

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



“Dominio de efectividad de la prevención no convencional de la
corrosión en concreto reforzado carbonatado”

Como requisito para la obtención del grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN

Por:

ING. LUIS ANGEL VILLEDA WONG

Director de tesis:

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel

Co-director:

Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez

OCTUBRE 2011



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Oficio SDEPI-370-2011

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de
Archivo de la UANL
Presente.-

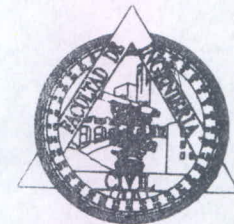
Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el **Ing. Luis Ángel Villeda Wong**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución.

De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,
"ALERE FLAMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria a 10 de octubre del 2011.



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

C.c.p. Archivo.
Rtp.



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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

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

Estimado Dr. Valdez,

En relación a su oficio en el que me informa que fui designado DIRECTOR DE LA TESIS "DOMINIO DE EFECTIVIDAD DE LA PREVENCIÓN NO CONVENCIONAL DE LA CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO CARBONATADO", que presenta el **Ing. LUIS ANGEL VILLEDA WONG**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis dictamino que la misma es **APROBADA**.

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

Atentamente

"ALERE FLAMMAN VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. 7 de octubre de 2011.

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
DIRECTOR DE LA TESIS



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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por este conducto se **APRUEBA** la tesis “**Dominio de efectividad de la prevención no convencional de la corrosión en concreto reforzado carbonatado**”, que presenta el **Ing. Luis Angel Villeda Wong**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, lo anterior después de ver leído, evaluado y constatado la calidad y los cambios sugeridos a la tesis.

Se extiende la presente para los fines que al interesado convengan.

ATENTAMENTE

“ALERE FLAMMAM VERITATIS”

Cd. Universitaria, a 30 de septiembre de 2011

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Evaluador de Tesis



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



Concretos Apasco, S.A. de C.V.

Av. Lázaro Cárdenas 2321 Pte.
Edificio Alestra, Residencial San Agustín
Garza García, Nuevo León 66260

Tel. (81) 8318.3200 Fax: (81) 8318.3217
www.holcimapasco.com.mx

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Valdez:

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis "**Dominio de efectividad de la prevención no convencional de la corrosión en concreto reforzado carbonatado**", que presenta el **Ing. Luis Angel Villeda Wong**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, le comunico que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA.**

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

ATENTAMENTE

San Nicolás de los Garza, a 30 de septiembre de 2011

MC ARSENIÓ GONZÁLEZ LOZANO
Evaluador de Tesis de Maestría

Agradecimientos

Agradezco a las personas quienes contribuyeron a dar forma a este trabajo, así como a las instituciones que me brindaron apoyo para realizar mis estudios de maestría y en la elaboración de este escrito.

De manera especial agradezco al Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel y al Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez, quienes aceptaron gentilmente dirigir la presente tesis y por sus apreciables comentarios para la versión final.

Agradezco al Ing. Arsenio González quien accedió como evaluador externo y contribuyó en la presente tesis por sus comentarios acertados en la versión final.

Se agradecen los apoyos recibidos para el desarrollo de esta tesis por parte del CONACYT a través del fondo Ciencia Básica otorgados al proyecto CB-2007/82464. De igual forma, se agradece la beca otorgada durante 24 meses a un servidor por parte de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL.

Al Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción y al Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil “Dr. Raymundo Rivera Villarreal” de la U.A.N.L., por toda su ayuda y apoyo, así como a los técnicos y personal administrativo por todas las facilidades brindadas para el uso de equipo e instalaciones.

A todos los amigos, compañeros y personas que ayudaron y contribuyeron en forma directa o indirecta en este proyecto.

Armando, Bonifacio, Ernesto, Eva, Jacques, Jesús, Karen, Omar, Raúl, Rafael y a los estudiantes de verano de investigación que contribuyeron con el mismo.

A mis padres y tíos por su apoyo incondicional.

A mi esposa e hija por estar conmigo.

Dedicatoria

A mi esposa Narda

Que con su apoyo constante y amor, ha sabido corregir mis errores y aplaudir mis virtudes.

A ella todo mi amor no por hoy, no por mañana, sino por siempre.

A mi hija Constanza

Aún cuando llevas unos meses de vida al escribir estas líneas, que esto sea para ella un ejemplo y orgullo en el futuro.

Espero tener la suficiente sabiduría para enseñarle el camino.

A mis padres Adoración y José Luis

Si dudaron en algún momento de la culminación de este trabajo, que bueno que se equivocaron.

En sí mismo, este resulta ser una demostración irrevocable de voluntad, empeño, cualidades que se obtienen por la educación y ejemplo familiar.

Gracias les doy, ya por ello he logrado mis objetivos.

A mis hermanas Adoración y Oyuky

Todo mi respeto y gratitud

A todos familiares y amistades que de una forma u otra, me ayudaron en la elaboración del presente trabajo.

Con especial agradecimiento a la familia Ochoa Wong que gracias a su paciencia y apoyo han sido factor importante en la terminación del mismo.

Índice de Figuras

Nombre de la figura

Figura 1. Canoas de concreto reforzado elaboradas por Joseph Monier.	18
Figura 2. Presa “Las Tres Gargantas” en China, fabricada de concreto reforzado.	20
Figura 3. Producción mundial aproximada de cemento.	22
Figura 4. Vista aérea de una planta cementera (Mehta et al, 2004).	23
Figura 5. Puente Confederación, Canadá.	27
Figura 6. Presa Hoover, E.U.	28
Figura 7. Puente peatonal en Sherbrooke, Quebec.	29
Figura 8. Corrosión del acero de refuerzo.	30
Figura 9. Costos de la corrosión en el sector Industrial en los E. U.	32
Figura 10. Distribución de puentes por tipo de material.	33
Figura 11. Proceso natural de un metal.	34
Figura 12. Formación de la pila de corrosión en el concreto reforzado en ambientes alcalinos (Borges, 2001).	37
Figura 13. Diagrama de equilibrio de Pourbaix: a) resumido para el fierro con agua y b) diagrama de regiones de acuerdo a su conducta de corrosión.	38
Figura 14. Principales componentes de la corrosión.	39
Figura 15. Grado de carbonatación del concreto frente a la humedad relativa.	43
Figura 16. Distintas condiciones de humedad en la matriz de concreto.	44
Figura 17. Representación de los poros (Del Valle et al, 2001).	45
Figura 18. Corrosión uniforme de un acero de refuerzo como resultado de la carbonatación del concreto.	46
Figura 19. Principio de la protección catódica con corriente impresa.	51

Índice de Figuras

Figura 20. Aplicabilidad, ventajas e inconvenientes de los métodos de protección directa.	51
Figura 21. Esquema del sistema de realcalinización electroquímica.	55
Figura 22. Esquema de protección indirecta.	55
Figura 23. Reacciones teóricas de la realcalinización electroquímica.	60
Figura 24. Evolución del pH en el concreto en función de la carga aplicada a nivel del acero (González, 2010).	63 67
Figura 25. Adaptación del modelo de la vida útil de Tuutti.	69
Figura 26. Arreglo de la varilla experimental.	75
Figura 27. Aspecto de las varillas posterior al proceso de preparación.	76
Figura 28. Espesores de recubrimiento de concreto contemplados en diferentes normas internacionales.	77
Figura 29. Configuración esquemática de los especímenes.	78
Figura 30. Variación de resistencias típicas para relaciones agua-cemento de concreto de cemento portland basadas en más de 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999.	79
Figura 31. Medición de la temperatura en estado fresco.	80
Figura 32. Medición del revenimiento.	781
Figura 33. Enrase de la muestra de concreto para la determinación de la masa unitaria.	81
Figura 34. Determinación del contenido de aire por el método de presión.	82
Figura 35. Habilitación de moldes de acero.	83
Figura 36. Desmolde de los especímenes.	83
Figura 37. Prueba de resistencia a compresión.	84

Índice de Figuras

Figura 38. Cámara ambiental para acelerar el proceso de carbonatación.	85
Figura 39. Aspecto de un concreto después de la aplicación de fenolftaleína.	87
Figura 40. Equipo de medición de pH en muestras de concreto pulverizado.	89
Figura 41. Esquema de montaje clásico de la celda de realcalinización.	91
Figura 42. Tablero de control.	91
Figura 43. Relación aproximada entre la resistencia a la compresión y relación agua-material cementante. La resistencia se basa en cilindros curados durante 28 días en ambiente húmedo, de acuerdo con la ASTM C 33 (AASHTO T 23). Adaptado de la tabla 9-3 del ACI 211.1, ACI 211.3 y Hover 1995.	98
Figura 44. Contenedores de carbonato de potasio.	99
Figura 45. Espesor de recubrimiento carbonatado en función de las semanas de exposición (extraída del trabajo de Kobayashi).	102
Figura 46. Carbonatación de especímenes evidenciada por la prueba de la fenolftaleína.	103
Figura 47. Disminución de la alcalinidad por el efecto de la carbonatación en los especímenes E2-P y E2-T.	104
Figura 48. Disminución de pH por la carbonatación especímenes E4-P y E4-T.	105
Figura 49. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la E2PDC2.0. realcalinización, especímenes E2-PDC0.0, E2-PDC1.0 (González, 2010) y E2-PDC2.0.	108
Figura 50. Evolución de los electrolitos en los especímenes E2-PDC0.0, E2-PDC1.0 (González, 2010) y E2PDC2.0.	109
Figura 51. Aspecto de los cortes frescos en los especímenes E2-PDC0.0,	111

