figura 3.2). El análisis granulométrico fue realizado por la compañía suministradora siguiendo el procedimiento normalizado UNE EN 933-2:1996, según EHE-08. Mientras, arena y grava de origen calcáreo de la región de Nuevo León, México, con un tamaño máximo 3/8", que cumplen con la Norma ASTM C 33 y la Norma Oficial NMX C-111 fueron utilizadas en las probetas de exposición natural.



Figura 3.2. Agregado utilizado para las probetas de laboratorio (izquierda) y de exposición natural (derecha) durante el estudio.

3.1.3.- Agua.

Para la elaboración, el curado de las probetas y para la realización de los ensayos físicos, se ha utilizado agua potable procedente de la red local de suministro para uso doméstico que en las probetas de exposición natural, cumplió con los requisitos que establece la Norma Oficial NMX C-122 y la ASTM C 94. Por su parte, la Tabla 3.2 presenta el análisis químico promedio del agua utilizada en las probetas de laboratorio.

Tabla 3.2. Análisis químico del agua utilizada.

Análisis de agua	
HCO ₃ ⁻	187.4 ± 12% mg/L
CO ₃ ²⁻	< 5.0±12% mg/L
NO ₂ ⁻	< 0.05±18/% mg/L
Cl ⁻	211.2±12% mg/L
F ⁻	< 0.10±12% mg/L
NO ₃ ⁻	11.1±12% mg/L
SO ₄ ²⁻	124.2±12% mg/L
Ca ²⁺	95.2 ± 12% mg/L
Na ⁺	102.6 ± 12% mg/L
Conductividad (20°C)	1145±6% μS/cm
pH	8.09±0.1

3.1.4.- *Cemento.*

Se utilizó Cemento portland tipo II de resistencia característica 32.5 N/mm² y alta resistencia inicial (CEM II/B-L 32.5 R) en las probetas de laboratorio. Por su parte, Cemento portland Compuesto (CPC 30R), que cumple con los estándares de la norma internacional ASTM C-150 y la nacional NMX-C-414 fue utilizado en las probetas de exposición natural.

3.1.5.- *Ceniza volante.*

Las cenizas volantes (CV) que se emplearon como sustitución al cemento en las probetas de carbonatación natural provienen de la planta Carboeléctrica José López Portillo en Nava, Coahuila, México. Por su parte, para las probetas de laboratorio, ceniza volante de la central térmica de Andorra, Teruel, España fue utilizada. Las cenizas fueron adicionadas según se suministraron sin aplicarles ningún tratamiento antes de su uso. Las composiciones características de la CV de la central térmica de Andorra se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Composición química de las CV empleadas en las probetas de laboratorio, expresada en %.

Parámetro	CV (%)
P. F.	2,44
SiO ₂	40,94
Al ₂ O ₃	24,65
Fe ₂ O ₃	13,59
CaO	9,83
MgO	1,59
Na ₂ O	0,34
K ₂ O	1,40
SO ₃	1,60

P.F.*: perdida final por ignición.

3.1.6.- Acero.

Para la confección de las probetas de concreto reforzado con acero (estudio de corrosión) se han utilizado barras de acero corrugado de diámetro 10 mm y longitud aproximada 15 cm, con un $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$. La Tabla 3.4 muestra la composición química del acero utilizado en las probetas de laboratorio.

Tabla 3.4. Composición del acero de refuerzo empleado.

%C = 0.30	%Si = 0.33	%Mn = 0.44	%S = 0.05
%P = 0.02	%Cr* < 0.01	%Ni* < 0.01	%Mo* < 0.01

*Los % porcentajes de Cromo, Níquel y Molibdeno se encuentran por debajo del límite de detección del procedimiento.

3.2.-Probetas

3.2.1.-Probetas de laboratorio.

De cada una de las 9 mezclas de concretos se fabricaron tres series de probetas

cilíndricas de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de largo con acero de 10 mm embebido de acuerdo a la Figura 3.3 [119]. La primera serie se sometió a la acción del CO_2 con la finalidad de comparar las diferentes matrices bajo el efecto de carbonatación acelerada; la segunda serie se expuso a la acción de cloruros mediante inmersión parcial en una solución de agua con cloruro de sodio (NaCl) 0.5 M; Finalmente, la tercera serie se sometió a la adición de distintos porcentajes de ión cloruro en el agua de mezcla (1%, 2% y 4% con respecto a la masa del material cementante). El proceso de mezclado del concreto se efectuó según la norma UNE-EN 12390-2: 2001, utilizando acero previamente decapado. Por su parte, fueron elaboradas probetas cilíndricas de 10 de diámetro por 20 cm de largo para la realización de las pruebas de migración de cloruros (norma NT BUILD 492).

Para la confección de las mismas se han usado moldes cilíndricos plásticos de polietileno con dimensiones de 150 X 76 mm, En la Figura 3.3 [119] se pueden ver con detalle el diseño de las probetas en estudio. Las dimensiones de las citadas probetas se adaptan bien al objeto de la investigación porque su tamaño las hace susceptibles a la acción de los diferentes ambientes agresivos, disminuyendo el tiempo del ensayo.

Los electrodos usados en este estudio han sido de acero corrugado al carbono de 10 mm de diámetro y longitud aproximada de 15 cm. Como contra electrodo se ha utilizado una malla de acero inoxidable de 15 X 24 cm.

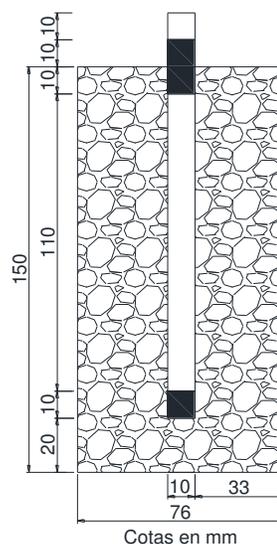


Figura 3.3. Esquema de fabricación de la probeta de concreto (propuesta por el Dr. P. Castro [119]).

3.2.2.-Probetas para exposición natural.

El proceso de mezclado del concreto se efectuó según la norma ASTM C39. De cada una de las 9 mezclas de concretos se fabricaron probetas de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de altura con acero embebido y un electrodo auxiliar de óxido de titanio (Figura 3.4), para monitorear la velocidad de corrosión instantánea mediante la prueba de resistencia a la polarización. Además se fabricaron probetas sin acero de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de altura para monitorear el avance en el frente de carbonatación y probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para verificar la resistencia a compresión. Es importante mencionar que el acero utilizado fue previamente decapado de acuerdo a la norma ASTM G-1, para su posterior verificación mediante pruebas gravimétricas. Por su parte, la Figura 3.5 muestra el electrodo de dióxido de titanio utilizado en las probetas con acero embebido.

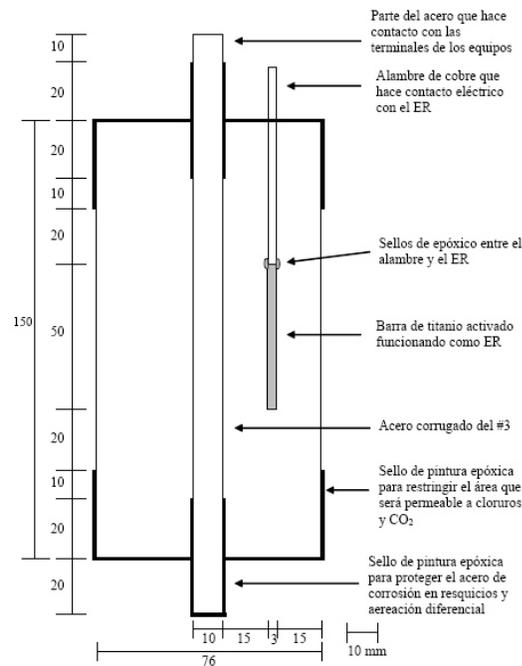


Figura 3.4. Detalle de la construcción de las probetas de concreto con acero embebido [6].

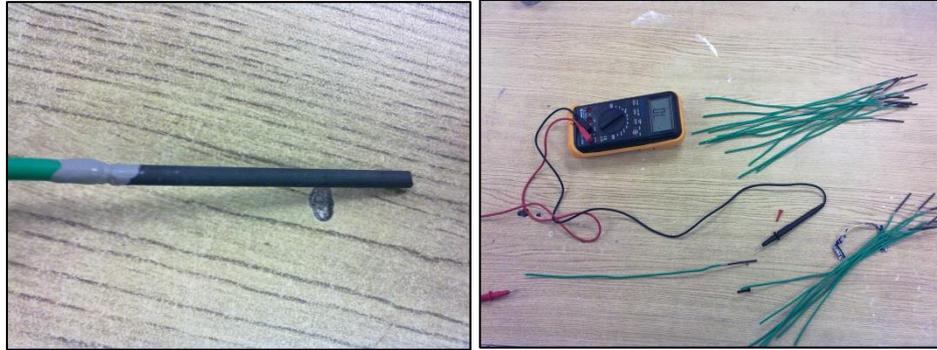


Figura 3.5. Detalle del habilitado de los electrodos de óxido de titanio; así como la verificación de la continuidad de la conexión necesaria para su instalación dentro de las probetas y el monitoreo.

3.2.3.- Preparación de los aceros a monitorear.

El acero viene suministrado en barras de 3, 6 y 9 m de longitud por lo que ha sido cortado con la ayuda de una sierra. Todas las barras han sido tratadas previamente a su pesado en una balanza electrónica de $\pm 0,001$ g de precisión. El tratamiento ha consistido en un primer baño en una disolución de hexametilentetramina al 3% en HCl 1M en un baño de ultrasonidos para eliminar todas las impurezas que el acero pudiera tener (Figura 3.6). A continuación, se han pasado por un chorro de agua para eliminar residuos y se han secado con aire caliente tras un baño en acetona, para así poder calcular al final del estudio la pérdida de peso que se ha producido por la corrosión y de este modo comprobar la bondad del método de resistencia a la polarización.



Figura 3.6. Limpieza y pesaje de los electrodos.

Tras la pesada de las barras se ha procedido a su preparación: el denominado extremo inferior de todas las armaduras ha sido recubierto con cinta aislante, en una longitud de 1 cm aproximadamente. A 11 cm se han colocado otros dos trozos de cinta

aislante para delimitar exactamente la superficie de acero que se ha expuesto a cada uno en las experiencias. Cada electrodo ha sido identificado con un número y sobre éste se ha puesto cinta adhesiva para evitar que la tinta se difumine. Como la longitud total de las barras ha sido de 15 cm, siempre han quedado unos centímetros de barra al descubierto, para así poder hacer las conexiones necesarias para realizar las correspondientes medidas de velocidad de corrosión (I_{corr}). Los extremos de estas barras que quedan expuestos al exterior han sido cubiertos con vaselina desde el primer momento de su colocación en el concreto para evitar el fenómeno de la corrosión en ellas.

Desde su preparación hasta su utilización, los aceros han sido envueltos en papel y colocados en un desecador de vidrio con gel de sílice para preservarlos de la humedad, y evitar así su oxidación. A continuación se muestra una ilustración de un electrodo listo para su colocación en el molde (Figura 3.7).



Figura 3.7. Electrodo de trabajo posterior a su habilitado.

3.3.- Elaboración de probetas

3.3.1.- Elaboración de probetas de laboratorio

En este caso, debido al pequeño volumen de concreto a fabricar, se ha realizado cada una de las mezclas en un molde de probeta cilíndrica, de 15 cm de diámetro por 30 cm de longitud. Tras asegurarse de que el molde está limpio y seco se ha introducido en primer lugar el agregado grueso, la arena y el cementante. Todo esto ha sido mezclado un poco en seco para conseguir una homogeneización de los materiales. A continuación se ha ido echando el agua (con la cantidad correspondiente de NaCl diluido en el caso de

las probetas con ión cloruro incluido en el agua de mezcla) poco a poco, mientras continuaba el mezcla. Una vez terminado de mezclar, se ha echado el concreto en una bandeja y con él se han rellenado los moldes mediante un cucharón (Figura 3.8). El llenado de los moldes se ha efectuado manualmente, y para enrasar se ha utilizado una espátula y la compactación se realizó mediante mesa vibradora.

Para la colocación de los electodos se ha llenado el molde hasta la mitad de concreto, entonces se ha clavado el electrodo correspondiente y se ha terminado de llenar hasta arriba de forma que se puedan ver los números de identificación de los electodos y la cinta aislante quede embebida en el concreto (Figura 3.9).



Figura 3.8. Mezcla de probetas para corrosión.



Figura 3.9. Colocación de electodos.

3.3.2- *Elaboración de probetas de exposición natural.*

De cada una de las nueve (9) mezclas se fabricaron 24 cilindros de 10 cm X 20 cm para realizar las pruebas de: resistencia a la compresión; así mismo, se construyeron 18 especímenes de concreto para la medición de carbonatación (sin acero embebido) y 6 probetas para la medición de la velocidad de corrosión instantánea. La Figura 3.10 muestra la mezcla realizada para las probetas de exposición natural; Por su parte, la Figura 3.11 muestra las probetas colocadas en campo.



Figura 3.10. Mezcla realizada para las probetas de exposición natural.



Figura 3.11. Probetas colocadas en campo.

3.3.3.- *Proceso de elaboración de las probetas.*

Durante el proceso de elaboración de las probetas se siguieron los siguientes pasos:

3.3.3.1.- *Caracterización de ingredientes.*

Siguiendo procedimientos estándar, fueron determinadas propiedades como composición química, distribución de tamaños de partículas, densidades, absorciones, pesos volumétricos y granulometrías.

3.3.3.2.- Pruebas de tanteo para definir proporciones de los concretos.

Se establecieron los parámetros fijos de las mezclas que permitieron evaluar las distintas variables en estudio y se determinaron las distintas proporciones para los concretos en estudio.

3.3.3.3.- Mezclas de concreto definitivas.

Habiendo obtenido las proporciones definitivas se reprodujeron las mezclas para determinar las propiedades de concreto en estado fresco y en estado endurecido que permitieron caracterizar el material.

De igual manera, en cada una de las mezclas se llevaron a cabo pruebas de calidad al concreto fresco como: determinación de la temperatura de la mezcla (ASTM C-1064), revenimiento (NMX C-156, ASTM C-143, y ASTM C-1362) y peso volumétrico (NMX C-162, ASTM C-29 y ASTM C-138), además, se verificó que el curado fue realizado, bajo la norma correspondiente. La Figura 3.12 muestra el ensaye de revenimiento realizado a las mezclas de concreto elaboradas para las probetas de exposición natural; La Figura 3.13 muestra el proceso de descimbrado de las probetas de carbonatación natural.



Figura 3.12. Verificación de la prueba de revenimiento en las mezclas elaboradas para las probetas de exposición natural.



Figura 3.13. Descimbrado de las probetas de concreto elaboradas para exposición natural.

3.4.- Curado del concreto.

El desmoldeo de cada probeta se ha hecho 24 horas después de su fabricación e inmediatamente después se han ido identificando con una cera resistente al agua. Para este proceso se han ido sacando los tapones, despegado las cintas aislantes y por último abriendo el tubo para sacar la probeta.

Posteriormente, estas han sido introducidas en la cámara húmeda durante su proceso de curado para evitar de este modo la variación de humedad en el concreto. Antes de su introducción en la cámara húmeda, se han cubierto los extremos visibles de los electrodos con vaselina para evitar la corrosión de los mismos. La Figura 3.14 muestra el proceso de curado de las probetas elaboradas para exposición natural.



Figura 3.14. Curado de las probetas elaboradas para exposición natural.

3.5.- Condiciones de exposición.

3.5.1.- Condiciones de las probetas sometidas al ataque de CO_2 .

Parte de las probetas fabricadas se sometieron a un proceso de carbonatación acelerada. En la Figura 3.15, se muestra dicha acción. La exposición a carbonatación acelerada constó de tres etapas: En la primera etapa las probetas se expusieron a una atmósfera de 100% de CO_2 y entre 60% y 70% de humedad relativa; pasados 50 días en la cámara de carbonatación, las probetas se sacaron a la humedad del laboratorio (50% - 60%) y temperatura ambiente (20 - 25°C). Para la parte final se guardaron las probetas en un desecador y se mantuvieron en una atmósfera del 100% de humedad relativa. La cámara de carbonatación consistió en un desecador conectado a un tanque de CO_2 (riqueza > 99.9%, seco). El flujo de CO_2 que se empleó fue discontinuo (una descarga de 5 minutos diaria) con un caudal aproximado de 10 l/min. Para simplificar, en este trabajo se hace referencia a que la atmósfera generada en la cámara es del 100% de CO_2 , aunque debido a la humedad de su interior, la concentración de CO_2 es ligeramente inferior. La temperatura de la cámara de carbonatación se mantuvo entre 20 °C y 25 °C y la humedad relativa de la misma se controló de forma que estuviera en el intervalo deseado, para ello

se introdujo una mezcla de glicerina con agua destilada en el fondo del desecador que eliminó el exceso de humedad producida durante el proceso de carbonatación; esto en concordancia con la norma DIN 50 008. Tomando como referencia trabajos previos [120,121], se realizó la elección de la humedad relativa a fin de acelerar al máximo la velocidad de carbonatación.



Figura 3.15. Probetas Expuestas a carbonatación.

3.5.2.- Exposición de probetas con ión cloruro incluido en el agua de mezcla.

Se estableció añadir 1%, 2% y 4% de ión cloruro por peso de material cementante en el agua de mezcla durante la elaboración de las probetas. Una vez que las probetas cumplieron 24 h se procedió al descimbrado y se comenzó con el monitoreo de la velocidad instantánea de corrosión mediante la técnica de Resistencia a la polarización (R_p). Durante el tiempo de observación las probetas se expusieron a tres humedades relativas (HR), primero se colocaron en un desecador con una HR del 90%, en la segunda etapa las probetas se mantuvieron en laboratorio a una HR de entre el 50% y el 60% y en la parte final del estudio las probetas regresaron al desecador con una HR del 100%. La Figura 3.16 muestra las probetas elaboradas con ión cloruro añadido en el agua de mezcla durante los primeros días de su monitoreo.



Figura 3.16. Probetas elaboradas con ión cloruro añadido en el agua de mezcla durante los primeros días de su monitoreo.

3.5.3.- Condiciones de las probetas sometidas al ataque de cloruros.

La evaluación ante el ingreso de ión cloruro se realizó mediante la inmersión parcial en una solución de agua con cloruro de sodio (NaCl) al 0.5 M, buscando similar la concentración de agua de mar. Durante el estudio, las probetas pasaron por cuatro etapas: en la primera etapa se sumergieron en la solución salina; pasados 50 días, se sacaron a humedad de laboratorio (entre 50% y 60%). A partir del día 190 las probetas se colocaron a una humedad relativa del 100% en un desecador y para la parte final (a partir del día 230) fueron puestas nuevamente bajo inmersión en la solución salina, según la imagen mostrada en la Figura 3.17.



Figura 3.17. Esquema de la probeta sometida al proceso de ataque por agua de mar sintética.

Dichas probetas, estuvieron parcialmente cubiertas por el agua, dejándose en su parte superior un centímetro de las mismas libre, para evitar el contacto directo de los electrodos con los cloruros. A lo largo de toda la experiencia se intentó mantener constante el nivel de la disolución y se evitó que la superficie libre de los electrodos se

vea afectada por la corrosión, protegiéndoles en sus extremos libres, con una capa de vaselina, que se repuso tantas veces fue necesario para evitar la corrosión de los electrodos.

3.5.4.- Sitios de exposición natural.

En función de la cercanía con una estación hidrometeorológica y el tipo de ambiente, se evaluaron los distintos lugares factibles a exponer las probetas; Seleccionando 3 sitios para la Cd. de Monterrey, mismos que a continuación se detallan en las Figuras 3.18 – 3.20:



Figura 3.18. Estación hidrometeorológica del Sistema Integral de monitoreo ambiental (SIMA) de la Secretaria de Desarrollo Sustentable, Gobierno del Estado de Nuevo León. Ubicada dentro del parque La pastora, Guadalupe, Nuevo León.



Figura 3.19. Oficinas del Organismo de Cuenca Río Bravo de la Comisión Nacional del agua (CONAGUA), ubicadas en Av. Constitución 4103 Oriente Col. Fierro Monterrey, Nuevo León.



Figura 3.20. Techado del laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil (FIC), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

3.6.- Ensayos de laboratorio.

3.6.1.- Potenciales de corrosión (E_{corr}) e intensidad de corrosión (I_{corr}) - resistencia de polarización.

Para las probetas en estudio se monitoreó el potencial de corrosión (E_{corr}) y la velocidad de corrosión instantánea (I_{corr}), que fue determinada mediante la técnica electroquímica de Resistencia a la polarización (R_p), en un potenciostato / galvanostato EG&G modelo 362 de Princetone Applied Research, con compensación de caída óhmica, acoplado a un registrador de señales (una computadora) y a un osciloscopio. Utilizando una configuración de 3 electrodos, donde se recurrió a un electrodo de referencia de calomelanos saturado (SCE, por sus siglas en inglés) y un electrodo auxiliar de malla de acero inoxidable. La técnica de R_p fue aplicada utilizando una velocidad de barrido de 0.5 mV/min y una perturbación de 10 mV en sentido anódico y 10 mV en sentido catódico respecto al potencial de corrosión (E_{corr}). Las Figuras 3.21 y 3.22 muestran la configuración de tres electrodos usada en la medición y las fotografías de la probeta en el momento de toma de medida.

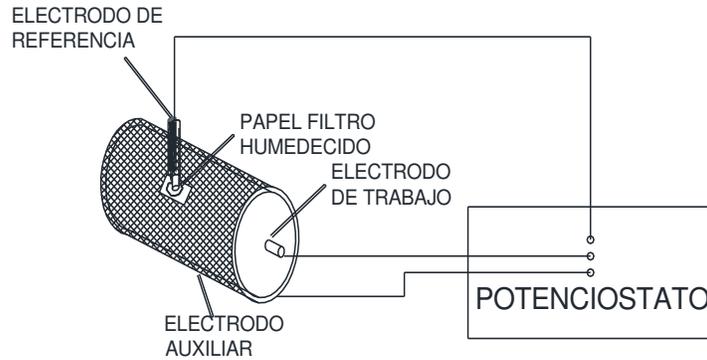


Figura 3.21. Esquema de la toma de medidas.

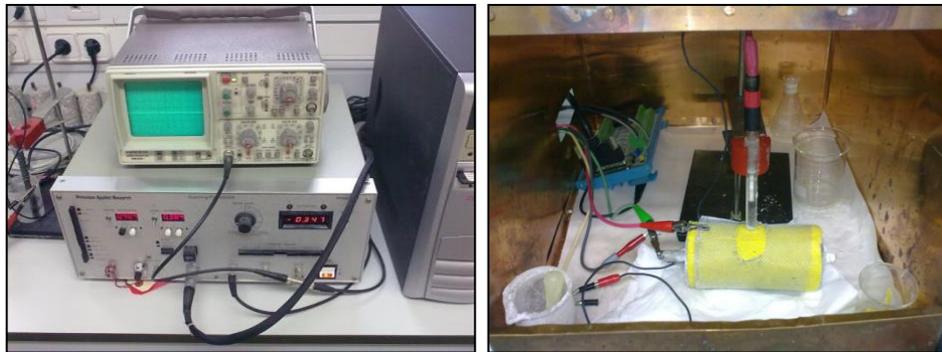


Figura 3.22. Fotos de la toma de medidas.

El potencial de corrosión, E_{corr} , para cada uno de los electrodos se obtiene por lectura directa en el multímetro del potencióstato; tras esta medida, se aplica al electrodo una diferencia de potencial de 20 mV, esto es un barrido desde $E_{\text{corr}} - 10 \text{ mV}$ hasta $E_{\text{corr}} + 10 \text{ mV}$, una vez definido el rango de corriente, las escalas adecuadas y compensada la caída óhmica, obtenemos, la curva de polarización del material que relaciona la intensidad de corriente con el potencial y cuya representación gráfica se obtiene en la computadora. El R_p es la pendiente de dicha curva alrededor del potencial de corrosión ($R_p = \Delta E / \Delta I$, cuando $\Delta E \rightarrow 0$), obtenido a partir de la Fórmula de Stern-Geary [122,123]. Es importante mencionar que el valor de R_p se relaciona con el I_{corr} mediante la constante B desarrollada por Stern y Roth [124] (ecuación 3.1).

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad \text{ecuación 3.1}$$

Stern y Roth [124] asentaron que cuando se utiliza un valor medio de $B = 26$ mV, el factor de error de I_{corr} máximo es de 2. En el caso del acero embebido en el concreto, un valor de 26 mV se considera adecuad para el estado activo (corrosión), mientras que $B = 52$ mV es más apropiado para el acero pasivo [125]. En nuestra investigación se utilizó un valor de $B = 26$ mV.

No debe olvidarse que la medida de la velocidad de corrosión es un valor en un momento determinado, es un valor instantáneo de la densidad de corriente de corrosión. Pero al tomar valores instantáneos durante el tiempo, obtenemos una curva de velocidad de corrosión frente al tiempo. Esto permite obtener la densidad de carga eléctrica total que ha intervenido en el desarrollo de la corrosión Q_t ($\mu\text{A}\cdot\text{día}/\text{cm}^2$).

$$Q_t = \int I_{corr} \cdot dt \quad \text{ecuación 3.2}$$

A partir de ésta densidad de carga total, cuyas unidades se transforman en C/cm^2 , se puede obtener la pérdida de peso electroquímico a través de la fórmula de Faraday y convertirla en g/cm^2 :

$$M = \frac{E_q \cdot Q_t}{96500} \quad \text{ecuación 3.3}$$

Dónde:

- M = masa de material perdido (g/cm^2)
- Q_t = densidad de carga que ha pasado (C/cm^2)
- E_q = equivalente-gramo del material ($\text{Fe}^{++} = (55,85/2) \text{ g/mol}$)
- Constante de Faraday = 96500 (C/mol)

3.6.2.- Determinación del coeficiente de migración de cloruros.

El ensayo de determinación del coeficiente de migración de cloruros descrito en la norma (NT Build 492, 1999) tiene por objetivo el estudio del comportamiento del concreto frente al ataque de sales marinas. En ella se define migración como:

«...el movimiento de iones bajo la acción de un campo eléctrico externo»

Su aplicación en probetas de concreto cilíndricas puede darnos una orientación de la durabilidad de las diferentes adiciones en concreto. Las probetas se ensayaron a 56 días de edad de curado. Para ello se sacaron de la cámara y se mantuvieron sumergidas en agua, hasta el momento de su pre-acondicionamiento; De las dos probetas cilíndricas disponibles se obtuvieron un total de tres cilindros de 50mm de altura y 100mm de diámetro tal y como muestra la Figura 3.23.



Figura 3.23. Probetas de concreto para determinar coeficiente de migración.

El pre-acondicionamiento se llevó a cabo creando el vacío durante dos horas. Transcurrido este tiempo se añadió a la bomba de vacío agua destilada. Pasada una hora se apagó la bomba de vacío y se dejaron las muestras inmersas durante 18 ± 2 horas.

Para poder obtener los valores del coeficiente de migración de cloruros, se róseo la muestra con nitrato de plata (AgNO_3), sobre el corte fresco de la probeta ensayada a tensión por compresión diametral. La plata precipita en contacto con el ión cloruro (Cl^-) permite medir la profundidad de penetración de cloruros en la muestra tal y como refleja la Figura 3.24. Con los datos del ensayo podemos calcular el coeficiente de migración de cloruros según la ecuación 3.4, descrita por la norma NT Build 492-1999.

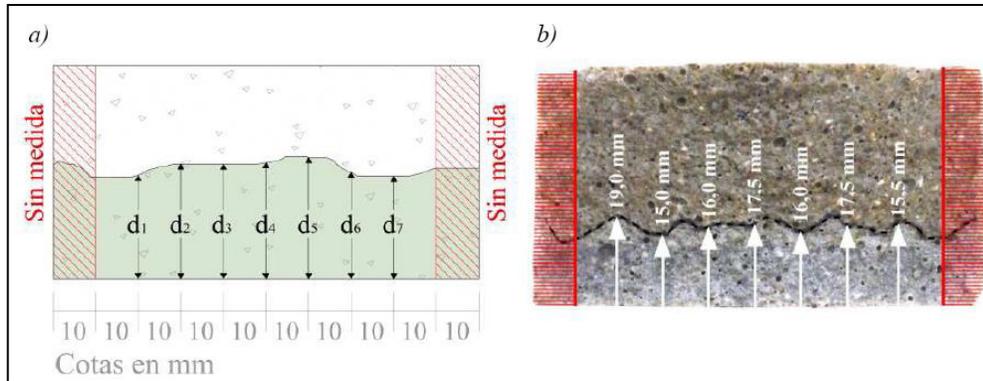


Fig. 3.24. Perfil de penetración de cloruros en concreto: a) Medida de la profundidad de penetración de cloruros en un corte axial de la muestra, b) ejemplo de una muestra ensayada.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} (x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)L x_d}{U-2}}) \quad \text{ecuación 3.4}$$

Dónde:

D_{nssm} : coeficiente de migración de cloruros ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$);

T: temperatura media de la disolución anolítica ($^{\circ}\text{C}$);

L: espesor de la muestra (mm);

U: valor absoluto del voltaje aplicado (V);

t: duración del test (horas);

x_d : media de las profundidades de penetración (mm).

3.7.- Ensayos de probetas en exposición natural.

Las probetas en exposición natural fueron sometidas a pruebas de resistencia a compresión, verificación de la velocidad instantánea de corrosión mediante la técnica de resistencia a la polarización y medición del frente de carbonatación. Dichas pruebas se detallan a continuación.

3.7.1.- Ensayos de resistencia a compresión.

Para la determinación de la resistencia a compresión de las mezclas seleccionadas, se utilizaron 2 cilindros de 10 X 20 cm para cada tipo de mezcla. Dichos cilindros fueron elaborados y curados durante 56 días de acuerdo a la Norma ASTM C192. El ensayo se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C 39 en una prensa Modelo ADR-Auto range, mca. Ele international; La Figura 3.25 muestra la imagen del equipo utilizado.



Figura 3.25. Imagen de la prensa de ensayo Modelo ADR-Auto range, mca. Ele international.

3.7.2.-Ensayos de velocidad de corrosión instantánea.

Para las medidas del potencial de corrosión (E_{corr}) y la resistencia a la polarización (R_p) se usó un Potenciostato/Galvanostato VoltaLab PGZ-301 conectado a una computadora personal. La prueba de resistencia a la polarización se realizó aplicando una polarización al sistema de ± 10 mV a partir del potencial de corrosión del acero, utilizando una velocidad de barrido de 12 mV/min disminuyendo en algunos casos hasta 6 mV/min para un estado pasivo del acero. Los resultados de R_p fueron transformados a densidad de corriente (I_{corr}) con la relación de Stern and Geary ($I_{corr}=B/R_p$). Tomando en cuenta los diferentes valores de b : si el acero estaba en estado pasivo (si $E_{corr} > -250$ mV vs SCE, $b = 52$ mV) o en estado activo (si $E_{corr} < -250$ mV vs SCE, $b = 26$ mV). Utilizando una configuración a tres electrodos, empleando un electrodo de referencia de calomelanos saturado (SCE, por sus siglas en inglés) y una placa de acero inoxidable 304L como electrodo auxiliar. La Figura 3.26 muestra el ensayo de una probeta del estudio.

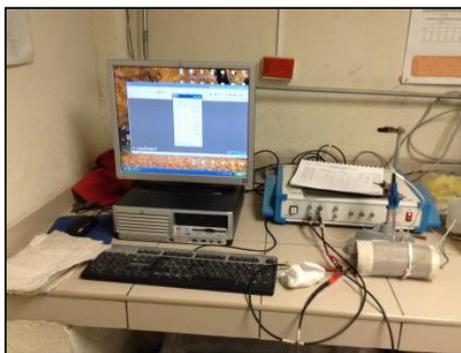


Figura 3.26. Imagen del ensayo de R_p de las probetas expuestas a carbonatación natural.

3.7.3.-Ensayos de monitoreo en el avance del frente de carbonatación.

El objetivo de esta prueba es determinar el avance de la carbonatación del concreto por medio del rociado de un corte fresco ($t < 15$ minutos) de las probetas del concreto en estudio con una solución de fenolftaleína disuelta en alcohol al 1%; Lo cual, produce una coloración rosa oscuro cuando está en presencia de un medio básico y ausencia de color en las zonas carbonatadas (ver Figura 3.27). Con la realización de mediciones periódicas es posible establecer el avance del frente de carbonatación.



Figura 3.27. Imágenes de rodajas de probetas expuestas a carbonatación natural rociadas con fenolftaleína.

3.8.- Análisis de los parámetros climáticos de las zonas en estudio.

Se realizó el análisis de los datos hidrometeorológicos de dos dependencias gubernamentales con la intención de identificar los factores que nos muestren la variabilidad climática de los sitios en estudio y sirvan de base para establecer la ecuación propuesta. Una fuente es el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) de la secretaria de desarrollo sustentable del gobierno de Nuevo León y la otra es el Organismo de Cuenca Río Bravo de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

3.8.1.- Estaciones del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) de la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Gobierno de Nuevo León.

El Sistema Integral de monitoreo Ambiental (SIMA) cuenta con 8 estaciones de medición en el área metropolitana de las cuales 5 estaciones tienen datos desde 1993 (22 años). Se han calculado los promedios mensuales y anuales de variables tales como: temperaturas máximas, mínima y promedio, precipitación, presión atmosférica,

radiación solar máxima y promedio y humedad relativa. La Figura 3.28 muestra la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas. Mientras que la Tabla 3.5 da referencias de las mismas.

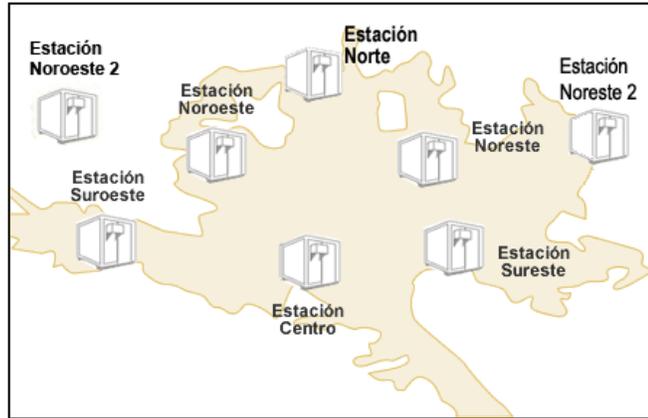


Figura 3.28. Ubicación de los sitios de las estaciones de monitoreo de SIMA. Adaptado de la página en internet de SIMA.

Tabla 3.5. Descripción de la ubicación de los sitios de las estaciones de monitoreo de SIMA. Adaptado de la página en internet de SIMA.

<p>Estación Sureste (La Pastora) (Sitio de exposición de probetas) Ubicada en el parque La Pastora en Guadalupe, N.L., en las coordenadas geográficas 25°40' 06" Norte, 100°14' 54" Oeste a una altura de 490 msnm (metros sobre el nivel del mar). Esta estación está localizada a favor del viento de un limitado corredor industrial en un área altamente poblada al sureste de la ciudad.</p>
<p>Estación Noreste (San Nicolás) Ubicada en la colonia Unidad Laboral en San Nicolás de los Garza, N.L., en las coordenadas geográficas 25°44' 42" Norte, 100°15' 17" Oeste a una altura de 500 msnm (metros sobre el nivel del mar). Esta estación está localizada en un área altamente poblada, permitiendo determinar los índices de contaminación atmosférica en la parte Norte del área Metropolitana de Monterrey.</p>
<p>Estación Centro (Obispado) Ubicada en los patios de Agua y Drenaje de Monterrey en el área del Obispado. Sus coordenadas geográficas son 25°40' 32" Norte, 100°20' 18" Oeste a una altura de 556 msnm (metros sobre el nivel del mar). Esta estación fue ubicada, principalmente, para monitorear la contaminación de fuentes fijas y móviles en el Centro del área Metropolitana de Monterrey para medir impactos del tráfico y la mezcla de los contaminantes de la mayoría de las fuentes industriales.</p>
<p>Estación Noroeste (San Bernabé) Ubicada en los talleres de Monterrey en la Col. San Bernabé, Monterrey, N.L., en las coordenadas geográficas 25°45' 11" Norte, 100°22' 11" Oeste a una altura de 554 msnm (metros sobre el nivel del mar). Esta estación está localizada a favor del viento de salida, en un área de alta concentración de población, al Oeste de la mayoría de las fuentes industriales y del tráfico del área Metropolitana de Monterrey.</p>

<p>Estación Suroeste (Santa Catarina) Ubicada en el centro de Santa Catarina, N.L., en las coordenadas geográficas 25°40' 30" Norte, 100°27' 30" Oeste a una altura de 678 msnm (metros sobre el nivel del mar). Esta estación está localizada a favor del viento de la mayoría de las fuentes industriales de Monterrey, San Pedro Garza García y Santa Catarina.</p>
<p>Estación Noroeste 2 (García) Ubicada en las calles Sierra Real y Sierra García en el Fraccionamiento Sierra Real en el municipio de García Nuevo León, en las coordenadas geográficas 25°46'59" Norte, 100°35'09" Oeste a una altura de 715 msnm (metros sobre el nivel del mar). Esta estación está localizada a favor del viento de la mayoría de las fuentes industriales del municipio de García, en un área de alta concentración de población.</p>
<p>Estación Norte (Escobedo) Ubicada en avenida Unión y calle Barcelona en el Fraccionamiento Santa Luz en el municipio de Gral. Escobedo N.L., en las coordenadas geográficas 25°48'2.43" Norte, 100°20'39.68" Oeste a una altura de 525 msnm (metros sobre el nivel del mar). Esta estación está localizada dentro de un área de concentración poblacional, la cual monitorea la contaminación generada por las fuentes fijas y móviles de la zona norte del Área Metropolitana de Monterrey.</p>

3.8.2.- Estaciones del Organismo de Cuenca Río Bravo de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

De manera similar a como se realizó el tratamiento estadístico de los datos hidrometeorológicos de SIMA, en el caso de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se seleccionaron 6 estaciones meteorológicas correspondientes al área metropolitana de Monterrey. Las cuales se pueden observar en la Figura 3.29 y la Tabla 3.6. Es importante mencionar que aunque existe más estaciones de monitoreo climático en la zona, no todas las estaciones cuenta con medición automatizada, razón por la cual se realizó esta selección de sitios.



Figura 3.29. Croquis de ubicación de las estaciones de monitoreo ambiental de CONAGUA.

Tabla 3.6. Número de identificación y municipio de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas de la CONAGUA para este estudio.

Estación	Nombre de Estación
C19002	AGUA BLANCA. STA.CATARINA
C19004	APODACA. APODACA
C19026	ICAMOLE. GARCIA
C19052	MONTERREY. N.L.
C19058	SANTA CATARINA
C19061	TOPO CHICO. MONTERREY

Como se mencionó en la parte introductoria de este apartado, los datos de las estaciones hidrometeorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Sistema Integral de monitoreo Ambiental (SIMA) de la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Gobierno de Nuevo León; Permitieron la realización del análisis de los parámetros hidrometeorológicos para buscar evidencias de cambio climático y tratar de establecer el comportamiento climático de la ciudad de Monterrey, además, de servir de parámetro de alimentación en la ecuación propuesta de predicción del avance en el frente de carbonatación de las estructuras de concreto reforzado.

Capítulo IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos durante la investigación; Aquí, se establecen los comportamientos en laboratorio de las distintas matrices ante los agentes agresivos seleccionados. Así mismo, se muestran los procesos teóricos que permitieron establecer la ecuación de predicción en el avance del frente de carbonatación y su contrastación con los resultados experimentales de las probetas expuestas a carbonatación natural.

4.1.- Resultados de la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en concretos con adiciones sometidos a un ataque por carbonatación acelerada.

La comparativa de las matrices frente a carbonatación se realizó con la finalidad de conocer en laboratorio el efecto de la adición de la Ceniza Volante en el avance del CO_2 , debido a la incertidumbre que genera el uso de este tipo de adición por el consumo de portlandita durante su hidratación. En las Figuras 4.1 a 4.3, se muestran las probetas elaboradas con relaciones $a/mc = 0.46$ (Figura 4.1), $a/mc = 0.59$ (Figura 4.2) y $a/mc = 0.70$ (Figura 4.3), para los tres contenidos de sustitución de CV (0%, 25% y 50%) seleccionados. La exposición consistió en tres etapas: durante la primera etapa de conservación, estas probetas se expusieron a una atmósfera de 100% de CO_2 y un 70% de humedad relativa, periodo durante el cual se observó, después del periodo de iniciación, una mayor velocidad de corrosión en las mezclas con sustitución. No obstante, la mezcla de un 25% de sustitución mostró valores de corrosión muy parecidos a la muestra patrón (0% CV). Pasados 50 días en la cámara de carbonatación, las probetas se sacaron a humedad (50 - 60%) y temperatura ambiente (20 - 25°C). Durante esta fase se aprecia una disminución de los niveles de corrosión general, la cual, es debida a la resistividad de la matriz cementante, que se impone en esas condiciones.

Para la parte final, se guardaron las probetas en un recipiente estanco y se mantuvieron en una atmósfera del 100% de humedad relativa para observar la evolución de las velocidades de corrosión, en un ambiente de alta humedad; Volviendo a tener

comportamientos similares a los presentados en la primer etapa del estudio. Nuevamente, de manera general se observó que cuanto mayor es el contenido de sustitución de ceniza volante, mayor es la velocidad de corrosión. De donde es importante resaltar que en principio se planteaba que un aumento progresivo de la sustitución del clinker por la CV implicaría un aumento de la velocidad de corrosión. Sin embargo, no se registran diferencias significativas en este parámetro, ya que las velocidades de corrosión entre la mezcla patrón y la mezcla de 25 % de CV son semejantes. La mezcla con 50% de CV, por su parte, sí mostró mayores velocidades de corrosión, lo cual, es debido, principalmente, a la hidratación de la CV que provoca una caída en la reserva alcalina de la matriz cementante y consecuentemente un mayor avance del frente carbonatado.

En la parte correspondiente al potencial de corrosión, se observa, como es de esperar, que los E_{corr} de las tres relaciones a/mc, muestran una clara ordenación de los valores en función de la cantidad de ceniza volante utilizada; Cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de CV, más negativo es el potencial de corrosión. Esta tendencia es la esperada, debido a que la sustitución de cemento por CV produce una elevada demanda de agua y un descenso de la reserva alcalina. Los valores de E_{corr} se agrupan en valores menos negativos para los aceros embebidos en los concretos sin sustitución de ceniza volante; El valor de E_{corr} de los aceros de los concretos con 25% de ceniza volante presenta un potencial de corrosión ligeramente inferior; finalmente, los que más ceniza contienen (50% CV), muestran los valores más negativos, que se asocian una mayor probabilidad de corrosión. No obstante, las velocidades de corrosión son muy cercanas en la primera etapa, debido al comienzo del proceso de deterioro, donde el agente nocivo no ha llegado a la interface acero-concreto. Durante la segunda etapa en que las probetas se sacaron a condiciones de laboratorio (HR 50 - 60% y T 20 - 25°C), se observa una clara disminución de las velocidades de corrosión de los tres electrodos, debido a la caída de humedad del poro que ralentiza la corrosión del acero; Finalmente en la tercera etapa encontramos el desempeño esperado, donde a mayor contenido de sustitución de CV, encontramos los valores más altos de corrosión.