Índice de Figuras

E2PDC2.0 y (4 días) (González, 2010) posterior a la aplicación de la fenolftaleína.	
Figura 52. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la realcalinización, especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC1.0 (González, 2010) y E2-TDC2.0.	113
Figura 53. Evolución de los electrolitos en los especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC1.0 (González, 2010) y E2-TDC2.0.	114
Figura 54. Aplicación de fenolftaleína en los especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC2.0 y E2-TDC1.0 (González, 2010).	115
Figura 55. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la realcalinización, especímenes E4-PDC0.0, E4-PDC1.0 y E4PPDC2.0 en sus cuatro zonas.	117
Figura 56. Evolución del electrolito realcalinizador para las series de E4-P.	118
Figura 57. Aplicación de fenolftaleína en los especímenes E4-PDC0.0, E4-PDC1.0 y E4-PDC2.0.	119
Figura 58. Núcleos de especímenes E4-T.	120
Figura 59. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la realcalinización, especímenes E4-TDC0.0, E4-TDC1.0 y E4TPDC2.0 en sus cuatro zonas.	122
Figura 60. Aplicación de fenolftaleína en los especímenes E4-TDC0.0, E4-TDC1.0 y E4-TDC2.0.	124
Figura 61. Progreso del pH en el concreto en función de la carga aplicada a nivel del acero.	126

Índice de Tablas

Nombre de la tabla.

Tabla 1. Reporte de daños en puentes de la Red Federal de Carreteras.	32
Tabla 2. Granulometría del agregado fino.	74
Tabla 3. Características físicas del agregado fino.	74
Tabla 4. Granulometría del agregado grueso.	75
Tabla 5. Características físicas del agregado grueso.	75
Tabla 6. Proporcionamiento de la mezcla de concreto.	80
Tabla 7. Componentes químicos del cemento utilizado.	95
Tabla 8. Pruebas en estado fresco.	96
Tabla 9. Resultados de resistencia a compresión.	97
Tabla 10. Evolución de la carbonatación a los 21 y 45 días de los especímenes E2.	100
Tabla 11. Evolución de la carbonatación a los 60 y 120 días de los especímenes E4.	101
Tabla 12. Avances de carbonatación de los especímenes E2-PDC0.0, E2-PDC1.0 (González, 2010) y E2-PDC2.0, antes de la aplicación de la REA.	107
Tabla 13. Avances de carbonatación de los especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC1.0 (González, 2010) y E2-TDC2.0, antes de la aplicación de la REA.	112
Tabla 14. Valores de pH en la zona intermedia para los especímenes E2-T.	113
Tabla 15. Alcalinidad del concreto (pH) a diferentes profundidades en los especímenes E4-P.	116
Tabla 16. Alcalinidad del concreto (pH) antes de la aplicación de la REA en los especímenes E4-T.	120

Introducción

El gran desarrollo en la industria de la construcción en las últimas décadas se ha basado en el uso del concreto reforzado. Debido a sus ventajas de durabilidad y rentabilidad, este se ha convertido en el principal material en el sector de la construcción, siendo utilizado en cualquier infraestructura en cualquier parte del mundo.

Hasta hace poco tiempo, se consideraba que un concreto reforzado bien elaborado podría tener una larga vida útil. Ahora bien, tanto la experiencia como las investigaciones llevadas a cabo indican diferentes agresiones de tipo físico o químico que deterioran al mismo sin importar lo bien diseñado que estuviera el concreto.

El principal problema del concreto reforzado es la corrosión del acero de refuerzo embebido, este daño influye en la durabilidad de las estructuras siendo causa de costosas pérdidas en reparaciones y mantenimiento de la funcionalidad y seguridad de las mismas. El acero embebido en el concreto está protegido por el segundo, representando una barrera física y también por una capa protectora de óxidos que lo recubre permanentemente, protegiéndolo por tiempo indefinido. La corrosión se inicia cuando penetran al concreto los agentes externos y logran romper esta capa de protección. La manifestación de la corrosión puede ser principalmente por cloruros o por carbonatación, ambos casos tienden a destruir la capa pasiva. Siendo este último el objeto del presente estudio.

La carbonatación produce la pérdida de pH en la fase intersticial del concreto. La alcalinidad debida a los hidróxidos es generada por la acción de la hidratación del cemento y éstos son consumidos de forma progresiva a medida que son transformados por el dióxido de carbono (CO_2) en carbonato de calcio (CaCO_3) hasta penetrar en las inmediaciones del acero de refuerzo. Este ambiente ácido en el acero, provoca micropilas de corrosión induciendo la destrucción de la capa pasiva, además de la producción de un óxido de hierro que es expansivo. Estas expansiones generan agrietamientos en el recubrimiento aumentando el frente expuesto, y si nada se hace para prevenirlos, el acero disminuye su sección, perdiendo su capacidad de refuerzo y pudiendo ocasionar un colapso en la estructura. Por ello, es importante llevar al cabo una evaluación de la estructura que permita obtener información acerca de la duración del periodo de iniciación por efecto de la carbonatación, conocer los mecanismos y la

Introducción

velocidad de ésta en el concreto para evitar llegar a un estado de degradación del acero, pero sobre todo, tener la oportunidad de realizar una intervención oportuna en la estructura.

Hay pocos métodos de reparación de estructuras deterioradas por carbonatación. Los tradicionales consisten en la eliminación del concreto contaminado, limpieza del refuerzo, y posteriormente reposición del concreto eliminado y eventualmente la sustitución del acero de refuerzo. Sin embargo, esta técnica tiene muchos inconvenientes tales como: la realización de trabajos muy laboriosos, ruido, suciedad, además del alto costo en reparación, entre otros.

Una solución alternativa, si el concreto está carbonatado, pero la corrosión se encuentra en estado incipiente, es la técnica de *Realcalinización Electroquímica*. Unas de las ventajas de su uso sería la poca o nula utilización de materiales de construcción, ya que esto constituye en una práctica sustentable, contrario al caso de las técnicas convencionales, además que restablece la alcalinidad del concreto que da protección a la capa pasiva del acero.

El presente trabajo afronta el estudio de la realcalinización electroquímica enfocándose en la etapa de iniciación de la corrosión por carbonatación en estructuras. Como parte de la investigación, se presentan dos casos para estructuras de concreto con dos espesores de recubrimiento. En el primer caso, cuando el frente de carbonatación no ha llegado al acero de refuerzo y en el segundo cuando el concreto se encuentra totalmente carbonatado, pero sin un grado significativo de corrosión del acero.

En el primer Capítulo se realiza una revisión documental de las generalidades sobre concreto y la durabilidad de las estructuras de concreto reforzadas. Se complementa la información con fundamentos básicos sobre la corrosión y en específico se afronta el caso del mecanismo de corrosión provocado por carbonatación. Por último, se hace una revisión de las técnicas utilizadas para prevención y rehabilitación para el caso de estructuras carbonatadas.

Al abordar el Capítulo dos, se presenta una investigación bibliográfica de los antecedentes de la realcalinización, información basada en los diversos parámetros de la

Introducción

técnica y de la estructura. Se puntualiza su funcionalidad y los mecanismos de incremento de pH, además de justificar el porque de la realización de este trabajo, los objetivos y metas son igualmente presentados hacia la parte final. Como hipótesis de trabajo se propone el cómo relacionar los parámetros representativos de una estructura en proceso de carbonatación con las medidas de aplicación de la realcalinización, todo esto con el fin de obtener las condiciones que propicien una extensión de la vida útil de la estructura. La prueba de la hipótesis será llevada a cabo mediante el seguimiento de las medidas propuestas en especímenes de concreto reforzado.

El Capítulo tres está dedicado a la metodología experimental para la elaboración de los especímenes utilizados en la etapa de carbonatación y el tratamiento de la técnica. En la primera parte, se presentan la elección de los materiales y de los especímenes de concreto con dos espesores de recubrimiento como variable de estudio para asociarlo con estructuras reales, agregando a esto, la inducción de la carbonatación a un grado parcial y otro total de su recubrimiento. Posteriormente, se describe la aplicación de la técnica de realcalinización. Al final del capítulo se presenta como una variable de la técnica la densidad de corriente aplicada, esto como parámetro relativo de la técnica electroquímica.

En el Capítulo cuatro se presentan el análisis y discusión de resultados en cuanto a los parámetros utilizados. La primera parte se centra en la caracterización y posteriormente a la carbonatación del concreto utilizado. Después se analiza la eficiencia sobre la realcalinización de un concreto parcial y totalmente carbonatado con un espesor de recubrimiento y subsecuentemente con otro. Se discute y compara sobre la recuperación alcalina lograda con diversas densidades de corriente en ambos concretos carbonatados, además, de la evolución del electrolito realcalinizador en cuanto a su pH.