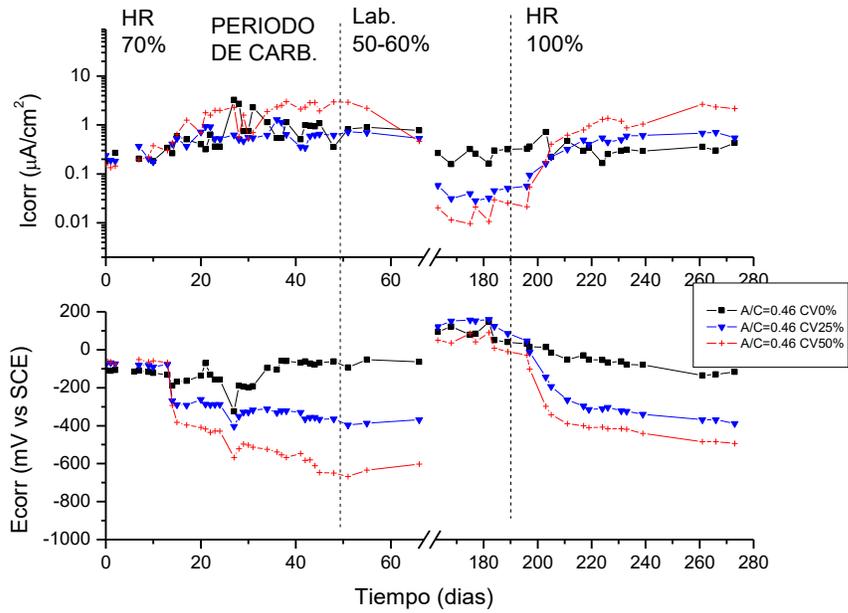


Figura 4.1. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a carbonatación acelerada. Relación $a/mc = 0.46$.

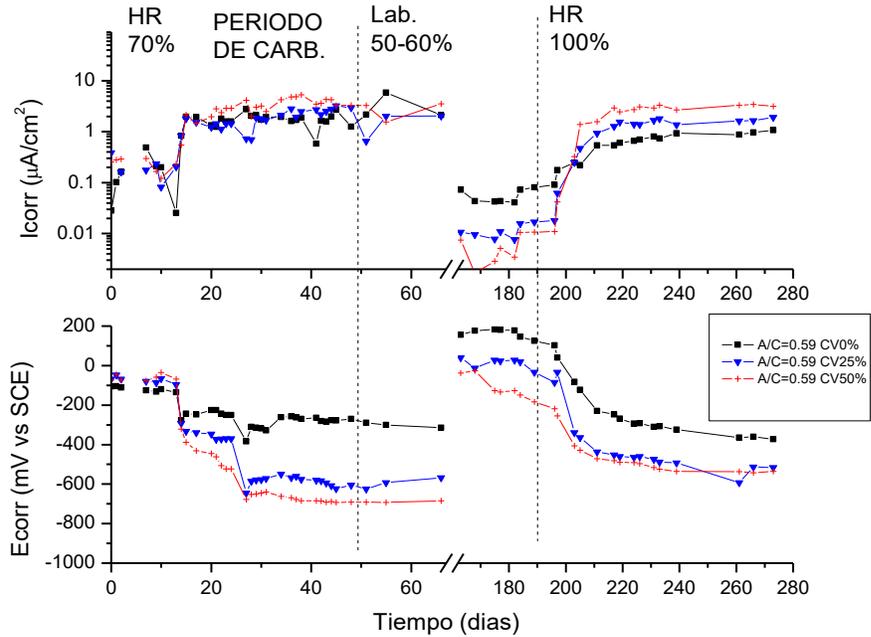


Figura 4.2. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a carbonatación acelerada. Relación $a/mc = 0.59$.

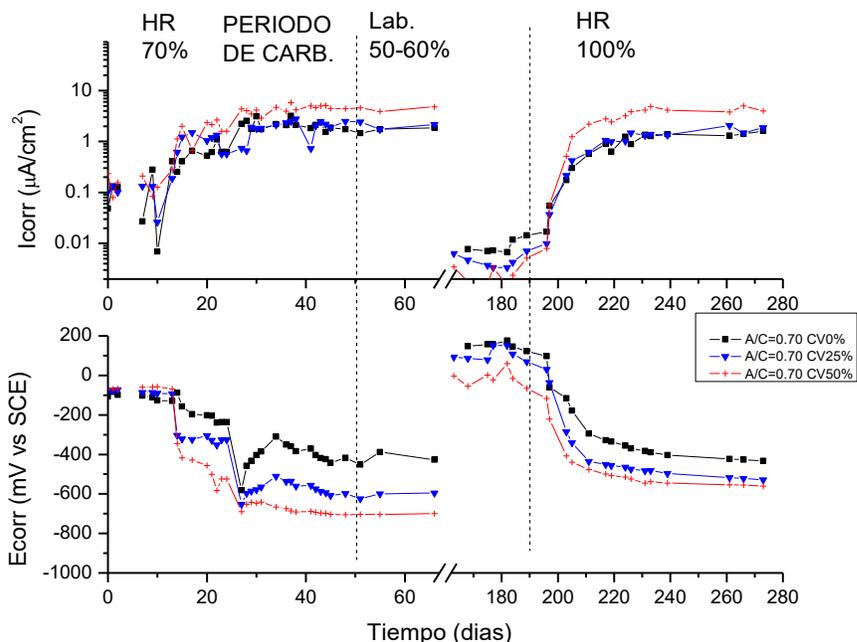


Figura 4.3. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a carbonatación acelerada. Relación $a/mc = 0.70$.

Lo anterior nos permite establecer que, ante carbonatación acelerada, la mezcla sin adición mineral (0% de CV) mostró menores velocidades de corrosión, sin embargo, la sustitución de un 25% de CV no se alejó mucho de este comportamiento, llegando incluso a igualarlo en la relación $a/mc = 0.70$. Comportamiento esperado considerando que la sustitución de Ceniza volante consume hidróxido de calcio para su hidratación lo cual nos haría pensar que a mayor contenido de sustitución de CV mayor será la caída del pH, y aunque la matriz se densifica, como consecuencia de la hidratación de la CV, esta densificación en ocasiones no es suficiente para compensar la pérdida de alcalinidad. De donde es importante resaltar que en principio se planteaba la hipótesis de que un aumento progresivo de la sustitución del clinker por CV implicaría un aumento de la velocidad de avance del frente de carbonatación, sin embargo, no se registran diferencias significativas en este parámetro. Es interesante mencionar que en estudios previos [126,127], se ha observado que una baja en la reserva alcalina solo afecta al tiempo de iniciación de la corrosión cuando la porosidad es alta, si tenemos bajas porosidades con una mínima reserva alcalina es posible proteger al acero de refuerzo durante la fase inicial. De manera que podría evaluarse de manera más específica, su posible uso como material de construcción de estructuras de concreto reforzado.

4.2.- Resultados de la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en concretos con adiciones expuestos a cloruros, mediante inmersión parcial en solución de agua con cloruro de sodio 0.5 M.

Las Figuras 4.4 - 4.6 presentan las curvas de evolución de la intensidad de corrosión y el potencial de corrosión de los aceros embebidos en los nueve tipos de concretos sometidos a un ataque por cloruros mediante inmersión en solución salina, simulando el ataque por ión cloruro en el medio costero. En estas figuras, se muestran los resultados correspondientes a las cuatro etapas del estudio, donde se sometieron los electrodos a diferentes condiciones ambientales; Durante la primera etapa, se sumergieron en una disolución de agua destilada con NaCl 0,5 M para acelerar la difusión de este agente, aunque por efecto de la humedad, la velocidad de corrosión fue baja; Pasados 50 días, las probetas se sacaron a humedad (50% - 60%) y temperatura ambiente (20°C – 25°C), donde en general, se observó un incremento en las velocidades de corrosión, debido a la baja en la humedad que propicio el incremento en la concentración de oxígeno; Posteriormente después del día 190 las probetas se colocaron a una humedad relativa del 100% en un desecador y en la parte final fueron puestas nuevamente bajo inmersión en agua de mar sintética.

En la Figura 4.4 ($a/mc = 0.46$), se aprecian velocidades de corrosión muy parecidas para los tres aceros (0%, 25% y 50% CV), no se observa una activación de las probetas debido a que el tiempo de estudio no permitió establecer los comportamientos de las distintas matrices. En lo correspondiente a los valores del potencial de corrosión no se observó un comportamiento claro, es de notar que el electrodo con 50 % de CV mostró mayores potenciales durante la primer etapa, no obstante, este comportamiento no continuó durante el estudio; Al final del estudio, la mezcla con 25% de CV fue la que mostró los potenciales más positivos, sin embargo, esta disminución de potencial no fue consistente con una baja en la velocidad de corrosión instantánea de la misma. Esta falta de diferencia para los días de estudio, es un indicio del buen comportamiento de las matrices con CV que muestran desempeños similares a las muestras patrón (0% CV).

En las Figuras 4.5 ($a/mc = 0.59$) y 4.6 ($a/mc = 0.70$), los electrodos de acero presentan velocidades de corrosión muy parecidas en la primera y segunda etapa, con

bastante fluctuación en la relación $a/mc=0.70$. Entre el día 50 y el 190, periodo en que las probetas se sacaron a humedad (50 - 60%) y temperatura ambiente (20 - 25°C), se observó, una clara tendencia de los concretos a la disminución de los niveles de corrosión general. El descenso de nivel de corrosión se debe a que la humedad del laboratorio es muy baja y consecuentemente, la falta de humedad en el interior de la probeta produce un aumento de la resistividad de la matriz cementante, lo que dificulta el movimiento de los productos de corrosión entre las zonas anódicas y catódicas que reduce por tanto la corrosión. No obstante, después del día 200 comenzó a ocurrir una separación en las velocidades de corrosión, encontrando un mejor desempeño en la mezcla con 25% de ceniza volante para la relación $a/mc = 0.59$, y muy parecidos para las sustituciones de 25% y 50% en la relación $a/mc= 0.70$; El electrodo de acero sin adición, mostró la mayor velocidad de corrosión durante este periodo para las dos relaciones a/mc . Estudios anteriores [128], con estas puzolanas han demostrado una densificación del material, que justifica su menor nivel de corrosión a pesar de la disminución en las características resistentes. En adición, hay que considerar otro aspecto no contemplado hasta ahora, y es el aumento en la capacidad de fijación de cloruros que tiene lugar al sustituir el cemento portland por ceniza volante. Las CV tienen en su composición aluminatos capaces de fijar cloruros libres por formación de sal de Friedel, y en consecuencia transformarlos en cloruros ligados. En adición, autores [56], indican que los principales caminos para que se produzca la difusión de los iones cloruro en el concreto son los poros interconectados en la pasta de cemento, los poros interconectados en el agregado y los poros interconectados en la interfase entre la pasta y el agregado. Generalmente, la permeabilidad del agregado es significativamente más baja que la de la pasta hidratada, así que si la interfase entre el agregado y la pasta no tiene aparentes deficiencias, la mayor difusión se produce en la pasta. Al emplear ceniza volante en el cemento, se aumenta la compacidad de la pasta, reduciendo de este modo la difusión de cloruros.

En resumen, al exponer las probetas en la solución de agua con cloruro de sodio (NaCl) 0.5 M, se observó, en general, que a mayor contenido de ceniza volante mayor es la protección de nuestro concreto ante el ataque del ión cloruro. El mejor comportamiento de las mezclas con ceniza volante se debe, principalmente, a la reacción

puzolánica que incrementa la tortuosidad de la matriz y reduce la difusión de los cloruros, sin embargo, al obtener velocidades de corrosión menores para el acero de la sustitución de 25% de CV en la relación $a/mc = 0.56$ y semejantes para los aceros de las sustituciones de 25% y 50% de CV en la relación $a/mc = 0.70$, se estima que un incremento en la sustitución de CV no necesariamente resultará en una mayor tortuosidad de la matriz debido a la falta de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) para permitir la reacción puzolánica.

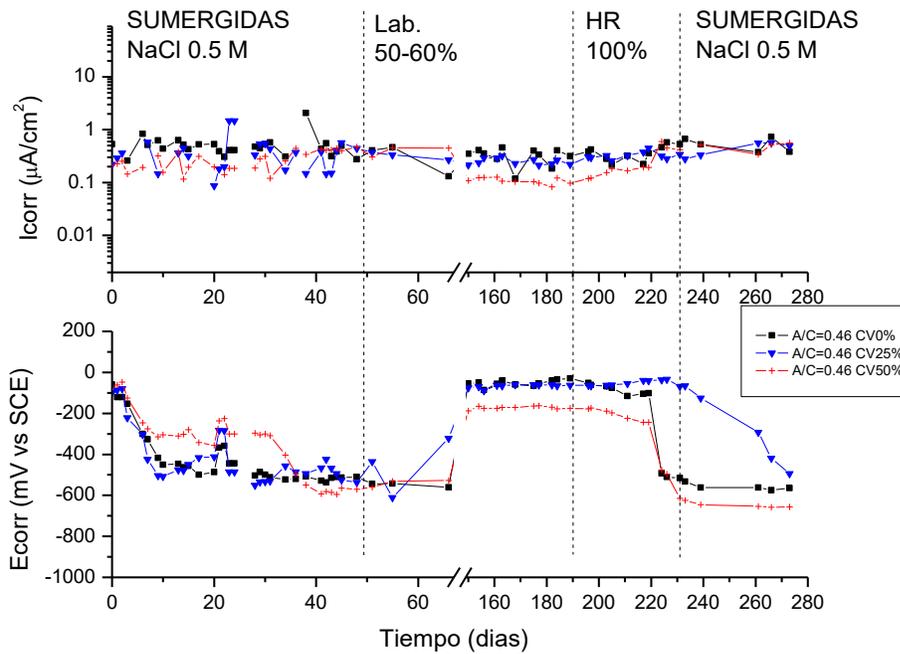


Figura 4.4. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a ataque por cloruros externos. Relación $a/mc = 0.46$.

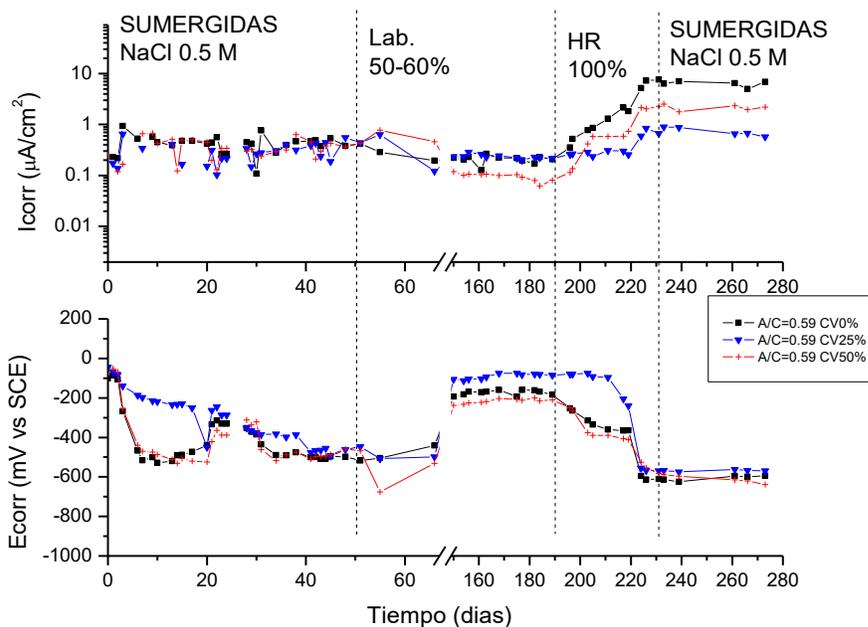


Figura 4.5. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a ataque por cloruros externos. Relación $a/mc = 0.59$.

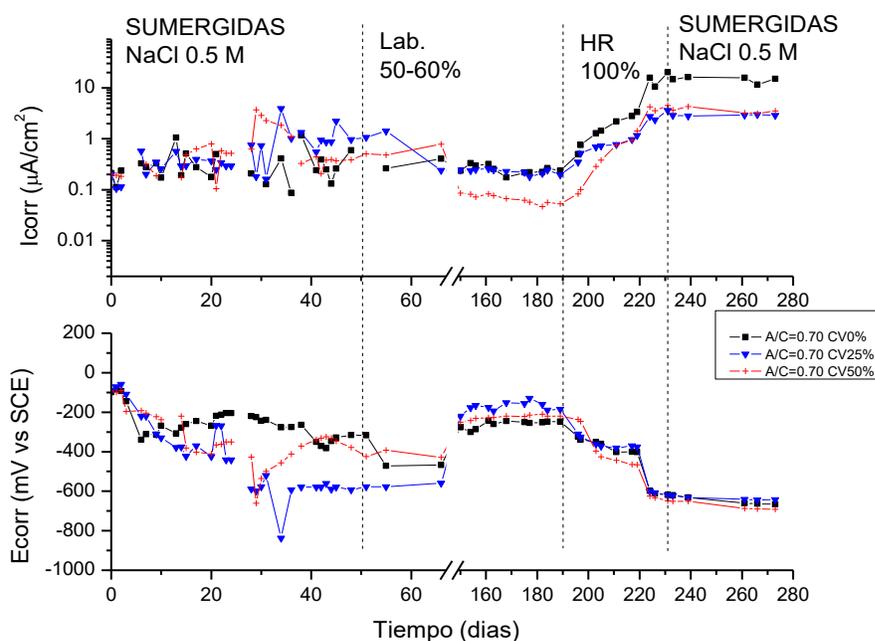


Figura 4.6. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a ataque por cloruros externos (Agua de mar sintética). Relación $a/mc = 0.70$.

4.3.- Efecto de la sustitución de ceniza volante en la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en concretos con adiciones minerales sometidos a un ataque por cloruros, mediante la inclusión de cloruro de sodio en el agua de mezcla.

La tecnología en concreto actual permite que sea difícil encontrar obras en las que se añadan ingredientes contaminados con cloruros a la mezcla, no obstante, existen ocasiones en que es necesario, ya sea por poca disponibilidad de agua dulce o por escases de agregados sin contaminantes. La adición de ión cloruro en el agua de mezcla se realizó con la intención de observar la respuesta de las distintas matrices para restaurar o mantener la capa pasiva del acero cuando el agente ya se encuentra dentro del concreto.

Las Figuras 4.7 (0% CV), 4.8 (25% CV) y 4.9 (50% CV), presentan la evolución de los potenciales y la velocidad de corrosión de los aceros embebidos en concretos con distintas concentraciones de cloruros añadidos en el agua de mezcla (1%, 2% y 4%), conservados a distintas humedades relativas durante el estudio. Inicialmente se observa que existen valores elevados de corrosión debido al proceso de pasivado de los aceros [129]. En general, se encontró claramente una correlación inversa entre el potencial de corrosión, E_{corr} , y la velocidad de corrosión, I_{corr} . Esta tendencia es la esperada, ya que un menor potencial (valores más negativos de E_{corr}) de corrosión indica más tendencia a que se produzca la corrosión. Se puede observar cómo los valores de E_{corr} se agrupan en valores menos negativos para los aceros embebidos en los concretos con adición de 1% de cloruros con respecto al peso de cemento, el valor de E_{corr} de los aceros del concreto con 2% de cloruros presenta un potencial de corrosión ligeramente inferior y finalmente los que más cloruros contienen (4%) muestran potenciales menores. De manera análoga, los valores de I_{corr} de los aceros de los concretos con mayor contenido de cloruros son los más elevados.

En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, se distingue como un mayor porcentaje de adición de cloruros resulta en una mayor velocidad de corrosión durante todo el estudio. Además, en la Figura 4.7 (0% CV), el acero correspondiente a la mezcla con un 1% de adición mantuvo el mismo estado de corrosión prácticamente durante todo el estudio. Lo anterior hace suponer que el umbral de cloruros necesarios para activar la corrosión en

esta matriz es superior al 1%. Para la Figura 4.8 (25% CV), se distinguen mayores valores de corrosión que las mezclas sin sustitución (Figura 4.7), lo cual es debido a la baja en la reserva alcalina debido a la hidratación de la CV. Este mismo comportamiento es observado en la Figura 4.9 (50% CV). Obteniendo un comportamiento lógico de acuerdo a la literatura, en donde, a mayor contenido de agente agresivo y menor reserva alcalina, obtenemos mayores velocidades de corrosión.

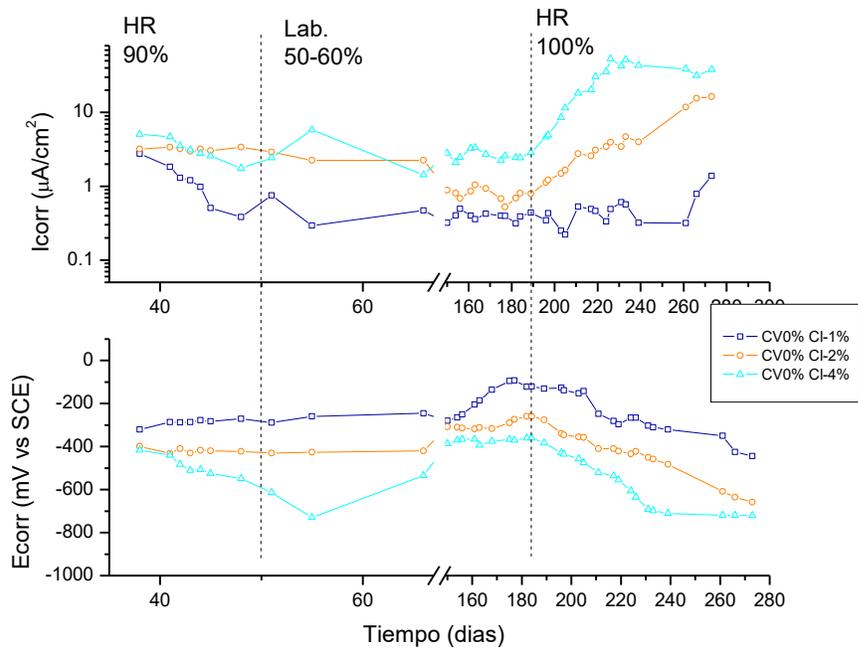


Figura 4.7. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros internos (cloruro de sodio añadido en el agua de mezcla). Contenido de Ceniza volante del 0%.

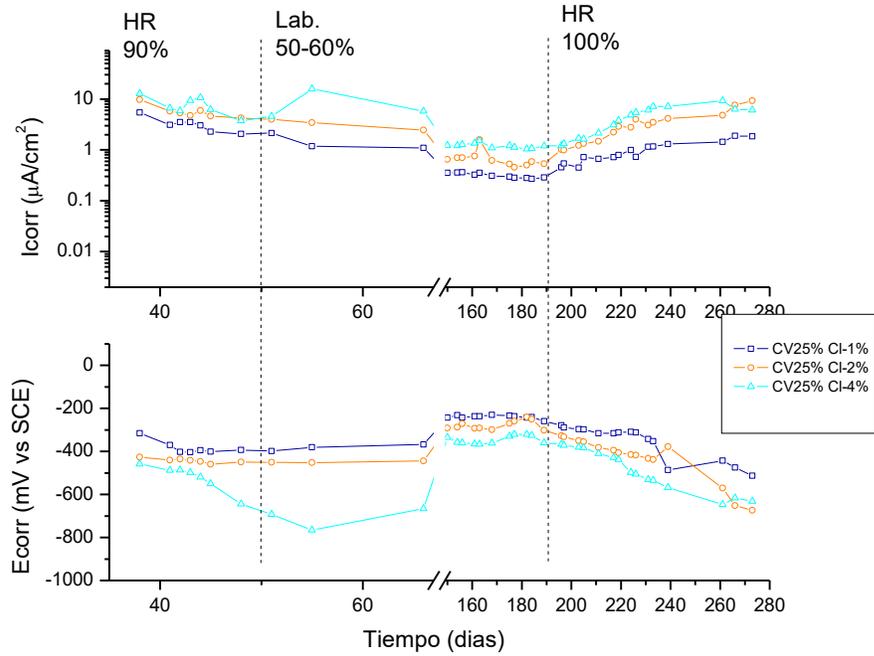


Figura 4.8. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros internos (cloruro de sodio añadido en el agua de mezcla). Contenido de Ceniza volante del 25%.

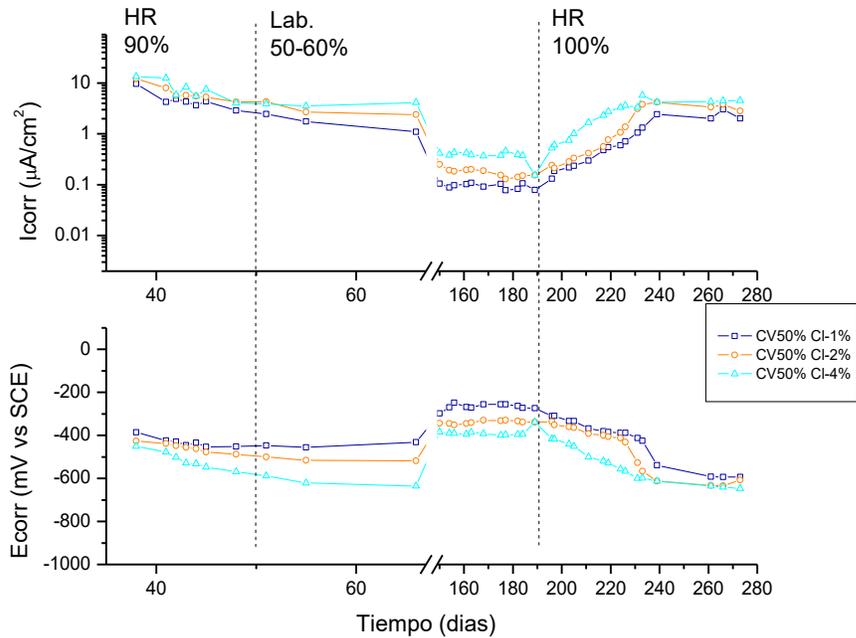


Figura 4.9. Evolución de la Icorr y la Ecorr de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros internos (cloruro de sodio añadido en el agua de mezcla). Contenido de Ceniza volante del 50%.

4.3.1.- Efecto de la sustitución de Ceniza Volante en la velocidad de corrosión de probetas con ión cloruro añadido en el agua de mezcla.

Como otra manera de ejemplificar el efecto de la ceniza volante en la resistencia ante un ataque por ión cloruro, se muestran las Figuras 4.10 – 4.12 en las cuales se realiza una comparación de los electrodos de las Figuras 4.7 – 4.9, pero variando el contenido de ceniza volante para un mismo contenido de adición de ión cloruro en el agua de mezcla.

En la Figura 4.10 (1% Cl⁻), podemos mencionar, que los tres aceros mostraron velocidades de corrosión altas durante el estudio, solo la mezcla con sustitución del 50% de CV pudo disminuir la velocidad de corrosión de su acero para el periodo que comprende entre los 150 y los 200 días, además, es posible comentar que el acero de la mezcla sin adición de CV mostró los menores valores de Icorr durante los primeros 60 días, no obstante, al final del estudio (periodo comprendido entre 200 y 280 días) los tres electrodos de acero mostraron valores de corrosión semejante.

En la Figura 4.11 (2% Cl⁻), se observa un mejor comportamiento de la Mezcla con 50% de sustitución de ceniza volante durante el periodo de 150 a 220 días, sin embargo, durante los primeros 60 días y los últimos 50 días del estudio las velocidades medidas para los tres electrodos fueron muy parecidas. Aquí se puede apreciar el efecto benéfico de la ceniza volante en la durabilidad ante este agente, ya que la ceniza volante es añadida en sustitución a la mezcla, lo cual permite un ahorro económico y sustentable al disminuir el consumo de cemento y reutilizar un subproducto de desecho de la industria termoeléctrica como lo es la CV.

Finalmente, para la Figura 4.12 (4% Cl⁻), se observa que, aunque en la etapa inicial del estudio (primeros 70 días) los tres electrodos muestran velocidades de corrosión muy semejantes, después de los 150 días y hasta el final del estudio es claro como el electrodo patrón (0% CV) está sujeto a mayores velocidades de corrosión; Entonces, nuevamente es posible observar el beneficio de usar CV.

Debido a lo anterior, es posible precisar que la adición de un 1% de ión cloruro en el agua de mezcla no significó en un comportamiento distinto de las velocidades de

corrosión de las probetas, lo cual, es un indicador de la necesidad de continuar el estudio durante un periodo de exposición mayor para observar el efecto de las adiciones de ceniza volante en las velocidades de corrosión para este porcentaje de adición de ión cloruro. No obstante, conforme se incrementó el porcentaje de adición de ión cloruro (2% y 4%), se observó un mejor desempeño de las mezclas con ceniza volante; Una posible causa de este comportamiento es la capacidad de enlace de ión cloruro de las CV que está relacionado con el alto contenido de alúmina de las mismas y que se traduce en una mayor formación de sal de Friedel [130,131]. Por su parte, otros autores, lo atribuyen también a la generación de más gel durante el proceso de hidratación, lo que facilita una mejor adsorción del ión cloruro [132]. Nuevamente, se puede apreciar el efecto benéfico de la misma, ya que la ceniza volante es añadida en sustitución al cemento Portland, lo cual nos permite un ahorro económico y sustentable al disminuir el consumo de cemento y reutilizar un subproducto de desecho de la industria termoeléctrica como lo es la CV.

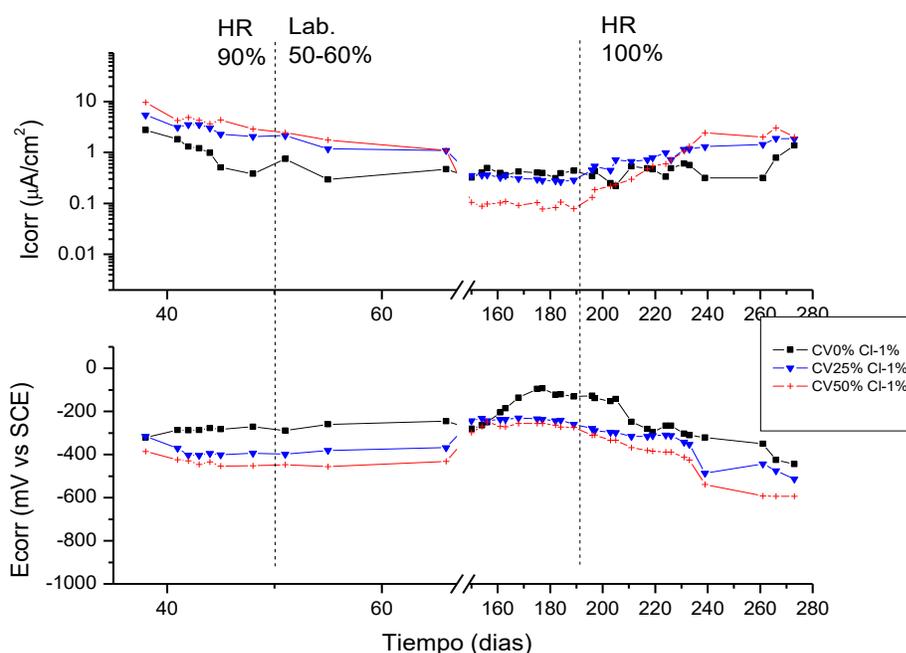


Figura 4.10. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros añadidos en el agua de mezcla; Comparativa variando el contenido de CV para un porcentaje de adición de ión cloruro del 1%.

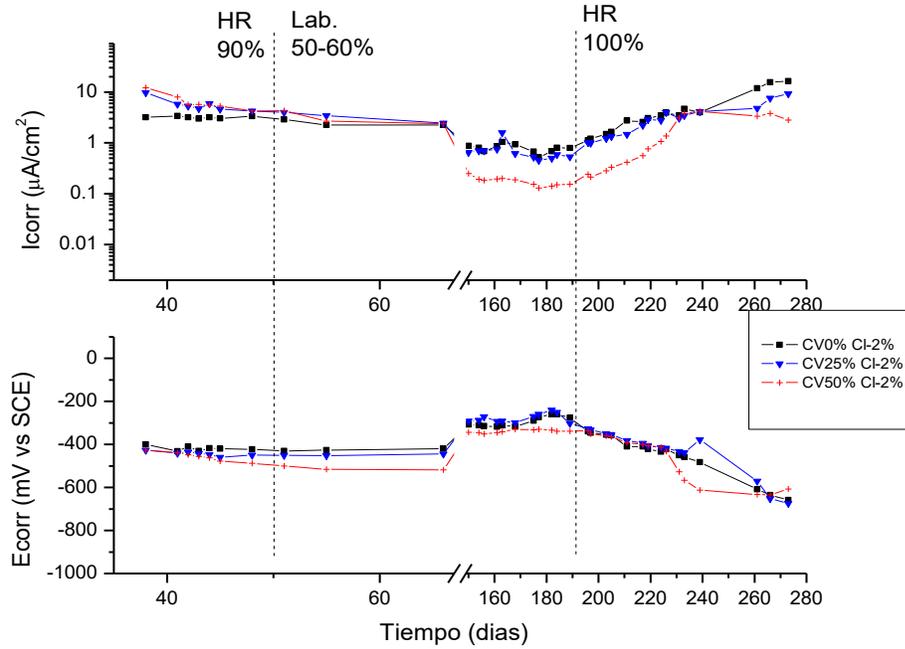


Figura 4.11. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros añadidos en el agua de mezcla; Comparativa variando el contenido de CV para un porcentaje de adición de ión cloruro del 2%.

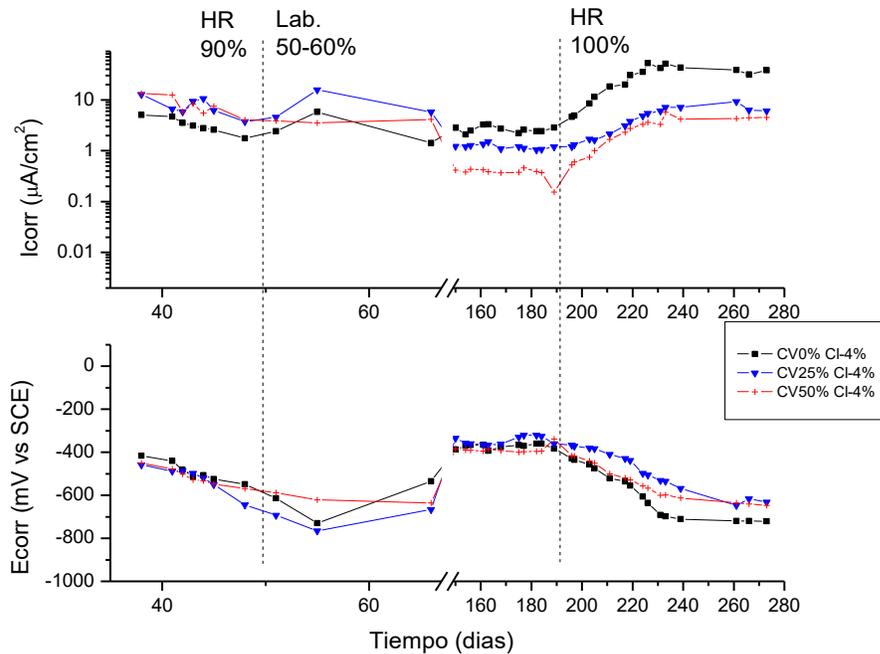


Figura 4.12. Evolución de la I_{corr} y la E_{corr} de los aceros embebidos en concretos sometidos a un ataque por cloruros añadidos en el agua de mezcla; Comparativa variando el contenido de CV para un porcentaje de adición de ión cloruro del 4%.

4.4.- Resultados de coeficientes de migración norma NT BUILD 492.

En las estructuras de concreto reforzado de regiones costeras, los iones Cl^- presentes en el agua de mar atraviesan el concreto modificando su pH alcalino, debido a la generación de iones Fe^{2+} , para finalmente, sí se concentran en la cantidad adecuada, en la interface concreto-acero, corroer el acero de refuerzo. Además, el ataque por cloruros produce Sal de Friedel, que al ser expansiva, puede provocar roturas en el concreto.

Con la finalidad de comprobar la capacidad de las matrices base cemento para proteger el acero de refuerzo se realizan ensayos para caracterizar el transporte del ión cloruro a partir de la difusión, en estado estacionario o no estacionario, los cuales, presentan el inconveniente de que en condiciones naturales son muy lentos, razón por la cual, se emplean campos eléctricos para acelerar el proceso de difusión y obtener resultados similares en tiempos más cortos [133].

Una prueba muy utilizada en la actualidad para comparar la migración de ión cloruro en concreto, es la prueba de migración de ión cloruro de acuerdo a la norma NT BUILD 492, que requiere de un espécimen saturado en agua, de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, el cual, es posicionado en una camisa plástica conteniendo una reserva de fluidos en ambos lados, la reserva contenida en el lado negativo contiene una solución de 10% de NaCl y la reserva que está en la terminal positiva contiene una solución de 0.3N NaOH. Se aplica una corriente de 30 Voltios a través del espécimen y se mide la corriente inicial. Basándose en la corriente inicial, se selecciona el voltaje y la duración de la prueba. Posteriormente, el espécimen se abre por la mitad y la penetración de los iones cloruro se mide roseando la superficie cortada con 0.1 M de solución de nitrato de plata. En base a la penetración y condiciones de prueba, se determina el coeficiente de migración de iones cloruros. Las Figuras 4.13 y 4.14 muestran la habilitación de las probetas previo al monitoreo. Por su parte, el esquema de realización del ensayo NT Build 492 y algunas fotos del mismo se muestran en la Figuras 4.15 y 4.16.



Figuras 4.13 y 4.14. Habilitado de las probetas previo al ensayo.

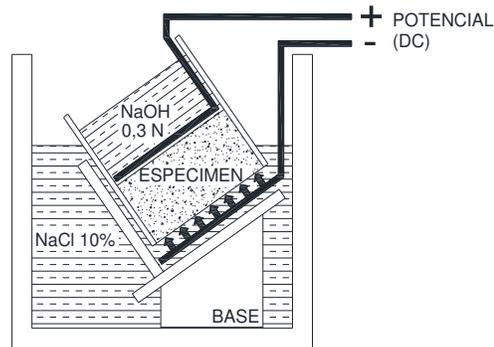


Figura 4.15. Configuración del monitoreo donde las probetas son sometidas a una corriente eléctrica inducida por una fuente de poder. (Fuente: adaptado de la propia norma NT BUILD 492).

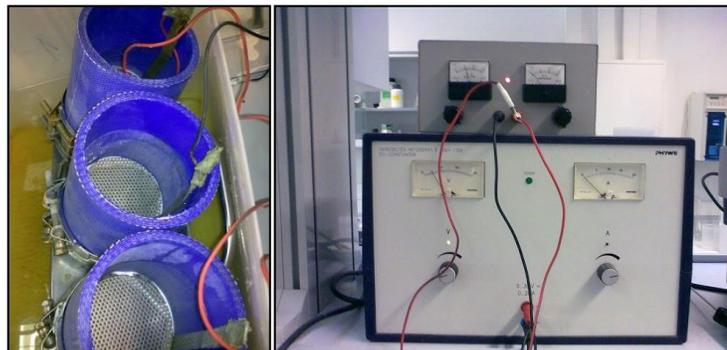


Figura 4.16. Imágenes del monitoreo donde las probetas son sometidas a una corriente eléctrica inducida por una fuente de poder.

Los resultados en esta prueba mostraron que el uso de CV mejora, aunque en el mismo orden de magnitud, la durabilidad de los productos cementicios resultantes ante el ingreso del ión cloruro. La Figura 4.17 muestra los valores del coeficiente de migración de cloruros de acuerdo a la norma NT Build 492. El análisis de los resultados en función del tipo de adición utilizada se muestran en la Tabla 4.1, donde queda claro

que los mayores coeficientes de migración son de las mezclas patrón, aún por encima de relaciones agua/material cementante superiores.

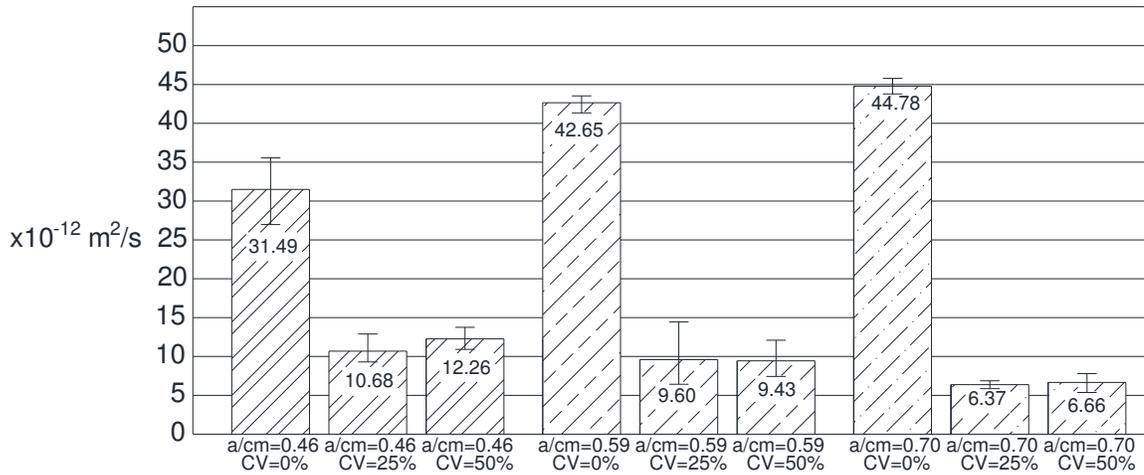


Figura 4.17. Comparación de los coeficientes de migración obtenidos en cada una de las nueve mezclas de estudio (unidades $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

Tabla 4.1. Análisis de los resultados de Migración de cloruros (NT build 492) a 56 días.

Menor coeficiente						Mayor coeficiente			
a/mc	a/mc	a/mc	a/mc	a/mc	a/mc	a/mc	a/mc	a/mc	a/mc
0.70	0.70	0.59	0.59	0.46	0.46	0.70	0.46	0.59	0.70
25%	50%	50%	25%	25%	50%	25 %	0 %	0 %	0 %
CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV

En la Figura 4.17 y la Tabla 4.1, se observa como los coeficientes de migración para las sustituciones de 25 % y 50 % son muy similares lo que permite asumir que el efecto benéfico de la adición de ceniza volante tiene un estado de saturación desde el 25 %. No obstante, el coeficiente de difusión está influenciado además del porcentaje de sustitución, por la porosidad y tortuosidad de la matriz resultante, quedando la duda sobre la micro-estructura formada en cada una de las matrices que provoca el comportamiento observado; Ya que, resulta interesante mencionar, que en las distintas mezclas seleccionadas, los contenidos de cemento y de arena son distintos; Teniendo así, que el contenido de arena de la relación $a/mc = 0.46$ a $a/mc = 0.59$ se incrementa en un 15 %, mientras que el cementante se reduce en un 36 %, sí a esto le agregamos la variable de la ceniza volante, sería complicado comparar entre distintas relaciones a/mc sin tener datos micro estructurales. Sin embargo, estos resultados son consistentes con

las velocidades de corrosión de los aceros que fueron expuestos a agua de mar sintética, donde se aprecia un buen desempeño de las mezclas con sustitución con respecto a la mezcla patrón, que inclusive fue superada en algunos casos por la sustitución del 25%. Y de la misma manera, estos resultados son corroborados con los resultados obtenidos de las mezclas con ión cloruro incluido en el agua de mezcla.

Como conclusión, en la prueba de migración NT BUILD 492, la adición de ceniza volante mejoró, aunque en un mismo orden de magnitud, la resistencia ante la migración de cloruros, no obstante, esta mejoría llega a un estado límite al obtener coeficientes muy parecidos para las sustituciones de 25% y 50%. Estos resultados son consistentes con los resultados de las velocidades de corrosión de los aceros que fueron expuestos a una solución de NaCl 0.5 M y a adición de ión cloruro en el agua de mezcla donde también se aprecia un buen desempeño de las mezclas con sustitución de CV.

4.5.- Resultados de las probetas sujetas exposición natural.

4.5.1.- Resultados de las pruebas en estado fresco.

La determinación de las propiedades del concreto en estado fresco se realizó para verificar y monitorear la calidad de las mezclas elaboradas, además, estas pruebas permiten la caracterización del material. Las pruebas al concreto en estado fresco que se llevaron a cabo fueron: determinación de la temperatura de la mezcla (ASTM C 1064), revenimiento (NMX C 156, ASTM C 143, y ASTM C 1362) y peso volumétrico (NMX C-162, ASTM C 29 y ASTM C 138). La Tabla 4.2 muestra el resultado de dichas pruebas.

Tabla 4.2. Pruebas en estado fresco de las probetas en exposición natural.

Mezcla	Temperatura °C	Revenimiento cm	Peso volumétrico kg/m ³
a/mc = 0.46 CV = 0%	22.5	23	2283.44
a/mc = 0.46 CV = 25%	22.5	23	2245.63
a/mc = 0.46 CV = 50%	22.5	23	2237.19
a/mc = 0.59 CV = 0%	23.5	24.5	2213.38
a/mc = 0.59 CV = 25%	24.6	25	2180.94
a/mc = 0.59 CV = 50%	23.8	27.5	2152.19
a/mc = 0.70 CV = 0%	22.0	23	2156.25
a/mc = 0.70 CV = 25%	22.0	23.5	2119.38
a/mc = 0.70 CV = 50%	22.5	23.5	2093.43

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.2, es posible establecer que debido a las condiciones de laboratorio, la temperatura se mantuvo constante durante la elaboración de las mezclas, solo la mezclas de relación $a/mc = 0.59$ se elaboraron a una mayor temperatura; sin embargo, esta variación no deben influir en las propiedades del concreto en estado endurecido. El revenimiento de las mezclas es alto, y para el caso de la relación $a/mc = 0.59$ es mayor, lo que nos indica que hay que tener cuidado de una posible segregación de las mezclas, si a futuro se busca añadir más variables (otras adiciones o mayores contenidos de sustitución). En cuanto al peso volumétrico es posible establecer que a mayor contenido de sustitución de ceniza volante, el peso disminuye, esto debido a la forma esférica hueca de la ceniza volante que provoca que la densidad de esta sea menor en comparación con la del cemento portland, además, de acuerdo al diseño de mezclas, el contenido de cemento disminuye conforme se incrementa la relación a/mc , lo cual también genera un detrimento del peso del material. Las propiedades anteriormente descritas tienen utilidad para caracterizar las mezclas en estudio y aunque tienen influencia directa en la durabilidad de las mismas, la correlación de estas es difícil de precisar.

4.5.2.- Resultados de la prueba de resistencia a compresión.

Para la determinación de la resistencia a compresión de las mezclas seleccionadas, se utilizaron 2 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto para cada tipo de mezcla. Dichos cilindros fueron elaborados y curados de acuerdo a la Norma ASTM C 192; El ensaye se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C 39 en una prensa Modelo ADR-Auto range, marca Ele international. La Tabla 4.3 muestra los resultados de dicho ensaye.

Tabla 4.3. Resultados de la prueba de resistencia a compresión a 28 días y 1 año de exposición natural.

Mezcla	Resistencia a compresión promedio. (28 días) después de curado kg/cm ²	Resistencia a compresión promedio. (1 año) kg/cm ² Inst. de Ingeniería Civil	Resistencia a compresión promedio. (1 año) kg/cm ² Oficinas de la Conagua	Resistencia a compresión promedio. (1 año) kg/cm ² Est. La Pastora SIMA
a/mc = 0.46 CV = 0%	402.60	438.90	478.20	464.05
a/mc = 0.46 CV = 25%	293.25	343.20	361.85	366.50
a/mc = 0.46 CV = 50%	238.85	272.25	277.60	300.90
a/mc = 0.59 CV = 0%	254.50	279.35	269.20	273.65
a/mc = 0.59 CV = 25%	132.95	251.15	268.65	267.30
a/mc = 0.59 CV = 50%	102.20	220.70	125.40	198.05
a/mc = 0.70 CV = 0%	295.05	369.10	351.10	328.50
a/mc = 0.70 CV = 25%	216.70	224.70	235.10	221.35
a/mc = 0.70 CV = 50%	145.10	168.70	171.00	179.30

En la Tabla 4.3 se observa como las resistencias a compresión fueron superiores en las mezclas patrón con respecto a las que contienen adición de ceniza volante. Dichos resultados son los esperados, al establecer que en etapas jóvenes, la resistencia de los concretos con CV son inferiores que los de cemento portland; y que para lograr su hidratación, la CV requiere de agua, lo cual en campo y según los resultados obtenidos, no se obtuvo. También se observó como todas las mezclas incrementaron su resistencia a través del tiempo, lo cual, hace suponer que además de las mezclas con adición de ceniza volante, las mezclas patrón (con solo cemento portland compuesto CPC 30R) contienen alguna adición mineral. En cuanto al efecto de la relación a/mc, una menor relación condujo a una mayor resistencia. Es notable, como esta variable influye sobre la resistencia por encima del contenido de CV, ya que las resistencias a compresión para

las mezclas con CV de una relación a/mc inferior fueron superiores con respecto a las resistencias obtenidas de una mezcla patrón con una relación a/mc superior. La resistencia a compresión podría ser un índice de las propiedades de durabilidad del material, sin embargo, al requerir la mayoría de los procesos de deterioro de reacciones químicas, dichas correlaciones no son del todo confiables. Lo que se espera de acuerdo a la literatura, es que a mayor resistencia mecánica, mayor es la durabilidad del concreto.

4.5.3.- Resultados del avance en el frente de carbonatación en los sitios de estudio.

Las Tablas 4.4 – 4.6, muestran los resultados obtenidos del monitoreo en el avance de carbonatación de las probetas expuestas a carbonatación natural.

Tabla 4.4. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural en la estación de la Pastora.

Pastora						
Relación a/mc	días					
	167	209	292	335	455	705
0.46,0%	5.63	6.13	6.78	6.75	8.22	9.38
0.46,25%	2.13	5.38	5.69	6.44	7.19	8.19
0.46,50%	5.81	6.13	7.06	7.19	8.63	9.88
0.59,0%	3.56	4.69	4.72	5.28	5.84	7.44
0.59,25%	6.81	8.31	8.25	8.72	11.56	13.50
0.59,50%	8.38	8.88	8.88	8.94	12.81	16.13
0.70,0%	6.81	7.63	8.00	8.58	9.16	11.00
0.70,25%	8.56	9.44	10.13	12.08	14.03	15.31
0.70,50%	13.31	13.75	13.75	15.13	16.53	18.88

Penetración en mm.

Tabla 4.5. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural en la estación de CONAGUA.

Conagua						
Relación a/mc	días					
	167	209	292	335	455	705
0.46,0%	6.00	6.14	6.28	7.06	8.69	10.69
0.46,25%	3.94	6.06	6.25	6.44	6.53	7.25
0.46,50%	6.56	7.56	8.09	9.13	9.66	12.88
0.59,0%	3.69	4.06	4.09	5.16	6.41	6.44
0.59,25%	5.81	6.50	7.41	9.41	10.59	13.63
0.59,50%	10.13	10.63	10.93	11.54	11.84	13.65
0.70,0%	4.56	6.56	6.89	7.22	7.66	11.88
0.70,25%	9.25	10.88	11.25	11.19	13.91	17.75
0.70,50%	12.75	15.31	15.98	16.66	19.75	23.00

Penetración en mm.

Tabla 4.6. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural en la estación Universidad.

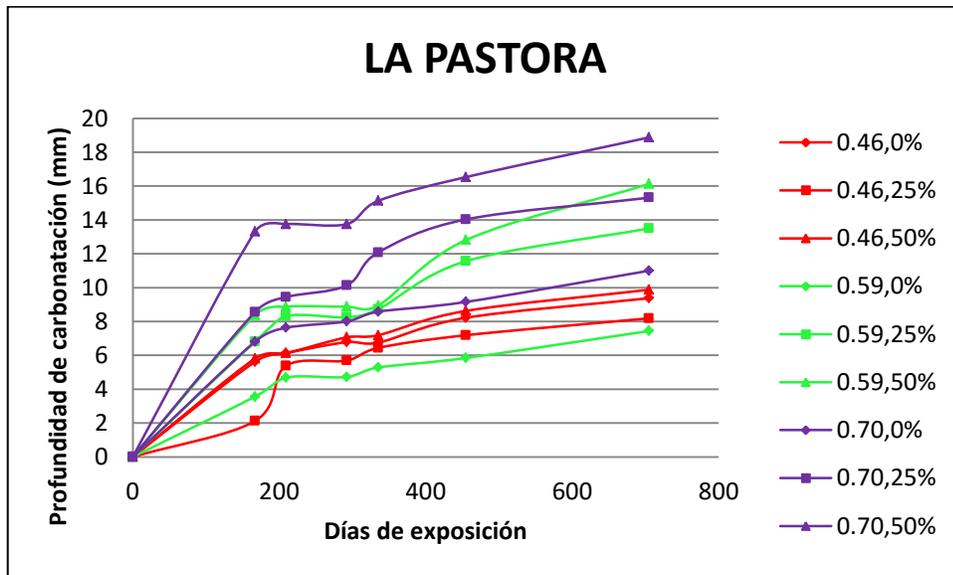
Universidad						
Relación a/mc	días					
	167	209	292	335	455	705
0.46,0%	6.25	6.88	7.69	8.44	10.38	10.75
0.46,25%	5.50	5.88	5.94	7.03	8.13	10.00
0.46,50%	6.69	7.44	7.75	8.06	10.41	13.72
0.59,0%	3.69	4.63	4.56	4.75	7.56	8.69
0.59,25%	7.75	8.94	9.16	9.91	11.50	13.00
0.59,50%	8.00	8.44	8.88	9.25	14.50	18.38
0.70,0%	5.25	5.94	6.63	6.56	11.38	11.63
0.70,25%	9.50	11.38	11.44	12.13	13.94	18.00
0.70,50%	10.94	11.63	12.31	12.47	17.81	-

Penetración en mm.

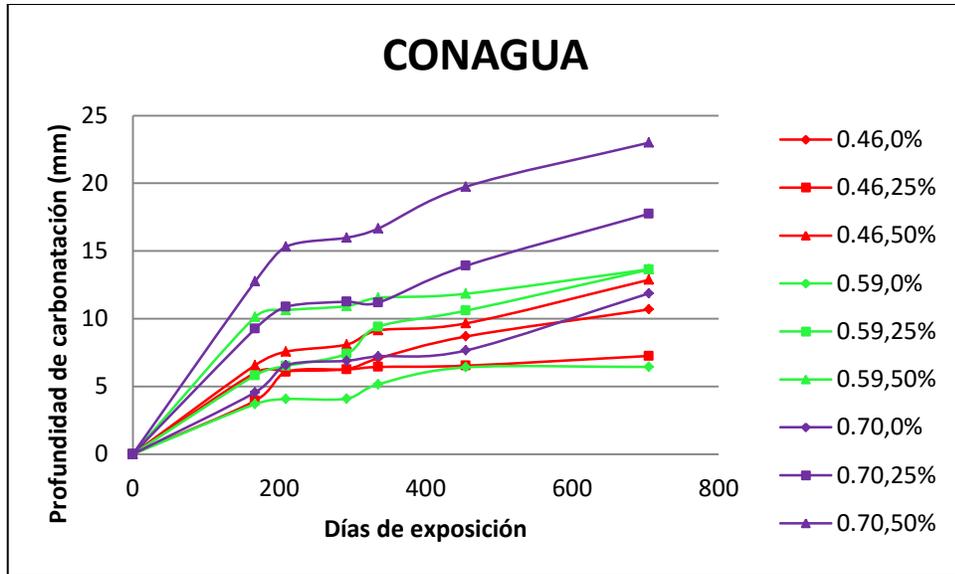
Debido a la dificultad de análisis de los resultados en forma tabulada, las Figuras 4.18 – 4.20, muestran los resultados de forma gráfica, mismos que permitieron realizar las comparativas entre relaciones a/mc, contenidos de sustitución de CV y sitios de exposición.

4.5.3.1.- Comparativa del avance en el frente de carbonatación en función de la relación a/mc y el contenido de CV para los sitios de estudio.

Las Figuras 4.18 – 4.20 muestran la totalidad de las mezclas presentadas por sitios de exposición. Teniendo así, una comparativa de los comportamientos de las mezclas con diferentes relaciones a/mc y diferentes contenidos de CV por sitio de exposición. Se observa una fuerte influencia de la relación a/mc por encima del contenido de CV, teniendo a las mezclas con relación a/mc = 0.46 con menores profundidades de carbonatación, seguidas de las mezclas con a/mc = 0.59; finalmente, las mezclas con relación a/mc = 0.70 son las que tienen mayores penetraciones de carbonatación. La influencia de la ceniza volante es la esperada, ya que un mayor contenido de sustitución de CV conlleva un mayor avance en el frente de carbonatación, solo la mezcla con una relación a/mc = 0.46 y CV = 25% pudo superar a la mezcla patrón al obtener menores valores de penetración de CO₂. Mención aparte merece la relación a/mc = 0.59 con un contenido de CV de 0% que obtuvo la menor penetración de carbonatación global. Sin embargo, debido a los distintos contenidos de cemento y arena usados en las mezclas seleccionadas, es difícil establecer una relación entre las distintas relaciones a/mc. El comportamiento descrito es constante y observable en las tres zonas de exposición.



Figuras 4.18. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural en la estación de La Pastora.



Figuras 4.19. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural en la estación de CONAGUA.

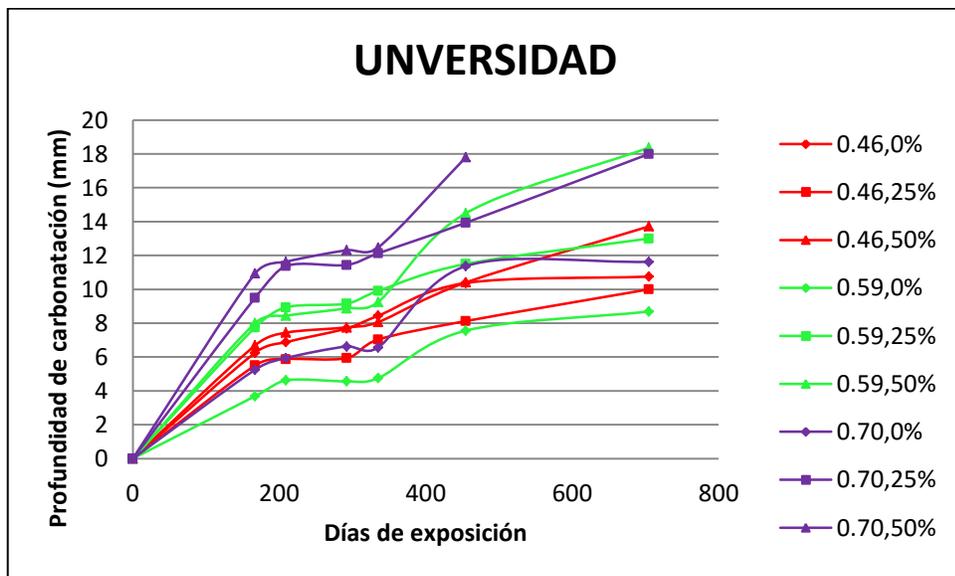


Figura 4.20. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural en la estación Universidad.

En las probetas con relación $a/mc = 0.46$ se observa como en los tres sitios de estudio, la sustitución de 25% de CV obtuvo la mayor resistencia frente a la carbonatación, seguida de la mezcla patrón (0% CV) y de la sustitución de 50% de CV. Por su parte, en las relaciones $a/mc = 0.59$ y $a/mc = 0.70$, como es de esperar, la mezcla patrón (0% CV) es la que presenta menor avance en el frente de carbonatación, seguida por la sustitución de 25% de CV y la de 50% de CV.

Aunque para la relación $a/mc = 0.59$ los comportamientos ante carbonatación de las sustituciones de 25% de CV y 50% de CV son muy similares, en la relación $a/mc = 0.70$ sí se observa una separación en los avances del CO_2 , siendo la carbonatación superior en todos los sitios para la sustitución de 50% de CV.

Por su parte, el comportamiento observado en la relación $a/mc = 0.46$ donde la sustitución de 25% mejora el desempeño de la mezcla patrón, puede ser atribuido a una optimización de la mezcla ya que al tener una relación a/mc baja obtenemos baja porosidad, misma que al parecer fue rellenada por la hidratación del 25% de sustitución de CV que permite compensar la caída en el pH atribuido a la sustitución de cemento portland por CV y la posterior hidratación de esta última, que consume portlandita y conlleva una caída en la alcalinidad. Sin embargo, en la sustitución de 50% de CV y en las demás relaciones a/mc del estudio, este efecto de “relleno” ya no fue suficiente para mejorar el desempeño de las probetas frente a carbonatación.

Como es de esperar, a mayor relación a/mc la profundidad de carbonatación es mayor para un mismo contenido de CV. Es notable, como en las mezclas sin adición de ceniza volante, la relación $a/mc = 0.59$ supera a la relación $a/mc = 0.46$, lo cual es atribuible a que probablemente la cantidad de agua en la relación $a/mc = 0.46$ es insuficiente para lograr una correcta hidratación; Razón por la cual, es superada por la relación $a/mc = 0.59$, que aparentemente logra una mejor hidratación; Y consecuentemente una mayor cantidad de portlandita en la matriz.

En los anexos 1 al 3 de este trabajo se presentan los resultados del avance en el frente de carbonatación de las probetas en estudio de manera más extensa mediante gráficos de comparativas particulares.

4.5.4.- Observación de los parámetros climáticos de las zonas en estudio.

La observación de los parámetros climáticos comenzó observando los datos de las estaciones hidrometeorológicas del área metropolitana de Monterrey; Notándose, que a pesar de la cercanía de los sitios, existen de diferencias en los comportamientos climáticos, razón por la cual cada sitio requiere un análisis particular. Hay autores

[28,134] que proponen formas de modelar estos comportamientos, sin embargo, las ecuaciones base y los cálculos para llegar al resultado no son de fácil implementación.

En las Figuras 4.21 – 4.25 se presenta de manera general los resultados históricos de las estaciones de SIMA en el área metropolitana de Nuevo León; sin embargo los datos aún no revelan un incremento en las temperaturas u otro parámetro que podría ser un indicador de cambio climático, no obstante, se ha observado una mayor ocurrencia de eventos extraordinarios, como puede ser el incremento en los acumulados de precipitación observados del 2004 al 2011.

Dicho, análisis fue realizado de manera exploratoria para establecer los comportamientos de clima en la ciudad a fin de establecer comportamientos anómalos en el clima de acuerdo a lo reportado, de manera general, se observó una periodicidad y estabilidad de los datos con una ligera tendencia a la alza, misma, que permitió acuñar la idea de linealizar los comportamientos climáticos, idea que sin embargo, ya ha sido utilizada por otros autores en predicciones climáticas, además, es prudente mencionar la existencia de una buena cantidad de modelos de predicción de vida útil que utilizan datos promedios en sus propuestas.

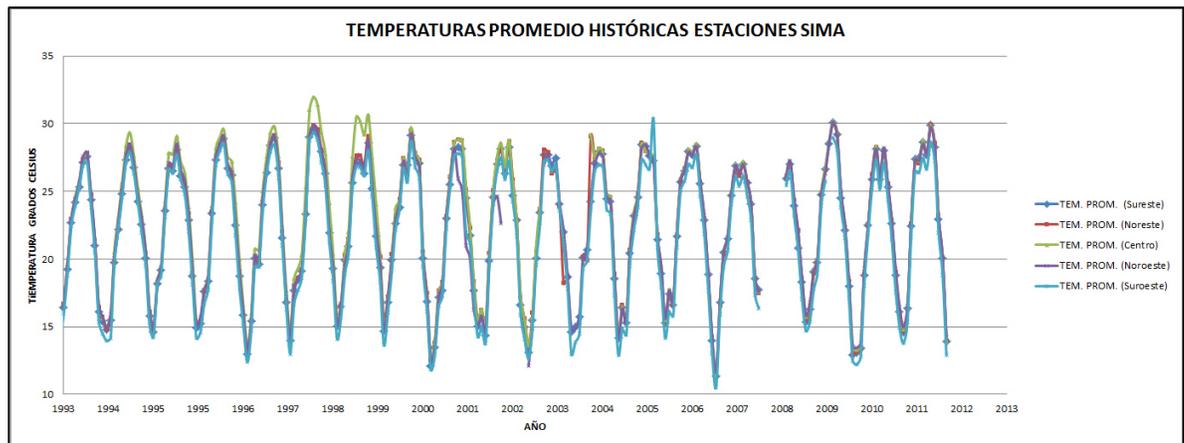


Figura 4.21. Temperaturas promedio históricas de las estaciones de SIMA.

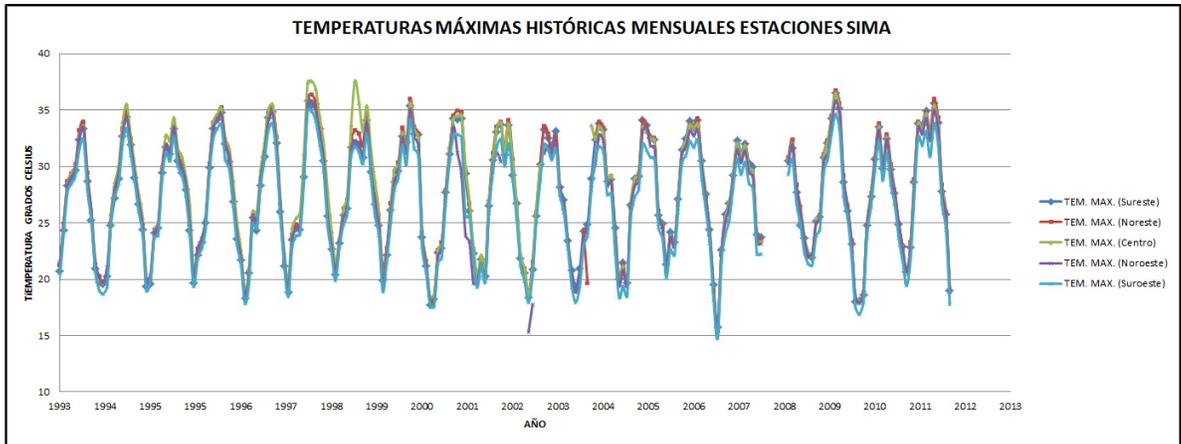


Figura 4.22. Temperaturas máximas históricas de las estaciones de SIMA.

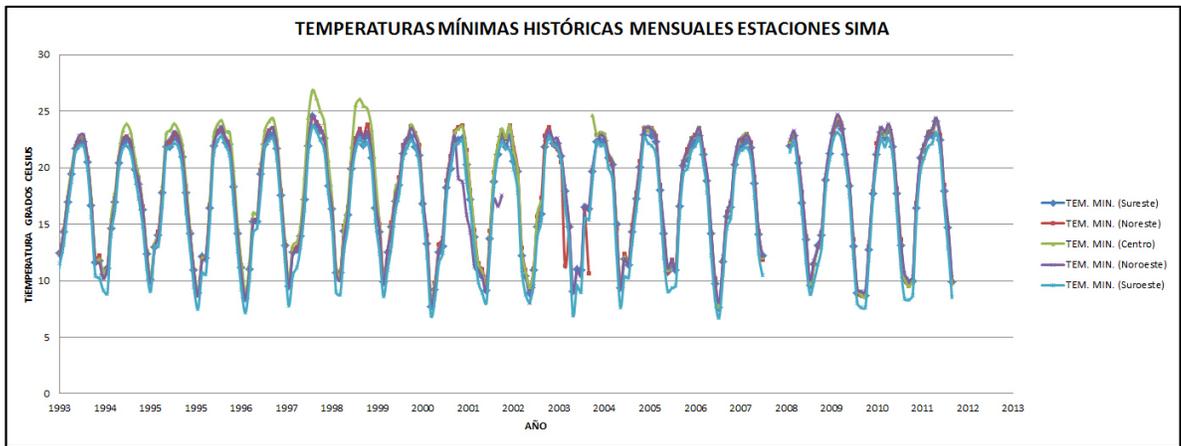


Figura 4.23. Temperaturas mínimas históricas de las estaciones de SIMA.

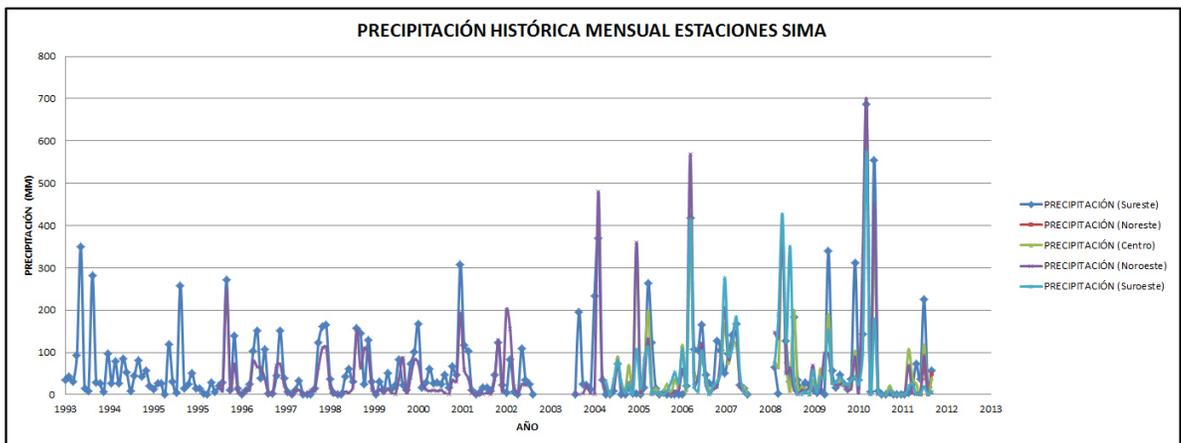


Figura 4.24. Precipitación histórica mensual de las estaciones de SIMA.

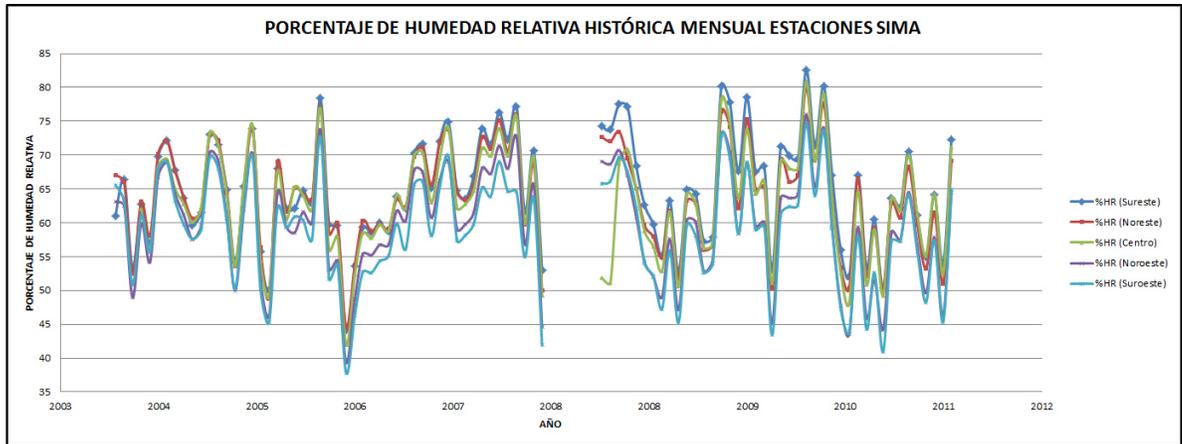


Figura 4.25. Porcentaje de humedad relativa histórica de las estaciones de SIMA.

Nota: Se cuenta además, con datos de radiación solar, presión atmosférica que por cuestiones de espacio y relevancia no están agregadas a este trabajo.

Por su parte, en las Figuras 4.26 - 4.28, se muestran los datos de la estaciones de la CONAGUA, mismos que recibieron un tratamiento parecido a los datos de SIMA. Debido a la gran cantidad de datos proporcionados, en estas figuras solo se muestra el comportamiento de dos periodos de medición con la intención de ejemplificar el trabajo, no obstante ya se han procesado del todo, y se ha realizado la verificación de la tendencia de los mismos, aunque aún no se encuentran resultados concluyentes.

Es conveniente mencionar, que al ser estaciones de medición más distantes entre sí, se puede observar diferencia en las temperaturas medidas; especialmente en la estación de Agua Blanca en Santa Catarina, Nuevo León que muestra temperaturas claramente menores, esta comparación es importante porque nos permite identificar distintos climas y su variabilidad particular. Además, podría ser un indicador de isla de calor para el área metropolitana de Monterrey.

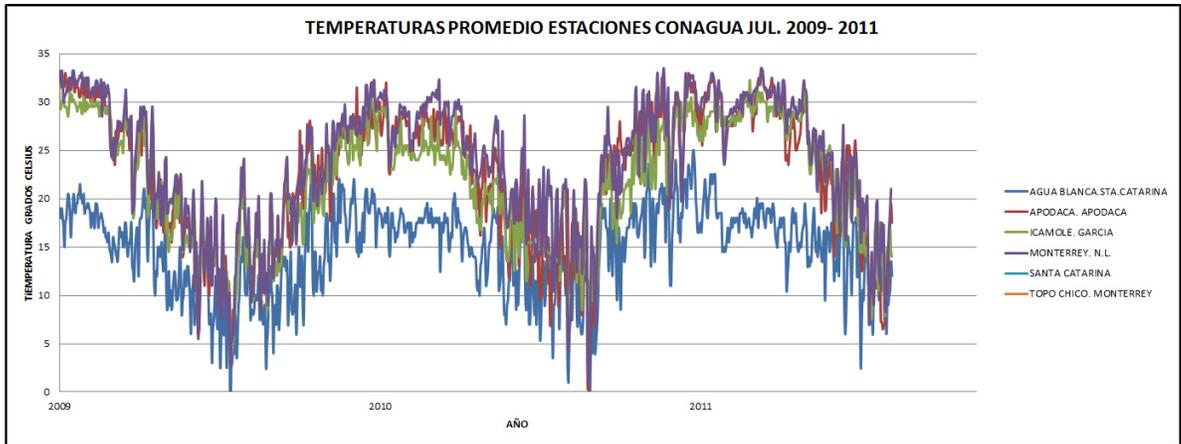


Figura 4.26. Temp. promedio medidas en estaciones de Conagua (jul. 2009-2011).

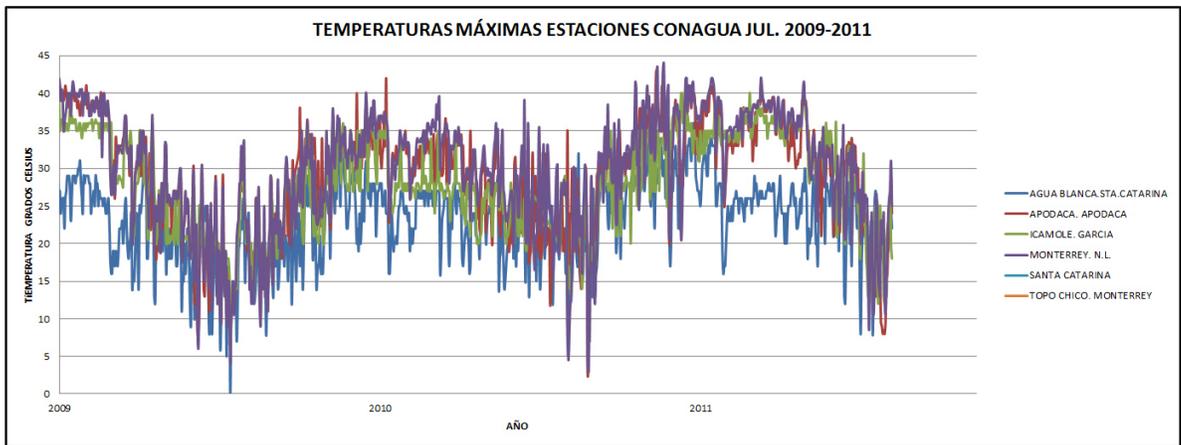


Figura 4.27. Temp. máximas medidas en estaciones de Conagua (jul. 2009-2011).

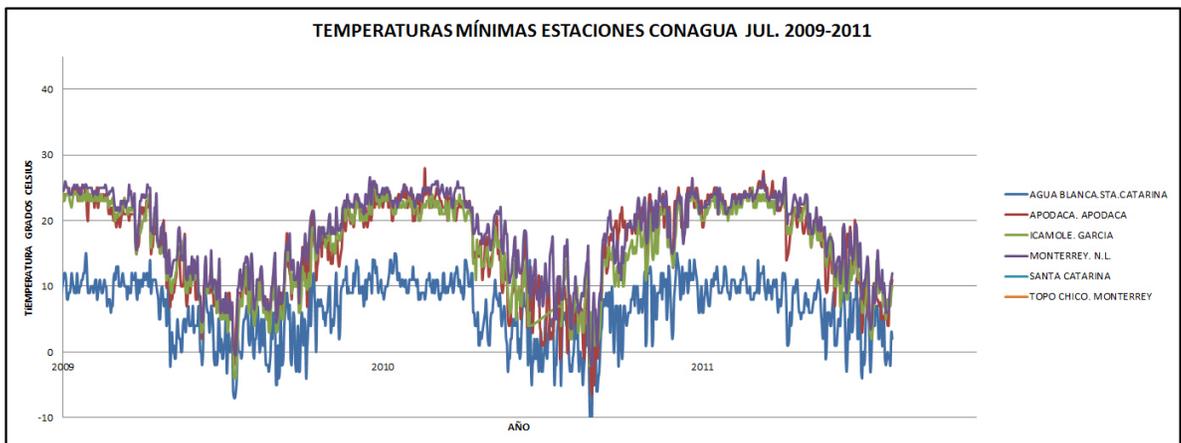


Figura 4.28. Temp. mínimas medidas en estaciones de Conagua (jul. 2009-2011).

4.6.- Propuesta de ecuación para predecir la profundidad de carbonatación que tome en cuenta la variabilidad de los factores climáticos.

En este apartado se habla de la justificación técnica y las consideraciones que permitieron la deducción de la ecuación propuesta.

Como se observó en los antecedentes, la ecuación de: $x = K\sqrt{t}$ nombrada comúnmente como la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo es la base para la predicción de la profundidad de carbonatación en la gran generalidad de los trabajos publicados debido a su facilidad de implementación y a que para casos específicos podría representar de manera muy adecuada el comportamiento del avance de carbonatación. Esta ecuación, aunque muy simplificada debido a la cantidad de suposiciones necesarias para llegar a la solución, tiene su origen en la solución de la ecuación diferencial para difusión conocida como la ley de Fick.

Sin embargo, cuando queremos monitorear la carbonatación de estructuras de concreto reforzado expuestas al ambiente natural, esta ecuación ha demostrado no ser del todo confiable. Lo anterior, debido a las condiciones cambiantes del medio en que están expuestas y a la variabilidad de las propiedades del material (Concreto reforzado).

Cabe mencionar que el Factor K de la ecuación engloba todas las propiedades del material que influyen en la carbonatación, las cuales pueden ser, en el caso de concreto reforzado: la porosidad o el contenido final de portlandita, que a su vez están influenciadas por el tipo de cemento, el grado de hidratación, la relación agua/material cementante, el uso de adiciones minerales o el tiempo de curado, entre otras; Además, engloba las variables del medio al que están expuestas nuestras estructuras, como son: la temperatura, humedad relativa, CO₂ ambiental o días de lluvia.

Es aquí donde la mayoría de las propuestas estudiadas realizan ajustes en el valor de K con la utilización de diversos coeficientes o funciones que toman en cuenta de manera específica uno o varios parámetros de los que depende el coeficiente de difusión K.

Otra forma sencilla, pero más elaborada de predecir la profundidad de

carbonatación es la propuesta por Meyer (1967), que también es una solución de la primera ley de Fick:

$$x = \sqrt{\frac{2Dct}{a}} \quad \text{Siendo: } K = \frac{2Dc}{a} \quad \text{ecuación 4.1}$$

Donde D es el coeficiente de difusión, c es la concentración de CO_2 y a es el material factible a carbonatar.

Dicha ecuación es un precedente de la manera en que se acomodan y desglosan los distintos factores de los que depende K . El coeficiente de difusión (D o D_{CO_2}), es la K que se obtendría en condiciones teóricas de difusión, que debido a su dependencia de otros factores (clima y propiedades del material) y la variabilidad de los mismos, requiere de ajustes para dar una buena aproximación en la estimación de la profundidad de carbonatación. Además, la utilización del coeficiente de difusión (D_{CO_2}) permite el ajuste matemático de unidades en las ecuaciones propuestas de manera relativamente sencilla. Razón por la cual, la gran mayoría de los autores parte de un coeficiente de difusión constante para el CO_2 (D_{CO_2}), el cual es afectado por distintas variables que pueden ser o no dependientes del tiempo. Esto, en su conjunto, viene a complementar el concepto de K que originalmente se mencionó. De manera esquemática dichas ideas se presentan en la siguiente ecuación:

$$x = \sqrt{\frac{2(D_{\text{CO}_2})(\text{Factores Ambientales})}{(\text{factores del Material})} t} \quad \text{ecuación 4.2}$$

Lo anterior tiene lógica debido a que un incremento en las variables climáticas (temperatura, % HR y concentración de CO_2) conlleva, normalmente, un incremento en las profundidades de carbonatación. Por su parte, un incremento en las propiedades del material (mayor contenido de cemento, mayor contenido de portlandita, mayor resistencia a compresión, mayor densidad), influye de manera inversa en la profundidad de carbonatación. Es importante mencionar, que la gran mayoría de los autores se refieren a los factores inherentes del material como la cuantificación del CO_2 factible a carbonatar la masa de concreto, misma que es función de los productos de hidratación.

No obstante, en la búsqueda bibliográfica, se observó que muchos de los modelos

propuestos en la literatura carecen de sencillez tanto para la obtención de los parámetros de entrada como para el cálculo de la profundidad de carbonatación. Existiendo modelos que requieren de la realización de ensayos acelerados, requieren de regresiones para determinar coeficientes o utilizan coeficientes que fueron particularizados para un tipo de cemento específico. Están además, los métodos que calculan composiciones de los compuestos hidratados; Los cuales son muy teóricos o requieren de pruebas avanzadas (análisis químico, difracción de rayos X, etc.) para determinar las variables de entrada, mismas que no terminan siendo exactas debido a la dificultad de estimar los compuestos formados durante la hidratación de las fases factibles a ser carbonatadas.

Ante lo cual, es importante comentar que una de las prioridades de este trabajo fue desarrollar una ecuación sencilla que permita estimar las profundidades de carbonatación de los concretos de manera confiable, y que además, tome en cuenta de manera sencilla la variabilidad climática.

4.6.1.- Factores seleccionados para la ecuación propuesta.

En la revisión bibliográfica se seleccionaron los principales factores a tomar en cuenta para la propuesta de predicción del avance en el frente de carbonatación. Los mismos se comentan a continuación:

- *Coefficiente de difusión D_{CO_2} .*

La importancia, ventajas y bondades de este factor ya han sido discutidas en las líneas superiores. Cabe comentar, que en un inicio, la finalidad de este proyecto era prescindir completamente del coeficiente de difusión del CO_2 en el concreto; La intención era que todos los factores seleccionados para la ecuación resultaran finalmente en el coeficiente de difusión corregido; tal y como lo presentan [87,88,98,108,111], sin embargo, dichas propuestas tienden a ser más empíricas que teóricas. Razón por la cual en la ecuación final fue agregado dicho coeficiente. Quedando la ecuación propuesta preliminar de la siguiente manera (ecuación 4.3), nótese que dicha ecuación, aún muestra bastante semejanza con la propuesta por Meyer (1967) en la ecuación 4.1:

$$x_c = \sqrt{\frac{2(D_{0,CO_2})}{a}} \sqrt{t} \quad \text{ecuación 4.3}$$

Donde:

- x_c = profundidad de carbonatación en cm.
- D_{0,CO_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO_2 . Hay autores que lo nombran D_1 ; Investigaciones previas lo sitúan entre $0.5 - 50 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ [30].
- a = cantidad de material factible a carbonatar (adimensional).
- t = tiempo del estudio en segundos.

- *Temperatura.*

Como toda reacción química, la velocidad del proceso de carbonatación se ve afectada por los cambios en la temperatura. En 1889, Arrhenius presentó una ecuación que considera el cambio en el coeficiente de difusión en función del cambio en la temperatura. La misma ecuación se presenta a continuación, y como podrán observar el cambio en la temperatura afecta de manera exponencial a la velocidad de reacción en un proceso de difusión [135].

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad \text{ecuación 4.4}$$

- D = Coeficiente de difusión corregido (m^2/s).
- D_0 = Coeficiente difusión inicial (m^2/s).
- E = Energía de activación (J/mol o eV/atm).
- R = Constante universal de los gases (8.314 J/mol-K).
- T = Temperatura absoluta (K).

Hoy en día, dicha ecuación es considerada de carácter empírico. Sin embargo, Yoon [30] y Stewart [102] presentan la ecuación de Arrhenius pero considerando que el coeficiente de difusión original está calculado a 20°C , en sus trabajos.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{E}{R}\right) \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T}\right) \quad \text{ecuación 4.5}$$

Ingresando datos a la formula se estableció la Tabla 4.7, misma que muestra los incrementos a la velocidad de difusión en función de la temperatura de exposición. Se puede observar, como es de esperar, el incremento de manera exponencial debido al cambio en la temperatura.

Tabla 4.7. Efecto de la temperatura en el incremento del coeficiente de difusión D_0 .

Temperatura	factor de incremento del Coeficiente de difusión D_0
20	1.000
21	1.057
22	1.118
23	1.181
24	1.248
25	1.317
26	1.390
27	1.467
28	1.547
29	1.631
30	1.719
31	1.812
32	1.908
33	2.009
34	2.114
35	2.225
36	2.340
37	2.461
38	2.587
39	2.718
40	2.855

En la Tabla 4.7, se observa cómo el coeficiente de difusión se incrementa al doble para un cambio en la temperatura de 13°C (20°C - 33°C); Con lo cual, se vería incrementada la velocidad en el avance del frente de carbonatación de manera proporcional.

Para este trabajo, y con la intención de considerar que, como consecuencia del cambio climático, la temperatura (T) cambiará en función del tiempo (t), se estableció la siguiente relación que busca ponderar de manera sencilla estos cambios:

$$T_{prom}(t) = \frac{T_{ini} + (k_T t_a + T_{ini})}{2} \quad \text{ecuación 4.6}$$

T_{ini} = Temperatura promedio anual al inicio del estudio (K).

t_a = tiempo al cual se quiere predecir la profundidad de carbonatación en años.

k_T = pendiente de la regresión lineal de los promedios históricos del sitio en estudio.

Es importante mencionar que aunque el cambio en la temperatura no es una línea recta, para esta propuesta y por facilidad de implementación se estableció dicho comportamiento que ya ha sido utilizado por otros autores para la predicción de parámetros climáticos [136]. Acomodando la ecuación 4.3 de la siguiente manera (ecuación 4.7):

$$x_c = \sqrt{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)} \right)}}{a}} \sqrt[2]{t} \quad \text{ecuación 4.7}$$

Donde =

- x_c = profundidad de carbonatación en cm.
- D_{0,co_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO₂. Hay autores que lo nombran D_1 ; Investigaciones previas lo sitúan entre $0.5 - 50 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ [30].
- $\exp^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)} \right)}$ = es la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura en un proceso difusivo ajustada a un D_1 que está calculado a 20°C.
- a = cantidad de material factible a carbonatar (adimensional).
- t = tiempo del estudio en segundos.