En el quinto y último capítulo se presentan las conclusiones derivadas de la investigación y algunas recomendaciones para trabajos futuros. Se concluye principalmente sobre la efectividad de la realcalinización con los parámetros establecidos. En la primera parte se presenta lo concluyente sobre la carbonatación parcial y total de los especímenes de concreto, obteniendo una constante promedio de $60 \text{ mm/año}^{1/2}$ para una carbonatación acelerada con una concentración al 20% de CO_2 .

Introducción

En cuanto a la técnica se presenta lo concluyente en cuanto a la efectividad contra los parámetros usados (grado de carbonatación, recubrimiento, densidad de corriente). Obteniendo en general que para el concreto utilizado en esta investigación, después de ser carbonatado y posteriormente realcalinizado, se presenta una mejora significativa en su alcalinidad principalmente aquellos realcalinizados con una densidad de corriente de 2.0 A/m².

CAPÍTULO 1

Generalidades y fundamentos

CAPÍTULO 1.- GENERALIDADES

1.1 EL CONCRETO Y EL ACERO

En la actualidad, el concreto reforzado es el material más utilizado en la industria de la construcción, lo anterior debido principalmente a su versatilidad. Puede ser fácilmente moldeado, diseñado, puede tener diversas variedades dimensionales, texturas, estilos, etc. Otra característica importante del concreto, es que con sus proporciones adecuadas, puede llegar a presentar una larga vida de servicio, protegiendo así al refuerzo embebido dentro de éste.

La principal característica estructural del concreto, es que es muy resistente a los esfuerzos de compresión, no obstante, es muy débil a los de tensión, tracción cortante, etc., por tal motivo, se recurre al acero. La combinación de estos materiales es llamado concreto reforzado, el cual se comporta muy favorablemente debido a sus propiedades en conjunto y mejorando la vida de servicio de la estructura

1.1.1 RESEÑA DEL CONCRETO

El concreto se ha empleado desde tiempos remotos, teniendo indicios de su utilización desde la era neolítica, al encontrarse los primeros concretos en un piso de aproximadamente de 7000 años de edad (Malinowski y Garfinkel, 1991). En Europa, de acuerdo con la prueba del carbono 14, el primer uso del concreto fue encontrado en Lepenski Vir cerca del río Danubio, en un piso de 250 mm de espesor y que fue construido en los años 5600 a. C. (Thornton, 1996).

Se piensa que el interior de las pirámides de Egipto estaba constituido por bloques de concreto y el exterior con bloques de caliza. Este concreto hecho por los egipcios fue elaborado con un cementante llamado geopolímero, obtenido de la mezcla de sedimentos del río Nilo, polvos de piedra caliza y residuos crisócolas de una mina de turquesa en la Montaña Sinaí (Davidovits, 1987).

Sin embargo, los romanos fueron los que en la antigüedad desarrollaron la utilización del concreto en todo tipo de aplicaciones. Pero después de la caída de su imperio bajo los ataques bárbaros, fue necesario esperar hasta el final del siglo XVIII y principios del XIX para tener un poco de interés por los cementantes hidráulicos y por el concreto, siendo patentado por Joseph Aspdín (albañil inglés), quien lo patentó con el nombre de cemento portland (Blezard, 1998). Sin embargo, después de la creación del cemento Portland y hasta a mediados del siglo XIX, fueron escasos los datos sobre el uso del concreto reforzado.

En el año de 1832 se realizó el primer intento de usar refuerzo a tracción en concreto o mampostería. Durante la construcción de un túnel bajo el río Támesis en Londres, Sir Marc Brunel construyó un arco experimental de ladrillo y cemento, usando tiras de anillos de hierro y de madera como refuerzo.

Aunque Lambot en Francia construyó un bote de remos de concreto reforzado en 1850, la invención del concreto reforzado usualmente se le atribuye a un jardinero parisino, Joseph Monier, quien en 1860 construyó macetas y canoas de concreto y los reforzó con una malla de alambre de hierro como se muestra en la Figura 1. (FICEM, 2008).

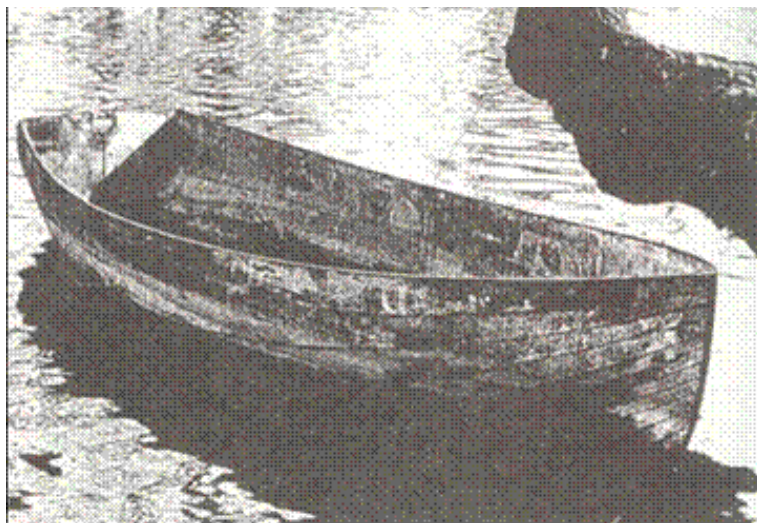


Figura 1. Canoas de concreto reforzado elaboradas por Joseph Monier.

1.1.2 SU FUTURO

Pensando en que pasará en un futuro con el concreto, éste, cada vez se optimizará en su diseño, preparación, aplicación, etc., en búsqueda del ahorro en la economía y el aumento de la sustentabilidad, ya que, en épocas actuales la contaminación ambiental y la recesión económica son temas importantes. El proceso total de la elaboración de un concreto será más simple y efectivo desde la elaboración del cemento, la trituración de los agregados, uso de los materiales suplementarios, etc., como resultado de la necesidad de disminuir la cantidad de energía y de CO₂. Los procesos incluirán mejoras en la producción, entrega y mejoras en el control de calidad del concreto.

La necesidad del uso de nuevas materias primas por parte de los productores será una presión importante. Se emplearán nuevas tecnologías para ajustar las variaciones de las materias primas sin disminuir el equilibrio del proceso de construcción. El uso de la ingeniería robótica acelerará la construcción optimizando al de igual forma el alcance, tiempo y costo en la industria de la construcción. Dentro de 50 años el concreto será diferente al de la actualidad (Torres, 2007).

Sin embargo, no solo la creación de las estructuras evolucionará, también los medios de reparación. Estos forzosamente deberán evolucionar a la par, deberán cambiar con el tiempo para sustituir las técnicas de reparación convencionales. Es el caso de algunas que ya se están abriendo paso para ser aplicadas o mejoradas, y con esto, contribuir a un aumento de la vida de servicio de las estructuras.

Estos avances advertirán una era donde la durabilidad del concreto será una de las prioridades, permitiendo una ventaja competitiva para él mismo y otros materiales. Con el uso de los aditivos, subproductos, concretos reciclados, tecnologías para controlar los desechos de concreto, etc., la industria de la construcción crecerá para bien del planeta, fortaleciendo con la era de los concretos verdes, que hoy en día empiezan a vislumbrarse.

1.1.3 SU APLICACIÓN

El concreto tiene una gran diversidad de aplicaciones en la construcción de la infraestructura de cualquier región, tales como: autopistas, carreteras, calles, banquetas, estacionamientos, puentes, túneles, presas, muros de contención, pistas de aterrizaje, sistemas de riego, sistemas de canalización, silos, bodegas, edificios, casas, rompeolas, embarcaderos, muelles e incluso barcos y construcciones submarinas, etc. Otras características de este material son su bajo costo y su relativa larga duración. Una de sus grandes ventajas radica en que existe un abastecimiento ilimitado de sus materias primas para su elaboración. Por lo tanto, su aprovechamiento de materiales locales, su versatilidad, universalidad y adaptabilidad, hace que se pueda optimizar fácilmente y obtener un bajo costo debido a su producción.

En la Figura 2, se presenta una imagen de la presa más grande del mundo ubicada en China (las “Tres Gargantas”) construida principalmente de concreto reforzado con una altura de 185 metros y 2.3 km de longitud.



Figura 2. Presa “Las Tres Gargantas” en China fabricada de concreto reforzado.

Como se ha explicado, desde hace mucho tiempo se ha utilizado el concreto reforzado, por su versatilidad, economía, facilidad de fabricación, etc., es por eso que sigue siendo y será el material común más utilizado en la industria de la construcción en el mundo. Sin embargo, es importante mencionar la forma en que impacta en el mundo, ya sea, en beneficio o en contra de la sociedad.