- *Factor de envejecimiento.*

El factor de envejecimiento: $(t_a)^{-nd,co_2}$, ha sido utilizado en los trabajos de In-Seok Yoon [30], Mark G. Stewart [102] y Emilio Bastidas-Arteaga [28], toma en cuenta el efecto de bloqueo debido al ingreso del CO₂ que provoca la carbonatación de la matriz y la propia hidratación de concreto, que ralentizan el posterior avance del frente carbonatado. Dejando el acomodo de variables de la siguiente manera (ecuación 4.8):

$$x_c = \sqrt{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)} \right)} * (t_a)^{-nd,co_2}}{a}} \sqrt[2]{t} \quad \text{ecuación 4.8}$$

Donde =

- x_c = profundidad de carbonatación en cm.
- D_{0,co_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO₂. Hay autores que lo nombran D_1 ; Investigaciones previas lo sitúan entre $0.5 - 50 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ [30].
- $\exp^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)} \right)}$ = es la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura en un proceso difusivo ajustada a un D_1 que está calculado a 20°C.
- t_a = tiempo al cual se quiere predecir la profundidad de carbonatación en años.

nd,CO₂ = es el factor empírico de edad del coeficiente de CO₂, función de la relación a/c, Yoon [30] lo reporta entre 0.1198 y 0.2778.

a = cantidad de material factible a carbonatar (adimensional).

t = tiempo del estudio en segundos.

- K_{urban}

El concepto de K_{urban} , se presenta en los trabajos de Mark G. Stewart [102] y Emilio Bastidas-Arteaga [28], toma en cuenta la diferencia en las concentraciones de CO₂ entre las zonas rurales y urbanas; Es usado como un factor de ajuste que incrementa el valor de la predicción si la estructura se encuentra en un sitio urbano, donde normalmente la concentración de CO₂ es mayor y como consecuencia el proceso de difusión es más rápido. Dicho factor fue agregado en la ecuación de la siguiente manera (ecuación 4.9):

$$x_c = \sqrt{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-nd,co_2} * k_{urban}}{a}} \sqrt{t} \quad \text{ecuación 4.9}$$

Donde =

x_c = profundidad de carbonatación en cm.

D_{0,co_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO₂. Hay autores que lo nombran D_1 ; Investigaciones previas lo sitúan entre 0.5 - 50 x 10⁻⁴ cm²/s [30].

$\exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right)$ = es la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura en un proceso difusivo ajustada a un D_1 que está calculado a 20°C.

t_a = tiempo al cual se quiere predecir la profundidad de carbonatación en años.

nd,CO₂ = es el factor empírico de edad del coeficiente de CO₂, función de la relación a/c, Yoon [30] lo reporta entre 0.1198 y 0.2778.

k_{urban} = el coeficiente que toma en cuenta el incremento en las concentraciones de CO₂ en sitios urbanos; 1.15 con un coeficiente de variación de 0.1 (Stewart, 2011) [102].

a = cantidad de material factible a carbonatar (adimensional).

t = tiempo del estudio en segundos.

- *Concentración de CO₂ en función del tiempo $C_{co_2}(t)$.*

Al considerar el problema de carbonatación como un fenómeno de difusión, es importante tomar en cuenta la concentración de CO₂, ya que es el agente que difunde a través de la matriz. La existencia del mismo, es la causante de la generación del gradiente de concentración que provoca la difusión del gas, dicho gradiente será mayor o menor en función de la concentración del mismo. Además, como ya se ha mencionado,

debido a los efectos del Cambio Climático, este gas cambiará su concentración en la atmosfera en función del tiempo y de la evolución de las fuentes generadoras del mismo (fabricas, vehículos, erupciones, etc.). Dicho factor aparece en la ecuación propuesta de la siguiente manera (ecuación 4.10):

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)} \right)} * (t_a)^{-nd,co_2} * k_{urban} * C_{co_2}(t)}{a}} \sqrt[2]{t} \quad \text{ecuación 4.10}$$

Donde =

x_c = profundidad de carbonatación en cm.

D_{0,co_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO₂. Hay autores que lo nombran D₁; Investigaciones previas lo sitúan entre 0.5 - 50 x 10⁻⁴ cm²/s [30].

$\exp^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)} \right)}$ = es la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura en un proceso difusivo ajustada a un D₁ que está calculado a 20°C.

t_a = tiempo al cual se quiere predecir la profundidad de carbonatación en años.

nd,CO_2 = es el factor empírico de edad del coeficiente de CO₂, función de la relación a/c, Yoon [30] lo reporta entre 0.1198 y 0.2778.

k_{urban} = el coeficiente que toma en cuenta el incremento en las concentraciones de CO₂ en sitios urbanos; 1.15 con un coeficiente de variación de 0.1 (Stewart, 2011) [102].

$C_{co_2}(t)$ = la concentración de CO₂ promedio durante el estudio, dependiente del tiempo. En kg/m³.

a = cantidad de material factible a carbonatar (adimensional).

t = tiempo del estudio en segundos.

- *Tiempo.*

El proceso de carbonatación requiere y depende del tiempo de exposición de la estructura. No obstante, existen condiciones ambientales en las que quizás el proceso de carbonatación se vea ralentizado hasta el grado de considerarse detenido; Uno de los factores que pueden “detener la carbonatación de estructuras”, por decir así, es la *humedad relativa* en los poros del concreto.

- *Humedad relativa.*

Al igual que la temperatura, la humedad relativa también se ve afectada por el cambio climático, sin embargo, su influencia sobre la velocidad de carbonatación no es lineal, de hecho la carbonatación máxima se encuentra entre 50 y 75 % ya que si esta es muy baja no hay suficiente humedad en el poro para permitir la disolución del CO₂ y sí

la humedad es muy alta el CO₂ no puede difundir adecuadamente. La Figura 4.29 muestra el comportamiento de la carbonatación en función de la humedad relativa.

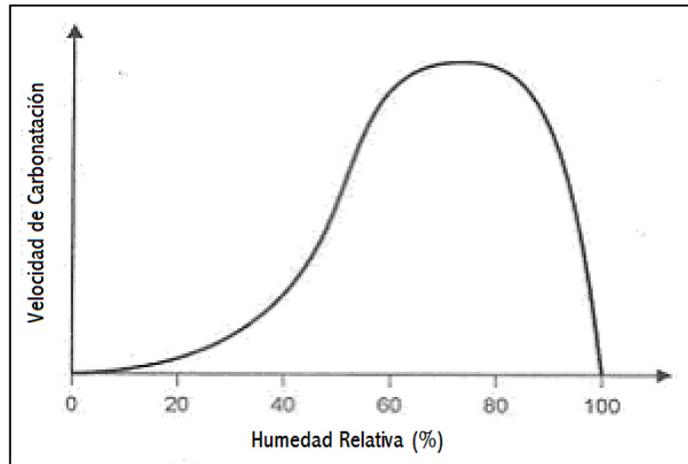


Figura 4.29. Representación esquemática de la velocidad de carbonatación del concreto en función de la humedad relativa de medio, bajo condiciones de equilibrio [33].

Razón por la cual, para esta propuesta, se decidió restar los días con humedad relativa alta, días de lluvia y días con una humedad relativa baja al tiempo total del estudio, de manera similar a como lo han propuesto Bakker [83] y Hergenröder [84]. Para esta propuesta, se propuso conceptualmente el término de tiempo efectivo (t_e), que sustituye al tiempo total (t) que utilizan la gran mayoría de las ecuaciones de predicción de carbonatación. La ecuación 4.11, muestra la sustitución de dicho factor para la presente propuesta.

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,CO_2}) \cdot \exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) \cdot (t_a)^{-nd,CO_2} \cdot k_{urban} \cdot C_{CO_2}(t)}{a}} \sqrt[2]{t_e} \quad \text{ecuación 4.11}$$

Donde =

x_c = profundidad de carbonatación en cm.

D_{0,CO_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO₂. Hay autores que lo nombran D_1 ;

Investigaciones previas lo sitúan entre $0.5 - 50 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ [30].

$\exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right)$ = es la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura en un proceso difusivo ajustada a un D_1 que está calculado a 20°C.

t_a = tiempo al cual se quiere predecir la profundidad de carbonatación en años.

nd,CO_2 = es el factor empírico de edad del coeficiente de CO₂, función de la relación a/c , Yoon [30] lo reporta entre 0.1198 y 0.2778.

k_{urban} = el coeficiente que toma en cuenta el incremento en las concentraciones de CO_2 en sitios urbanos; 1.15 con un coeficiente de variación de 0.1 (Stewart, 2011) [102].

$C_{co2}(t)$ = la concentración de CO_2 promedio durante el estudio, dependiente del tiempo. En kg/m^3 .

a = cantidad de material factible a carbonatar (adimensional).

t_e = tiempo efectivo de exposición (segundos).

- *Propiedades del material: Cantidad de material carbonatable y relación agua/material cementante.*

De manera similar a como sucede con la concentración de CO_2 , la cantidad de material factible a carbonatar es importante, debido a que también tiene influencia en el gradiente de concentraciones que genera la difusión.

Aunque, hay autores que realizan directamente el cálculo del material del material factible a carbonatar a través de relaciones estequiométricas que consideran los productos de hidratación en sus ecuaciones [81,96,97]. La gran mayoría de los mismos asocian las propiedades del material al concepto del “a” [28,30,89,99,102]:

$$a = 0.75 \times C_e \times CaO \times \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \text{ (kg m}^{-3}\text{)} \quad \text{ecuación 2.38}$$

Dónde:

C_e = contenido de cemento ($kg m^{-3}$).

CaO = contenido de CaO en el cemento ($kg m^{-3}$).

α_H = grado de hidratación.

M = las respectivas masas molares del CO_2 (44 g/mol) y del CaO (56 g/mol).

Para esta propuesta, se decidió atribuir las propiedades del material a la concentración de portlandita, la cual se estima de manera aproximada mediante la medición del pH del concreto, de acuerdo a la norma ASTM D 1242. Por su parte, la relación agua/material cementante influye de manera directa en la porosidad del concreto, misma que afecta en la penetración del CO_2 . De tal manera, que introduciendo ambos factores: concentración de portlandita y relación a/mc; Conscientes del error provocado por la manera de estimar la concentración de hidróxido de calcio y la porosidad, se completa la ecuación propuesta de la siguiente manera (ecuación 4.12):

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-nd,co_2} * k_{urban} * C_{co_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_{2pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e} \quad \text{ecuación 4.12}$$

Donde =

x_c = profundidad de carbonatación en cm.

D_{0,co_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO₂. Hay autores que lo nombran D_1 ;

Investigaciones previas lo sitúan entre 0.5 - 50 x 10⁻⁴ cm²/s [30].

$\exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right)$ = es la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura en un proceso difusivo ajustada a un D_1 que está calculado a 20°C.

t_a = tiempo al cual se quiere predecir la profundidad de carbonatación en años.

nd,CO_2 = es el factor empírico de edad del coeficiente de CO₂, función de la relación a/c, Yoon [30] lo reporta entre 0.1198 y 0.2778.

k_{urban} = el coeficiente que toma en cuenta el incremento en las concentraciones de CO₂ en sitios urbanos; 1.15 con un coeficiente de variación de 0.1 (Stewart, 2011) [102].

$C_{co_2}(t)$ = la concentración de CO₂ promedio durante el estudio, dependiente del tiempo, en kg/m³.

a/mc = relación agua entre cementante expresado en decimal.

$Ca(OH)_{2pHi}$ = es la concentración inicial de iones hidroxilo al inicio del estudio, medido inmediatamente después del curado del concreto y obtenido a través de pruebas de pH de acuerdo a ASTM D 1242, en kg/m³.

t_e = tiempo efectivo de exposición (segundos).

4.6.2.- Ecuación propuesta.

Las consideraciones anteriores permitieron desarrollar, la propuesta del modelo de predicción del frente de carbonatación, para estructuras expuestas al ambiente sin cubierta; La cual, busca ser fácilmente extrapolable a otras regiones climáticas.

Aunque esta propuesta tiene características distintas a lo propuesto por otros autores; sí se nutre de todos los trabajos presentados en los antecedentes. No obstante, por su semejanza y por la manera de acomodar las variables, es posible identificar como base, las ecuaciones de Yoon [30], Stewart [102] y Bastidas-Arteaga [28]. La Tabla 4.8 muestra las ecuaciones de dichos autores:

Tabla 4.8. Propuestas de predicción del avance en el frente de carbonatación de Yoon [30], Stewart [102] y Bastidas-Arteaga [28].

Año	Autor	Ecuación
2007	In-Seok Yoon, Oguzhan Copuroglu, Ki-Bong Park [30].	$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(RH, t)}{a(C_{CO_2})}} C_{CO_2}(t) t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}$
2011	Mark G. Stewart, Xiaoming Wang, Minh N. Nguyen [102].	$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} C_{CO_2}(t - 1999)} \left(\frac{t_0}{t - 1999}\right)^{n_m}$ <p style="text-align: center;">$t \geq 2000$</p> $x_c(t) \approx \sqrt{\frac{2f_t(t)D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} \int_{2000}^t C_{CO_2}(t) dt} \left(\frac{1}{t - 1999}\right)^{n_m}$ <p style="text-align: center;">$t \geq 2000$</p>
2013	Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs, Mark G. Stewart, Xiaoming Wang [28].	$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} C_{CO_2} t} \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}$ <p style="text-align: center;">Vuille M. (2003) (105)</p> $x_c(t) \approx \sqrt{\frac{2f_T(t)D_{CO_2}(t)}{a} k_{urban} \int_0^t C_{CO_2}(t) dt} \left(\frac{1}{t}\right)^{n_m}$ <p style="text-align: center;">Mark G. Stewart (2011) [102].</p>

Una vez que se han presentado los antecedentes y las consideraciones que fueron tomadas en cuenta para esta propuesta, se hace la presentación formal de la ecuación de predicción del avance en el frente de carbonatación de este trabajo, incluyendo las distintas variables usadas y la manera de obtener las mismas. La ecuación 4.12 muestra un nuevamente la propuesta.

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(D_{0,CO_2}) * \exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-nd,CO_2} * k_{urban} * C_{CO_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_2_{pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e} \quad \text{ecuación 4.12}$$

Donde =

x_c = profundidad de carbonatación en cm.

D_{0,CO_2} = Es el coeficiente inicial de difusión de CO₂. Hay autores que lo nombran D_1 ; Investigaciones previas lo sitúan entre 0.5 - 50 x 10⁻⁴ cm²/s [30].

$\exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right)$ = es la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura en un proceso difusivo ajustada a un D_1 o D_{0,CO_2} que está calculado a 20°C.

E = Energía de activación [(J/mol o eV/atm); (40,000 J/mol, Kada-Benameur, 2000 [137]).

R = Constante de los gases (8.314 J/mol-K).

$T_{prom}(t)$ = Temperatura promedio absoluta que varía en función del tiempo (K).

$$T_{prom}(t) = \frac{T_{ini} + (k_T t_a + T_{ini})}{2} \quad \text{ecuación 4.6}$$

T_{ini} = Temperatura promedio anual al inicio del estudio (K).

t_a = tiempo al cual se quiere predecir la profundidad de carbonatación en años.

k_T = pendiente de la regresión lineal de los promedios históricos del sitio en estudio.

nd,CO_2 = es el factor empírico de edad del coeficiente de CO₂, función de la relación a/c, Yoon [30] lo reporta entre 0.1198 y 0.2778.

k_{urban} = el coeficiente que toma en cuenta el incremento en las concentraciones de CO₂ en sitios urbanos con respecto a sitios rurales; Su valor es 1.15 con un coeficiente de variación de 0.1 (Stewart, 2011) [102].

$C_{CO_2}(t)$ = la concentración de CO₂ promedio durante el estudio, dependiente del tiempo, en kg/m³.

$$C_{CO_2}(t) = [0.0019 \times 10^{-3}] * \left[\frac{C_{CO_2,t_0} + (C_{CO_2,t_0} + 1.5(t_a))}{2} \right] \quad \text{ecuación 4.13}$$

C_{CO_2,t_0} = Concentración promedio de CO₂ al inicio del estudio, en ppm.

t_a = tiempo al cual se requiere obtener la profundidad de carbonatación en años.

Factor de conversión 1ppm = 0.0019 x 10⁻³ kg/m³.

Nota: 1.5 ppm es la tasa de crecimiento en las concentraciones de CO₂ para los próximos 100 años; Propuesta por el fib Model Code for Service Life Design y citado por (Sterwart, 2011 [102]); No obstante, algunos autores esperan tasas de incremento de hasta 1.9 ppm.

a/mc = relación agua entre cementante expresado en decimal.

$Ca(OH)_{2pHi}$ = es la concentración inicial de iones hidroxilo al inicio del estudio, medido inmediatamente después del curado del concreto y obtenido a través de pruebas de pH en concreto de acuerdo a ASTM D 1242; En kg/m^3 .

t_e = tiempo efectivo de exposición (segundos).

$$t_e = t_d - t_p - t_{HRBC} - \frac{1}{2}t_{HRMC} \quad \text{ecuación 4.14}$$

t_d = tiempo al cual se requiere obtener la profundidad de carbonatación (tiempo total del estudio), en días.

t_p = considera la cantidad de tiempo con precipitación a la que estuvo expuesta la estructura (se considera que en estas condiciones no existe carbonatación debido a que está saturada la red de poros).

$$t_p = (k_p * t_a + t_{p0} * t_a) \quad \text{ecuación 4.15}$$

k_p = La pendiente de la regresión lineal del comportamiento de los registros históricos de precipitación del área en estudio.

t_a = tiempo al cual se requiere obtener la profundidad de carbonatación, en días.

t_{p0} = tiempo total en el que la estructura estuvo expuesta a condiciones de precipitación para el año inicial de vida de la estructura o el año inmediato anterior, en días.

t_{HRBC} = es el tiempo de exposición de la estructura a una humedad relativa de carbonatación despreciable ($HR < 20\%$, $HR > 75\%$ Carbonatación despreciable).

$$t_{HRBC} = [(k_{HRbc} * t_a + t_{HRbc0} * t_a) - (t_p)] \quad \text{ecuación 4.16}$$

k_{HRbc} = La pendiente de la regresión lineal del comportamiento de los registros históricos de la humedad relativa con carbonatación despreciable ($HR < 20\%$, $HR > 75\%$, Carbonatación despreciable) del área en estudio, en días.

t_{HRbc0} = Tiempo total en el que la estructura estuvo expuesta a carbonatación despreciable ($HR < 25\%$, $HR > 75\%$), para el año inicial de vida de la estructura o el año inmediato anterior, en caso de que la estructura sea nueva (con menos de 1 año de vida).

t_p = considera la cantidad de tiempo con precipitación a la que estuvo expuesta la estructura (se considera que en estas condiciones no existe carbonatación debido a que está saturada la red de poros); Como puede existir tiempo en que simultáneamente tenemos precipitación una humedad relativa alta se debe disminuir el valor de t_p de los días con una humedad relativa que genera baja carbonatación.

t_{HRMC} = es el tiempo de exposición de la estructura a una humedad relativa de carbonatación media ($25\% \leq HR \leq 49\%$).

$$t_{HRMC} = [(k_{HRmc} * t_a + t_{HRmc0} * t_a)] \quad \text{ecuación 4.17}$$

k_{HRmc} = Es la pendiente de la regresión lineal del comportamiento de los registros históricos de la humedad relativa con carbonatación media ($25\% \leq HR \leq 49\%$) del área en estudio.

$t_{HR_{m.c.0}}$ = Tiempo total en el que la estructura estuvo expuesta a carbonatación media ($25\% \leq HR \leq 49\%$) para el año inicial de vida de la estructura o el año inmediato anterior, en caso de que la estructura sea nueva (con menos de 1 año de vida).

4.6.3.- Verificación de las unidades de la ecuación propuesta.

Con la finalidad de ilustrar la compatibilidad de unidades en la ecuación propuesta, se presenta el siguiente ejercicio, donde se muestra el equilibrio de unidades y el resultando de la ecuación.

$$x_c = \sqrt{\frac{2(D_{0,co_2}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-nd,co_2} * k_{urban} * C_{co_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_2_{pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e} \quad \text{ecuación 4.12}$$

$$x_c = \sqrt{\frac{2(cm^2/s) * adim. * adim. * adim. * kg/m^3}{\left[\frac{1}{adim.} * kg/m^3\right]}} \sqrt[2]{s}$$

adim. = adimensional

$$x_c = cm$$

4.6.4.- Ejemplo numérico de la ecuación propuesta.

Caso: Concreto con relación $a/mc = 0.46$, 0% de CV; ubicado en la estación de La Pastora; análisis a 2 años.

$$x_c = \sqrt{\frac{2(D_{0,CO_2}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-n_{d,CO_2}} * k_{urban} * C_{CO_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_2_{pHi}\right]}} \sqrt{t_e} \quad \text{ecuación 4.12}$$

4.6.4.1.- Cálculo del coeficiente de difusión, D_{0,CO_2} .

Se determinó un coeficiente de difusión $D_{0,CO_2} = 0.65 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, el cual fue tomado de la Tabla 4.9, (Sterwart, 2011).

Tabla 4.9. Valores de D_1 y n_d en función de la relación a/c [102].

a/c	$D_1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	n_d
0.45	0.65	0.218
0.50	1.24	0.235
0.55	2.22	0.240

Nota: para valores intermedios use interpolación lineal.

Quedando la ecuación así:

$$x_c = \sqrt{\frac{2(0.65 \times 10^{-4}) * \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right) * (t_a)^{-n_{d,CO_2}} * k_{urban} * C_{CO_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_2_{pHi}\right]}} \sqrt{t_e}$$

4.6.4.2.- Cálculo del efecto en el cambio de temperatura, $\exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)}\right)\right)$.

Siendo, $T_{prom}(t)$:

$$T_{prom}(t) = \frac{T_{ini} + (k_r t_a + T_{ini})}{2} \quad \text{ecuación 4.6}$$

Como las probetas comenzaron su exposición en el año de 2013, se tomó la temperatura promedio anterior a dicho año; Esto con la finalidad de resolver el problema como se espera sea resuelto en la realidad, sin tener resultados posteriores; La intención es verificar la factibilidad de realizar predicciones inmediatamente después de la puesta en marcha de la estructura, tomando la temperatura media del sitio de estudio. Las Figuras 4.30 y 4.31 muestran la regresión lineal de la temperatura promedio, a partir, tanto de datos mensuales como de datos anuales. Se determinó, utilizar el incremento en la temperatura calculado a partir de los promedios mensuales, debido a que presenta un valor más alto. Por su parte, la Tabla 4.10 muestra el cálculo de promedios de temperatura para el año 2012, a partir del cual se estableció la T_{ini} .

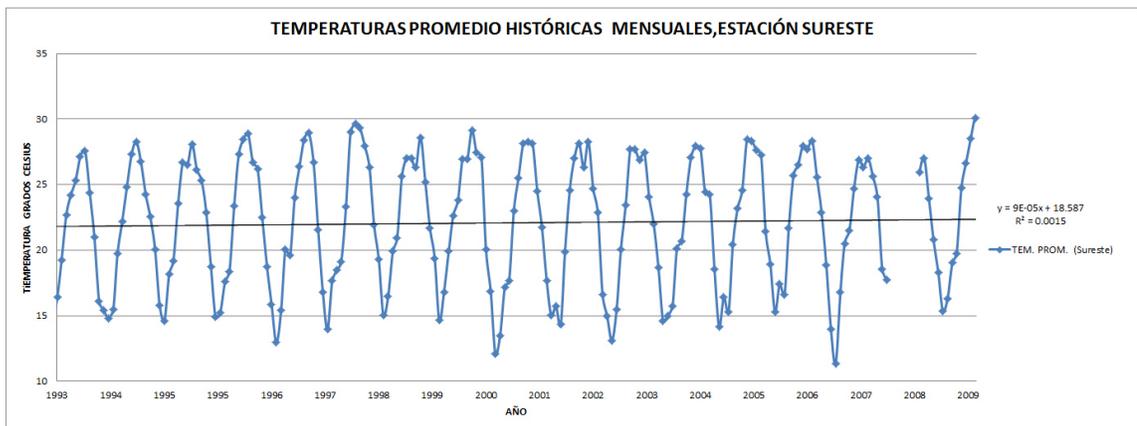


Figura 4.30. Temperaturas promedio históricas mensuales de la estación sureste.

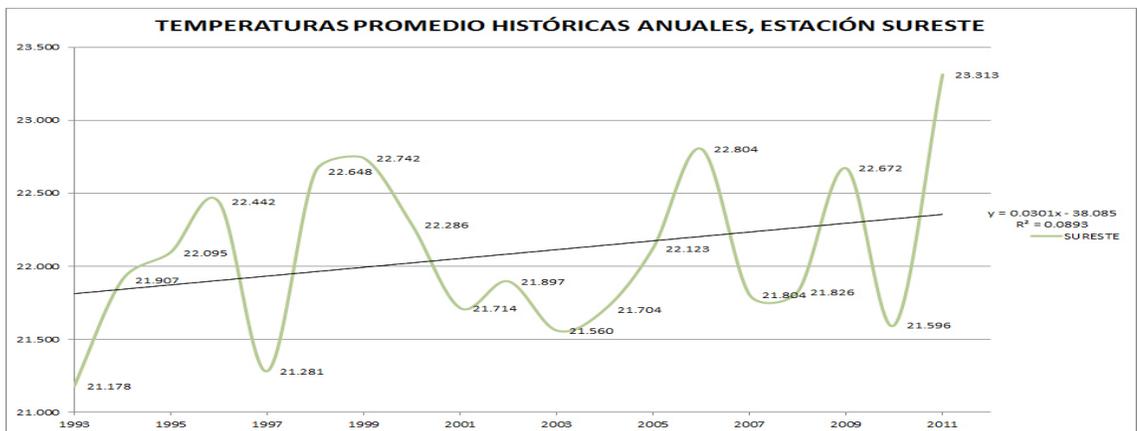


Figura 4.31. Temperaturas promedio históricas anuales de la estación sureste.

Nota: debido a que la variación en la temperatura, calculada a partir de promedios anuales (**0.0301**) es mayor que la obtenida a partir de promedios mensuales (9×10^{-5}), se determinó utilizar esta en los cálculos por ser un valor más crítico. $k_T = 0.0301$

Tabla 4.10. Cálculo de promedios de temperatura para el año 2012, estación sureste.

SURESTE										
2012	T _{prom.}		TEM. MAX.		TEM. MIN.		PRECIPITACIÓN		%HR	
ene	16.315	3.417	21.900	5.020	11.458	2.667	34.090	5.694	59.739	17.398
feb	19.053	3.729	25.173	5.284	13.130	3.432	17.750	1.659	55.101	18.965
mar	19.760	4.803	25.512	5.916	14.050	4.168	28.750	3.199	63.205	20.744
abr	24.739	2.451	30.830	3.279	18.909	2.905	22.250	3.287	52.779	18.730
may	26.640	2.600	32.103	3.563	21.261	1.926	12.750	0.999	64.876	8.362
jun	28.509	1.242	34.279	1.765	23.081	1.354	4.670	0.683	64.249	5.542
jul	30.081	0.880	36.538	1.372	23.904	0.987	11.500	1.807	57.194	4.640
ago	29.235	1.845	35.165	2.923	23.416	0.844	1.500	0.187	57.921	8.211
sep	24.532	2.679	28.632	3.253	21.185	2.175	339.000	20.492	80.242	9.338
oct	22.100	4.043	26.085	4.890	18.365	4.063	56.750	5.022	77.846	11.679
nov	17.999	2.517	23.113	3.505	13.046	2.331	17.750	2.312	67.617	8.516
dic	12.909	4.133	18.002	6.315	8.880	2.896	46.500	3.028	78.559	13.177
Prom anual	22.672		28.123		17.577		593.260		65.011	
desv anual	6.122		6.940		5.671		7.096		15.820	

$$T_{ini} = 22.672 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{prom}(t) = \frac{T_{ini} + (K_T t_a + T_{ini})}{2} \quad \text{ecuación 4.6}$$

$$T_{prom}(t) = \frac{22.672 + (0.0301(2) + 22.672)}{2}$$

$$T_{prom}(t) = 22.702 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (temperatura promedio para } t = 2 \text{ años)}$$

Con los datos completos se calcula el factor que toma en cuenta los cambios en la temperatura:

$$\exp^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)} \right)} \quad \text{ecuación 4.18}$$

E = 40,000 J/mol, Kada-Benameur, 2000 [137].

R = 8.314 J/mol-K

$$T_{prom}(t) = 22.702 \text{ }^{\circ}\text{C} = 295.702 \text{ K}$$

$$\exp^{\frac{40000}{8.314} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{295.702} \right)} = 1.162$$

Quedando la ecuación:

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(0.65 \times 10^{-4}) * 1.162 * (t_a)^{-nd,co_2} * k_{urban} * C_{co_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_{2pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e}$$

4.6.4.3.-Cálculo del factor de envejecimiento, $(t_a)^{-nd,co_2}$.

$$(t_a)^{-nd,co_2} \tag{ecuación 4.19}$$

Mark G. Stewart, 2011 [102], reporta la Tabla 4.11 con un 95% de certidumbre para nd. Como la relación a/mc = 0.46, se ha decidido utilizar un valor de nd = 0.218.

Tabla 4.11. Valores de D₁ y n_d en función de la relación a/c.

a/c	D ₁ x 10 ⁻⁴ cm ² s ⁻¹	n _d
0.45	0.65	0.218
0.50	1.24	0.235
0.55	2.22	0.240

Nota: para valores intermedios use interpolación lineal.

Entonces tenemos que:

$$(t_a)^{-nd,co_2} \tag{ecuación 4.19}$$

$$(2)^{-0.218} = 0.860$$

Quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(0.65 \times 10^{-4}) * 1.162 * 0.86 * k_{urban} * C_{co_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_{2pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e}$$

4.6.4.4.-Cálculo de k_{urban}.

k_{urban}, es el coeficiente que toma en cuenta el incremento en las concentraciones de CO₂ en sitios urbanos; Su ponderación es de 1.15 con un Coeficiente de variación de

0.1, (Stewart, 2011) [102]. Debido a la ubicación de sitio de exposición que es zona urbana, se decidió utilizar dicho valor.

$$k_{urban} = 1.15$$

Quedando la ecuación:

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(0.65 \times 10^{-4}) * 1.162 * 0.86 * 1.15 * C_{CO_2}(t)}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_{2pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e}$$

4.6.4.5.-Cálculo de la Concentración de CO₂ dependiente del tiempo, C_{CO₂}(t) (kg/m³).

$$C_{CO_2}(t) = [0.0019 \times 10^{-3}] * \left[\frac{C_{CO_2,t_0} + (C_{CO_2,t_0} + 1.5(t_a))}{2} \right] \quad \text{ecuación 4.20}$$

C_{CO₂,t₀} =Concentración promedio de CO₂ al inicio del estudio: 393.1 ppm, estimado a partir de datos puntuales reportados para la ciudad.

t_a = tiempo al cual se requiere obtener la profundidad de carbonatación en años.

Factor de conversión 1ppm = 0.0019 x 10⁻³ kg/m³).

Se considera un aumento de 1.5 ppm anual de acuerdo a lo publicado por el código fib Model Code for Service Life Design [138]; aunque probablemente este valor sea menor al real.

$$C_{CO_2}(t) = [0.0019 \times 10^{-3}] * \left[\frac{393.1 + (393.1 + 1.5(2))}{2} \right]$$

$$C_{CO_2}(t) = 7.497 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$$

Quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(0.65 \times 10^{-4}) * 1.162 * 0.86 * 1.15 * 7.496 \times 10^{-4}}{\left[\frac{1}{a/mc} * Ca(OH)_{2pHi}\right]}} \sqrt[2]{t_e}$$

4.6.4.6.- Relación a/mc.

Se utilizó la relación $a/mc = 0.46$ (dato de diseño de mezcla).

Por lo que la ecuación queda:

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(0.65 \times 10^{-4}) * 1.162 * 0.86 * 1.15 * 7.496 \times 10^{-4}}{[0.46 * Ca(OH)_{2pHi}]} \sqrt[2]{t_e}}$$

4.6.4.7.- Concentración de material carbonatable, $Ca(OH)_{2pHi}$.

Una de las propuestas innovadoras de este trabajo, tiene que ver con la estimación de la cantidad de material carbonatable en función de la estimación del pH de la mezcla. Dicha propuesta se describe a continuación:

pH = 12.576 medido (Ver anexo A4, mediciones de pH).

Entonces tenemos que: $pOH + pH = 14$ ecuación 4.21

$$pOH = 14 - 12.576$$

$$pOH = 1.424$$

$$[OH^-] = 10^{-pOH}$$

$$[OH^-] = 10^{-1.424}$$

$$[OH^-] = 0.03767 \text{ M/l (que es la concentración de iones hidroxilo en moles por litro)}$$

Para simplificar el problema, se consideró que solo tenemos iones Ca^+ asociados a los OH^- . Lo cual es falso, porque también tenemos otros iones asociados al hidróxido en menor cantidad, como pueden ser Na^+ y K^+ . De esta manera se estimó, de acuerdo a la fórmula química de la portlandita ($Ca(OH)_2$), que por cada mol de OH^- tenemos $\frac{1}{2}$ mol de Ca^+ .

Entonces obtenemos la siguiente concentración de $Ca(OH)_2$ equivalente.

$$[Ca(OH)_2] = 0.03767/2 = 0.018835 \text{ M/l (concentración equivalente de portlandita para la concentración de hidroxilo medida a partir del pH).}$$

Cálculo de la masa del Ca(OH)₂:

$$\text{Ca} = 40.08 \text{ uma}$$

$$(\text{OH})_2 = 2(1.0079 + 15.999) = 34.0138 \text{ uma}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = 74.0938 \text{ uma}$$

$$\frac{0.018835 \text{ mol} \cdot 74.0938 \text{ gr}}{1 \text{ mol}} = 1.395557 \text{ gr/l}$$

Resultando que la concentración de Ca(OH)₂ es:

$$[\text{Ca(OH)}_2] = 1.395557 \text{ gr/l} = 1.396 \text{ kg/m}^3$$

Se cuenta ahora, con todos los datos excepto él t_e.

$$x_c = \sqrt[2]{\frac{2(0.65 \times 10^{-4}) * (1.16188) * (0.86) * (1.15) * (7.497 \times 10^{-4})}{\left[\frac{1}{0.46} * 1.396\right]}} \sqrt[2]{t_e}$$

$$x_c = (1.921 \times 10^{-4}) \sqrt[2]{t_e}$$

4.6.4.8.- Cálculo de t_e (segundos).

4.6.4.8.1.- Cálculo de tiempo de precipitación.

Partiendo de que 1 mm de precipitación es igual a 1 l/m² ó 0.01 l/dm², Se consideraron como días de lluvia con precipitación, aquellos que tienen más de 10 mm de precipitación (10 l/m² o 1 l/dm²), por suponer que es la cantidad mínima que satura el poro y detiene el proceso de carbonatación. La Tabla 4.12 y la Figura 4.32 muestran estos cálculos; En los que para determinar la cantidad de días de precipitación por año históricos, se utilizó la siguiente función de Excel:

$$\text{Conta.SI.Conjunto}(\text{rango_criterios1}, \text{criterio1}, [\text{rango_criterios2}, \dots])$$

Tabla 4.12. Cálculo de la variación de los días con precipitación. Estación sureste.

Año	Días con precipitación superior al 10 mm
1993	25
1994	19
1995	17
1996	12
1997	20
1998	18
1999	20
2000	13
2001	22
2002	11
2003	s/d
2004	20
2005	13
2006	17
2007	27
2008	s/d
2009	14
2010	25
2011	8
2012	20
PROMEDIO	18.813

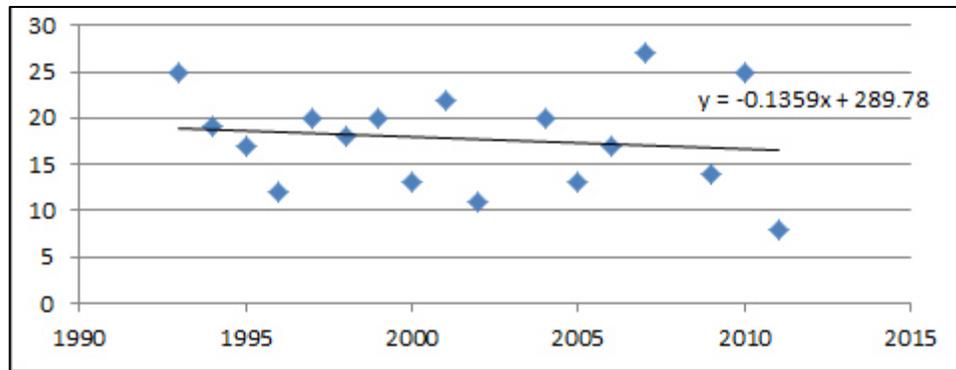


Figura 4.32. Cálculo de la variación de los días con precipitación. Histórico de días con precipitación superior a 10 mm, Estación sureste.

Entonces, se tiene que el promedio histórico de días con precipitación superior a 10 mm es 18.813 días, y que de acuerdo a la regresión lineal simple esa cantidad de días se reduce año con año a razón de 0.136. Entonces, se calcula la cantidad de días con precipitación total durante el tiempo de estudio.

$$tp = (k_p * t_a + t_{p0} * t_a) \quad \text{ecuación 4.15}$$

$$tp = (-0.136 * 2 + 18.813 * 2)$$

$$tp = 37.3532 \text{ días (precipitación superior a 10 mm durante el estudio).}$$

4.6.4.8.2.- *Cálculo de tiempo de exposición a humedad de carbonatación despreciable.*

$t_{HR_{BC}}$, es el tiempo de exposición de la estructura a una humedad relativa de carbonatación despreciable ($HR < 20\%$, $HR > 75\%$). El cual fue calculado de manera similar a como fueron determinados los días de precipitación. La Tabla 4.13 y la Figura 4.33, muestran el resumen de dichos cálculos.

$$t_{HR_{BC}} = [(k_{HR_{bc}} * t_a + t_{HR_{bc0}} * t_a) - (t_p)] \quad \text{ecuación 4.16}$$

Tabla 4.13. Cálculo de la variación de los días con HR<20%, HR>75% Carbonatación despreciable. Estación sureste.

Año	Días con %HR > 20	Días con %HR < 75	Suma de días del intervalo
2004	0	81	81
2005	2	78	80
2006	4	65	69
2007	0	142	142
2008	0	76	76
2009	0	77	77
2010	0	63	63
2011	3	30	30
2012	0	65	65
Promedio	---	---	74.333

Nota: Para el cálculo de la pendiente de la línea de regresión y el promedio de días con humedad relativa en el rango seleccionado se determinó quitar los valores extremos.

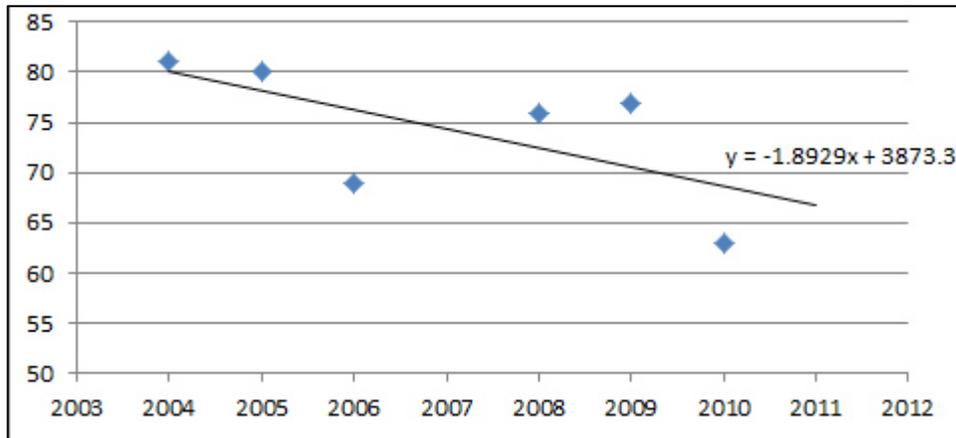


Figura 4.33. Cálculo de la variación de los días con HR<20%, HR>75% (Carbonatación despreciable), Estación sureste.

$$t_{HR_{BC}} = [(k_{HR_{bc}} * t_a + t_{HR_{bc0}} * t_a) - (t_p)] \quad \text{ecuación 4.16}$$

$$t_{HR_{BC}} = [(-1.8929 * 2 + 74.333 * 2) - (37.353)]$$

$$t_{HR_{BC}} = 107.527 \text{ días}$$

Nota: Con la intención de evitar duplicidades en el tiempo al cual la estructura fue expuesta a una baja velocidad de carbonatación, se hace la resta del tiempo de

precipitación (t_p), por considerar, que durante el tiempo de precipitación se genera una humedad relativa alta en el ambiente.

4.6.4.8.3.- *Cálculo de tiempo de exposición a humedad de carbonatación media.*

t_{HRMC} , es el tiempo de exposición de la estructura a una humedad relativa de velocidad de carbonatación media ($25\% \leq HR \leq 49\%$). La Tabla 4.14 y la Figura 4.34, muestran el resumen de dichos cálculos.

$$t_{HRMC} = [(k_{HRmC} * t_a + t_{HRmCo} * t_a)] \quad \text{ecuación 4.17}$$

Tabla 4.14. Cálculo de la variación de los días con $25\% \leq HR \leq 49\%$ Carbonatación media. Estación sureste.

Año	Días con humedad relativa en el rango de $25\% \leq HR \leq 49\%$
2004	53
2005	59
2006	65
2007	49
2008	10
2009	44
2010	65
2011	66
2012	60
Promedio	57.286

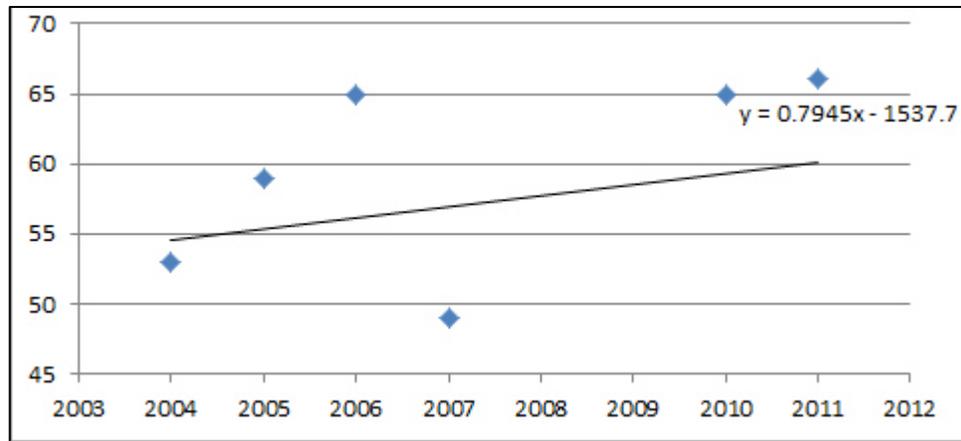


Figura 4.34. Cálculo de la variación de los días con $25\% \leq HR \leq 49\%$, velocidad de carbonatación media, Estación sureste.

$$t_{HR_{MC}} = [(k_{HR_{mc}} * t_a + t_{HR_{mc0}} * t_a)] \quad \text{ecuación 4.17}$$

$$t_{HR_{MC}} = [(0.795 * 2 + 57.286 * 2)]$$

$$t_{HR_{MC}} = 116.162 \text{ días}$$

Finalmente:

$$t_e = t_d - t_p - t_{HR_{BC}} - \frac{1}{2} t_{HR_{MC}} \quad \text{ecuación 4.14}$$

$$t_e = 730 - 37.353 - 107.527 - \frac{1}{2} (116.162)$$

$$t_e = 527.039 \text{ días}$$

$$t_e = 45,536,169.6 \text{ seg}$$

$$x_c = (1.921 \times 10^{-4})^2 \sqrt{t_e \text{ (seg)}}$$

$$x_c = (1.921 \times 10^{-4})^2 \sqrt{45,536,169.6}$$

$$x_c = 1.29 \text{ cm}$$

$$x_c = 12.9 \text{ mm}$$

Profundidad medida = 11.25 mm (medidos)

Diferencia = 1.65 mm

4.7.- Verificación de la ecuación propuesta.

De manera análoga a como se efectuó el ejemplo de la sección anterior, se realizó la verificación de los resultados obtenidos por medio de la ecuación propuesta con los datos medidos en las probetas expuestas a carbonatación natural en el área metropolitana de Monterrey;. Las Tablas 4.15 – 4.26 muestran el resumen de estos cálculos. Por su parte, las Tablas 4.27- 4.35, muestran los resultados finales y el análisis de los mismos.

La Tabla 4.15 muestra las variables de entrada requeridas para predecir la profundidad de carbonatación de acuerdo a la ecuación propuesta; En el caso del coeficiente de difusión D_{0,CO_2} , que es la variable que demostró tener fuerte influencia en la variación de los resultados predichos por la ecuación, hay que mencionar que para establecer de manera fiel su valor, es necesario hacer experimentación en laboratorio; Sin embargo, ya existen valores reportados, mismos que han sido mencionados en este trabajo, y a partir de los cuales por medio de interpolación lineal se obtuvieron los datos de la primer columna; Como dichos valores demostraron no ser representativos de los concretos con ceniza volante de este estudio, se realizó una ponderación del coeficiente de difusión D_{0,CO_2} que minimizó el error de la predicción en la ecuación propuesta. Hay que observar que dicho valor ponderado y utilizado en la propuesta es muy cercano en orden de magnitud a los presentados en la literatura, además, que asemeja los comportamientos obtenidos en la prueba de migración de cloruros donde las mezclas no tuvieron variaciones significativas; Tomando en cuenta, la dificultad de realizar una comparación directa entre el coeficiente de migración de cloruros de acuerdo a la Norma NT BUILD 492 y el coeficiente de carbonatación natural, se estima que los resultados de la norma NT BUILD 492 pueden dar una referencia de la manera en que se desempeñan las matrices ante otros procesos difusivos como es el caso de la carbonatación natural. Por su parte el valor de nd, CO_2 fue estimado a partir de los resultados de Mark G. Stewart, 2011 [102] (Tabla 4.11); El valor de la relación a/mc es un dato de entrada del diseño de mezcla y la concentración de $Ca(OH)_{2_{pHi}}$ fue calculada en el anexo 4 con base a mediciones de pH en laboratorio de acuerdo a la norma ASTM D 4262.

Tabla 4.15. Valores seleccionados y obtenidos para los parámetros de la propuesta en función tipo de mezcla.

<i>Mezcla</i>	D_{0,CO_2}^* (obtenidos por interpolación)	D_{0,CO_2}^{**} (utilizado en la propuesta)	nd, CO_2^{***}	a/mc	$Ca(OH)_2_{pHi}^{****}$
0.46,0%	$0.65 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	$0.89 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.218	0.46	1.396 kg/m ³
0.46,25%	$0.65 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	$0.31 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.218	0.46	0.659 kg/m ³
0.46,50%	$0.65 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	$0.36 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.218	0.46	0.456 kg/m ³
0.59,0%	$3.58 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1*}$	$0.22 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.24	0.59	0.974 kg/m ³
0.59,25%	$3.58 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1*}$	$0.63 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.24	0.59	0.722 kg/m ³
0.59,50%	$3.58 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1*}$	$0.38 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.24	0.59	0.354 kg/m ³
0.70,0%	$7.44 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1*}$	$0.29 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.24	0.70	0.574 kg/m ³
0.70,25%	$7.44 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1*}$	$0.48 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.24	0.70	0.415 kg/m ³
0.70,50%	$7.44 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1*}$	$0.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$	0.24	0.70	0.312 kg/m ³

* Datos obtenidos por interpolación lineal de la Tabla 4.11, a partir de los resultados de Mark G. Stewart, 2011 [102].

** Datos ponderados del coeficiente de difusión D_{0,CO_2} que minimizan el error de la predicción de la ecuación propuesta.

*** Datos estimados Tabla 4.11.

**** Datos obtenidos en el anexo 4.

La Tabla 4.16 muestra las temperaturas promedio iniciales, promedio de concentración de CO₂ inicial (ppm), días con precipitación, días con humedad relativa de velocidad de carbonatación media (25% ≤ HR ≤ 49%), días con humedad relativa de velocidad carbonatación de baja (HR < 20%, HR > 75%) y pendientes de comportamiento de los mismos, que fueron calculados a partir

de los datos hidrometeorológicos de las zonas en estudio. El coeficiente de k_{urban} se determinó mantener en 1.00 debido a que se consideró que el valor de la concentración inicial de CO_2 utilizado es confiable para los sitios de estudio.

Tabla 4.16. Valores seleccionados y obtenidos para los parámetros de la propuesta en función del sitio de exposición.

<i>Sitio de exposición</i>	T_{ini}	k_T	k_{urban}	C_{CO_2,t_0}	t_{p0}	k_{p0}	t_{HRbCO}	k_{HRbC}	t_{HRmCO}	k_{HRmC}
<i>La Pastora</i>	22.672	0.0301	1.00	393.1 ppm	18.813	-0.136	74.333	-1.893	57.286	0.795
<i>CONAGUA</i>	24.677	0.0982	1.00	393.1 ppm	18.813*	-0.136*	74.333*	-1.893*	57.286*	0.795*
<i>Universidad</i>	21.862	0.144	1.00	393.1 ppm	18.813*	-0.136*	74.333*	-1.893*	57.286*	0.795*

* Al no contar, al momento de escritura de la tesis con datos completos y suficientes para establecer el comportamiento de la precipitación y la humedad relativa en las estaciones de CONAGUA y Universidad, se decidió tomar los datos de la estación de La Pastora en lo correspondiente a esas variables.

La Tabla 4.17 muestra la temperatura promedio calculada para cada uno de los periodos de estudio, la cual se obtuvo a partir de las temperaturas promedio iniciales registradas y la pendiente de la variación de dichas temperaturas considerando un comportamiento lineal en función del tiempo.

Tabla 4.17. Temperatura promedio calculada para cada uno de los periodos y sitios de estudio.

<i>Sitio de exposición</i>	T_{ini}	k_T	$T_{prom.} \text{ } ^\circ\text{C}$					
			167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días
<i>La Pastora</i>	22.672	0.0301	22.679	22.681	22.684	22.686	22.672	22.701
<i>CONAGUA</i>	24.677	0.0982	24.699	24.705	24.716	24.722	24.738	24.772
<i>Universidad</i>	21.862	0.144	21.895	21.903	21.920	21.928	21.862	22.001

Con las estimaciones de las temperaturas promedio para cada uno de los periodos y sitios de estudio se calcula el efecto que tiene la temperatura sobre el coeficiente de migración D_{0,CO_2} , con base en la ecuación de Arrhenius para procesos difusivos, Mismos que son mostrados en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Estimación del efecto de la temperatura en el coeficiente de difusión D_{0,CO_2} .

<i>Sitio de exposición</i>	$exp^{\frac{E}{R}(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{prom}(t)})}$					
	167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días
<i>La Pastora</i>	1.170	1.170	1.170	1.170	1.170	1.171
<i>CONAGUA</i>	1.306	1.307	1.308	1.308	1.309	1.312
<i>Universidad</i>	1.121	1.121	1.122	1.123	1.118	1.127

A partir de la concentración de CO_2 reportada para los sitios de estudio y considerando un incremento de acuerdo a la literatura de 1.5 ppm anual (fib Model Code for Service Life Design [138]; aunque probablemente este valor sea menor al real), se calcula la concentración de CO_2 promedio para cada periodo de estudio, misma que es presentada en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19. Estimación de la concentración promedio de bióxido de carbono (C_{CO_2} , en ppm) para cada uno de los periodos y sitios de estudio.

<i>Sitio de exposición</i>	$C_{CO_2}(t)$ (ppm)						
	0 días	167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días
La Pastora	393.100	393.443	393.529	393.700	393.788	394.035	394.549
CONAGUA	393.100	393.443	393.529	393.700	393.788	394.035	394.549
Universidad	393.100	393.443	393.529	393.700	393.788	394.035	394.549

En la tabla 4.20, se muestran las concentraciones promedio de bióxido de carbono de la Tabla 4.19 convertidas a unidades de kg/m^3 , mismas que son las unidades de entrada en la ecuación. Tomando como valor de conversión $1\text{ppm} = 0.0019 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

Tabla 4.20. Estimación de la concentración promedio de bióxido de carbono (C_{CO_2} , en kg/m^3) para cada uno de los periodos y sitios de estudio.

Sitio de exposición	C_{CO_2} , kg/m^3 ($\times 10^{-3}$)						
	0 días	167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días
<i>La Pastora</i>	393.100	0.74754	0.74771	0.74803	0.74820	0.74867	0.74964
<i>CONAGUA</i>	393.100	0.74754	0.74771	0.74803	0.74820	0.74867	0.74964
<i>Universidad</i>	393.100	0.74754	0.74771	0.74803	0.74820	0.74867	0.74964

En la Tabla 4.21 se presenta el resumen del cálculo del factor de envejecimiento $(t_a)^{-nd,CO_2}$, que toma en cuenta el efecto de taponeo de la matriz debido a los procesos de hidratación y carbonatación a través del tiempo; Dicho valor fue obtenido a partir del valor de nd, CO_2 propuesto en la Tabla 4.15.

Tabla 4.21. Estimación del factor de envejecimiento $(t_a)^{-nd,co_2}$.

<i>Mezcla</i>	<i>nd, co₂</i>	$(t_a)^{-nd,co_2}$					
		167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días
0.46,0%	0.218	1.186	1.129	1.050	1.019	0.953	0.866
0.46,25%	0.218	1.186	1.129	1.050	1.019	0.953	0.866
0.46,50%	0.218	1.186	1.129	1.050	1.019	0.953	0.866
0.59,0%	0.24	1.206	1.143	1.055	1.021	0.948	0.854
0.59,25%	0.24	1.206	1.143	1.055	1.021	0.948	0.854
0.59,50%	0.24	1.206	1.143	1.055	1.021	0.948	0.854
0.70,0%	0.24	1.206	1.143	1.055	1.021	0.948	0.854
0.70,25%	0.24	1.206	1.143	1.055	1.021	0.948	0.854
0.70,50%	0.24	1.206	1.143	1.055	1.021	0.948	0.854

Las Tablas 4.22 – 4.24, muestran el resumen de los cálculos del tiempo de precipitación, tiempo con humedad relativa de velocidad de carbonatación media ($25\% \leq HR \leq 49\%$) y tiempo con humedad relativa de velocidad carbonatación de baja ($HR < 20\%$, $HR > 75\%$); Mismos que fueron calculados a partir del promedio de días en que existió tal condición para el año inicial del estudio o el año inmediato anterior para el caso de estructuras nuevas (estructuras con fecha de construcción menor a un año) y la variaciones históricas de dichos días en función del tiempo (ver Tabla 4.16). Dichos cálculos permitieron la construcción de la Tabla 4.25, que es el tiempo efectivo de carbonatación de la estructura.

Tabla 4.22. Resumen del cálculo del tiempo de precipitación t_p para cada uno de los sitios y periodos de estudio.

<i>Sitio de exposición</i>	t_{p0}	k_{p0}	t_p (días)						
			167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días	365 días **
<i>La Pastora</i>	18.813	-0.136	8.545	10.695	14.942	17.142	23.282	36.075	18.677
<i>CONAGUA</i>	18.813*	-0.136*	8.545	10.695	14.942	17.142	23.282	36.075	18.677
<i>Universidad</i>	18.813*	-0.136*	8.545	10.695	14.942	17.142	23.282	36.075	18.677

** Valores de referencia, no participan en los cálculos de predicción de la profundidad de carbonatación.

Tabla 4.23. Resumen del cálculo del tiempo de humedad relativa de velocidad carbonatación de baja t_{HRbC} (HR<20%, HR>75%) para cada uno de los sitios y periodos de estudio.

<i>Sitio de exposición</i>	t_{HRbC0}	k_{HRbC}	t_{HRbC} (días)						
			167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días	365 días **
<i>La Pastora</i>	74.333	-1.893	24.598	30.785	43.010	49.344	67.020	103.844	72.440
<i>CONAGUA</i>	74.333*	-1.893*	24.598	30.785	43.010	49.344	67.020	103.844	72.440
<i>Universidad</i>	74.333*	-1.893*	24.598	30.785	43.010	49.344	67.020	103.844	72.440

** Valores de referencia, no participan en los cálculos de predicción de la profundidad de carbonatación.

Tabla 4.24. Resumen del cálculo del tiempo de humedad relativa de velocidad de carbonatación media t_{HRmC} (25% ≤ HR ≤ 49%) para cada uno de los sitios y periodos de estudio.

<i>Sitio de exposición</i>	t_{HRmC0}	k_{HRmC}	t_{HRmC} (días)						
			167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días	365 días **
<i>La Pastora</i>	57.286	0.795	26.574	33.257	46.465	53.307	72.402	112.184	58.081
<i>CONAGUA</i>	57.286*	0.795*	26.574	33.257	46.465	53.307	72.402	112.184	58.081
<i>Universidad</i>	57.286*	0.795*	26.574	33.257	46.465	53.307	72.402	112.184	58.081

** Valores de referencia, no participan en los cálculos de predicción de la profundidad de carbonatación.

En la Tabla 4.25, se presenta la cantidad de días efectivos de exposición de las probetas de carbonatación (t_e), el cual se obtiene de la diferencia entre el tiempo total de exposición menos el tiempo de precipitación, el tiempo humedad relativa de velocidad de carbonatación media y el tiempo humedad relativa de velocidad carbonatación de baja, periodos durante los cuales se considera que el proceso de carbonatación es ralentizado debido a las condiciones ambientales. La Tabla 4.26 muestra estos mismos tiempos pero convertidos a segundos, unidad de entrada necesaria para los cálculos de la profundidades de carbonatación en la ecuación propuesta.

Tabla 4.25. Resumen del cálculo del tiempo efectivo de carbonatación t_e (días).

<i>Sitio de exposición</i>	t_e (días)					
	167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días
<i>La Pastora</i>	120.569	150.892	210.816	241.860	328.497	508.990
<i>CONAGUA</i>	120.569	150.892	210.816	241.860	328.497	508.990
<i>Universidad</i>	120.569	150.892	210.816	241.860	328.497	508.990

Tabla 4.26. Resumen del cálculo del tiempo efectivo de carbonatación t_e (segundos).

<i>Sitio de exposición</i>	t_e (segundos)					
	167 días	209 días	292 días	335 días	455 días	705 días
<i>La Pastora</i>	10417178.525	13037067.735	18214467.840	20896735.364	28382133.107	43976711.737
<i>CONAGUA</i>	10417178.525	13037067.735	18214467.840	20896735.364	28382133.107	43976711.737
<i>Universidad</i>	10417178.525	13037067.735	18214467.840	20896735.364	28382133.107	43976711.737

Las Tablas 4.27 - 4.32 muestran las profundidades de carbonatación predichas por la ecuación propuesta en este trabajo para los distintos sitios de estudio, comparadas con los datos obtenidos del monitoreo en el avance del frente de carbonatación de las

probetas expuestas al medio ambiente y las profundidades calculadas a partir de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo ($x = K\sqrt{t}$). En las Tablas 4.27 y 4.28, se presentan las comparativas de la estación hidrometeorológica de La Pastora, donde se observa un error menor de las predicciones de la ecuación propuesta con respecto a las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, mismas que nos permiten presumir un buen comportamiento de la ecuación propuesta, debido a la separación del concepto de K en un mayor número de factores.

Tabla 4.27. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación propuesta, Estación de La Pastora.

Pastora																		
a/mc	167 días			209 días			292 días			335 días			455 días			705 días		
	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)
0.46,0%	5.63	5.63	0.00	6.13	6.15	0.02	6.78	7.01	0.23	6.75	7.39	0.64	8.22	8.33	0.11	9.38	9.90	0.52
0.46,25%	2.13	4.84	2.71	5.38	5.28	0.10	5.69	6.02	0.33	6.44	6.35	0.09	7.19	7.16	0.03	8.19	8.50	0.31
0.46,50%	5.81	6.26	0.45	6.13	6.84	0.71	7.06	7.80	0.74	7.19	8.23	1.04	8.63	9.27	0.64	9.88	11.02	1.14
0.59,0%	3.56	3.83	0.27	4.69	4.17	0.52	4.72	4.73	0.01	5.28	4.99	0.29	5.84	5.60	0.24	7.44	6.62	0.82
0.59,25%	6.81	7.52	0.71	8.31	8.19	0.12	8.25	9.31	1.06	8.72	9.81	1.09	11.56	11.02	0.54	13.5	13.02	0.48
0.59,50%	8.38	8.34	0.04	8.88	9.09	0.21	8.88	10.32	1.44	8.94	10.88	1.94	12.81	12.22	0.59	16.13	14.44	1.69
0.70,0%	6.81	6.23	0.58	7.63	6.79	0.84	8	7.71	0.29	8.58	8.13	0.45	9.16	9.13	0.03	11	10.79	0.21
0.70,25%	8.56	9.43	0.87	9.44	10.27	0.83	10.13	11.67	1.54	12.08	12.30	0.22	14.03	13.81	0.22	15.31	16.33	1.02
0.70,50%	13.31	12.16	1.15	13.75	13.25	0.50	13.75	15.05	1.30	15.13	15.86	0.73	16.53	17.81	1.28	18.88	21.06	2.18

Tabla 4.28. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, Estación de La Pastora.

Pastora																	
a/mc	167 días			209 días			292 días			335 días*		455 días			705 días		
	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	k	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)
0.46,0%	5.63	4.77	0.86	6.13	5.33	0.80	6.78	6.30	0.48	6.75	0.37	8.22	7.87	0.35	9.38	9.79	0.41
0.46,25%	2.13	4.55	2.42	5.38	5.09	0.29	5.69	6.01	0.32	6.44	0.35	7.19	7.51	0.32	8.19	9.34	1.15
0.46,50%	5.81	5.08	0.73	6.13	5.68	0.45	7.06	6.71	0.35	7.19	0.39	8.63	8.38	0.25	9.88	10.43	0.55
0.59,0%	3.56	3.73	0.17	4.69	4.17	0.52	4.72	4.93	0.21	5.28	0.29	5.84	6.15	0.31	7.44	7.66	0.22
0.59,25%	6.81	6.16	0.65	8.31	6.89	1.42	8.25	8.14	0.11	8.72	0.48	11.56	10.16	1.40	13.5	12.65	0.85
0.59,50%	8.38	6.31	2.07	8.88	7.06	1.82	8.88	8.35	0.53	8.94	0.49	12.81	10.42	2.39	16.13	12.97	3.16
0.70,0%	6.81	6.06	0.75	7.63	6.78	0.85	8	8.01	0.01	8.58	0.47	9.16	10.00	0.84	11	12.45	1.45
0.70,25%	8.56	8.53	0.03	9.44	9.54	0.10	10.13	11.28	1.15	12.08	0.66	14.03	14.08	0.05	15.31	17.52	2.21
0.70,50%	13.31	10.68	2.63	13.75	11.95	1.80	13.75	14.13	0.38	15.13	0.83	16.53	17.63	1.10	18.88	21.95	3.07

* En el caso de las predicciones realizadas mediante la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, el valor de “K” fue ponderado a partir del despeje de la misma ecuación tomando como variable de entrada la profundidad de carbonatación obtenida en campo a los 335 días de exposición.

Las Tablas 4.29 y 4.30, presentan las comparativas de la estación hidrometeorológica de Conagua, donde el error también es mayor en las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los resultados de la ecuación propuesta. Es necesario mencionar que en la ecuación propuesta existen nueve predicciones extras que representan el 16.7% del total de mediciones, lo anterior, debido a que en la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo se utilizan las mediciones del día 335 para ponderar el valor de K; Por su parte, los datos hidrometeorológicos considerados en la ecuación propuesta para dicha estación, fueron extrapolados a partir

de las mediciones de la estación de La Pastora, lo cual genera un error acumulado por efecto de que las condiciones hidrometeorológicas son algo superiores en la estación de Conagua.

Tabla 4.29. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación propuesta, Estación de Conagua.

Conagua																		
a/mc	167 días			209 días			292 días			335 días			455 días			705 días		
	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)
0.46,0%	6	5.95	0.05	6.14	6.50	0.36	6.28	7.41	1.13	7.06	7.82	0.76	8.69	8.82	0.13	10.69	10.48	0.21
0.46,25%	3.94	5.11	1.17	6.06	5.58	0.48	6.25	6.36	0.11	6.44	6.71	0.27	6.53	7.57	1.04	7.25	9.00	1.75
0.46,50%	6.56	6.62	0.06	7.56	7.23	0.33	8.09	8.24	0.15	9.13	8.70	0.43	9.66	9.81	0.15	12.88	11.66	1.22
0.59,0%	3.69	4.04	0.35	4.06	4.41	0.35	4.09	5.01	0.92	5.16	5.27	0.11	6.41	5.93	0.48	6.44	7.01	0.57
0.59,25%	5.81	7.95	2.14	6.5	8.66	2.16	7.41	9.84	2.43	9.41	10.37	0.96	10.59	11.66	1.07	13.63	13.79	0.16
0.59,50%	10.13	8.82	1.31	10.63	9.60	1.03	10.93	10.91	0.02	11.54	11.50	0.04	11.84	12.93	1.09	13.65	15.29	1.64
0.70,0%	4.56	6.59	2.03	6.56	7.18	0.62	6.89	8.15	1.26	7.22	8.59	1.37	7.66	9.66	2.00	11.88	11.43	0.45
0.70,25%	9.25	9.97	0.72	10.88	10.86	0.02	11.25	12.34	1.09	11.19	13.00	1.81	13.91	14.62	0.71	17.75	17.29	0.46
0.70,50%	12.75	12.85	0.10	15.31	14.00	1.31	15.98	15.91	0.07	16.66	16.76	0.10	19.75	18.85	0.90	23	22.29	0.71

Tabla 4.30. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, Estación de Conagua.

Conagua																	
a/mc	167 días			209 días			292 días			335 días		455 días			705 días		
	Med (mm)	Cal k^2/\bar{t}	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal k^2/\bar{t}	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal k^2/\bar{t}	diferencia (mm)	Med (mm)	k	Med (mm)	Cal k^2/\bar{t}	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal k^2/\bar{t}	diferencia (mm)
0.46,0%	6	4.98	1.02	6.14	5.58	0.56	6.28	6.59	0.31	7.06	0.39	8.69	8.23	0.46	10.69	10.24	0.45
0.46,25%	3.94	4.55	0.61	6.06	5.09	0.97	6.25	6.01	0.24	6.44	0.35	6.53	7.51	0.98	7.25	9.34	2.09
0.46,50%	6.56	6.45	0.11	7.56	7.21	0.35	8.09	8.52	0.43	9.13	0.50	9.66	10.64	0.98	12.88	13.24	0.36
0.59,0%	3.69	3.64	0.05	4.06	4.08	0.02	4.09	4.82	0.73	5.16	0.28	6.41	6.01	0.40	6.44	7.49	1.05
0.59,25%	5.81	6.64	0.83	6.5	7.43	0.93	7.41	8.79	1.38	9.41	0.51	10.59	10.97	0.38	13.63	13.65	0.02
0.59,50%	10.13	8.15	1.98	10.63	9.11	1.52	10.93	10.77	0.16	11.54	0.63	11.84	13.45	1.61	13.65	16.74	3.09
0.70,0%	4.56	5.10	0.54	6.56	5.70	0.86	6.89	6.74	0.15	7.22	0.39	7.66	8.41	0.75	11.88	10.47	1.41
0.70,25%	9.25	7.90	1.35	10.88	8.84	2.04	11.25	10.45	0.80	11.19	0.61	13.91	13.04	0.87	17.75	16.23	1.52
0.70,50%	12.75	11.76	0.99	15.31	13.16	2.15	15.98	15.55	0.43	16.66	0.91	19.75	19.42	0.33	23	24.17	1.17

* En el caso de las predicciones realizadas mediante la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, el valor de “K” fue ponderado a partir del despeje de la misma ecuación tomando como variable de entrada la profundidad de carbonatación obtenida en campo a los 335 días de exposición.

Las Tablas 4.31 y 4.32, presentan las comparativas de la estación hidrometeorológica Universidad, donde, nuevamente, el error acumulado es ligeramente superior en las predicciones de la ecuación propuesta respecto a las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo; no obstante, se repiten las consideraciones de la estación de Conagua, donde, la ecuación propuesta presenta nueve predicciones extras que representan el 16.7% del total de mediciones; y donde, los datos hidrometeorológicos fueron extrapolados a partir de las mediciones de la estación de La Pastora, lo cual genera un error acumulado por efecto de que las condiciones hidrometeorológicas son superiores en la estación Universidad.

Tabla 4.31. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación propuesta, Estación Universidad.

Universidad																		
a/mc	167 días			209 días			292 días			335 días			455 días			705 días		
	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)	Med. (mm)	Cal. (mm)	diferencia (mm)
0.46,0%	6.25	5.51	0.74	6.88	6.02	0.86	7.69	6.86	0.83	8.44	7.24	1.20	10.38	8.15	2.23	10.75	9.72	1.03
0.46,25%	5.5	4.73	0.77	5.88	5.17	0.71	5.94	5.89	0.05	7.03	6.22	0.81	8.13	7.00	1.13	10	8.35	1.65
0.46,50%	6.69	6.13	0.56	7.44	6.69	0.75	7.75	7.63	0.12	8.06	8.06	0.00	10.41	9.07	1.34	13.72	10.81	2.91
0.59,0%	3.69	3.75	0.06	4.63	4.08	0.55	4.56	4.64	0.08	4.75	4.89	0.14	7.56	5.48	2.08	8.69	6.50	2.19
0.59,25%	7.75	7.36	0.39	8.94	8.02	0.92	9.16	9.11	0.05	9.91	9.60	0.31	11.5	10.77	0.73	13	12.78	0.22
0.59,50%	8	8.17	0.17	8.44	8.89	0.45	8.88	10.11	1.23	9.25	10.65	1.40	14.5	11.95	2.55	18.38	14.18	4.20
0.70,0%	5.25	6.10	0.85	5.94	6.65	0.71	6.63	7.55	0.92	6.56	7.96	1.40	11.38	8.93	2.45	11.63	10.59	1.04
0.70,25%	9.5	9.23	0.27	11.38	10.06	1.32	11.44	11.43	0.01	12.13	12.04	0.09	13.94	13.51	0.43	18	16.03	1.97
0.70,50%	10.94	11.90	0.96	11.63	12.97	1.34	12.31	14.74	2.43	12.47	15.53	3.06	17.81	17.42	0.39	--	--	--

Tabla 4.32. Resultados del avance en el frente de carbonatación para las probetas expuestas a carbonatación natural comparados con las predicciones de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, Estación Universidad.

Universidad																	
a/mc	167 días			209 días			292 días			335 días		455 días			705 días		
	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	k	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)	Med (mm)	Cal $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm)
0.46,0%	6.25	5.96	0.29	6.88	6.67	0.21	7.69	7.88	0.19	8.44	0.46	10.38	9.84	0.54	10.75	12.24	1.49
0.46,25%	5.5	4.96	0.54	5.88	5.55	0.33	5.94	6.56	0.62	7.03	0.38	8.13	8.19	0.06	10	10.20	0.20
0.46,50%	6.69	5.69	1.00	7.44	6.37	1.07	7.75	7.52	0.23	8.06	0.44	10.41	9.39	1.02	13.72	11.69	2.03
0.59,0%	3.69	3.35	0.34	4.63	3.75	0.88	4.56	4.43	0.13	4.75	0.26	7.56	5.54	2.02	8.69	6.89	1.80
0.59,25%	7.75	7.00	0.75	8.94	7.83	1.11	9.16	9.25	0.09	9.91	0.54	11.5	11.55	0.05	13	14.38	1.38
0.59,50%	8	6.53	1.47	8.44	7.31	1.13	8.88	8.64	0.24	9.25	0.51	14.5	10.78	3.72	18.38	13.42	4.96
0.70,0%	5.25	4.63	0.62	5.94	5.18	0.76	6.63	6.12	0.51	6.56	0.36	11.38	7.65	3.73	11.63	9.52	2.11
0.70,25%	9.5	8.56	0.94	11.38	9.58	1.80	11.44	11.32	0.12	12.13	0.66	13.94	14.14	0.20	18	17.60	0.40
0.70,50%	10.94	8.80	2.14	11.63	9.85	1.78	12.31	11.64	0.67	12.47	0.68	17.81	14.53	3.28	-	-	-

* En el caso de las predicciones realizadas mediante la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, el valor de “K” fue ponderado a partir del despeje de la misma ecuación tomando como variable de entrada la profundidad de carbonatación obtenida en campo a los 335 días de exposición.

Finalmente, y con la intención de ilustrar la buena predicción de los valores calculados con la ecuación propuesta en este trabajo de tesis, en las Tablas 4.33 – 4.35 se presenta la comparativa de las diferencias obtenidas a través de la ecuación propuesta y la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los datos medidos. Es importante observar que en los tres sitios de estudio se obtuvieron más casos en que la diferencia de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo fue mayor con respecto a los datos medidos. Es así, en la estación de La pastora se tuvieron 24 ocasiones en que la diferencia de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo fue mayor

contra 18 de la ecuación propuesta. En el caso de la estación de la Conagua esta diferencia fue de 27 de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo contra 16 de la ecuación propuesta. Mientras, en la estación Universidad, por su parte, la diferencia fue de 26 a 18.

Tabla 4.33. Comparativa de las diferencias obtenidas a través de la ecuación propuesta y la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los datos medidos, Estación de La Pastora.

Estación de La Pastora										
a/mc	167 días		209 días		292 días		455 días		705 días	
	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$
0.46,0%	0	0.86	0.02	0.8	0.23	0.48	0.11	0.35	0.52	0.41
0.46,25%	2.71	2.42	0.1	0.29	0.33	0.32	0.03	0.32	0.31	1.15
0.46,50%	0.45	0.73	0.71	0.45	0.74	0.35	0.64	0.25	1.14	0.55
0.59,0%	0.27	0.17	0.52	0.52	0.01	0.21	0.24	0.31	0.82	0.22
0.59,25%	0.71	0.65	0.12	1.42	1.06	0.11	0.54	1.4	0.48	0.85
0.59,50%	0.04	2.07	0.21	1.82	1.44	0.53	0.59	2.39	1.69	3.16
0.70,0%	0.58	0.75	0.84	0.85	0.29	0.01	0.03	0.84	0.21	1.45
0.70,25%	0.87	0.03	0.83	0.1	1.54	1.15	0.22	0.05	1.02	2.21
0.70,50%	1.15	2.63	0.5	1.8	1.3	0.38	1.28	1.1	2.18	3.07

Nota: debido a la incertidumbre generada en la medición de la profundidad de carbonatación en las probetas expuestas a ambiente natural, se estableció ponderar una diferencia de ± 0.02 como igualdad en los resultados predichos por ambas ecuaciones.

Tabla 4.34. Comparativa de las diferencias obtenidas a través de la ecuación propuesta y la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los datos medidos, Estación de La Conagua.

Estación de la Conagua										
a/mc	167 días		209 días		292 días		455 días		705 días	
	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$
0.46,0%	0.05	1.02	0.36	0.56	1.13	0.31	0.13	0.46	0.21	0.45
0.46,25%	1.17	0.61	0.48	0.97	0.11	0.24	1.04	0.98	1.75	2.09
0.46,50%	0.06	0.11	0.33	0.35	0.15	0.43	0.15	0.98	1.22	0.36
0.59,0%	0.35	0.05	0.35	0.02	0.92	0.73	0.48	0.4	0.57	1.05
0.59,25%	2.14	0.83	2.16	0.93	2.43	1.38	1.07	0.38	0.16	0.02
0.59,50%	1.31	1.98	1.03	1.52	0.02	0.16	1.09	1.61	1.64	3.09
0.70,0%	2.03	0.54	0.62	0.86	1.26	0.15	2	0.75	0.45	1.41
0.70,25%	0.72	1.35	0.02	2.04	1.09	0.8	0.71	0.87	0.46	1.52
0.70,50%	0.1	0.99	1.31	2.15	0.07	0.43	0.9	0.33	0.71	1.17

Nota: debido a la incertidumbre generada en la medición de la profundidad de carbonatación en las probetas expuestas a ambiente natural, se estableció ponderar una diferencia de ± 0.02 como igualdad en los resultados predichos por ambas ecuaciones.

Tabla 4.35. Comparativa de las diferencias obtenidas a través de la ecuación propuesta y la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo con respecto a los datos medidos, Estación Universidad.

Estación Universidad										
a/mc	167 días		209 días		292 días		455 días		705 días	
	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$	diferencia (mm) ecuación propuesta	diferencia (mm) $k^2\sqrt{t}$
0.46,0%	0.74	0.29	0.86	0.21	0.83	0.19	2.23	0.54	1.03	1.49
0.46,25%	0.77	0.54	0.71	0.33	0.05	0.62	1.13	0.06	1.65	0.2
0.46,50%	0.56	1	0.75	1.07	0.12	0.23	1.34	1.02	2.91	2.03
0.59,0%	0.06	0.34	0.55	0.88	0.08	0.13	2.08	2.02	2.19	1.8
0.59,25%	0.39	0.75	0.92	1.11	0.05	0.09	0.73	0.05	0.22	1.38
0.59,50%	0.17	1.47	0.45	1.13	1.23	0.24	2.55	3.72	4.2	4.96
0.70,0%	0.85	0.62	0.71	0.76	0.92	0.51	2.45	3.73	1.04	2.11
0.70,25%	0.27	0.94	1.32	1.8	0.01	0.12	0.43	0.2	1.97	0.4
0.70,50%	0.96	2.14	1.34	1.78	2.43	0.67	0.39	3.28	-	-

Nota: debido a la incertidumbre generada en la medición de la profundidad de carbonatación en las probetas expuestas a ambiente natural, se estableció ponderar una diferencia de ± 0.02 como igualdad en los resultados predichos por ambas ecuaciones.

En el anexo 5 de este trabajo se pueden observar, de manera particular, las gráficas de las comparativas de las profundidades de carbonatación predichas por la ecuación desarrollada en este trabajo con los datos obtenidos del monitoreo en el avance del frente de carbonatación de las probetas expuestas a carbonatación natural y las profundidades calculadas a partir de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo ($x = k^2\sqrt{t}$), para los distintos sitios de estudio. En ellas se observa, de manera cualitativa, una mayor estabilidad de los gráficos de la ecuación propuesta con respecto a los datos medidos.

Los gráficos de la ecuación de la raíz cuadrada de tiempo, muestran una buena predicción, el día 292 de la exposición, lo anterior, es debido a que, como ya se mencionó en líneas superiores de este trabajo, el valor de “K” fue obtenido a partir de las mediciones de profundidad de carbonatación del día 335, lo cual provoca, que el coeficiente de variación usado sea muy cercano al real en el día 292, no obstante, los gráficos aparentan un crecimiento acumulativo que anuncia, que a mayor tiempo de exposición se incrementará el error con respecto a los datos medidos, lo anterior es atribuible, a la existencia de un único valor de K que no varía a través del tiempo (como ocurre en la realidad), y nos permite prever que las predicciones a tiempos mayores de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo generarán mayor error; Por su parte, la ecuación propuesta, al incluir variables climáticas y del material dependientes del tiempo, minimiza este error.

En la misma línea, es posible observar, que la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo predijo con mayor error la profundidad de carbonatación en las relaciones agua / cementante altas, lo anterior, es debido a que el concepto de K funciona de manera adecuada en porosidades bajas (donde por lapsos de tiempo existe estabilidad en el coeficiente de difusión), lo cual, no ocurre en altas porosidades (donde ocurre mayor variación del coeficiente de difusión a través del tiempo).

Por su parte, al utilizar los valores climáticos de la estación de La Pastora, en los otros dos sitios de exposición (Universidad y CONAGUA) para la ecuación propuesta, se está incluyendo un error a las predicciones de la misma, que no obstante, no afecta de manera observable en la exactitud de los resultados, lo cual, es prueba de la buena estabilidad de la ecuación propuesta y su robustez al momento de ser alimentada por datos que no son del todo precisos. Sin embargo, los resultados aún no son concluyentes y requieren de una mayor cantidad de validaciones para establecer conclusiones categóricas.

Capítulo V

CONCLUSIONES

Sobre la comparativa de matrices en condiciones de laboratorio:

- La mezcla sin adición mineral (0% de CV) mostró menores velocidades de corrosión frente a carbonatación acelerada, no obstante, la sustitución de un 25% de CV no se alejó mucho de este comportamiento, llegando incluso a igualarlo en la relación $a/mc = 0.70$.
- En general, a mayor contenido de ceniza volante, mayor es la protección del concreto ante el ataque del ión cloruro en una solución de agua con cloruro de sodio 0.5 M. El mismo efecto benéfico se observó cuando expusimos las probetas ante el ataque de ión cloruro en el agua de mezcla.
- La adición de ceniza volante mejoró, aunque en un mismo orden de magnitud, la resistencia ante la migración de cloruros.
- El uso de la ceniza volante como sustitución de cemento portland en altos contenidos y después de un considerable tiempo de curado, resultó benéfico en la durabilidad ante ingreso de ión cloruro.
- Ante el ataque por carbonatación, es recomendable realizar estudios previos para establecer el contenido óptimo de sustitución con ceniza volante que no genere detrimento en la durabilidad frente al ingreso de CO_2 .

Sobre la ecuación propuesta:

- La ecuación propuesta se presenta como una solución viable, que facilita con respecto a otras propuestas el tomar en cuentas las variaciones climáticas y del material en función del tiempo, para establecer con una buena aproximación el avance en el frente de carbonatación de estructuras de concreto reforzado. No obstante, aunque los resultados obtenidos muestran una buena predicción y

estabilidad de la ecuación propuesta, aún faltan por realizar un mayor número de verificaciones con diferentes contenidos de sustitución de adiciones minerales, a mayores tiempos de exposición, distintos ambientes climáticos y diversos historiales hidro-meteorológicos;

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Como todo proyecto, dicho trabajo tiene áreas de oportunidad y elementos a mejorar; A continuación se enumeran los que hasta la fecha han sido identificados:

- Es necesario, realizar mayor cantidad de validaciones de la ecuación propuesta para una mayor cantidad de sitios y tiempos de exposición. A fin de analizar cada una de las variables y establecer refinamientos para cada uno de los parámetros que intervienen.
- Es interesante, establecer el probable tiempo de duración de la estructura en función de los datos medidos, debido a la necesidad de determinar el tiempo remanente de servicio que pueda tener una estructura en análisis.
- Es necesario, establecer una relación que considere el efecto sinérgico del avance de cloruros con el avance del frente de carbonatación; Lo anterior con la finalidad de incluir este efecto en la ecuación propuesta.
- El factor que más influyen en el comportamiento de la ecuación, es el coeficiente de migración D_{0,CO_2} , mismo que presenta un área de oportunidad importante para ser estimado en mayor rango de relaciones a/mc y sustituciones de CV.
- En cuanto al tiempo efectivo de carbonatación (t_e), es interesantes establecer el volumen de precipitación que provoca la saturación del poro, su relación con la humedad relativa generada, así como los procesos de secado del poro en función de las condiciones hidrometeorológicas ambientales y la manera como estas variables afectan la velocidad de carbonatación de la estructura.

Anexo 1

Comparativas del avance en el frente de carbonatación por sitio de exposición, para una misma relación a/mc; variando el contenido de CV.

Las Figuras A1.1 – A1.9 muestran de forma gráfica los resultados de las probetas en estudio por sitio de exposición comparando las mezclas con una misma relación a/mc, pero variando el contenido de CV.

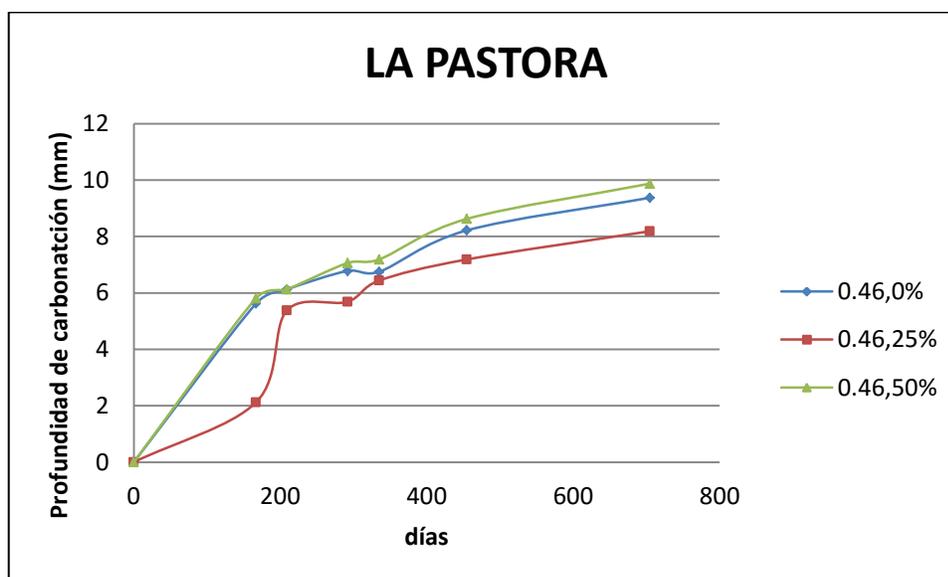


Figura A1.1. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.46; Variando el contenido de CV. Est. de La Pastora.

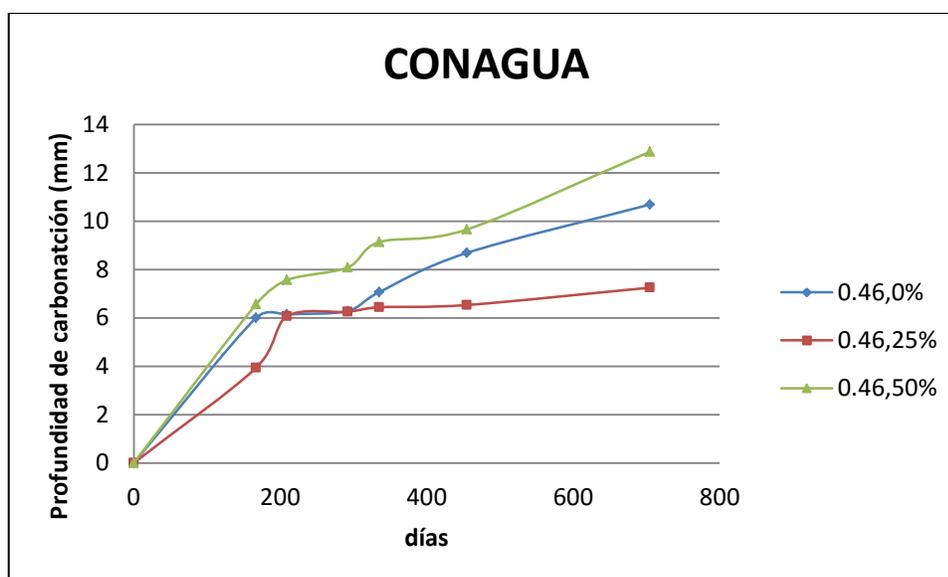


Figura A1.2. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.46; Variando el contenido de CV. Est. de CONAGUA.

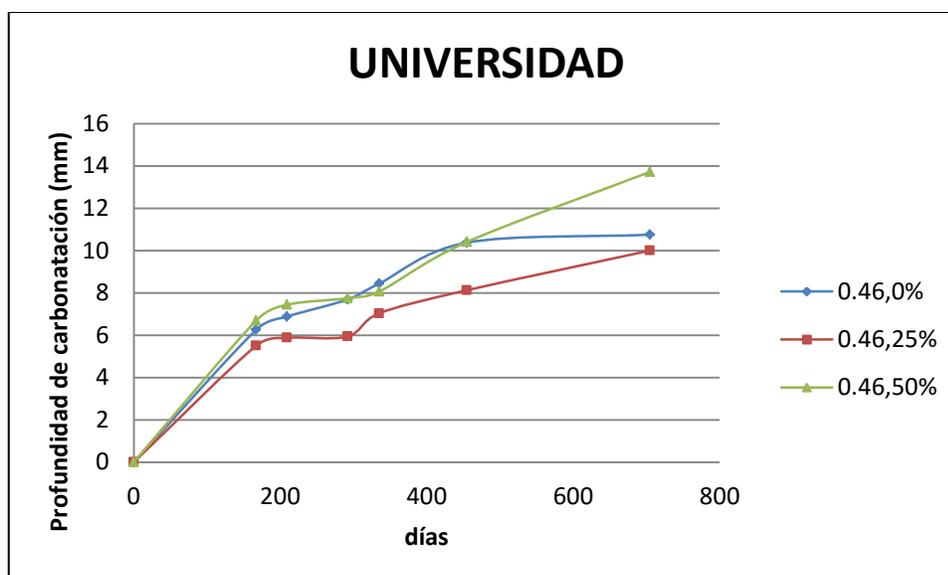


Figura A1.3. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.46; Variando el contenido de CV. Estación Universidad.