1.1.4 IMPACTO ECONÓMICO

Tiene mayor relevancia el impacto económico en las plantas productoras de cemento que en las de concretos, pero igualmente impactan en cualquier lugar de forma:

- directa, en sus trabajadores, los sueldos y prestaciones, compra de bienes y servicios, pago de impuestos, dividendos para sus accionistas y otros proveedores de capital, así como en el valor de los productos que venden a sus clientes;
- indirecta, el impacto económico se multiplica: compras e inversiones de su personal, contratistas y proveedores; empleos creados por los clientes en la industria de la construcción; la transferencia de conocimiento y tecnología entre regiones geográficas del mundo; el incremento en eficiencia, reducción de desperdicios por algunas prácticas de ecología industrial y beneficios otorgados a la comunidad por las actividades relacionadas con la construcción de proyectos de infraestructura que utilizan los productos.

Las plantas cementeras han avanzado en su producción en una forma exponencial debido al crecimiento de la población y de la infraestructura de la mayoría de los países. En la Figura 3 es representada, la producción aproximada de concreto en el mundo (U.S. Geological Survey, 2009).

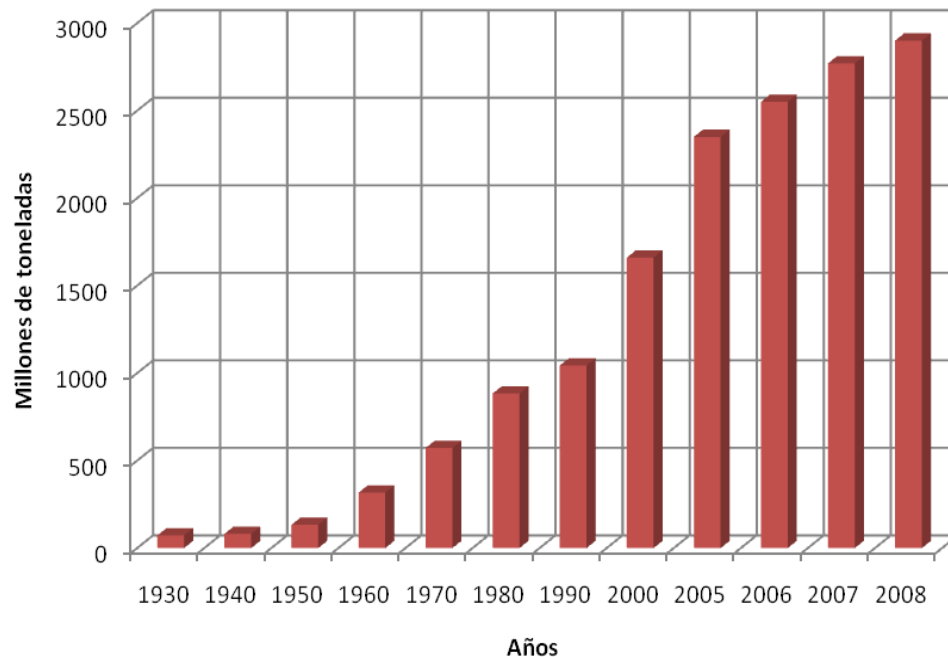


Figura 3. Producción mundial aproximada de cemento.

Conforme a la CANACEM (Cámara Nacional del Cemento), México tuvo en el 2008, una producción total de sus 32 plantas cementeras de 37.1 millones de toneladas de cemento, con un consumo 35.1 millones a nivel nacional, dando como resultado un consumo de 329 kg por habitante. Por lo tanto, si utilizamos en promedio 250 kg de cemento por 1 m^3 de concreto, México produjo aproximadamente 106.687 millones de toneladas de concreto.

1.1.5 IMPACTO AMBIENTAL

Debido a la gran cantidad de combustible utilizado en la fabricación y la liberación de dióxido de carbono de las materias primas como la caliza, la producción de cemento también genera emisiones de carbono como cualquier otro proceso industrial. Las plantas cementeras producen el 7% de emisiones de CO_2 global que hay en el mundo y aproximadamente el 55% es producido por la quema de la caliza y el otro 45% es producido por los combustibles para alcanzar cerca de 1400 a 1550°C necesarios para el proceso. (Pade y Guimaraes, 2007).



Figura 4. Vista aérea de una planta cementera (Mehta et al, 2004).

Según la OECD y la IEA (Organisation for Economic Co-operation and Development e International Energy Agency, respectivamente), la energía primaria que produce una planta de cemento por tonelada es de de 3.4 a 5.3 GJ (GJ/T) con una media aproximada de 4.4 GJ, por lo tanto, se necesita aproximadamente 2.5 a 3 EJ por año, el cual es el 28 al 33% del uso de energía total en el sector industrial en el mundo.

Las grandes cantidades de extracción de materias primas tales como caliza y arcilla, y el combustible como el carbón, a menudo resultan en una deforestación extensiva y pérdida de suelo superficial.

El concreto comúnmente está compuesto por un 60 a 70% de agregados en masa. Esto significa que para hacer el concreto, se está consumiendo arena y grava (la mayoría de las veces proveniente de roca triturada) a una velocidad de 2.030 billones de toneladas por año en el mundo. Las operaciones de extracción, procesado, y transporte que involucran tales cantidades de agregados consumen a su vez, cuotas considerables de energía, y afectan la ecología en las áreas forestadas y lechos de los ríos. Así mismo, se

utilizan grandes volúmenes de agua de mezclado. La industria concretera utiliza agua para el lavado y el curado del concreto, hoy en día no se tiene una estimación global del consumo.

Además de los tres componentes primarios del concreto (cemento, agregados y agua), se incorporan numerosos aditivos químicos y minerales a las mezclas de concreto. Ellos también representan considerables adiciones de energía y materiales en el producto final.

El mezclado, transporte, colocación, consolidación, terminación, etc., al emplear combustibles principalmente fósiles o no renovables durante sus procesos, representan cantidades importantes de energía.

Finalmente, como un punto importante, la construcción de estructuras que al poco tiempo presentan deterioros debido a los agentes externos o a la tecnología del concreto mal empleada traen consigo uno de los mayores problemas, la pérdida de durabilidad de los elementos de concreto reforzado (Mehta y Burrows, 2001). Las estructuras ciertamente, son diseñadas aproximadamente para 50 años de vida útil, pero en la actualidad, muchas de ellas presentan daños a los 20 o 30 años de construidas. Es por eso que, el incremento de la durabilidad de las estructuras, es una solución viable en la preservación de los recursos naturales.

1.1.6 ENFOQUE SUSTENTABLE

Hay muchas formas de conseguir una perspectiva sustentable, primordialmente por la industria de la construcción que emplea el concreto. Por mencionar algunas, y la más importante de hecho, la reducción en el consumo de cemento, por la disminución de energía y emisiones de CO₂ que causa el efecto invernadero. Principalmente, en la creación de cementos portland compuestos que contienen adiciones minerales, eliminando así la necesidad de una mayor producción de clinker para obtener cemento.

Además, el uso de cementos compuestos mejora sustancialmente la durabilidad de un concreto, contribuyendo en cierta forma en la conservación de las materias primas y energía. Preferentemente donde la productividad laboral es primordial, las velocidades de fraguado o de endurecido del concreto con contenidos altos de adiciones minerales se pueden controlar con la ayuda de los aditivos superplastificantes. Sin embargo, en los programas de construcción donde la optimización de los recursos es importante, debe ser aceptable el uso de las adiciones minerales.

Otra forma de obtener un concreto sustentable es en la elaboración de concretos reciclados, obtenidos de la demolición de estructuras. También puede ser usado como concreto ciclópeo¹ o donde el concreto no requiera ser muy especializado. Igualmente, el uso de arenas finas que son subproductos industriales, se podrían reutilizar para elaborar concretos. Por lo tanto, el uso de estos agregados disminuiría una cantidad considerable de la extracción de agregados de fuentes naturales.

En estructuras ya construidas y deterioradas, el uso del parcheo es lo más común, lo cual nos lleva a utilizar nuevamente concreto o morteros de reparación. Una forma de apoyar los procesos sustentables es el uso de las puzolanas en sustitución de cemento, o buscar alguna otra solución, sin la afectación física-química de la estructura, para la cual se pueden utilizar algunas técnicas de prevención o de rehabilitación.

Estas, son sólo algunas de las formas posibles para elaborar un concreto con enfoque sustentable, nos queda a nosotros razonar y actuar para poder disminuir el daño que se le está haciendo a nuestro hogar que es la Tierra.

¹ Ciclópeo: Es aquel que está formado por una mezcla cuyos agregados se componen de hasta un 60 % por fragmentos de roca con una masa aproximada de 30 kg por pieza, que se colocan a mano embebidos en el concreto normal, en su lugar definitivo en la obra.

1.1.7 DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO

La durabilidad, va de la mano con la sustentabilidad, ejemplo claro es al usar el concreto en la rehabilitación de una estructura deteriorada antes de cumplir su vida de servicio. Esto resulta en una ventaja para las cementeras, pero una gran desventaja para el mundo, ya que al incrementarse la producción, provoca principalmente aumento de energía y emisiones de gases que causan el efecto invernadero. En las rehabilitaciones convencionales como el parcheo, debido a una mala calidad inicial, conlleva una práctica no sustentable, pues provoca volver a utilizar más concreto en su reparación. Por lo tanto, se deben crear concretos dependiendo del ambiente que va a estar expuesto y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, su proporción, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado van a determinar la durabilidad final y la vida útil del concreto.