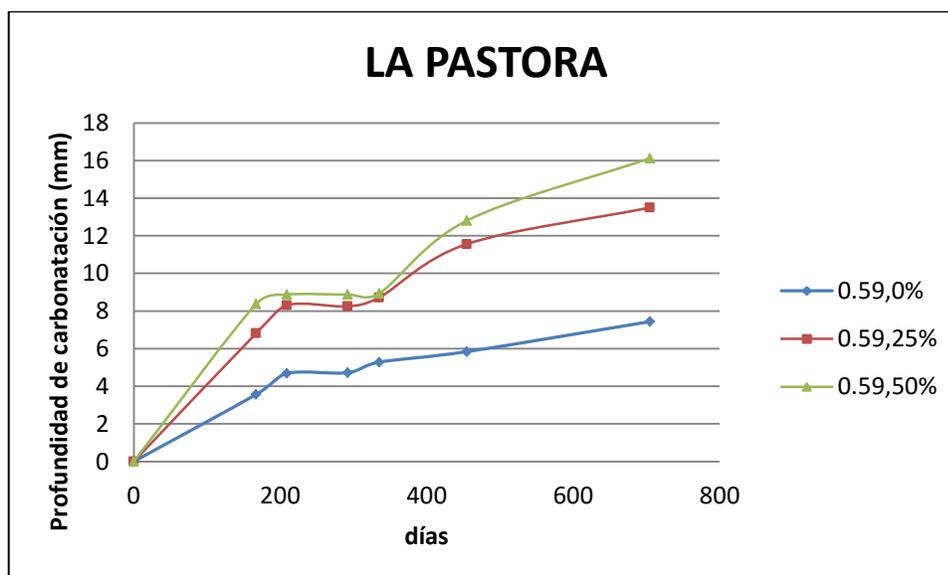


Figura A1.4. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.59; Variando el contenido de CV. Estación de La Pastora.

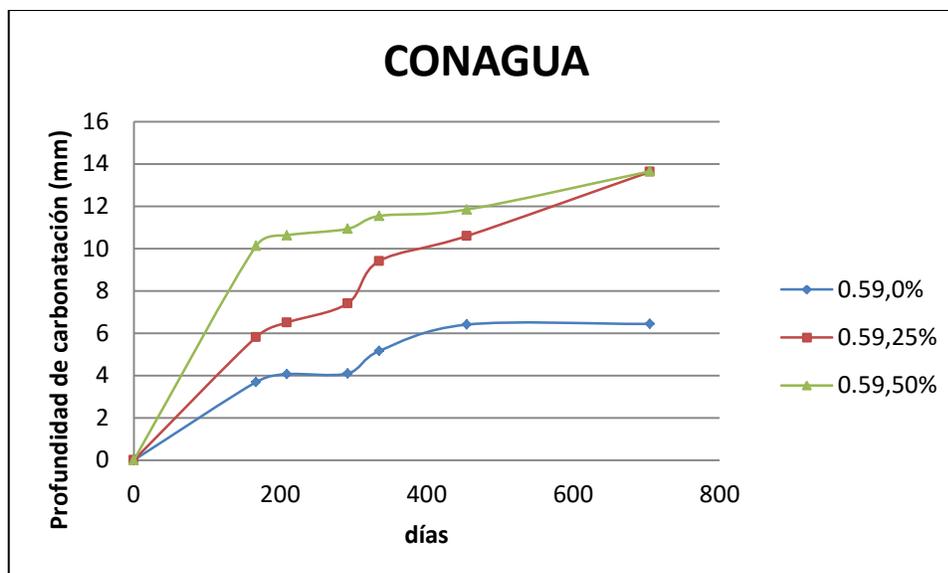


Figura A1.5. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.59$; Variando el contenido de CV. Estación de CONAGUA.

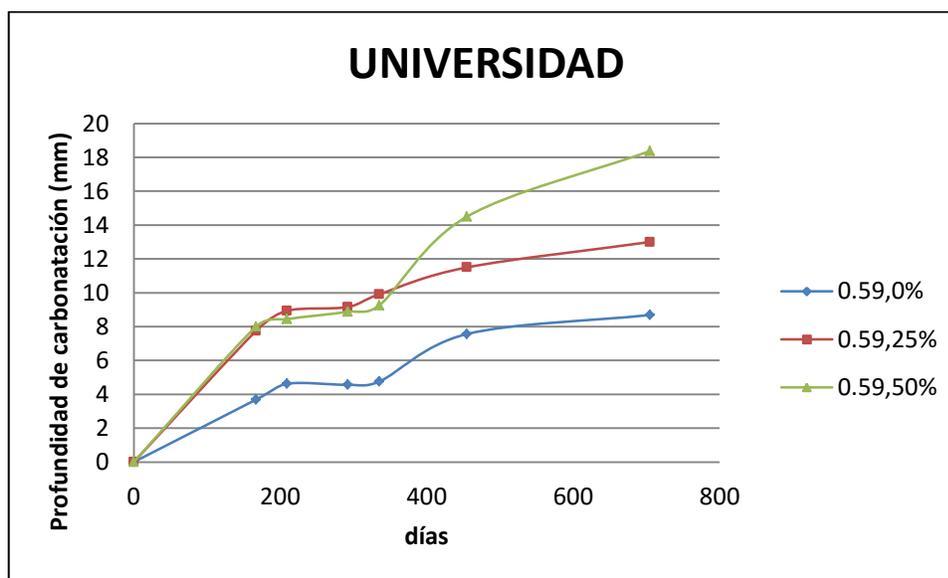


Figura A1.6. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.59$; Variando el contenido de CV. Estación Universidad.

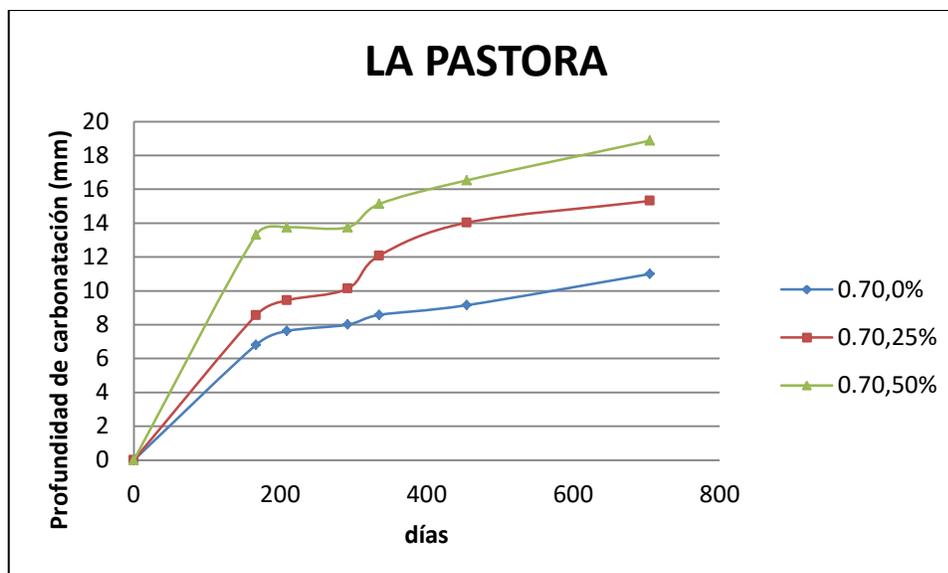


Figura A1.7. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$; Variando el contenido de CV. Estación de La Pastora.

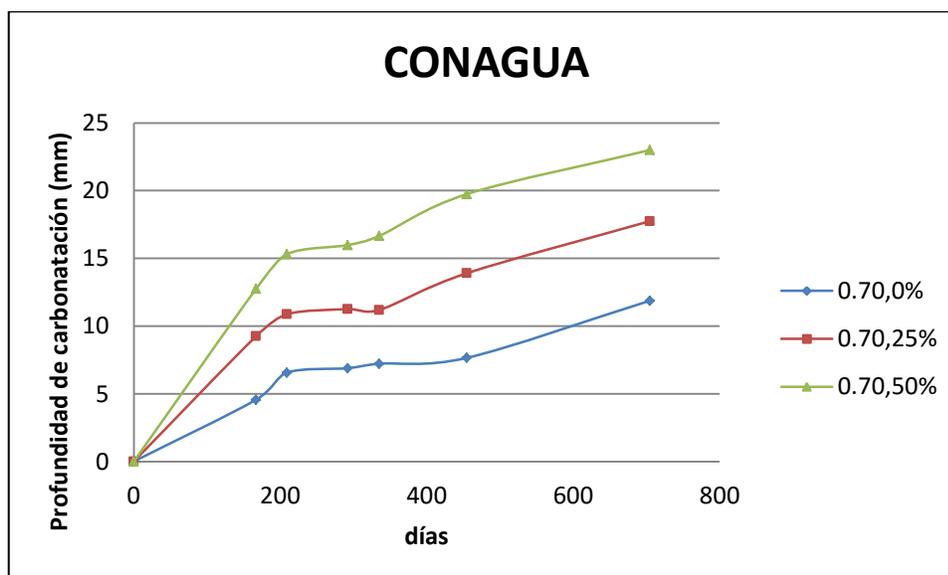


Figura A1.8. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$; Variando el contenido de CV. Estación de CONAGUA.

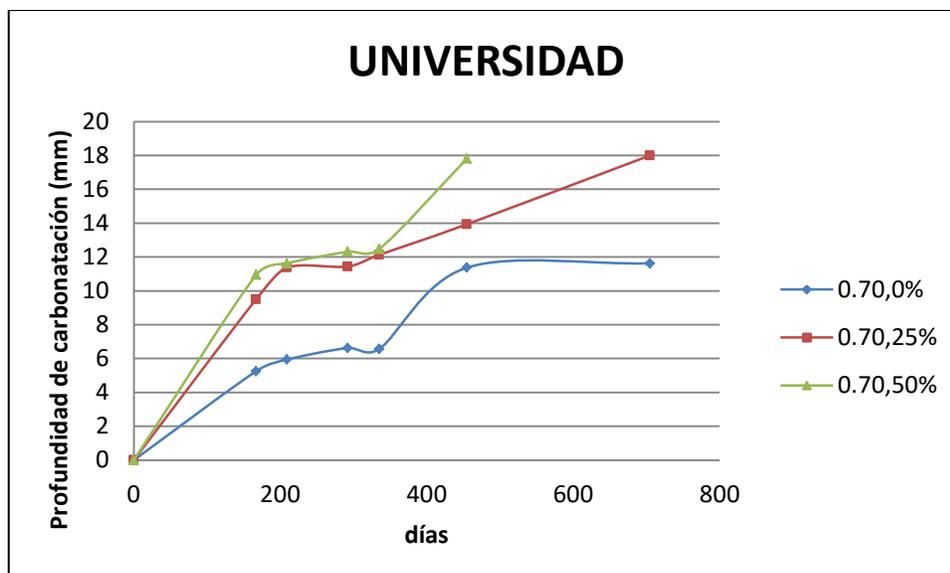


Figura A1.9. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación a/mc =0.70; Variando el contenido de CV. Estación Universidad.

Anexo 2

Comparativas del avance en el frente de carbonatación por sitio de exposición, para un mismo contenido de CV; variando la relación a/mc.

En las Figuras A2.1 – A2.9 se realiza la comparativa de los resultados de las probetas en estudio por sitio de exposición comparando las mezclas con un mismo porcentaje de CV, variando la relación a/mc.

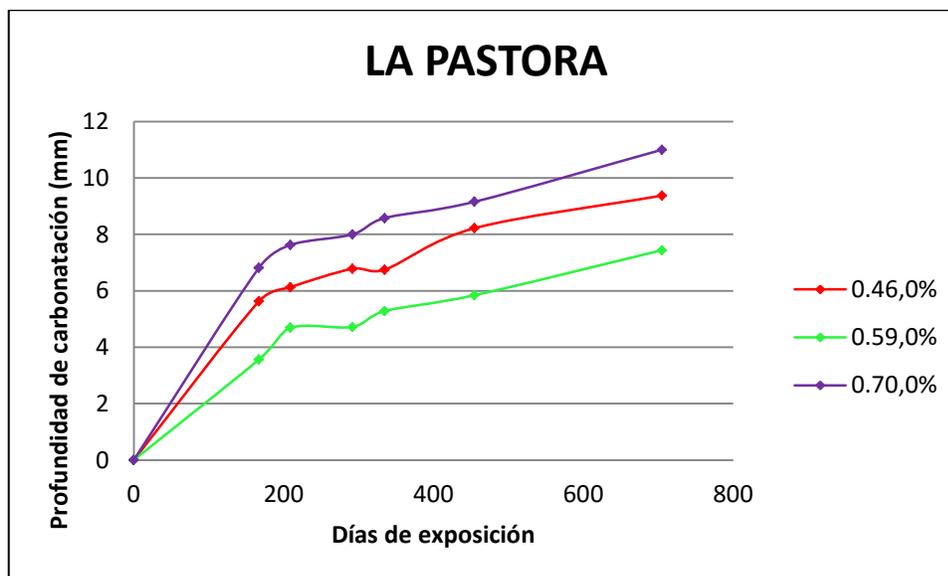


Figura A2.1. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 0%; Variando la relación a/mc. Estación de La Pastora.

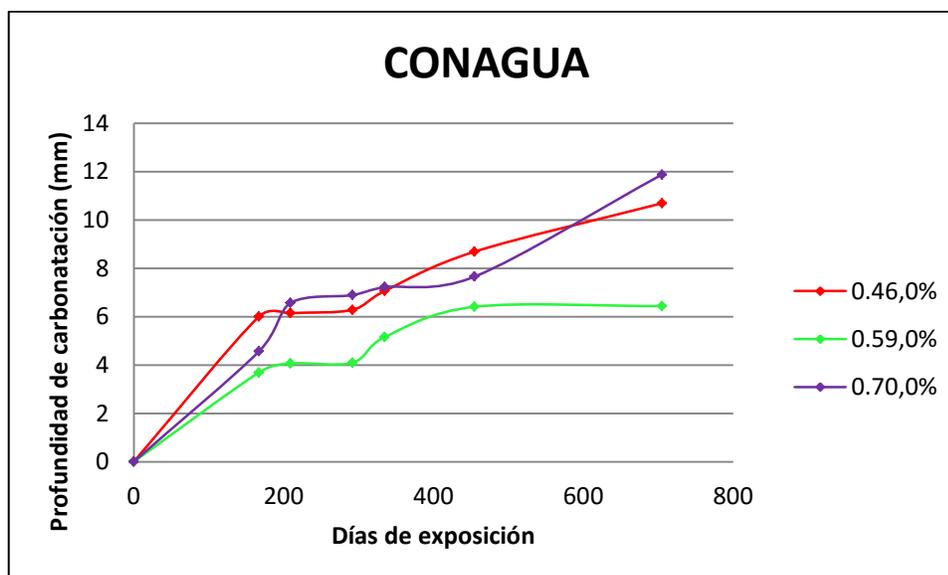


Figura A2.2. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 0%; Variando la relación a/mc. Est. de CONAGUA.

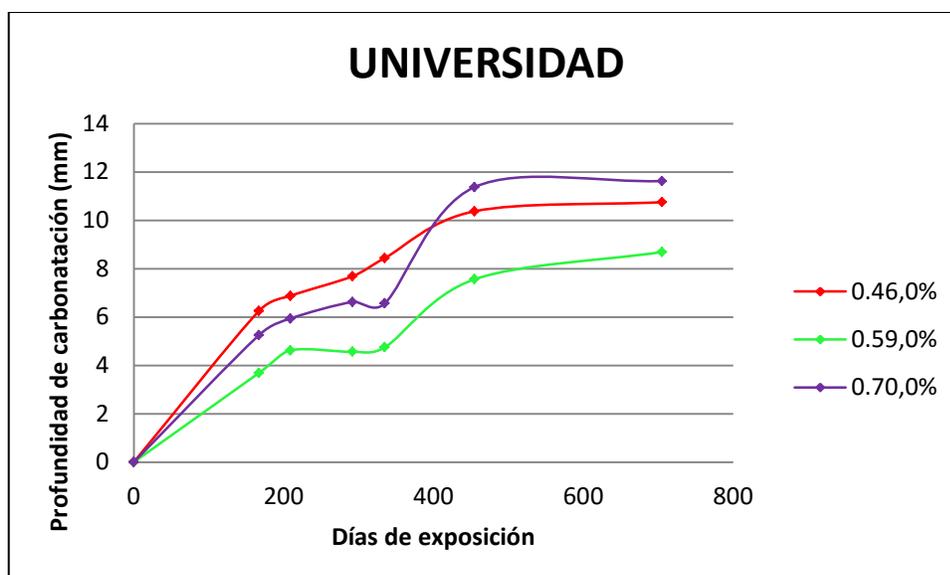


Figura A2.3. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 0%; Variando la relación a/mc. Estación Universidad.

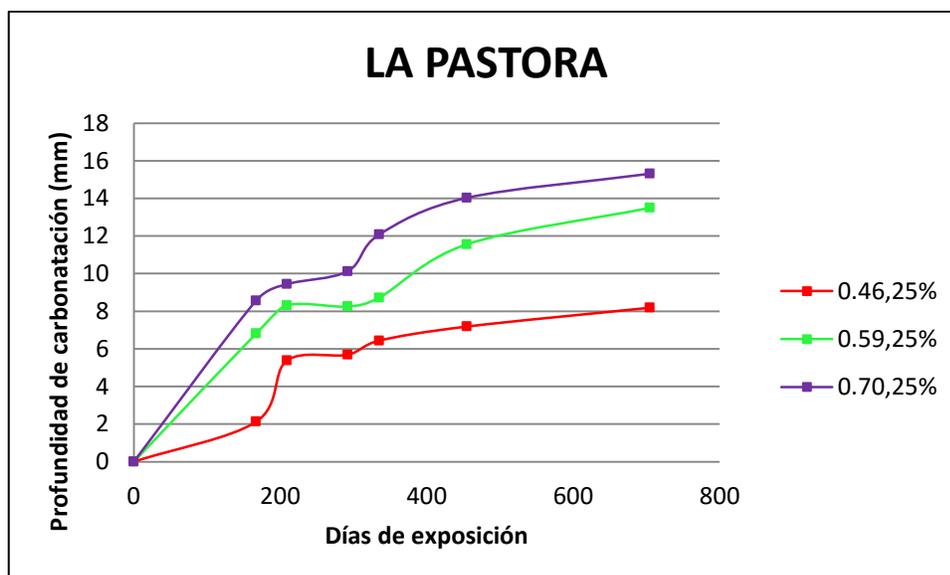


Figura A2.4. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 25%; Variando la relación a/mc. Estación de La Pastora.

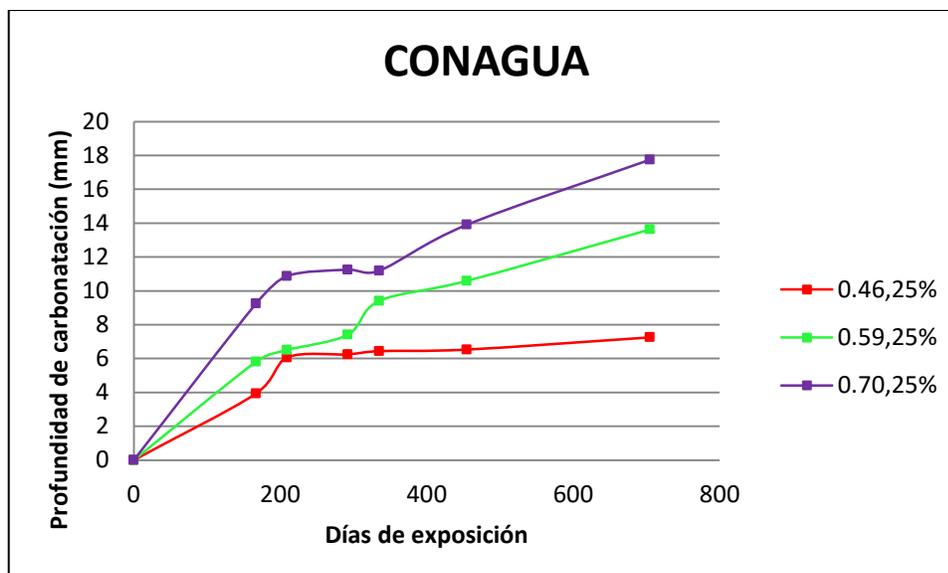


Figura A2.5. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 25%; Variando la relación a/mc. Estación de CONAGUA.

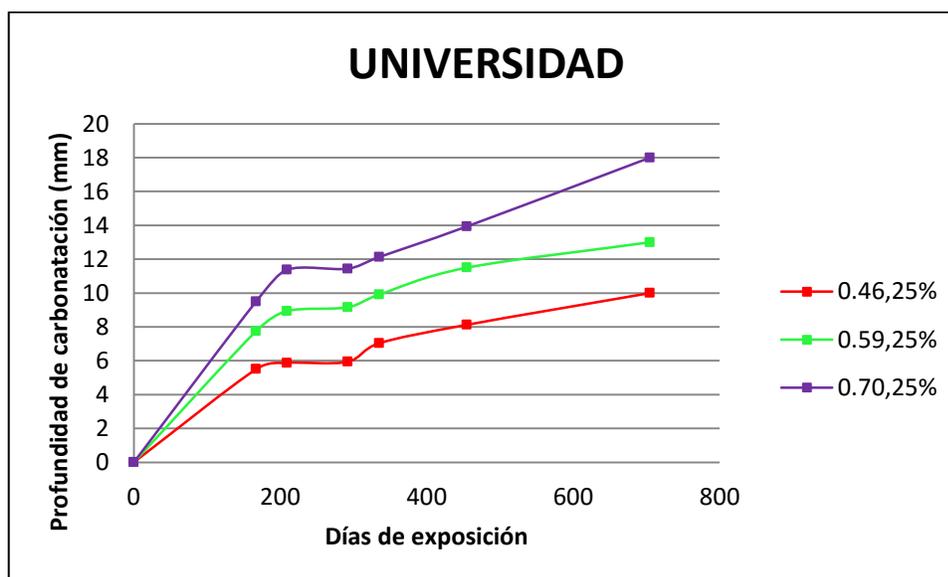


Figura A2.6. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 25%; Variando la relación a/mc. Estación Universidad.

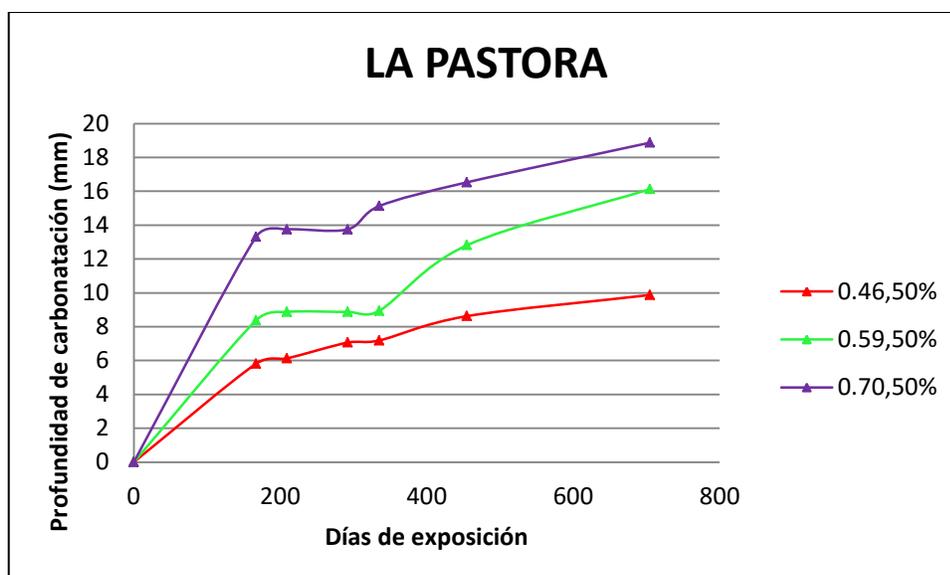


Figura A2.7. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 50%; Variando la relación a/mc. Estación de La Pastora.

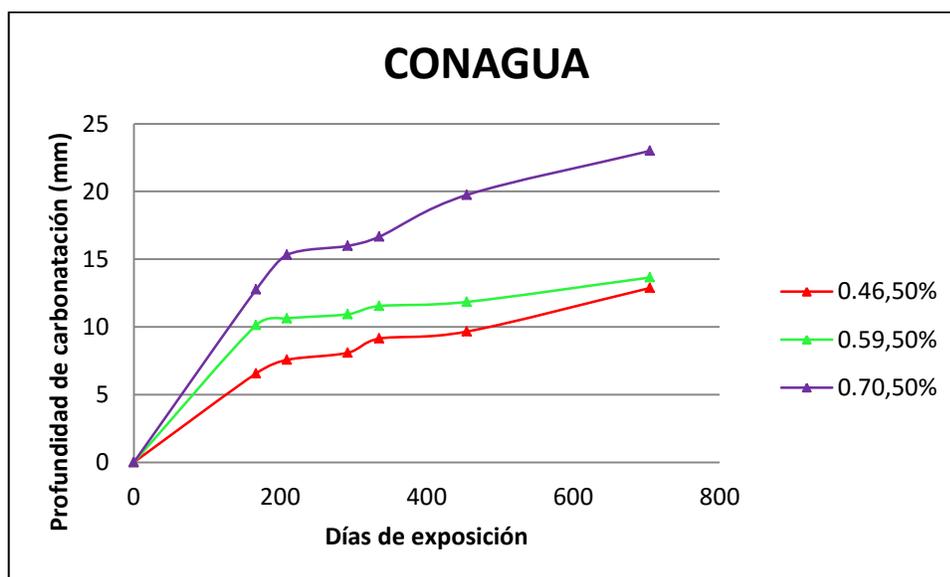


Figura A2.8. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 50%; Variando la relación a/mc. Estación de CONAGUA.

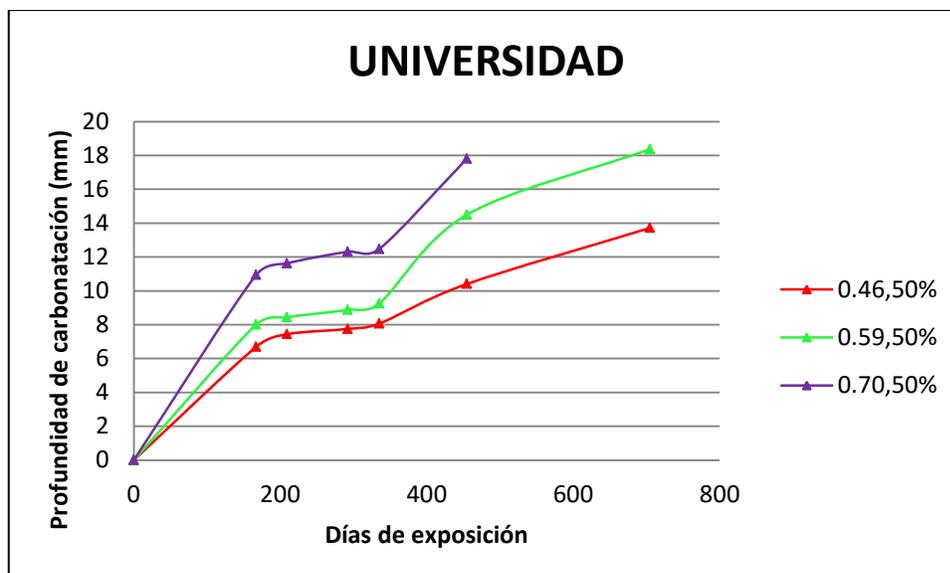


Figura A2.9. Comparativa de las diversas mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para un contenido de CV 50%; Variando la relación a/mc. Estación Universidad.

Anexo 3

Comparativas del avance en el frente de carbonatación en los sitios de estudio.

A pesar de que no se realizó una caracterización de la agresividad ambiental en los sitios de estudio, sí se realizó una selección de los mismos en función de los agentes externos (tráfico vehicular, fábricas cercanas o densidad de población) de manera empírica. En las Figuras A3.1 – A3.9, se muestra la comparativa del avance en el frente de carbonatación para los distintos sitios de estudio; De donde, se observa de manera cualitativa una mayor tasa de carbonatación en la estación Universidad; Por su parte, la estación de CONAGUA muestra una ligera superioridad con respecto a la estación de La Pastora.

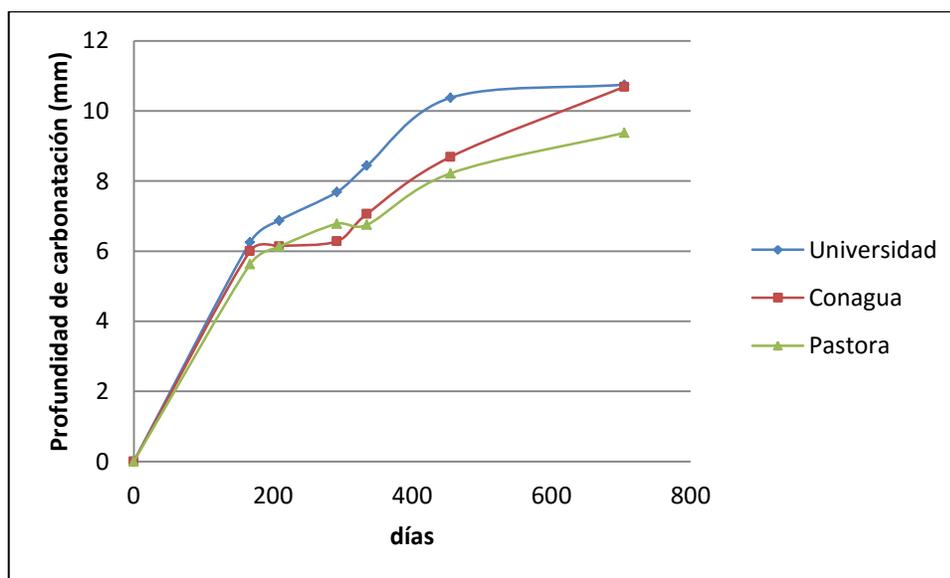


Figura A3.1. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.46$ y un contenido de CV del 0%.

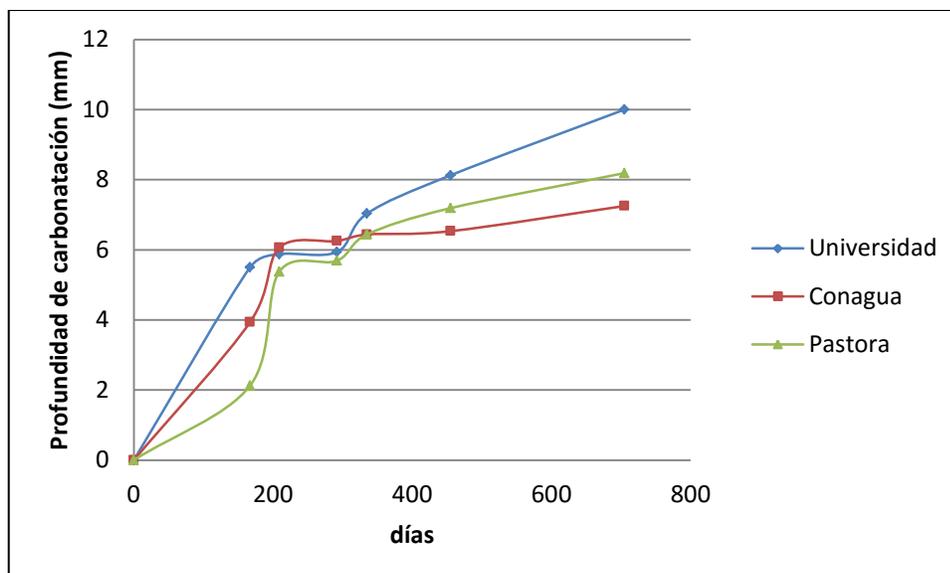


Figura A3.2. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.46$ y un contenido de CV del 25%.

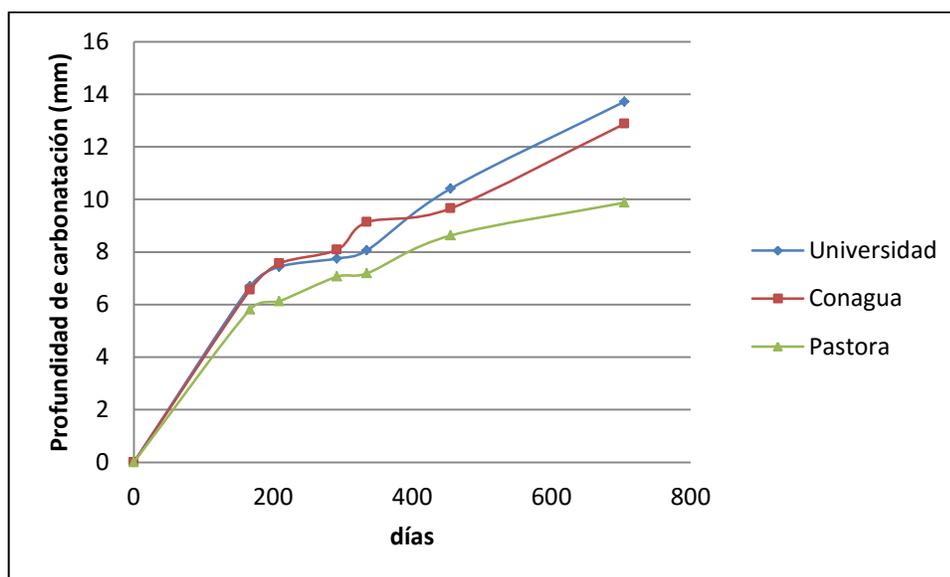


Figura A3.3. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.46$ y un contenido de CV del 50%.

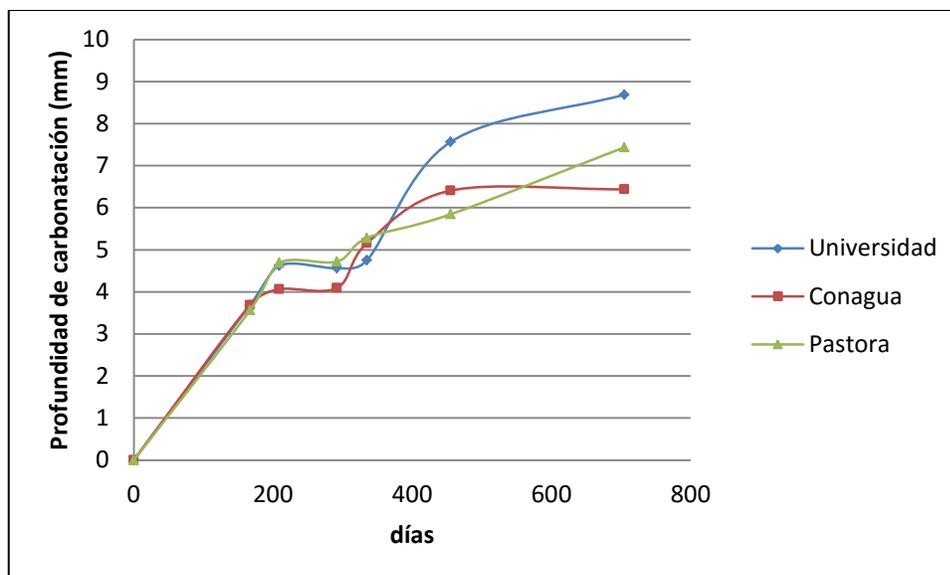


Figura A3.4. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.59$ y un contenido de CV del 0%.

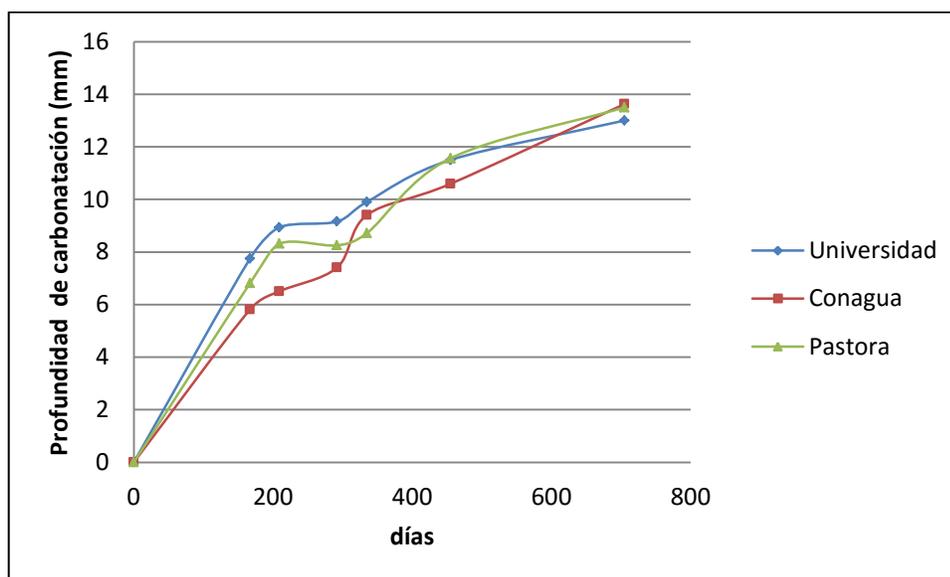


Figura A3.5. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.59$ y un contenido de CV del 25%.

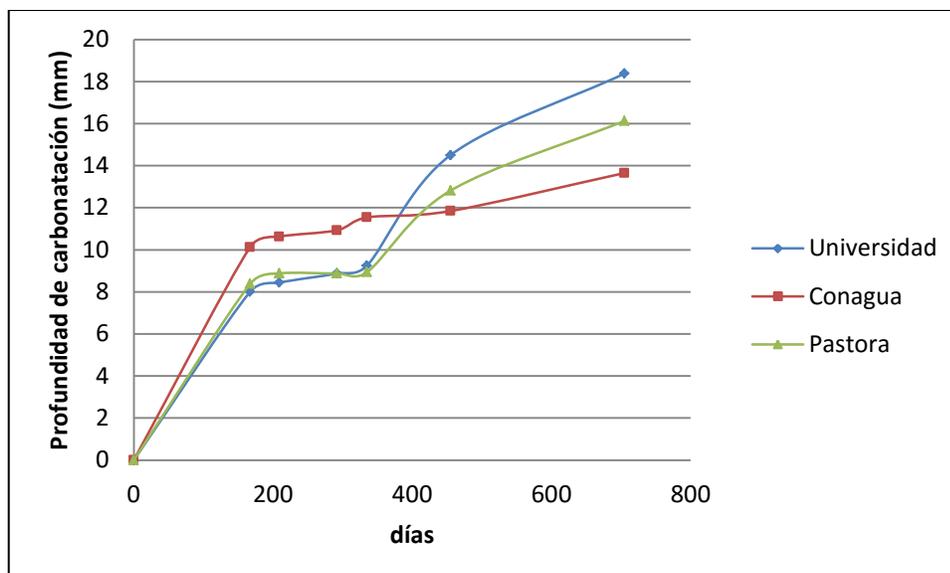


Figura A3.6. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.59$ y un contenido de CV del 50%.

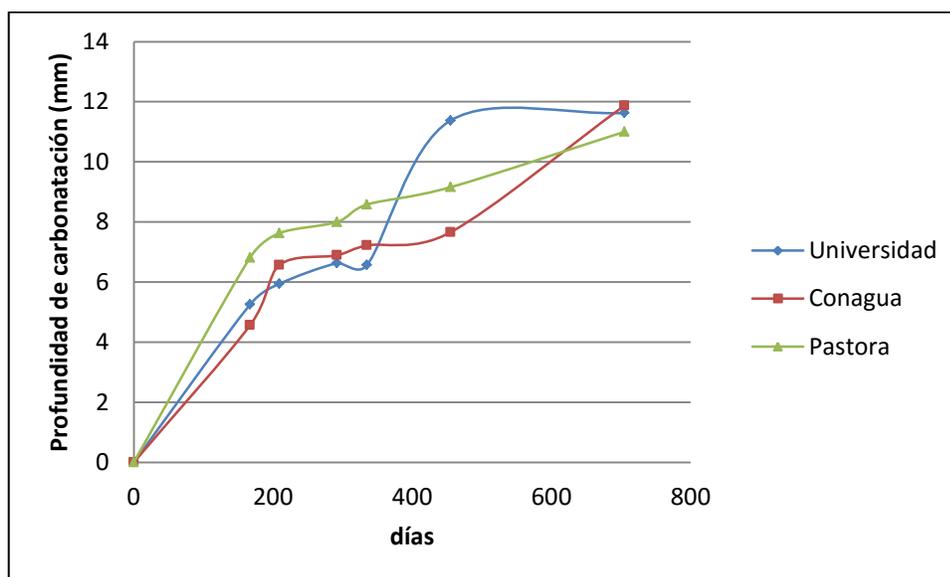


Figura A3.7. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$ y un contenido de CV del 0%.

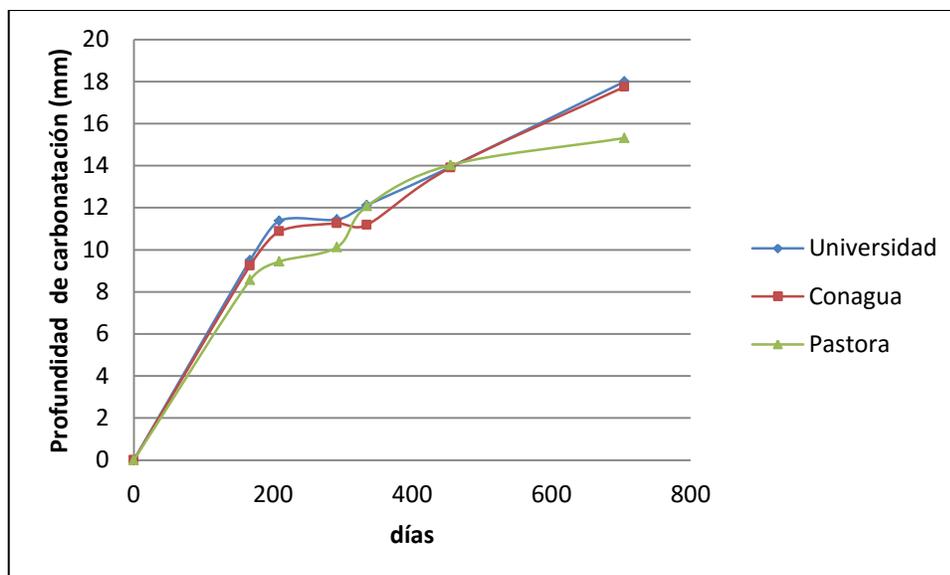


Figura A3.8. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$ y un contenido de CV del 25%.

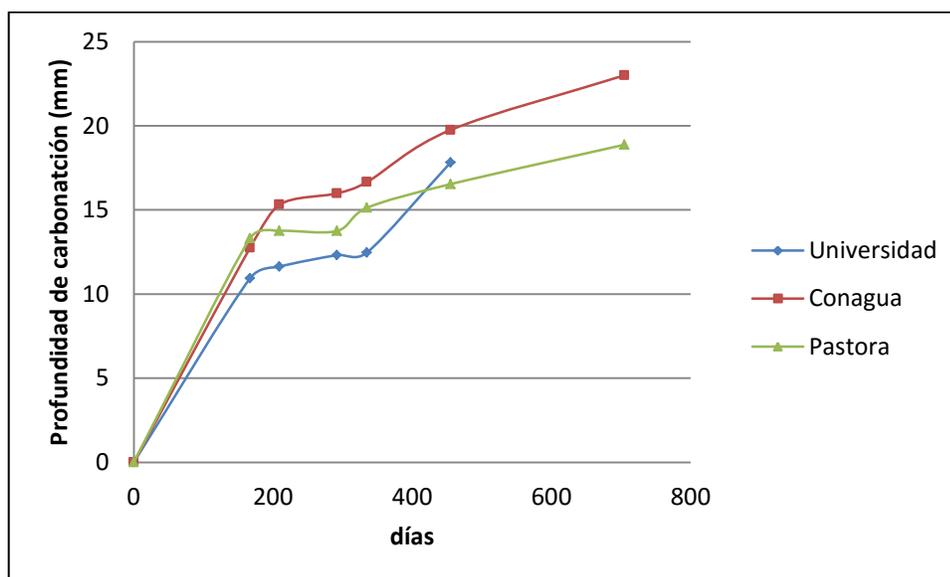


Figura A3.9. Comparativa de los distintos sitios de exposición de mezclas en estudio expuestas a carbonatación natural para una relación $a/mc = 0.70$ y un contenido de CV del 50%.

Anexo 4

Cálculo de la concentración de portlandita para cada una de las mezclas de estudio.

La Tabla A4.1 muestra las mediciones de pH hechas a las mezclas de este estudio. La medición se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 4262, la cual solicita dos muestras pulverizadas de concreto de 10 g, disueltas en 75 ml de agua des-ionizada, que posterior a un breve tiempo de homogeneización y reposo son llevadas a un medidor de pH estabilizado en rangos de 7 a 10.

Tabla A4.1. Resultados de las mediciones de pH de las mezclas en estudio.

<i>Mezcla</i>	<i>pH promedio</i>	<i>pOH</i>	<i>[OH⁻]</i>	<i>≈ Ca_{equivalente}</i>	<i>Ca(OH)₂_{pHi}</i>
0.46,0%	12.576	1.424	0.0377	0.01885	1.396 kg/m ³
0.46,25%	12.25	1.75	0.0178	0.0089	0.659 kg/m ³
0.46,50%	12.09	1.91	0.0123	0.00615	0.456 kg/m ³
0.59,0%	12.42	1.58	0.0263	0.01315	0.974 kg/m ³
0.59,25%	12.29	1.71	0.0195	0.00975	0.722 kg/m ³
0.59,50%	11.98	2.02	0.00955	0.004775	0.354 kg/m ³
0.70,0%	12.19	1.81	0.0155	0.00775	0.574 kg/m ³
0.70,25%	12.05	1.95	0.0112	0.0056	0.415 kg/m ³
0.70,50%	11.925	2.075	0.00841	0.004205	0.312 kg/m ³

Anexo 5

Comparativas de la predicción de la ecuación propuesta.

En este apartado se presenta de manera gráfica (figuras A5.1 - A5.27) la comparativa de las profundidades de carbonatación predichas por la ecuación desarrollada en este trabajo con los datos obtenidos del monitoreo en el avance del frente de carbonatación de las probetas expuestas a carbonatación natural y las profundidades calculadas a partir de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo ($x = k\sqrt{t}$) para los distintos sitios de estudio.

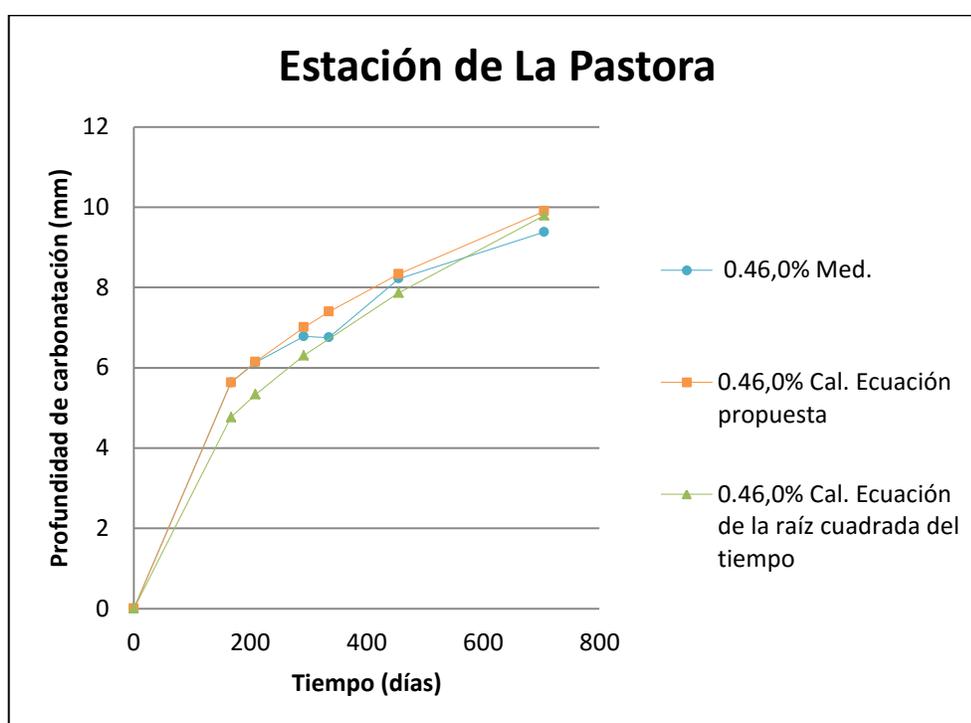


Figura A5.1. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación a/mc =0.46 y 0% de CV. Estación de La Pastora.

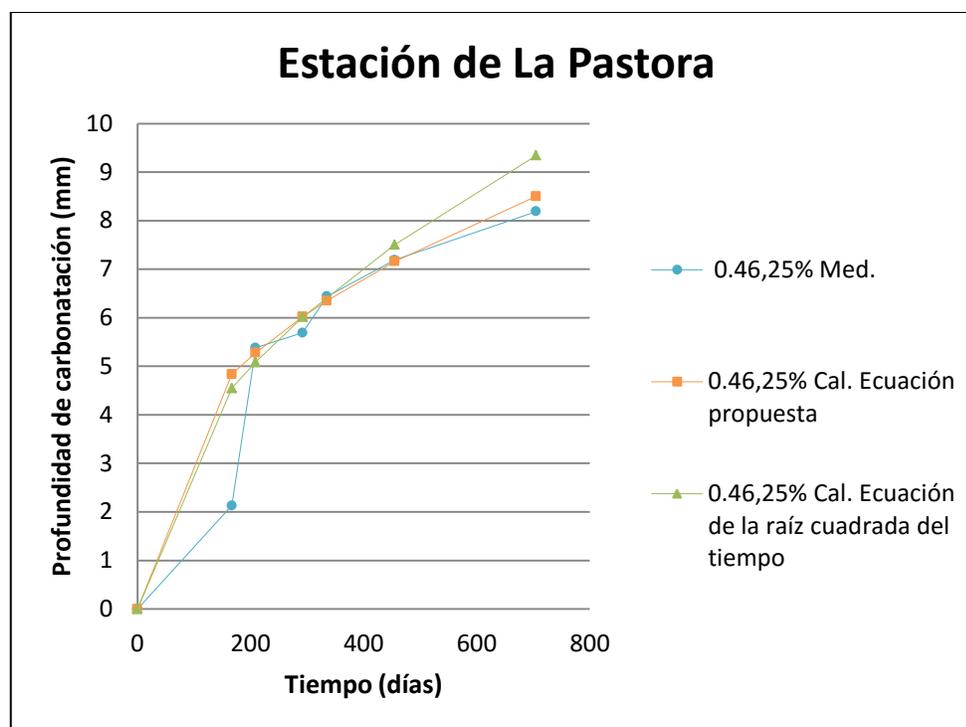


Figura A5.2. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 25% de CV. Estación de La Pastora.

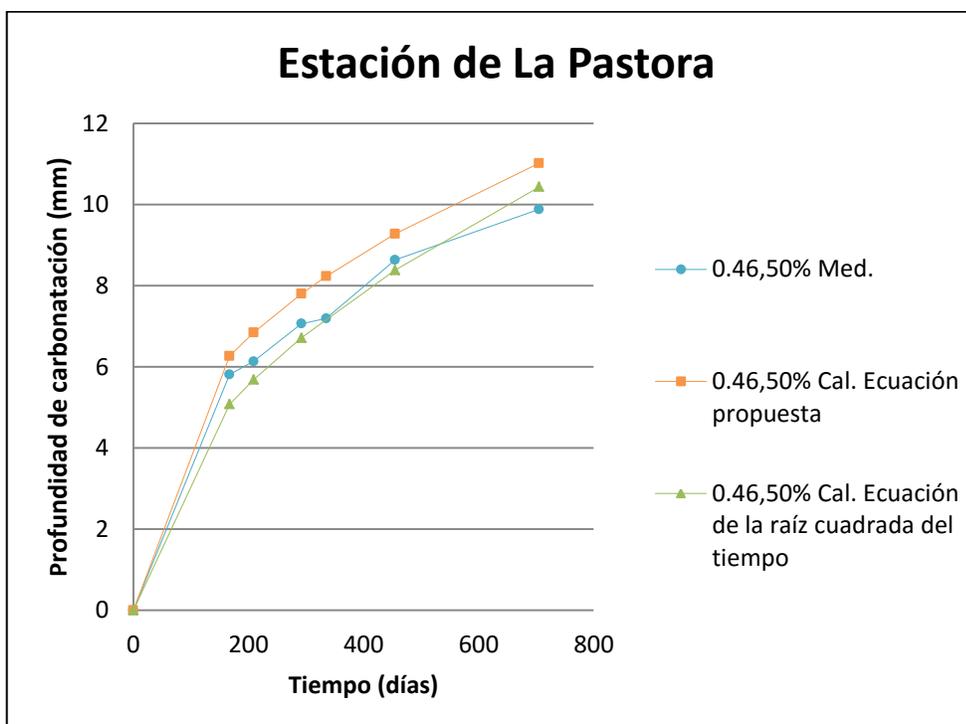


Figura A5.3. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 50% de CV. Estación de La Pastora.

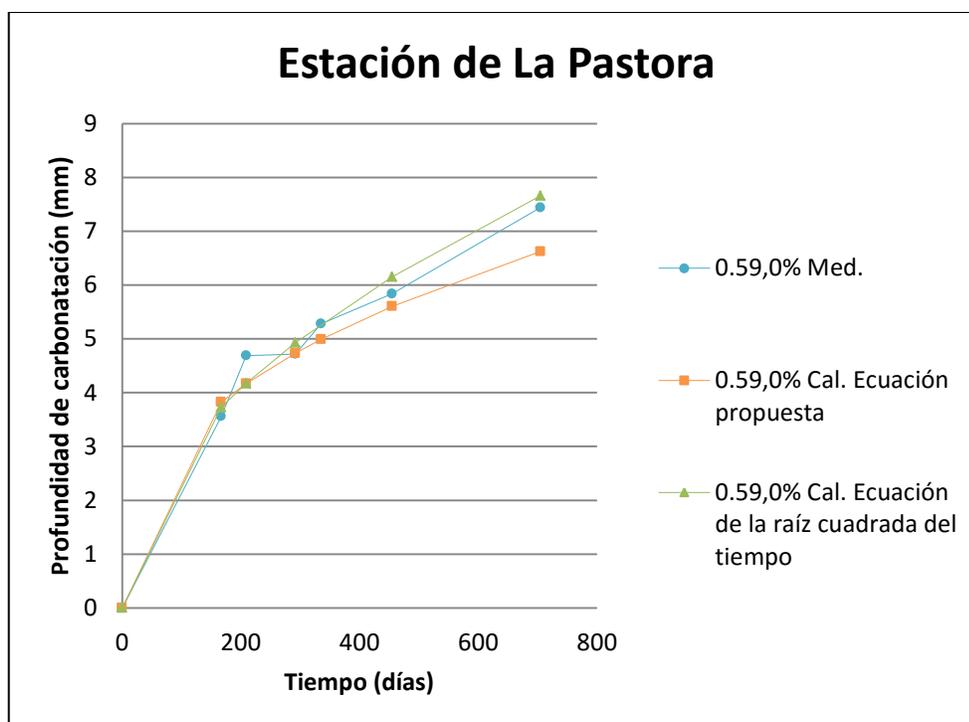


Figura A5.4. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 0% de CV. Estación de La Pastora.

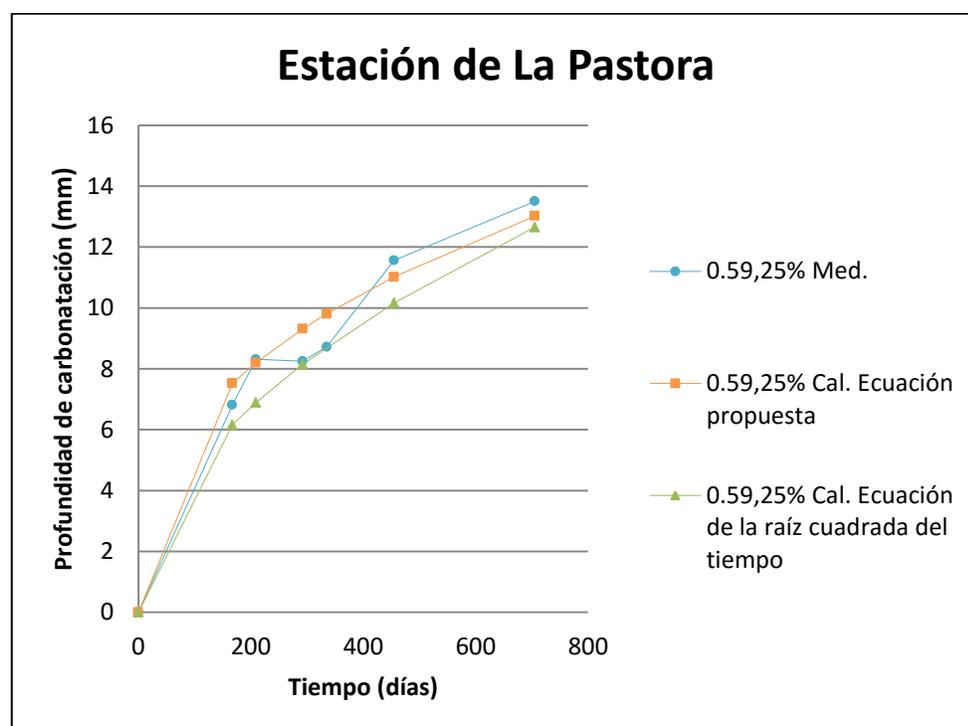


Figura A5.5. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 25% de CV. Estación de La Pastora.

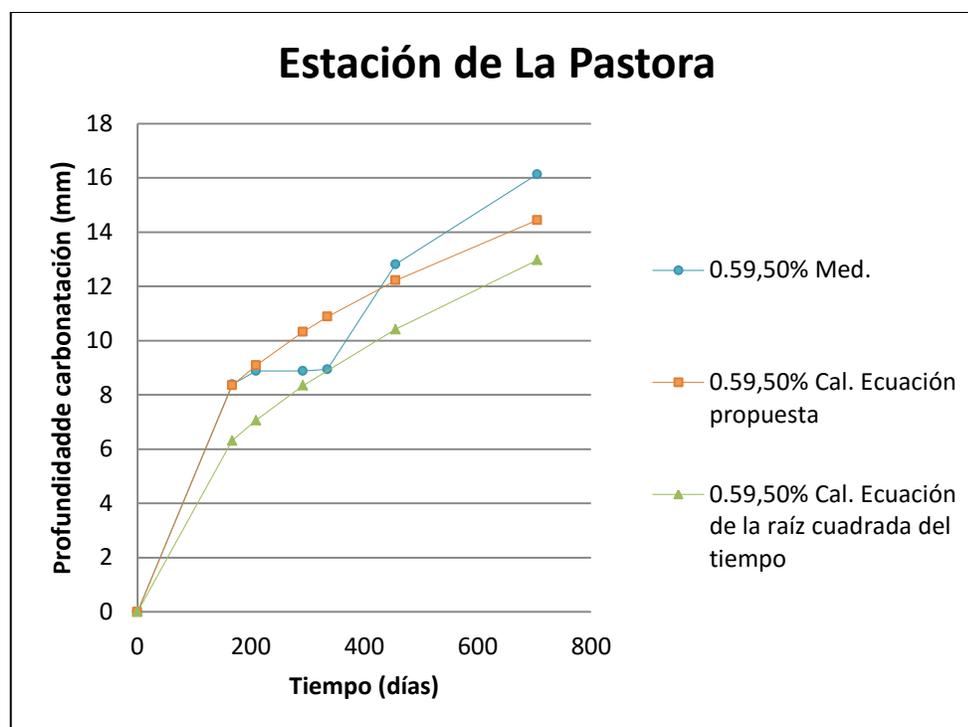


Figura A5.6. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 50% de CV. Estación de La Pastora.

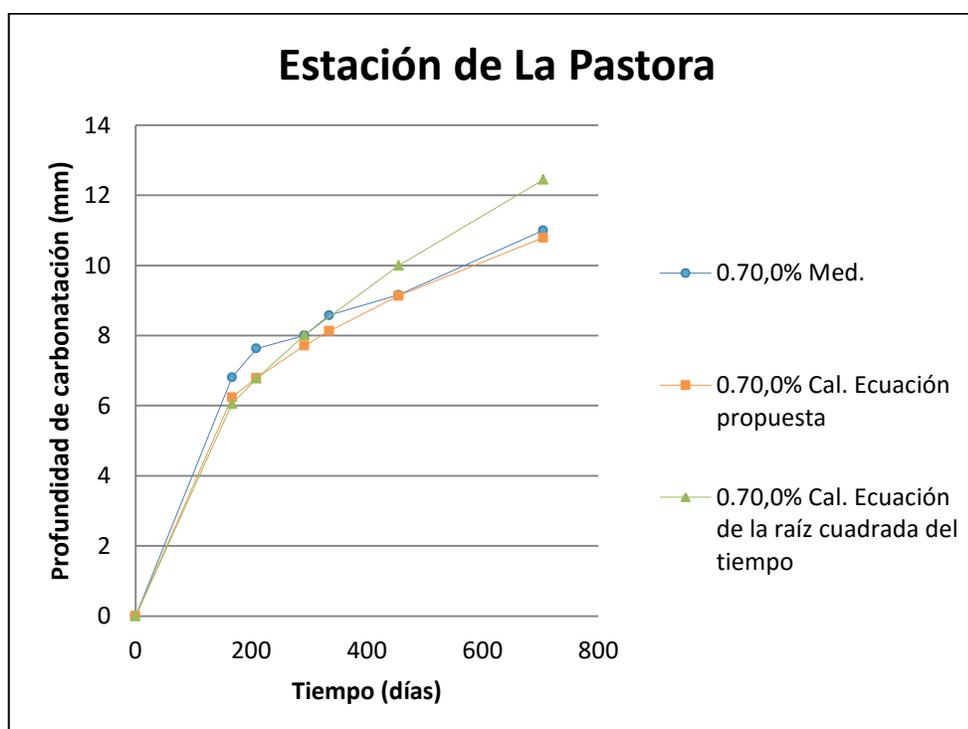


Figura A5.7. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 0% de CV. Estación de La Pastora.

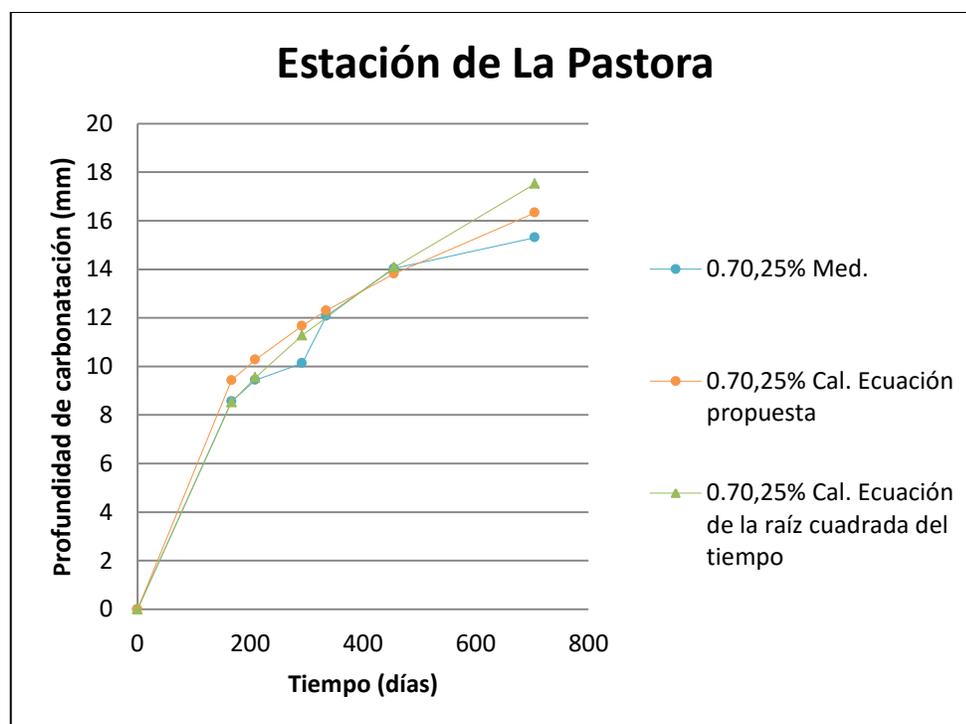


Figura A5.8. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 25% de CV. Estación de La Pastora.

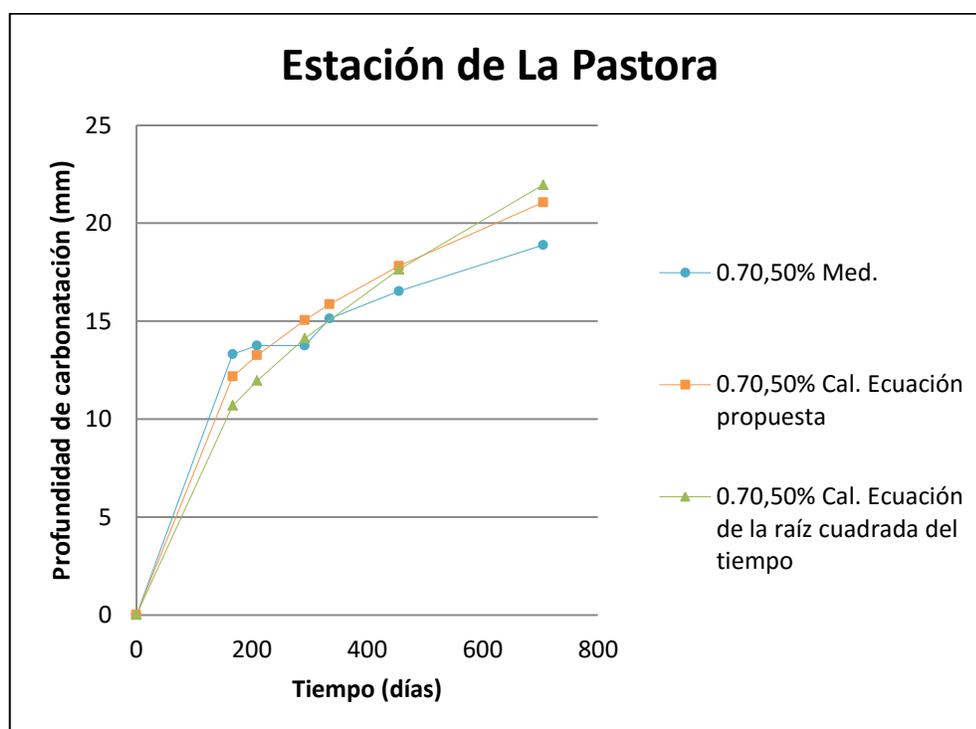


Figura A5.9. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 50% de CV. Estación de La Pastora.

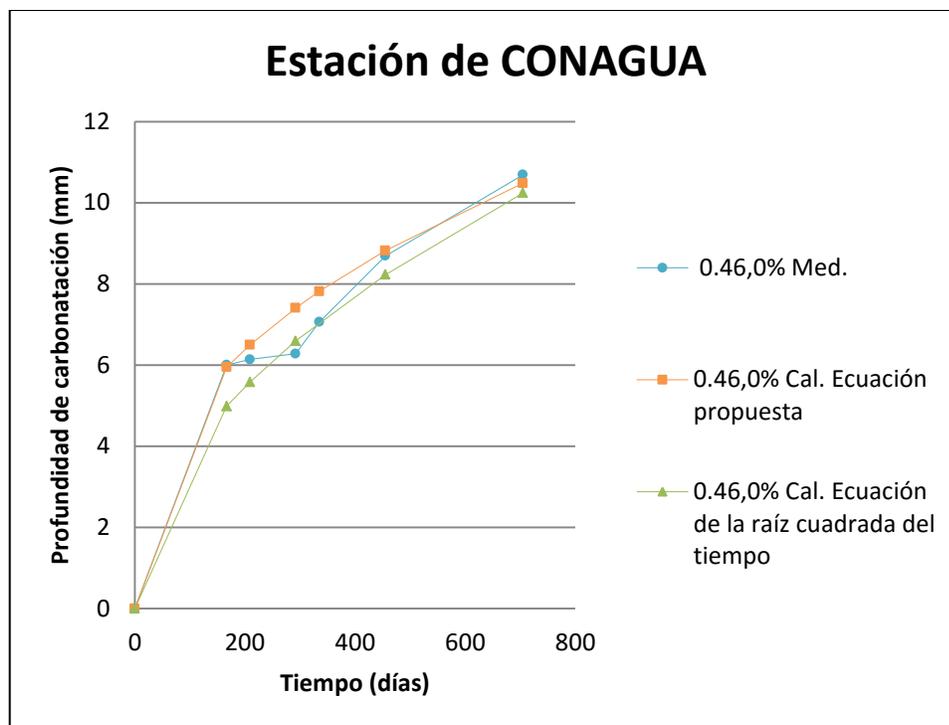


Figura A5.10. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 0% de CV. Estación de Conagua.

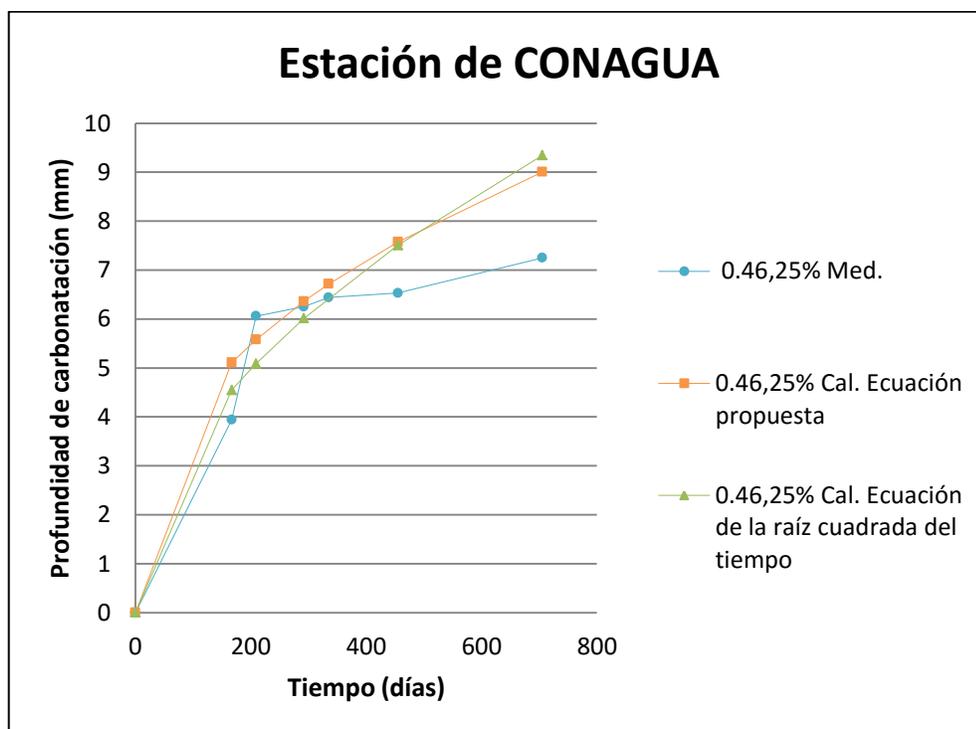


Figura A5.11. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 25% de CV. Estación de Conagua.

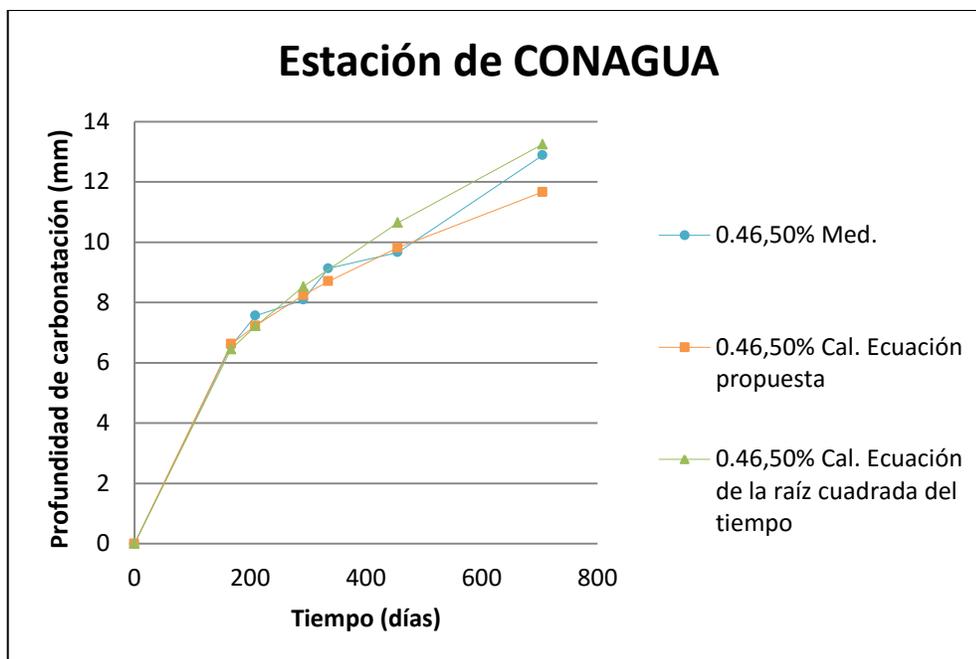


Figura A5.12. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 50% de CV. Estación de Conagua.

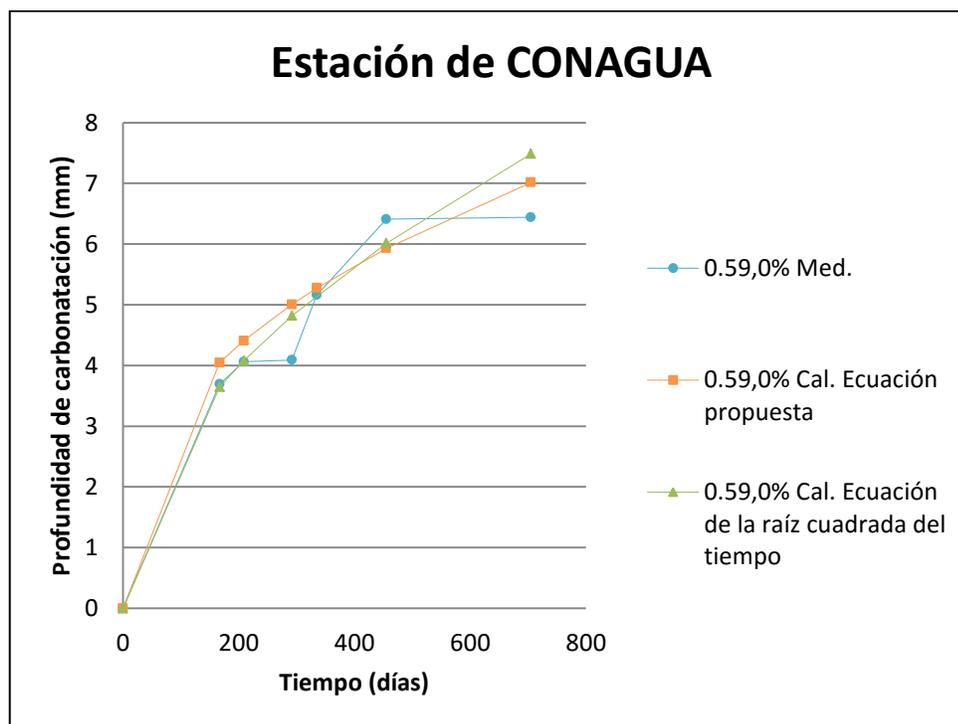


Figura A5.13. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 0% de CV. Estación de Conagua.

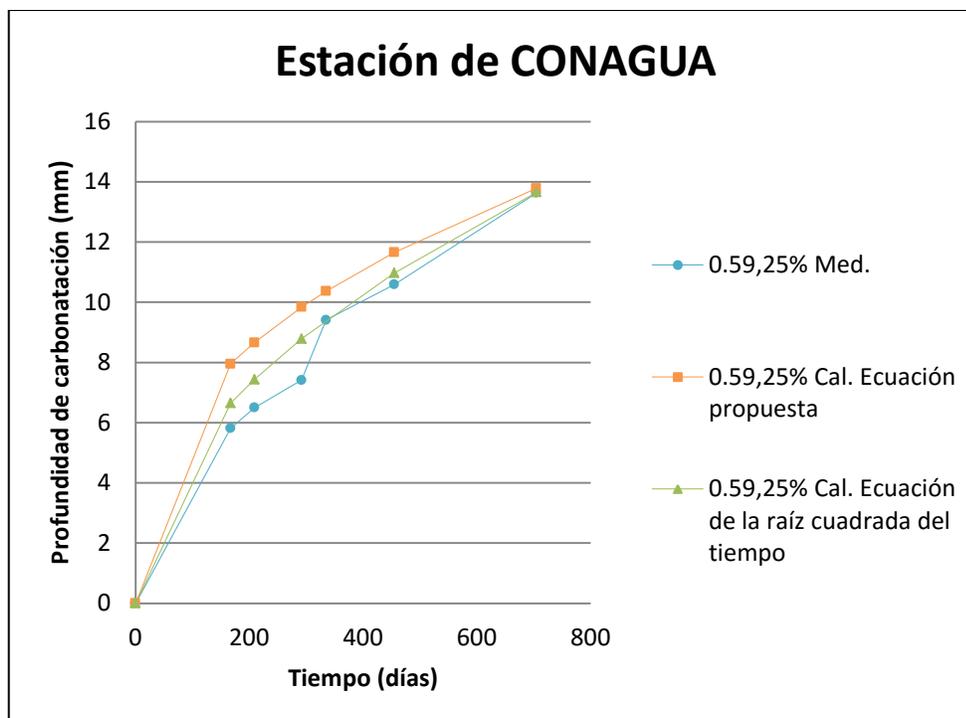


Figura A5.14. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 25% de CV. Estación de Conagua.

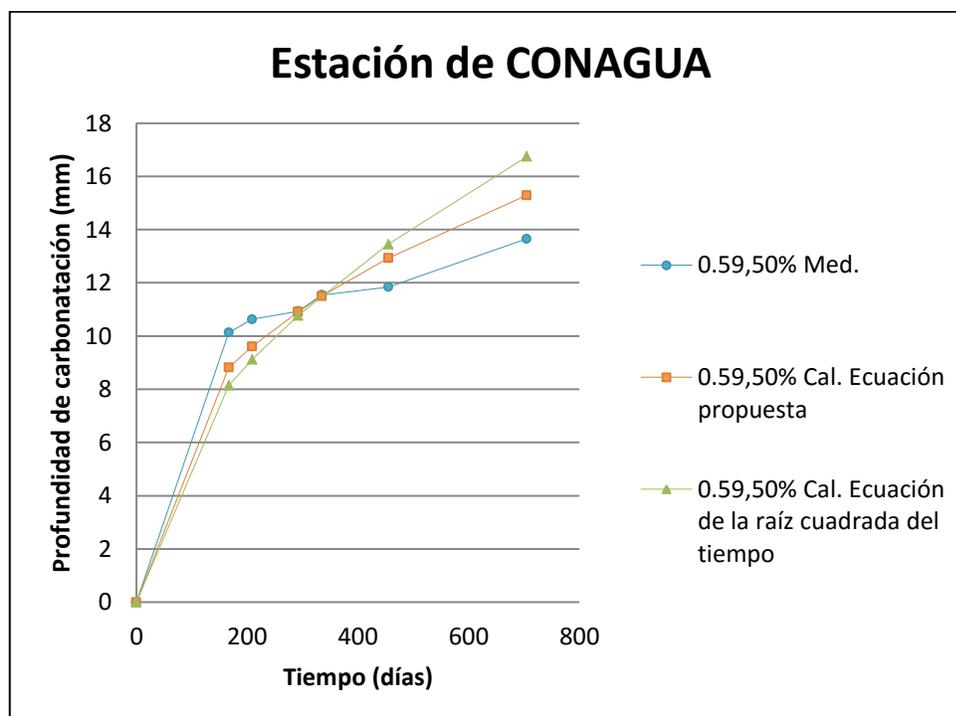


Figura A5.15. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 50% de CV. Estación de Conagua.

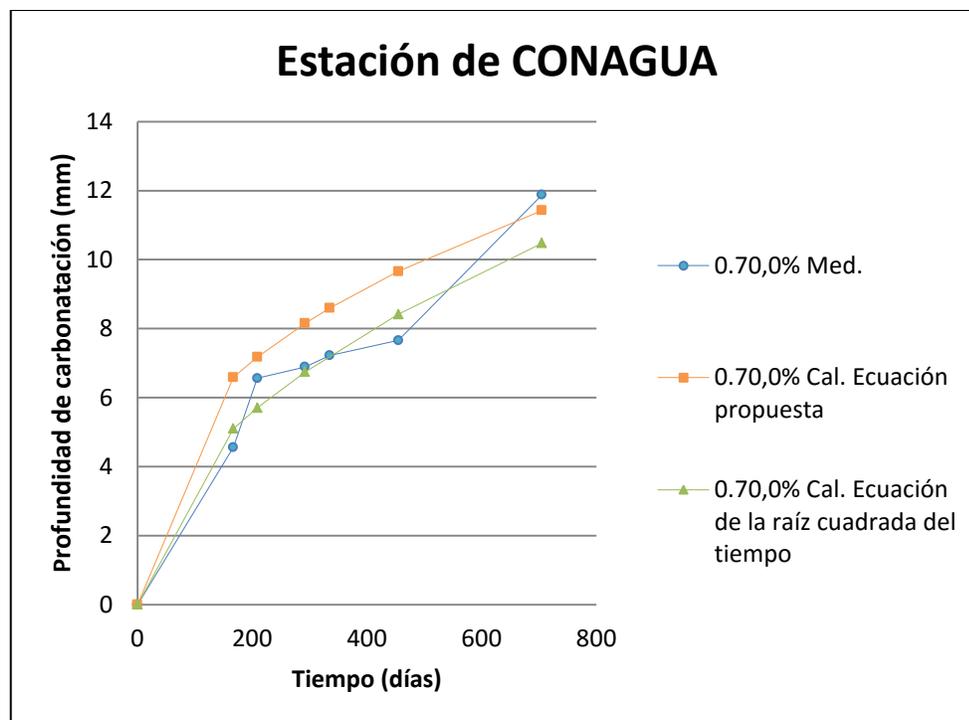


Figura A5.16. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 0% de CV. Estación de Conagua.

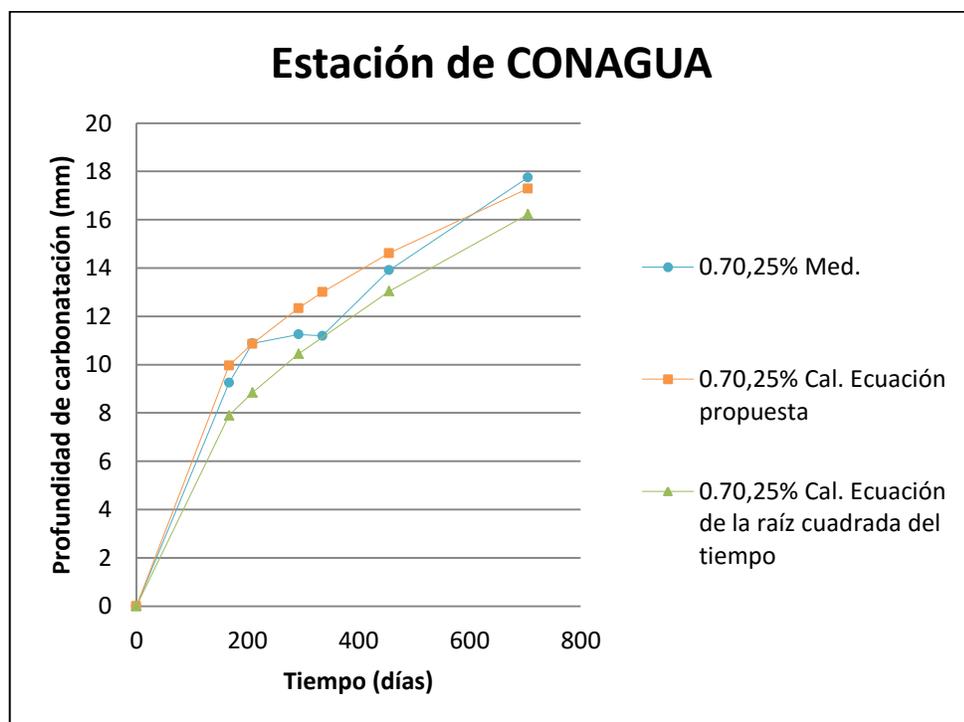


Figura A5.17. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 25% de CV. Estación de Conagua.

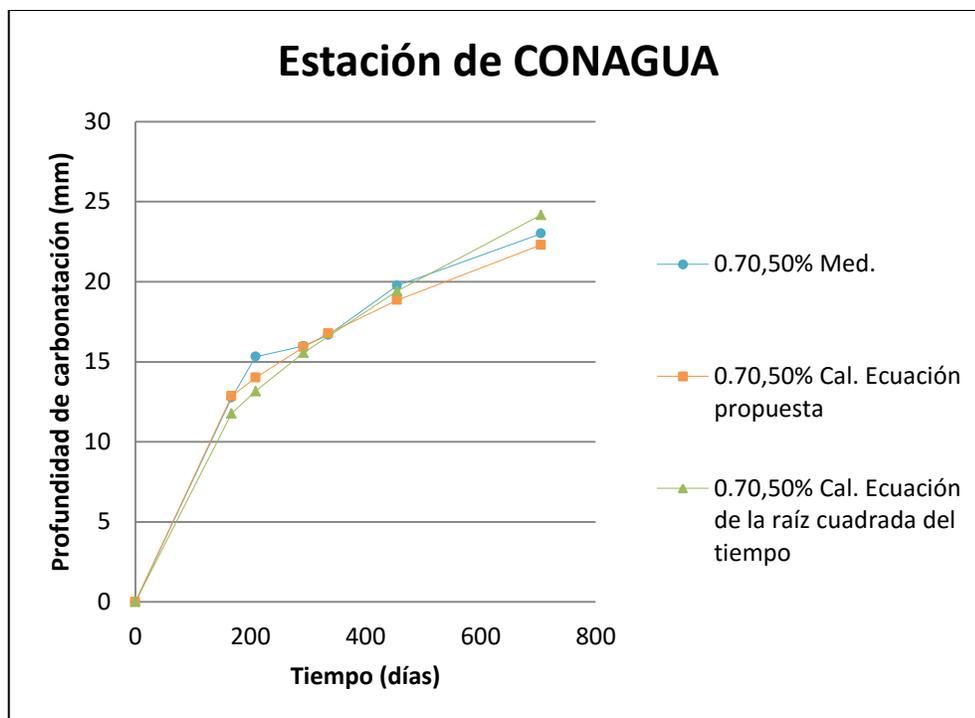


Figura A5.18. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 50% de CV. Estación de Conagua.