Se han realizado extensos estudios sobre la durabilidad y se han reportado varios conceptos con diferentes enfoques pero dirigidos hacia el mismo punto: aumentar la vida de servicio de las estructuras.

Según el comité ACI 201 (1997), la durabilidad de un concreto de cemento hidráulico se define como “su capacidad para resistir la acción de la erosión, ataque químico, abrasión, o cualquier otro proceso de deterioro”. Bajo este enfoque, los concretos durables conservarán su forma original, calidad y servicio independientemente del ambiente al cual se exponen.

Por otro lado, según el reporte del comité 130-CSL de la RILEM (Sarja et al, 2000), “Durability Design of Concrete Structures,” se propuso una metodología sobre el tema de diseño por durabilidad. Este reporte se enfocó principalmente en asociar, por un lado, el diseño estructural por carga última y revisar las dimensiones diseñadas por durabilidad. En él se estipula que: “...las estructuras deben de ser diseñadas de tal manera que su nivel mínimo de confiabilidad se asegure durante la vida útil propuesta, a pesar del deterioro y envejecimiento de los materiales.” Un claro ejemplo de cómo el autor define la durabilidad.

En Latinoamérica, también se elaboró un reporte en 1998 por la Red Temática de DURAR (Trocónis et al, 1998), donde se establecieron algunos conceptos básicos sobre la evaluación, mantenimiento, reparación y/o rehabilitación de estructuras de concreto, dañadas principalmente por el problema que genera la corrosión del acero de refuerzo. Por lo tanto, forma parte del concepto de durabilidad al aportar soluciones contra el deterioro de una estructura.

En el mundo existen ejemplos de estructuras que han sido diseñadas utilizando los conceptos que definen la durabilidad. Así, se han utilizado concretos durables en la construcción de dos puentes importantes, en los cuales, el cliente solicitó 100 años de vida útil, en el puente Confederación en Canadá (Figura 5) y el Puente Tago en Lisboa, Portugal (Aïtcin, 2004). En los dos puentes, el recubrimiento se tuvo que extender hasta los 75 mm para cubrir los 100 años de ciclo de vida que se establecían como requisito. Esto como una forma de prevenir que los agentes externos tarden en recorrer todo el espesor de recubrimiento hasta el acero de refuerzo.



Figura 5. Puente Confederación, Canadá.

Otro ejemplo, es el caso de la presa Hoover, una presa de gravedad con forma de arco construida con concreto reforzado, y que se encuentra entre las fronteras de los estados de Arizona y Nevada, E.U. En ella, se utilizó durante el colado y el curado de la construcción, tubos de agua refrigerada en el concreto. Esto redujo el calor de hidratación generado por las reacciones químicas del cemento durante el fraguado y endurecido del concreto. Debido a este tipo de curado especial, se estimó una duración de hasta 120 años aproximadamente de la estructura de concreto reforzado.



Figura 6. Presa Hoover, E.U.

Y como último ejemplo, el puente peatonal que se encuentra en Sherbrooke en Quebec, es un puente elaborado con polvo reactivo, el cual es caracterizado por su alta resistencia y baja permeabilidad, que en conjunto resultan en la mejoría del empaquetamiento de las partículas y el bajo contenido de agua. La resistencia del concreto usado en la construcción de este puente es de aproximadamente 2000 kg/cm^2 (200 MPa). Debido a su baja porosidad y alta resistencia se estima que tendrá una

durabilidad excelente al impedir que los agentes externos puedan deteriorarla (Kosmatka et al, 2004).



Figura 7. Puente peatonal en Sherbrooke, Quebec.

De lo comentado anteriormente, podemos resumir, que la durabilidad es la capacidad que tiene la estructura para enfrentar el deterioro en el tiempo. Sin embargo, se sabe que la durabilidad no puede ser garantizada debido a la amplia gama de los procesos de deterioro a la que puede estar expuesta una estructura. Aún para las estructuras mencionadas, la durabilidad prevista es solo eso, una estimación, ya que apenas rebasan los 10 años de haber sido construidas. Adicionalmente, algunos de los ejemplos se basan en métodos de colocación, curado, recubrimientos mayores del recomendado, etc., y no en una tecnología de concreto avanzada. Si la incertidumbre se presenta en este tipo de estructuras, que ocurriría con las estructuras ya fabricadas, en la cuales los cuidados durante su fabricación, colocación y funcionamiento no se comparan a los utilizados en las construcciones mencionadas anteriormente.

1.2 DETERIORO POR LA CORROSIÓN; PANORAMA MUNDIAL

Históricamente, han ocurrido problemas de durabilidad de diversa índole, basados probablemente en el mal procedimiento de construcción o proporcionamiento del

concreto, alta permeabilidad debido a la relación (agua/cemento), al inadecuado compactado o curado, por las reacciones de los agregados y sus causas, las retracciones (autógena, secado y contracción), los ciclos de hielo y deshielo, corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto, etc. Este último factor, es el que con frecuencia provoca más daños en cualquier tipo de edificación de concreto reforzado y metálica (Broomfield, 1997).

La corrosión del acero de refuerzo es la transformación del hierro metálico corroído que provoca un incremento en el volumen que, dependiendo de su estado de oxidación, puede ser tan grande como 600% del volumen del metal original [Solís et al, 2005]. Este incremento de volumen es la causa principal de la expansión y del agrietamiento del concreto, que después viene acompañado de la pérdida de sección del acero de refuerzo que pudiera provocar un fallo estructural. En la Figura 8 se presenta una losa de concreto reforzado como ejemplo de los efectos que puede sufrir una estructura por la corrosión del acero de refuerzo.



Figura 8. Corrosión del acero de refuerzo.

A causa de estos problemas, en la mayoría de los países se pierden importantes cantidades de dinero, debido a la disminución de la durabilidad de las estructuras por la corrosión, eso sin mencionar las eventuales pérdidas de vidas humanas.

Por ejemplo, es el caso del puente Point Peasant en Ohio, E.U., que colapsó en diciembre de 1979 causando la muerte de 46 personas. La causa de este accidente: falla del acero de refuerzo por corrosión bajo esfuerzo (Hernández y Mendoza, 2006).

En 1981 en París, Francia, el centro de Pompidou mostró señales de corrosión severa a menos de 5 años del término de su construcción (Hernández y Mendoza, 2006).

En Venezuela, los estudios realizados en 1985 en la industria petrolera mostraron costos directos por corrosión, del orden de 925 mil millones de bolívares (MMBs); lo cual representó un 20% del presupuesto de mantenimiento de ese país (De Romero et al., 2005).

En 1989 en el Reino Unido, la agencia de carreteras estimó el daño por corrosión inducido por la sal en un total de 616.5 millones de euros en autopistas y puentes de carreteras nacionales en Inglaterra y Gales. Estos daños representan el 10% del inventario total de todos los puentes y autopistas. Por lo tanto, podemos concluir que los daños y los gastos pueden ser 10 veces más de la estimación anterior (Broomfield, 1997).

En un estudio que se realizó en el sector industrial de Estados Unidos por la “Federal Highway Administration” (Koch Gerhardus H. et al, 2002), fueron reportados los costos directos de la corrosión en el sector industrial (Figura 9). Este estudio arrojó como resultado que los costos anuales por corrosión eran del orden de 276 billones de dólares; lo cual representa el 3.1% del Producto Interno Bruto (PIB).

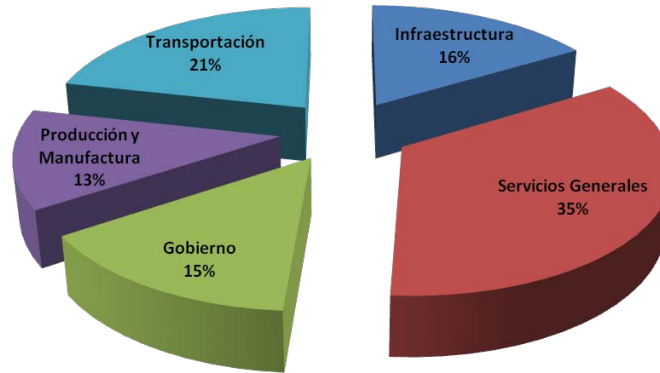


Figura 9. Costos de la corrosión en el sector Industrial en los Estados Unidos.

En el 2006 en México, en una publicación técnica (López et al, 2006), editada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) presentan cifras aproximadas (véase Tabla 1) de los puentes afectados por la carbonatación y los ataques por cloruros en el país. La Red Federal de Carreteras en México cuenta con 6,854 puentes construidos hace 20 años; la mayor parte de ellos construidos de concreto reforzado (67%) (véase Figura 10). Por su parte Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) tiene a su cargo 2500 puentes de los cuales gran parte de ellos son también de concreto reforzado.