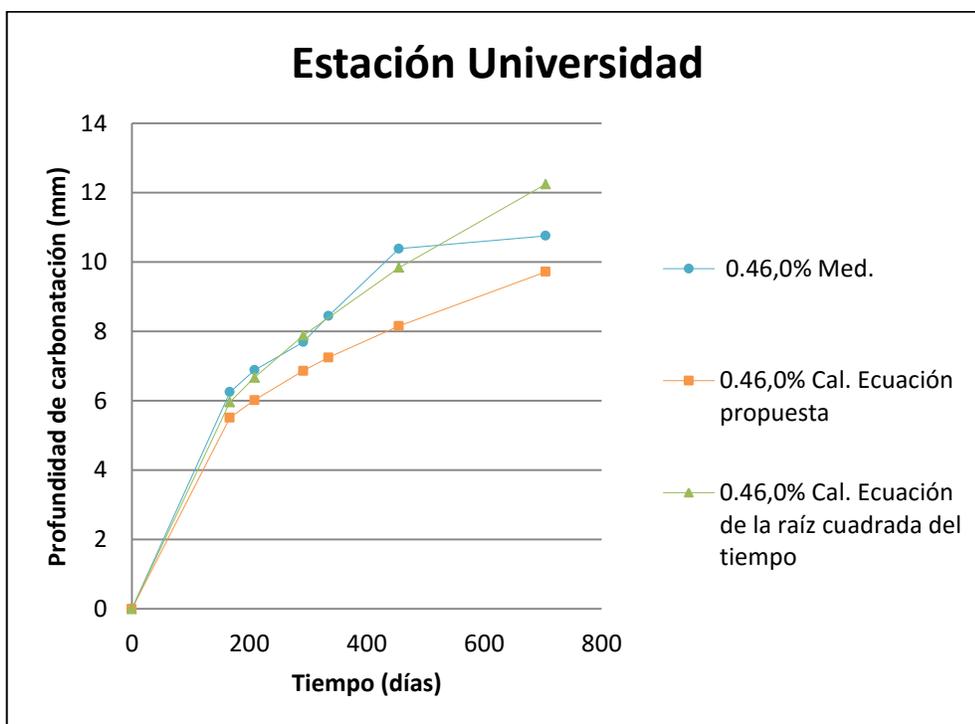


Figura A5.19. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 0% de CV. Estación Universidad.

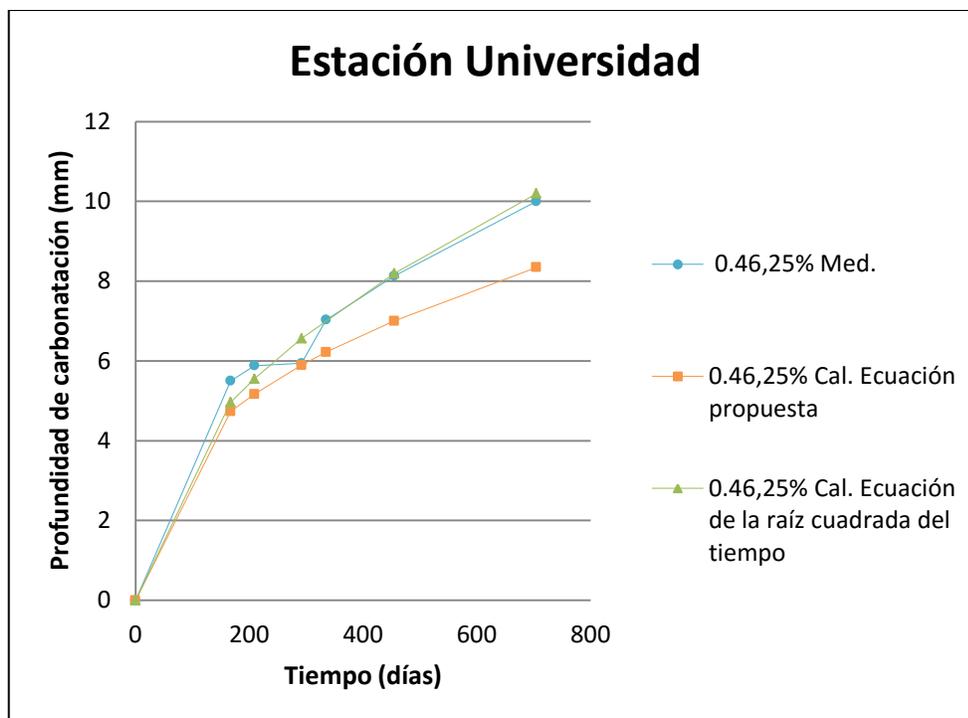


Figura A5.20. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 25% de CV. Estación Universidad.

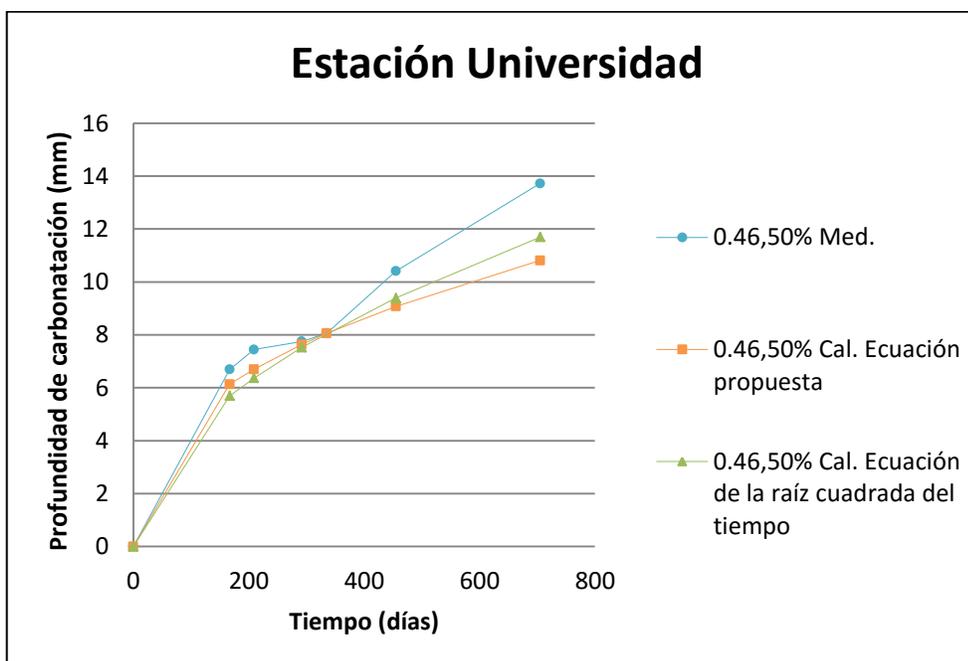


Figura A5.21. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.46$ y 50% de CV. Estación Universidad.

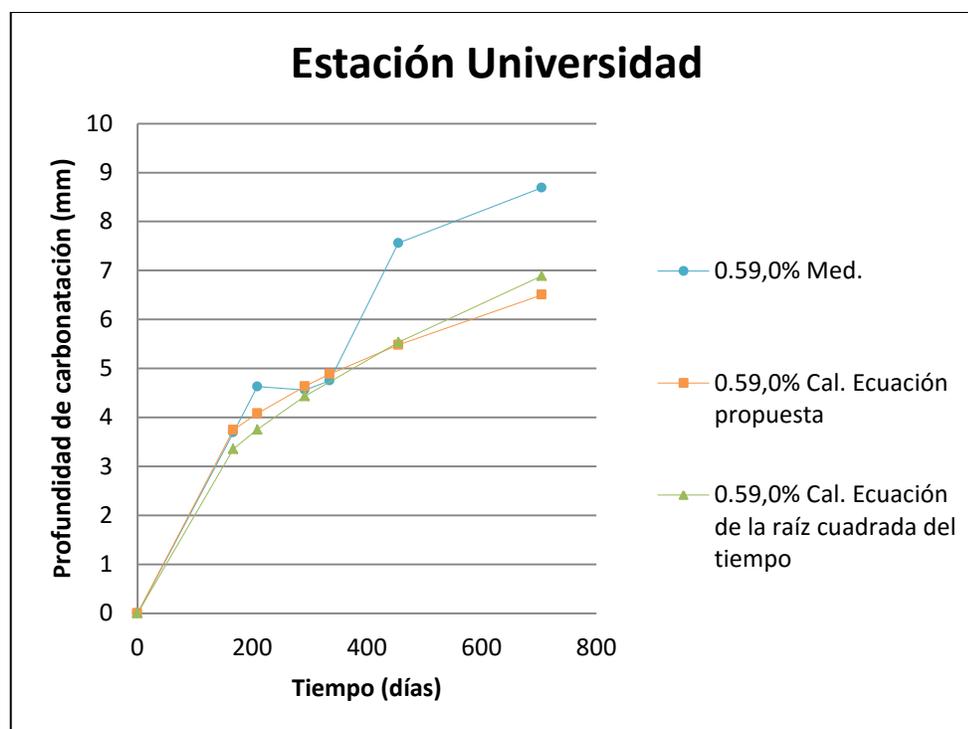


Figura A5.22. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 0% de CV. Estación Universidad.

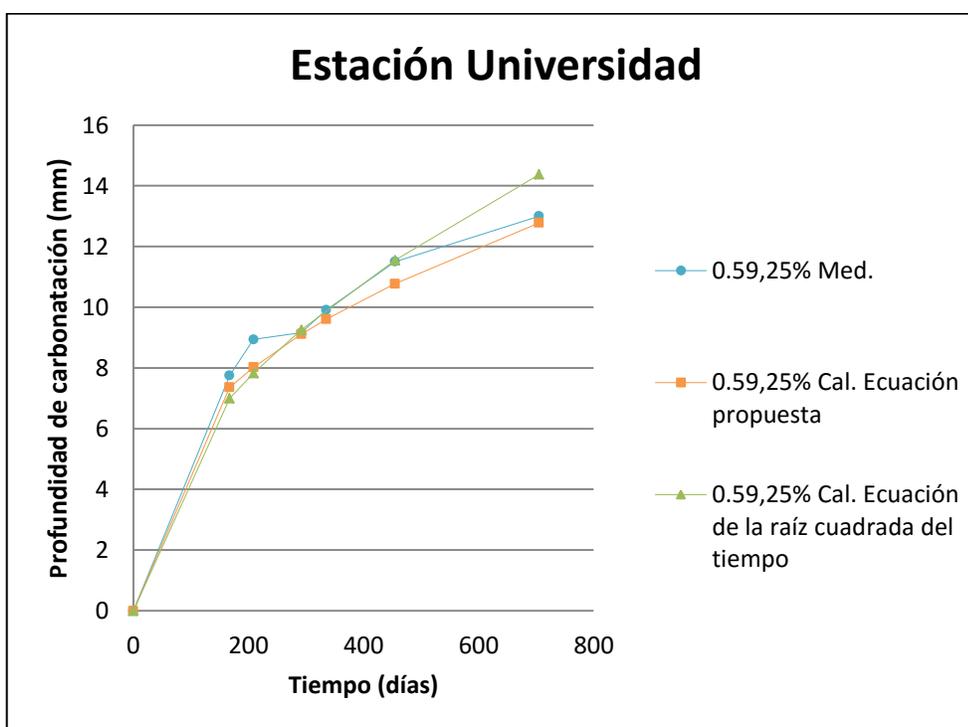


Figura A5.23. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 25% de CV. Estación Universidad.

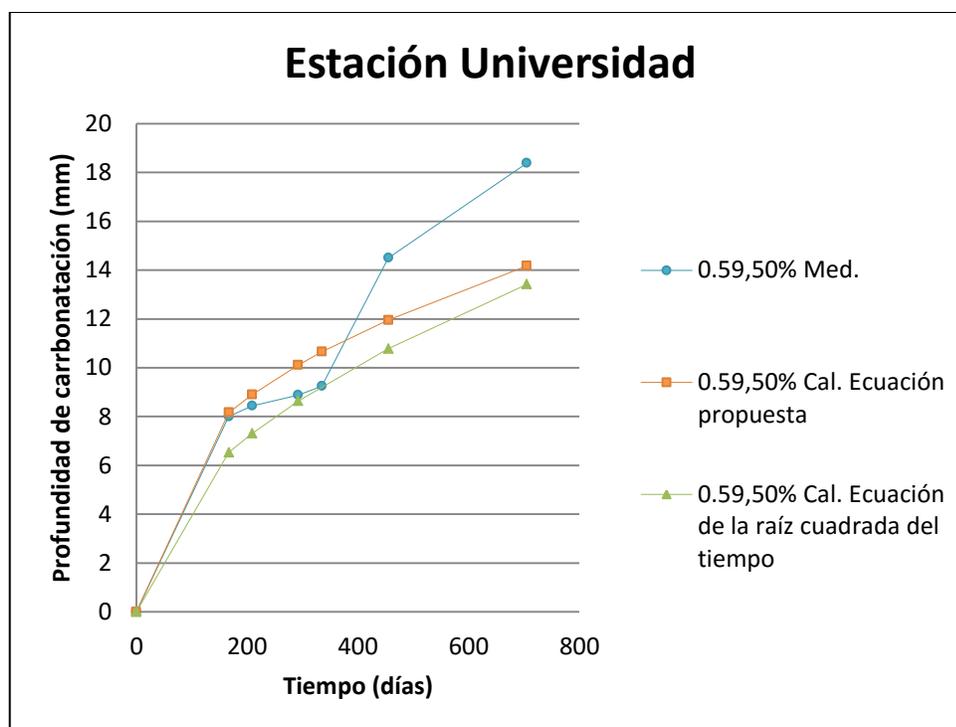


Figura A5.24. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.59$ y 50% de CV. Estación Universidad.

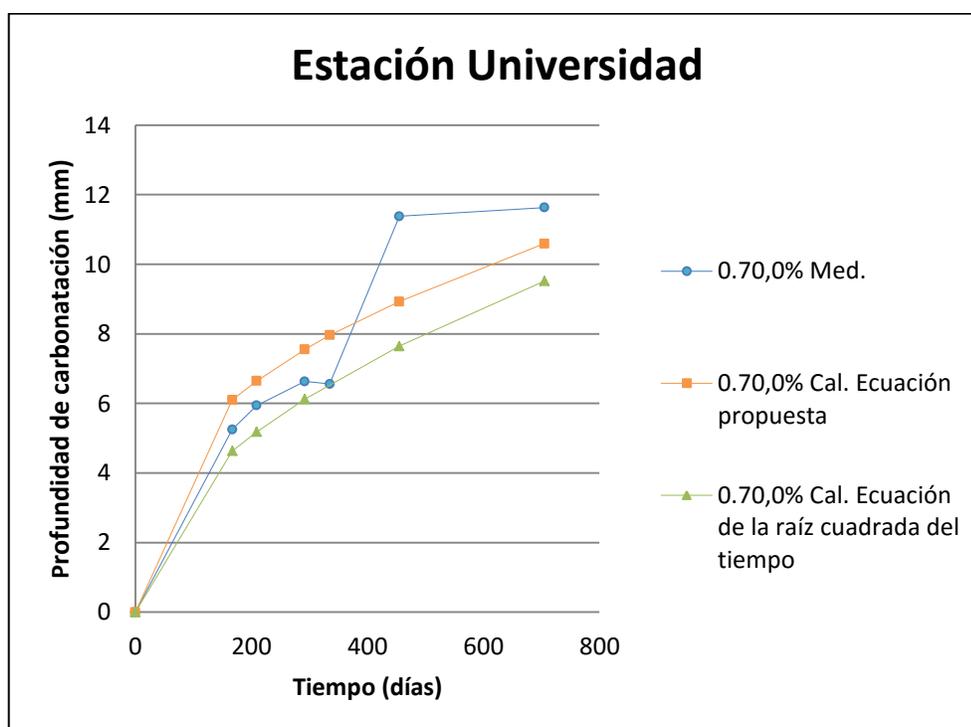


Figura A5.25. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 0% de CV. Estación Universidad.

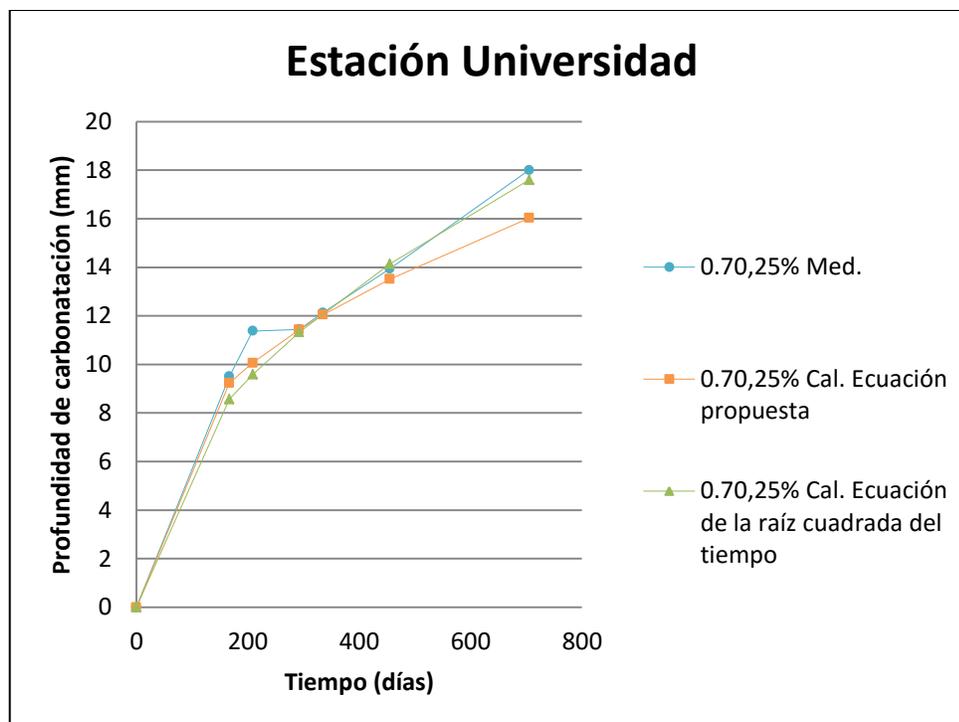


Figura A5.26. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 25% de CV. Estación Universidad.

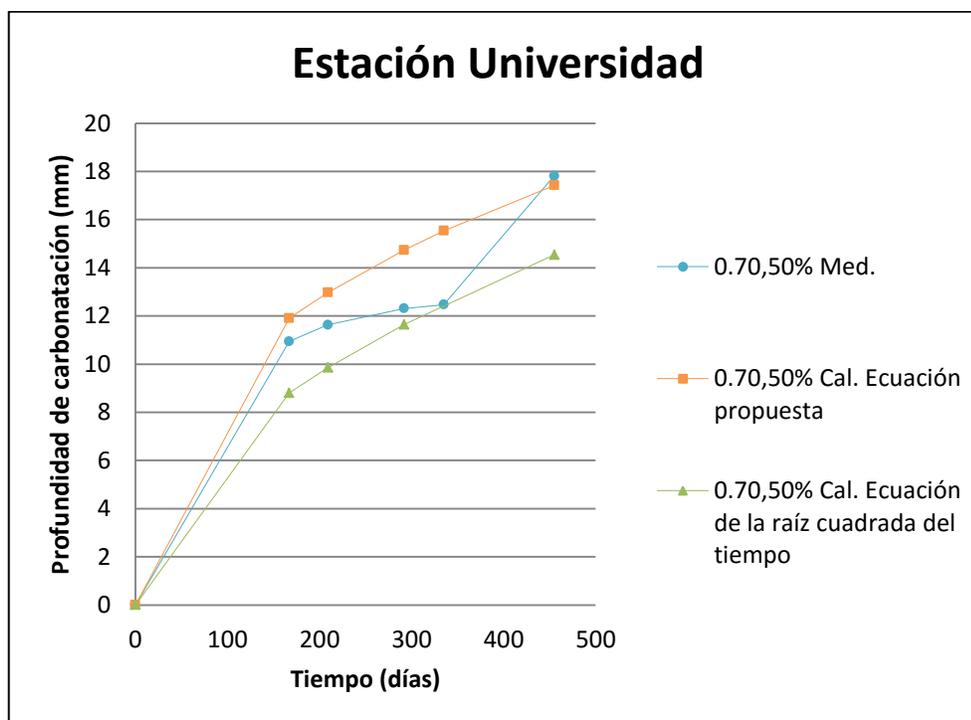


Figura A5.27. Comparativa de la predicción de la ecuación propuesta; mezcla con relación $a/mc = 0.70$ y 50% de CV. Estación Universidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Deterioration of concrete structures in the environment of the Middle East.* **Rasheeduzzafar, S. S., Dakhil, F. H. and Al-Gahtani, A. S.** ACI Journal, 1984, vol. 81,13.
2. *Tecnología del Concreto.* **Neville, A. M.** México, D. F. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1999.
3. **Broomfield, J. P.** *Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, Investigation and Repair.* U. K. E & FN SPON, 1997.
4. **Koch, Gerhardus H. et al.** *Corrosion cost and Preventive Strategies in the United States.* Office of Infrastructure, Research and Development, Federal Highway Administration, 6300 Georgetown Pike, Mclean VA 22101-2296. 2001.
5. *Corrosion monitoring and protection for infrastructure projects II.* **Gundaker, E. F.** [ed.] NACE. 1996. 2nd Latin American Region Corrosion Congress.
6. **Mendoza Rangel, José Manuel.** *Vida de servicio de estructuras de concreto reforzado influenciadas por el cambio climático global en ambiente tropical marino.* Mérida: CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2009. p. 2. Tesis doctoral.
7. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.* **Trocónis de Rincón, Oladis and Miembros de la Red DURAR.** Maracaibo, Venezuela: CYTED, pp. 13-14, 21, 38-40. Tercera Edición.
8. *Service-life prediction - State of the art report.* **ACI 365.** Farmington, Hills: American Concrete Institute, 2000.
9. *Tesis Refuerzo - Protección en Estructuras de Concreto dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica.* **Lee Orantes, Francisco.** Celaya, Gto., México. 2005.
10. *Periodo de iniciación de la Corrosión (T1) en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino.* **Torres Acosta, A.** 5. Construlink, 2004, Revista Internacional Construlink (RCI), Vol. 2. 1645 - 576.
11. *Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección.* **Helene, Paulo and Pereira, Fernanda.** Brasil: CYTED, Septiembre 2003, pp. 46,47.

12. **Pourbaix, M.** *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. 2d English. National Association of Corrosion Engineers, 1974.
13. *Durability of Loaded Reinforced concrete in Chloride Environment*. **Francois, R. and Arligue, G.** EUA: American Concrete Institute, 1994, ACI SP - 145.
14. **Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa.** http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_6.htm. [Online] [Cited: enero 4, 2016.]
15. *Evaluación de estructuras técnicas y materiales para su reparación*. **García, F. de J.** IMCyC, 2003.
16. *Durabilidad de Estructuras de Concreto en México*. **Mena Ferrer, Manuel.** México: IMCYC, 2005, pp. 31 - 32, 90, 34. Primera edición.
17. **Tuutti, K.** Corrosion of steel in concrete PhD thesis. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), 1983.
18. *Informe 222R Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. **ACI Comité 222.** EUA: American Concrete Institute, 2002.
19. *La carbonatación, enemigo olvidado del concreto*. **Montani, Rick.** México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., Diciembre 2000, Revista Construcción y tecnología.
20. **Sabine, C.L., et al.** The oceanic sink for anthropogenic CO₂. 2004, pp. Science 305: 367-371.
21. **Carbon Dioxide Information Analysis Center.** [Online] <http://cdiac.ornl.gov/pns/faq.html>.
22. [Online] <http://www.globalwarmingart.com>.
23. **IPCC, 2013.** *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [ed.] T. F. Stocker, et al. Cambridge, United Kindom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. p. 1535.
24. **Joint science academies statement.** joint science academies statement: sustainability, energy efficiency and climate protection. UK Royal Society website consultado el 17-04-2010, 16 de mayo de 2007.

25. **NRC** . Understanding and Responding to climate change. Board on Atmospheric Sciences and climate. US National Academy of Sciences, Consultado el 09-11-2010, 2008.
26. **USGRCP**. Key findings, On (website): Global Climate Change Impacts in the United States. U. S. Global Change Research Program website. Consultado el 17-04-2010.
27. **IPCC**. 1. Observed changes in climate and their effects in (section): Summary for Policymakers. *In (book): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A. Geneva, Switzerland, publisher: IPCC, 2007.*
28. *Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach.* **Bastidas-Arteaga, Emilio, et al.** 2013, Engineering Structures, Vol. 51, pp. 259-266.
29. *Influence of Marine Climates on Carbonation of Reinforced Concrete Buildings.* **Castro, P., Moreno, E. I. and Genescá, J.** 2000, Cement and Concrete Research 30 (10), pp. 1565 - 1571.
30. *Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete.* **Yoon, In-Seok, Copuroglu, Oguzhan and Park, Ki-Bong.** 2007, Atmospheric Environment, Vol. 41, pp. 7274-7285.
31. *A service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation.* **Van den Heede, Philip and De Belie, Nele.** 2014, Construction and Building Materials, Vol. 55, pp. 183-193.
32. **Castro, Pedro, Castillo, R. and Carpio, J. J.** *Corrosión en estructuras de hormigón, en Teoría, Inspección, Diagnostico, Vida Útil y Reparaciones.* 1ra. México: IMCYC, 1998.
33. **Garcés Terradillos, P., Climent Llorca, M. A. and Zornoza Gómez, E.** *Corrosión de Armaduras en estructuras de hormigón armado.* p. 47. ISBN:978-84-8454-685-6.
34. **Andrade, M. C.** *Nueva técnica eletroquímica de medida de la corrosión en hormigones armados y pretensados. Empleo de aditivos inhibidores como medios de protección.* Tesis doctoral realizada en el I.E.T.C.C., 1973.
35. **Andrade, M. C. and Gonzalez, J. A.** *Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements.* Werkst. Korros 29, p. 515, 1978.

36. *On site determination of the polarization resistance in a reinforced concrete beam.* **Feliú, S., Gonzalez, J. A. and Andrade, C.** San Francisco (California): marzo (1987), Proceedings of NACE conference Corrosion 87. paper No.145.
37. *Polarization resistance and impedance of steel bars.* **Andrade, M. C., Alonso, C. and Gonzalez, J. A.** Materials Science Forum, 1988, Vols. 44-45, p. 329.
38. **Aitcin, P. C.** *Blinders for Durable and Sustainable Concrete (Modern Concrete Technology Series).* Routledge, 1er. edition, August 20, 2007, p. 49.
39. **Aitcin, Pierre-Claude.** *El futuro del concreto y el concreto del futuro.* Monterrey, N. L., México: Conferencia técnica ofrecida por la sección Noreste de México del American Concrete Institute (ACI) y la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL, 2007.
40. **Aitcin, Pierre - Claude.** *Cement and Concrete Development from an Environmental Perspective.* [ed.] Odd Gjorv and Koji Sakai. *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century.* 2000, p. 210.
41. **Environmental Protection Agency.** *AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors.* Washington, D. C.: 2005. Vol. Volumen I: Stationary point and Area Sources.
42. **Marceau, et al.** *Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture, SN2095b.* Skokie, IL: Portland Cement Association, 2006. p. 69.
43. **Marceau, Medgar L., Nisbet, Michael A. and VanGeem, Martha G.** *Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete.* skokie, IL. Portland Cement Association , 2007. SN3011.
44. **Pade, Claus, et al.** *The CO₂ Uptake of Concrete in the Perspective of Life Cycle Inventory.* *International Symposium on Sustainability in the Cement and Concrete Industry.* Lillehammer, Norway, September, 2007.
45. **Idorn-Gunna, M. I.** *Durabilidad del concreto y economía de recursos.* *Construcción y Tecnología.* Marzo, pp.46-48, (1ra. parte) y abril, pp.44-46, (2da. y última parte) 1992.
46. **Mehta, Kumar.** *Reducing the Environmental Impact of Concrete.* *Concrete International.* October 2001.
47. **Scrivener, K. L.** *Properties, applications and practicalities of special cements.* *11th International Congress on the Chemistry of Cement.* Durban: South Africa, 2007.
48. **Valdez Tamez, Pedro Leobardo.** *Tesis Doctoral con especialidad en Ciencias de Materiales. Desarrollo de un método para evaluar materiales naturales con potencial puzolánico para su uso en el cemento.* Monterrey, N. L., México: Facultad de Ingeniería Mecánica y eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002.

49. **Malhotra, V. M.** Role of Supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions. *Proc. Int. Conference on Infrastructure Regeneration and Rehabilitation-Improving the Quality of Life through better Construction A Vision for the Next Millennium*. R. N. Swamy, Sheffield Academics Press, 1999, pp. 27-42.
50. **Alonso, M. C. and de Luxán, M. P.** *Aplicación de las cenizas volantes en el campo de la construcción. Experiencia española*, Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. 1995. p. 16.
51. **Nochaiya, T., Wongkeo, W. and Chaipanich, A.** *Utilization of fly ash and silica fume and properties of Portland cement -fly ash - silica fume concrete*, *Fuel* 89. 2010. pp. 768 - 774.
52. *Benefits of slag and fly ash*. **Bijen, J.** 10, 1996, *Constr. Build Mater*, pp. 309-314.
53. *Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar*. **Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Sirivivatnanon, V.** 2004, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 34, pp. 1087-1092.
54. **Papadakis, V. G.** *Effecto of fly ash on Portland cement systems, Part I Low-calcium fly ash*. 1999: *Cem. Concr. Res.* 29. pp. 1727 - 1736.
55. *Fly ash effects II. The active effect of fly ash Cem*. **Wang, A., Zhang, C. and Sun, W.** 2004, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 34, pp. 2057 - 2060.
56. *An experimental Study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash blast furnace concrete*. **Leng, F., Feng, N. and Lu, X.** 2000, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 30, pp. 989-992.
57. *Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes - Influence of test methods on microstructure*. **Jain, J. A. and Neithalath, N.** 2010, *Cem. Concr. Comp.*, Vol. 32, pp. 148 - 156.
58. *Effect of silica fume, metakaolin and low calcium fly ash on chemical resistance of concrete*. **Roy, D. M., Arjunan, P. and Silsbee, M. R.** 2001, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 31, pp. 1809-1813.
59. *Influence of pozzolanic, slag and chemical admixtures on pore size distribution and permeability of hardened cement pastes*. **Manmohan, D. and Mehta, P. k.** 3, 1981, *Concrete and Aggregates*, pp. 63-67.
60. *Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste*. **Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T.** 2005, *Cem. Concr. Comp.*, Vol. 27, pp. 425-428.

61. *Effect of sewage sludge ash (SSA) on the mechanical performance and corrosion levels of reinforced Portland cement mortars.* **Alcofel, E. G., et al., et al.** 2006, Mater. Construcc., Vol. 56, pp. 31 - 43.
62. *Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash.* **Garcés, P., et al.** 2008, Waste Manag., Vol. 28 (12), pp. 2495-2502.
63. *Carbonation rate and reinforcing steel corrosion rate of OPC/FC3R/FA mortars under accelerated condition.* **Zornoza, E., Payá, J. and Garcés, P.** 2009, Advances in Cement Research, Vols. 21,1, pp. 12-22.
64. *The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement-modified fly ash mortars.* **Garcés, P., et al., et al.** 2010, Cement and Concrete Composites, Vol. 32, pp. 201-210.
65. *Corrosion Behavior of Steel Reinforcement in Concrete with Recycled Aggregates, Fly Ash and Spent Cracking Catalyst.* **Gurdián, H., et al.** 2014, Materials, Vol. 7, pp. 3176-3197.
66. *Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars.* **Baeza, F., et al.** 2014, Construction and Building Materials, Vol. 66, pp. 645-653.
67. *Portland cement systems with addition of sludge ash, application in concrete for the manufacture of blocks.* **Baeza, F., et al.** 2014, Journal of Cleaner Production.
68. **Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T.** *Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste.* Constr. Build. Mater. 21, 2007. pp. 1534-1541.
69. **Schiessl, P. and Wiens, U.** *Rapid determination of chloride diffusivity in concrete with blending agents.* RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, RILEM Publications, 1995.
70. **Ouellet, S., et al.** *Microstructural evolution of cemented paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test results.* Cem. Concr. Res. 37, 2007. pp. 1654 - 1665.
71. **Tasdemir, C.** *Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete.* Cem. Concr. Res. 33, 2003. pp. 1637 -1642.
72. **Berndt, M. L.** *Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate.* Constr. Build. Mater. 23, 2009. pp. 2606 - 2613.
73. **Thomas, M. D. A. and Matthews, J. D.** *Performance of pfa concrete in a marine environment - 10 - year results.* Cem. Concr. Comp. 26, 2004. pp. 5 - 20.

74. *Manual for assessing corrosion-affected concrete structures*. **CONTECVET**. CONTECVET-IN 309021.
75. **Chalee, W., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasit, P.** *Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater*. Struct 22, 2009. pp. 341 - 353.
76. **Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C.** *Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis*. Mate. Design 31, 2010. pp. 1242-1249.
77. **Bamforth, P. B.** *Concrete classifications for R. C. structures exposed to marine and other salt -laden environments* . Edinburgh: Proceedings of Structural Faults and Repair Congress, 1993.
78. *Improving the durability of concrete by the use of mineral additions Bahrain: Proceedings of Concrete Durability in the Arabian Gulf*. **Bamforth, P. B.** 1995.
79. *Effect of fly ash on chloride transport through concrete study by impedance spectroscopy*. **Sánchez, I., López, M. P. and Climent, M. A.** [ed.] J. M. Makar, L. Raki (Eds.) J. J. Beaudoin. Montreal, 2007. Durability and degradation of cement systems : corrosion and chloride transport, T4. 04-4, Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement, National Research Council of Canada.
80. **Demirboga, R.** *Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures*. Build. Environ. 42, 2007. pp. 2467 - 2471.
81. *Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation* Title no. 88-M43. **Papadakis, Vagelis G., Vayenas, Costas G. and Fardis, Michael N.** 4, July-August 1991, ACI Materials Journal, Vol. 88, pp. 363-373.
82. *Interaction between microclimate and concrete - a prerequisite for deterioration*. **Nilsson, Lars-Olof.** 5, 1996, Construction and Building Materials, Vol. 10, pp. 301-308.
83. *Prediction of service life reinforcement in concrete under different climatic conditions at given cover*. **Bakker, R.** Sheffield: R. N. Swamy, 1964. Corrosion and Protection of steel in Concrete International Conference.
84. *Zur statistischen Instandhaltungsplanung für bestehende Betonbauwerke bei Karbonatisierung des Betons und möglicher der Bewehrung*. **Hergentröder, M.** Technische Universität München, 1992.
85. *Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies*. **Roy, S. K., Poh, K. B. and Northwood, D. O.** 1999, Building and Environment, Vol. 34, pp. 597-606.

86. **Brown, JH.** Durability of Building Materials and Components. [book auth.] JM Baker, et al. Spon E, and FN, 1991, pp. 249-258.
87. *A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete.* **Jiang, Linhua, Lin, Baoyu and Cai, Yuebo.** 2000, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 699-702.
88. *Experimental study and calculation formula of carbonation depth, Concrete (in Chinese).* **Jiang, L.X., et al.** 1996, Vol. 4, pp. 12-17.
89. *Depth profiles of Carbonates formed during natural carbonation.* **Houst, Yves F. and Wittmann, Folker H.** 2002, Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1923-1930.
90. **Kropp, J.** Relations between transport characteristics and durability. [book auth.] J. Kropp and H. K. Hilsdorf. *Performance Criteria for Concrete Durability.* London: E & F Spon, 1995, pp. 97-137.
91. *Concrete carbination test in natural and accelerated conditions.* **Sanjuán, M. A., Andrade, C. and Cheyrezy, M.** 4, October 2003, Advances in Cement Research, Vol. 15, pp. 171-180.
92. *Design for avoiding damage due to carbonation included corrosion.* **Parrot, L. J.** [ed.] Malhotra. Nice: CANMET, 1994. International Congress on Durability of Concrete. pp. 283-298.
93. *Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion.* **Jung, Woo-Yong, Yoob, Young-Soo and Sohn, Young-Moo.** 2003, Cement and concrete Research, Vol. 33, pp. 663-677.
94. **Diamond, B. S. and Berke, N. S.** *Steel corrosion in concrete.* E&FN SPON, 1997. p. 48 y 158.
95. **CEB.** *New approach to durability design - an example for carbonation induced corrosion.* Comité Euro-International du Béton . Lausanne: Schiessi P., 1997.
96. *A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation.* **Roziere, Emmanuel, Loukili, Ahmed and Cussigh, Francois.** 2009, Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 190-199.
97. *A model for predicting the carbonation depth of concrete containinf low-calcium fly ash.* **Wang, Xiao-Yong and Lee, Han-Seung.** 2009, Construction and Building Materials , Vol. 23, pp. 725-733.

98. *Cromprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate.* **Conciatori, David, Laferriere, Francine and Brühwiler, Eugen.** 2010, Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 109-118.
99. *Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-base methodologies.* **Marques, P.F. and Costa, A.** 2010, Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 258-265.
100. **LNEC E465.** *Concrete Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS.* Lisbon: LNEC, 2007.
101. *Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated test to natural carbonation.* **Hyvert, N., et al.** 2010, Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 1582-1589.
102. *Climate Change impact and risks of concrete infrastructure deterioration.* **Stewart, Mark G., Wang, Xiaoming and Nguyen, Minh N.** 2011, Engineering Structures, Vol. 33, pp. 1326-1337.
103. *Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures.* **Monteiro, I., et al.** 2012, Construction and Building Materials, Vol. 29, pp. 263-269.
104. *The new LNEC specifications on reinforced concrete durability.* **Goncalves, AF., Ribeiro, AB. and Ferrerira, ME.** [ed.] Guimaraes. 2007. International RILEM workshop on integrated service life modelling of concrete structures. pp. 131-139.
105. *20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results.* **Vuille, M., et al.** 2003, Clim Change, Vol. 59, pp. 75-99.
106. *Carbonation of surface protected concrete.* **Aguiar, José B. and Júnior, Cristela.** 2013, Construction and Building Materials, Vol. 49, pp. 478-483.
107. *Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with Portland and Blended cements.* **Marques, Pedro Faustino, Chastre, Carlos and Nunes, Angela.** 2013, Cement & Concrete Composites, Vol. 37, pp. 171-184.
108. *Comparison of carbonation depths measured on in-field exposed existing r. c. structures with predictions made using fib-Model Code 2010.* **Guiglia, Matteo and Taliano, Maurizio.** 2013, Cement & Concrete Composites, Vol. 38, pp. 92-108.

109. *Software para el cálculo de la velocidad de deterioro de los hormigones sometidos a carbonatación.* **Roa-Rodriguez , G., Aperador, W and Vera, Rosa.** 1, 2014, Rev. LatinAm. Metal. Mat., Vol. 34, pp. 45-54.
110. *Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying.* **Younsi, A., et al.** 2013, Cement and Concrete Research, Vol. 43, pp. 25-33.
111. *Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing Climate.* **Köliö, Arto, et al.** 2014, Engineering Structures, Vols. 62-63, pp. 42-52.
112. *Computer-aided modeling of concrete service life.* **Demis, Sotiris, Efstathiou, Maria P. and Papadakis, Vagelis G.** 2014, Cement & Concrete Composites, Vol. 47, pp. 9-18.
113. *Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures.* **Duprat, Frédéric, Tru Vu, Ngoc and Sellier, Alain.** 2014, Construction and building Materials, Vol. 66, pp. 597-605.
114. *Carbonation and CO₂ uptake of concrete.* **Yang, Keun-Hyeok, Seo, Eun-A and Tae, Sung-Ho.** 2014, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 46, pp. 43-52.
115. *Urban scale mapping of concrete degradation from projected climate change.* **Saha, Mithun and Eckelman, Matthew J.** 2014, Urban Climate, Vol. 9, pp. 101-104.
116. *Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation.* **Salvoldi, B. G., Beushausen, H. and Alexander, M. G.** 2015, Construction and Building Materials, Vol. 85, pp. 30-37.
117. *Statistical analysis of the carbonation rate of concrete.* **Hills, Thomas P., et al.** 2015, Cement and Concrete Research, Vol. 72, pp. 98-107.
118. **López Celis, Raquel, et al.** *Durabilidad de la Infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos II.* Instituto Mexicano del transporte, Publicación técnica No. 292, 2006. pp. 3 - 14.
119. **Castro-Borges, P.** *Difusión y Corrosión por iones Cloruro en el Concreto Reforzado.* México: Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 1995. p. 169.
120. *Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy.* **Lo, Y and Lee, H. M.** 2002, Building and Environment, Vol. 37, pp. 507-514.

121. *The influence of mix parameters and binder choice on the carbonation of cement solidified wastes.* **Lange, L. C., Hills, A. B. and Poole, A. B.** 1996, Vol. 16, pp. 749-756.
122. *A theoretical analysis of the shape of polarization curves.* **Stern, M. and Geary, AI.** 1956, J Elect Soc, p. 104 (1);56.
123. *Techniques electrochimiques qualitatives et quantitatives pour mesurer les effets des additions sur la corrosion des armatures. Silic Ind.* **Andrade, C. and González, J A.** 1982;47, pp. 289-95.
124. *Anodic behaviour of iron in acid solution.* **Stern, M. and Roth, RM.** 1957, J Electrochem Soc, pp. 104 (6): 390-2.
125. *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on site.* **Andrade, C. and Alonso, C.** 1996, 10 (5): 315-28, Constr Build Mater.
126. *Corrosion rate of steel embedded in blended Portland and fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) cement mortars.* **Zornoza, E., Garcés, P. and Payá, J.** 58,292, 2008, Materiales de construcción, pp. 27-43.
127. *The carbonation of OPC mortars partially substituted with spent fluid catalytic catalyst (FC3R) and its influence on their mechanical properties.* **Zornoza, E., et al.** 2009, Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1323-1328.
128. —. **Zornoza, E., et al.** Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1323-1328.
129. *Effect of sewage sludge ash (SSA) on the mechanical performance and corrosion levels of reinforced Portland cements mortars.* **Garcés, P., et al.** 2006, Materiales de construcción, Vol. 56, pp. 31-43.
130. *Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion.* **Koulombi, N., Batis, G. and Malami, CH.** [ed.] UK.: The Institute of Materials. Costa JM, Mercer AD editors, 1993, p. 619.
131. *Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides.* **Montemor, M. F., et al.** 2002, Cement & Concrete Composites, Vol. 24, pp. 45-53.
132. *Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview.* **Shi, X. and y otros.** 2011, Construction and building Materials, Vol. 30, pp. 125-138.

133. *Aplicación de Campos Eléctricos para la Caracterización de Hormigones en relación con el Transporte de Iones Cloruro*. **M., Castellote Marta**. [ed.] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
134. *Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Part 2 - Canadian urban simulations*. **Talukdar, S., et al.** 2012, Cement & Concrete Composites, Vol. 34, pp. 931 - 935.
135. **Askeland, Donald R.** *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. 3er edición. International Thomson Editores, 1998. ISBN 968-7529-36-9.
136. **Ospina Noreña, Jesús E., Gay García, Carlos and Conde Álvarez, Ana C.** *Historia del Clima de la Cd. de México: Efectos observados y Perspectivas*. 2014.
137. *Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry*. **Kada-Benameur, H., Wirquin, E. and Duthoit, B.** Cem. Concr. Res., Vol. 30, pp. 301-305.
138. **Fib. Model code for service life design**. Bulletin 34, Lausanne, february, 2006.