Tabla 1. Reporte de daños en puentes de la Red Federal de Carreteras Mexicanas.

COMPARACIÓN DE GRADO DE DAÑO EN PUENTES POR LOS MECANISMOS MÁS IMPORTANTES		
Grado de daño	Por penetración de cloruros	Por carbonatación
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

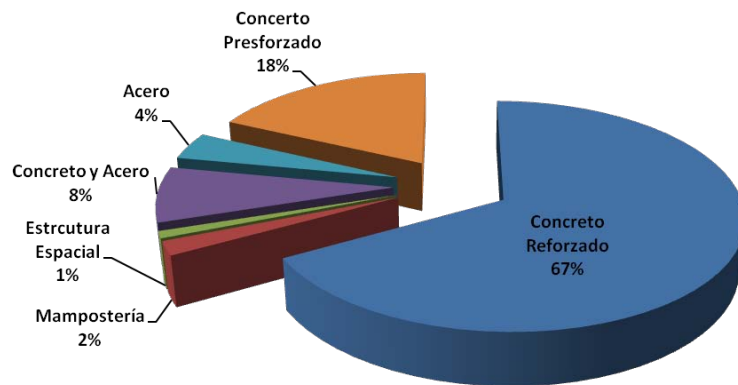


Figura 10. Distribución de puentes por tipo de material.

De esta publicación podemos constatar la gran cantidad de puentes dañados por corrosión y que la mayoría de los puentes de grado media y baja ya se encuentran en camino hacia un deterioro mayor. Concluyendo también, que si presentan problemas los puentes, en igual forma, se pueden encontrar las demás infraestructuras de concreto reforzadas en el país, como las viviendas, edificios, escuelas, hospitales, museos, iglesias, etc.

Por consiguiente y por los antecedentes presentados, hay una gran cantidad de problemas por corrosión en el mundo, que se presentan en el país, y que en el transcurso de unos pocos años, la cantidad de estructuras que presentan deterioro se incrementará considerablemente.

Por otra parte, debido a que los problemas de corrosión en las estructuras dependen en gran medida del medio ambiente en las que se encuentran expuestas, es necesario analizar detalladamente el comportamiento de las estructuras en diversas condiciones ambientales, para determinar el método y materiales de reparación más adecuados.

I.3 FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN

La corrosión es un fenómeno que se presenta debido a que los metales, salvo alguna que otra rara excepción (como los metales nobles: oro, platino, etc., que se encuentran en estado nativo en la Tierra), no existen como tales en naturaleza, sino combinados con otros elementos químicos formando los minerales, como los óxidos, sulfuros, carbonatos, etc. Entonces, la fuerza conductora que causa que un metal se oxide es consecuencia de su existencia natural en forma combinada (u oxidada). Para alcanzar este estado metálico, a partir de su origen mineral, es necesario que el metal absorba y almacene una determinada cantidad de energía. Esta energía le permitirá el posterior regreso a su estado original a través de un proceso de oxidación (corrosión) (Ávila y Genescá, 1996).

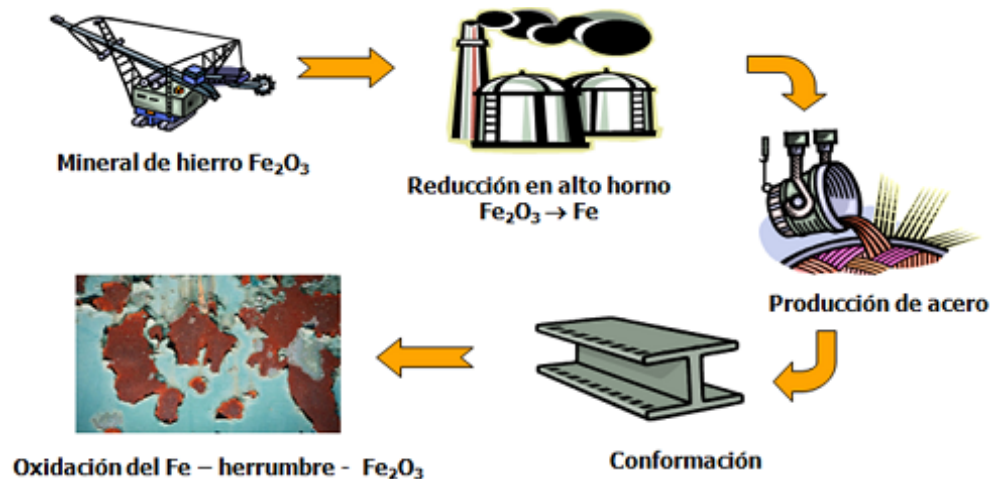


Figura II. Proceso natural de un metal.

Este proceso de oxidación (corrosión) es una reacción de óxido-reducción, debido a que el metal con energía almacenada (ya transformado en acero de refuerzo o estructura metálica) empieza a reaccionar con las sustancias químicas del medio y consecuentemente forma la herrumbre metálica llamada óxido de hierro (II) hidratado (véase Figura 12) (Spencer et al, 2000).

1.4 PROTECCIÓN NATURAL DEL CONCRETO

En cualquier concreto reforzado puede ocurrir la corrosión del acero de refuerzo siempre y cuando se presenten factores electroquímicos. Sin embargo, la relación existente entre el concreto y el acero de refuerzo, se basa en que el concreto provee una protección tanto física como química en contra de los agentes externos antes que pueda ocurrir la corrosión.

- La protección física, es la **capa protectora** del concreto (espesor de recubrimiento) que impide el ingreso de los agentes ambientales (oxígeno, humedad, dióxido de carbono, cloruros, sulfatos, etc.) que pueden despasivar al acero e iniciar la corrosión. Sin embargo, esta capa tiene un límite, ya que, en un ambiente agresivo, los agentes químicos, ya sea los cloruros, los sulfatos del agua de mar o el dióxido de carbono en un ambiente urbano, suelen acumularse en esta capa y lentamente se transportan a través del concreto hasta llegar a la interface del acero de refuerzo y provocar los daños por corrosión. La protección física depende mucho de la calidad y del cuidado del concreto durante su preparación, compactado, acabado y curado.
- La otra protección que le da el concreto al acero, es debida a la alta alcalinidad del concreto, pues al reaccionar el cemento con el agua, forma los hidróxidos de calcio, potasio y sodio. Los iones hidroxilo (OH^-) se encuentran en la fase intersticial del concreto y producen un ambiente alcalino, por lo tanto el pH del concreto es de aproximadamente entre 12 y 13, lo cual crea el ambiente necesario para la segunda capa protectora de óxido en la superficie del acero impidiendo que el acero en ese ambiente se corroa. A este proceso también se le llama **pasivación del acero** (Trocónis et al, 1998).

1.5 CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

Actualmente, se reconoce que la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto ocurre por medio de un proceso de tipo electroquímico. Esto es que, la reacción global

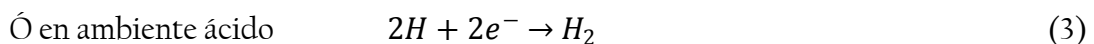
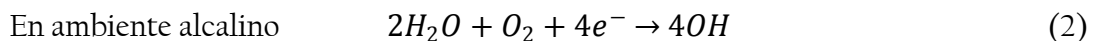
de corrosión es el resultado de dos o más reacciones electroquímicas parciales, independientes entre sí, que se llevan a cabo en la interfase metal (acero) y un electrolito (solución del poro). Dichas reacciones electroquímicas parciales, alejan al metal de su estado de equilibrio para que se corroa, dando como resultado su disolución (Borges, 2001).

Como en todo proceso de corrosión electroquímica, en el acero de refuerzo debe formarse una pila de corrosión, es decir que debe existir un ánodo y un cátodo conectados eléctricamente y un conductor iónico que debe cerrar el circuito. En la Figura 12 se presenta un esquema simplificado del mecanismo de corrosión en el concreto reforzado con las reacciones electroquímicas parciales, que son explicadas a continuación:

En las zonas anódicas formadas en la superficie del refuerzo de acero, ocurre la reacción de oxidación (ec. 1):



Lo que ocurre, es que el Fe libera electrones que se mueven a través del acero de refuerzo hacia las zonas catódicas, donde ocurren las reacciones de reducción (ec. 2 y 3). Las cuales dependen de la disponibilidad de oxígeno y del pH de la solución del poro intersticial del concreto. En función de lo anterior se pueden formular las siguientes reacciones:



El circuito electroquímico se cierra a través del transporte de iones hidroxilo y ferrosos presentes en la solución acuosa de los poros del concreto, provocando el fenómeno de corrosión del acero de refuerzo.

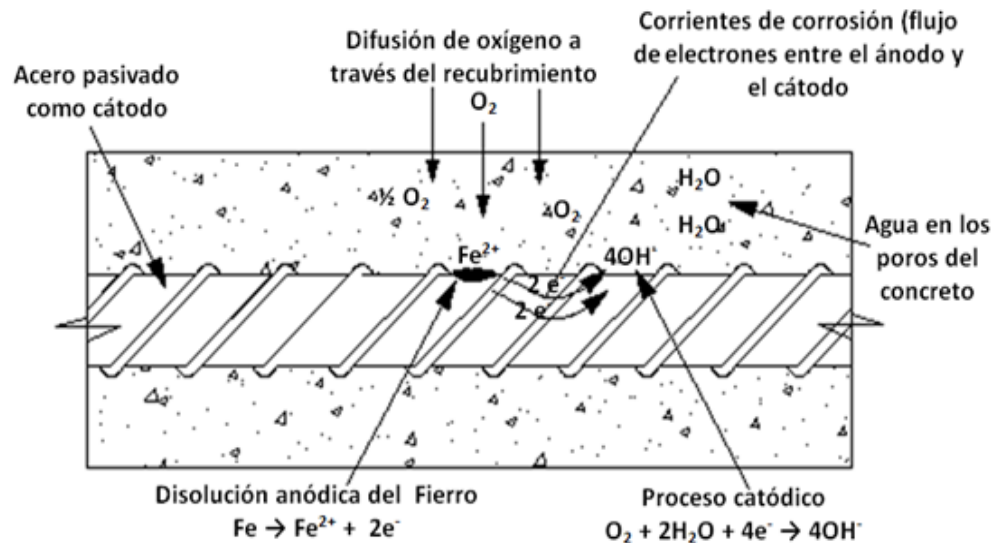


Figura 12. Formación de la pila de corrosión en el concreto reforzado en ambientes alcalinos (Borges, 2001).

El equilibrio de estas reacciones no depende solamente del potencial eléctrico que provoca que se transporten los iones, sino también del pH del medio en el cual va a estar expuesta la estructura. Ambas reacciones, son importantes para conocer el estado electroquímico del acero en una estructura, primordialmente por el potencial y la acidez del medio acuoso y poder predecir si habrá o no formación de herrumbre.

Es por eso, que Marcel Pourbaix (Pourbaix, 1996) realizó estudios sobre las reacciones entre el hierro (Fe) y el agua a 25°C para predecir si el metal tenderá a formar óxidos o hidróxidos, si se disolverá completamente o bajo qué condiciones el metal permanecerá inmune a la oxidación. Para ello, elaboró diagramas (que llevan su nombre) que representan gráficamente, en función del potencial (E_H) y del pH, zonas delimitadas termodinámicamente estables en la forma en la que se puede encontrar el metal (véase la Figura 13).

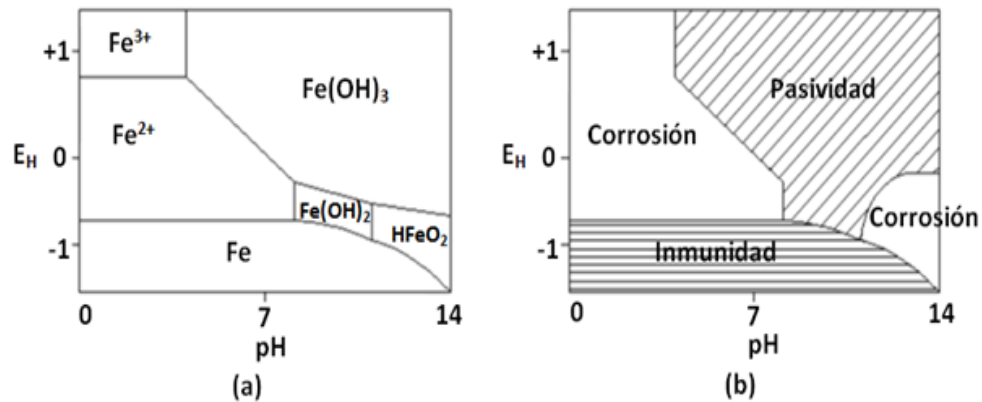


Figura 13. Diagrama de equilibrio de Pourbaix a) resumido para el hierro con agua y b) diagrama de regiones de acuerdo a su conducta de corrosión.

En la Figura 13a, se muestra el diagrama resumido para el hierro en contacto con el agua, y en la Figura 13b se observan divisiones importantes mostrando las regiones que son clasificadas de acuerdo al estado al que tiende el metal: ya sea pasividad, corrosión e inmunidad. La zona de pasividad, se aplica a metales que cuentan con una capa oxidada sobre su superficie, como por ejemplo la formación del óxido ferroso (Fe_3O_4), óxido férrico (Fe_2O_3) o de hidróxidos de hierro, inhibiendo la corrosión hasta una velocidad despreciable. La zona de corrosión, se presenta cuando el metal se está reduciendo o disolviendo formando los productos de corrosión. Por último, la zona de inmunidad se describe cuando el metal se encuentra perfectamente preservado y se encuentra estable bajo ciertas condiciones especiales de pH y potencial, un ejemplo claro de un acero inmune es el mismo pasivado con una protección catódica.

1.5.1 FACTORES QUE AFECTAN LA PROTECCIÓN NATURAL DEL CONCRETO

Los tres factores principales que deterioran al acero de refuerzo y que tratan de romper la protección que brinda el concreto son: la humedad, el oxígeno y las altas concentraciones de cloruros, sulfatos y CO_2 . Estos factores son representados en la siguiente figura:

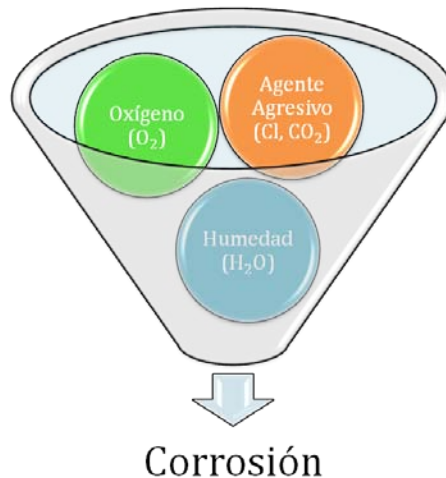


Figura 14. Principales componentes de la corrosión.

Para que el fenómeno se lleve a cabo, son necesarios los tres factores (humedad, oxígeno y agente agresivo) en el tiempo de iniciación del proceso de corrosión lo que resultaría en un deterioro del acero de refuerzo. Si algún factor no se encontrara antes de despasivar al acero de refuerzo, el fenómeno no podría ocurrir, sin embargo, si el acero ha sido deteriorado, el fenómeno sería irrevocable aún y cuando su cinética haya disminuido.

Con estos componentes principales los fenómenos, que se forman son la corrosión por ataque por cloruros, particularmente en ambientes marinos, y la corrosión por carbonatación que se presenta en lugares densamente industrializados, siendo estos los fenómenos más importantes de la corrosión del acero en concreto.

1.6 CORROSIÓN POR CLORUROS

Hay varias formas por las cuales los cloruros se encuentran presentes en el concreto. Podrían agregarse durante el mezclado en el agua de reacción, por aditivos, agregados contaminados, etc. O bien penetrando por medio de agentes externos a través de la red de poros. Esta situación es característica en estructuras situadas en las cercanías de ambientes marinos o en las estructuras que emplean sales para el deshielo.

Los cloruros provocan un ataque local de la capa pasiva en el acero, lo que ocasiona una degradación localizada que generalmente se transforma en picaduras. Cuando el área afectada es importante, ocurre la fractura del recubrimiento. Sin embargo, en zonas completamente sumergidas, la corrosión puede llevarse a cabo sin ninguna señal de daño.

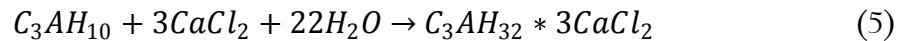
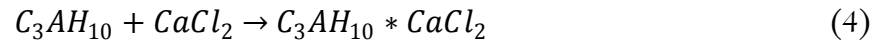
Los cloruros penetran en el concreto a través de la red de poros. Estos iones se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan en el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. Sin embargo, los cloruros disueltos en la fase intersticial pueden interaccionar con las fases sólidas del concreto quedando inmovilizados, por lo tanto, los cloruros dentro el concreto puede encontrarse en varios estados (Sánchez de Rojas, 2004):

- *Cloruro libre*, es el que permanece disuelto en el agua que contienen los poros. Se desplaza al interior del concreto por difusión u otros mecanismos.
- *Cloruro ligado*, es el que permanece unido a los componentes de hidratación del cemento. Este cloruro queda inmovilizado, sin posibilidad de moverse al interior del concreto.
- *Cloruro total*, es la cantidad total de cloruro que se encuentra en el concreto, sin hacer distinción en los cloruros libres o ligados. La concentración de cloruro total es la suma de los cloruros libres y ligados.

El cloruro libre es el más dañino, ya que al quedar disuelto en el agua de los poros, es capaz de despasivar al acero e iniciar su corrosión, localizándose en determinados puntos del acero. Por lo que es importante conocer la capacidad de ligar cloruros de cada concreto. Pues los que son capaces de ligar muchos cloruros, pueden ser susceptibles de sufrir la corrosión de su acero.

Los procesos mediante los cuales se unen los cloruros a los productos de hidratación del cemento (Taylor, 1967), son tanto de tipo químico como de tipo físico. El principal responsable de la unión química de los cloruros es el aluminato tricálcico. Este

componente del cemento reacciona con los cloruros de los poros, para formar el monocloroaluminato hidratado o “sal de Friedel” $C_3AH_{10} \cdot CaCl_2$ y el tricloroaluminato hidratado $C_3AH_3 \cdot 3CaCl_2$ según las reacciones:



Además de un mecanismo de difusión que es relativamente lento, los cloruros pueden penetrar mucho más rápidamente por un mecanismo de succión capilar, muy propio de ambientes de niebla salina existente en climas cálidos marinos, en los que los cloruros están suspendidos en las gotitas de humedad del aire. En este fenómeno incide mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

Todas las normativas limitan el contenido en cloruros en el concreto fresco, pero estos límites varían de un país a otro. Ello es debido a la dificultad de establecer un límite seguro, por debajo del cual no exista riesgo de despasivación del acero, ya que este límite depende de numerosas variables (Fernández, 1994), algunas de las cuales son: el tipo de cemento (finura, contenido de yeso, contenido en aluminato tricálcico, etc.), proporción de cemento, relación a/c, contenido de humedad, etc.

1.7 CORROSIÓN POR CARBONATACIÓN

La carbonatación se presenta particularmente donde el ambiente es rico de concentraciones altas de CO_2 . Este fenómeno, en particular en concretos sin refuerzo, no presenta un problema, sino una ventaja, pues al carbonatarse un concreto, sus poros se saturan de calcita ($CaCO_3$) densificándolo. No obstante, en concretos reforzados, es probable que llegue a presentarse el fenómeno de la corrosión por carbonatación.

Este fenómeno basta con tener una concentración de 0.03% en el ambiente (Tronconis, 2005), que es el que se encuentra normalmente en la atmósfera. Esta concentración se incrementará en zonas localizadas donde hay gran actividad económico-industrial. Por

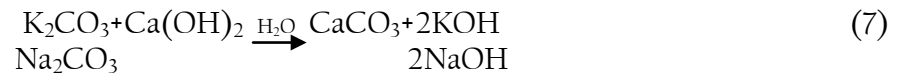
consecuencia, un acelerado proceso en la formación del ácido carbónico, que reacciona con la fase intersticial del concreto.

A diferencia de la mayoría de los ácidos, el ácido carbónico no causa daños físicos a la pasta de cemento, pero neutraliza a los álcalis (KOH y NaOH) que se encuentran en solución del poro formando los carbonatos de potasio y sodio (ec. 4). Estos carbonatos reaccionan con la portlandita libre (Ca(OH)₂) del concreto y en presencia de humedad, forman carbonatos de calcio y álcalis principalmente en las líneas de los poros (ec. 5), Si se cumplen los factores externos del ambiente, el proceso de carbonatación del concreto puede volverse cíclico, el cual es llamado **frente de carbonatación** (Del Valle et al, 2001).

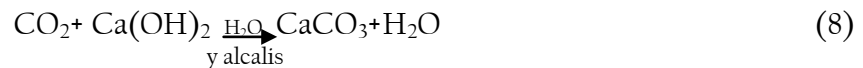
El mecanismo de reacción de la carbonatación es:



Esto incrementa la solubilidad del Ca(OH)₂,



Por lo tanto la reacción real se debe escribir:



El resultado final de estas reacciones es el consumo total o neutralización de los álcalis, por lo tanto, una disminución del pH (a valores inferiores de 9) en la solución intersticial, que al llegar el frente carbonatado a nivel de la varilla, despasivará por completo ésta y provocará una **corrosión generalizada** (Tuutti, 1982).

El cálculo de la velocidad del frente de carbonatación es de vital importancia para conocer el tiempo en que tardará en llegar hasta el acero de refuerzo. Esta velocidad de

avance es función directa de: a) el contenido de humedad del concreto, b) su porosidad y c) el contenido de materia alcalina a carbonatarse.

El contenido de humedad en el concreto resulta trascendental, ya que como se indica en la Figura 15 (Trocónis et al, 1998), con una humedad entre 55 y 70% de grado de carbonatación alcanza una mayor velocidad. En la Figura 16 (Del Valle et al, 2001) se muestran las distintas condiciones de humedad en un acercamiento de las redes de poro en el concreto, en el cual:

- si los poros están secos (Fig. 16a), el riesgo de carbonatación es prácticamente nula ya que el CO_2 no podría reaccionar,
- si los poros están llenos de agua (Fig. 16a), el riesgo de carbonatación disminuye por la difícil difusión del CO_2 en el agua pudiendo ser el caso de las estructuras sumergidas y
- si los poros están parcialmente llenos de agua (Fig. 16c), es cuando se dan las condiciones óptimas para la carbonatación.

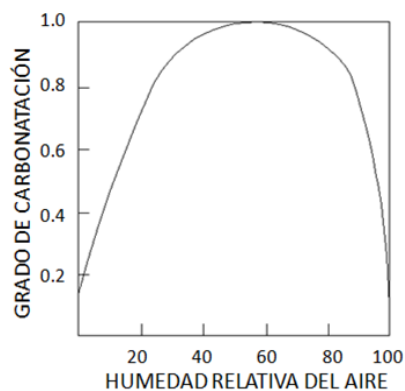


Figura 15. Grado de carbonatación del concreto frente a la humedad relativa.



Figura 16. Distintas condiciones de humedad en la matriz de concreto.

La porosidad del concreto es también un parámetro muy importante en el mecanismo de carbonatación. La forma interna de los poros, su tamaño y la cantidad de estos influye en dicho mecanismo. En caso de tener poros pequeños estarían todo el tiempo saturados de agua provocando que sea inaccesible para el CO_2 , sin embargo, en concretos porosos la carbonatación avanza a mayor velocidad. En concretos con relaciones A/C altas, es más fácil que los agentes externos puedan transportarse al interior.

Existen cuatro tipos de poros:

- los poros por aire atrapado son producidos por el proceso de mezclado y representan una cantidad pequeña de aire;
- los poros por aire incluido, son intencionalmente incorporados para incrementar la durabilidad del concreto, debido a que aumenta la protección del concreto contra el deterioro por los ciclos de congelación y deshielo y evitan el agrietamiento;
- los poros capilares, son los espacios que originalmente ocupaba el agua de hidratación en el concreto fresco, y donde el cemento hidratado no ha sido ocupado por el gel (CSH)
- y por último los poros gel, que se forman en el proceso de hidratación, que son componentes no cristalizados formados en la fase intersticial del concreto.

En la Figura 17 se muestra el tamaño aproximado de los cuatro tipos de poros que se pueden encontrar en un concreto.

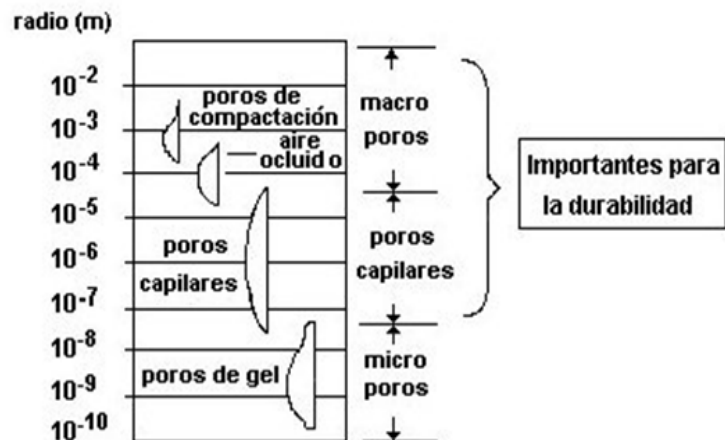


Figura 17. Representación de los poros (Del Valle et al, 2001).

Los poros de mayor tamaño son los que influyen en la durabilidad del concreto, porque a través de estos accede el CO_2 que puede iniciar un ataque al acero embebido en el concreto y causar la corrosión promovida por la carbonatación.

Finalmente, la portlandita y los álcalis (sodio y potasio), son las materias para carbonatarse (Broomfield, 1997). Cuanto mayor sea su contenido, menor será la velocidad de carbonatación, de ahí que los cementos Portland sin adiciones sean en general más resistentes a la carbonatación.

Entonces, la corrosión por carbonatación se identifica primordialmente por atacar a lo largo del acero de refuerzo, de ahí el nombre de **corrosión generalizada**, debido a que el pH disminuye en todo el frente del elemento.

Los productos de la corrosión tienen un mayor volumen que los formados por la hidratación del cemento y que inicialmente formaron la capa pasiva del acero. Estos óxidos generan esfuerzos de tensión en el concreto, provocando los agrietamientos,

botaduras, las manchas, etc. Un ejemplo del resultado de este mecanismo se observa en la Figura 18.



Figura 18. Corrosión uniforme de un acero de refuerzo como resultado de la carbonatación del concreto.

El presente estudio se basa en la prevención de la corrosión de estructuras carbonatadas, que según el estudio hecho por la SCT (López et al., 2006) es el fenómeno que afecta un mayor número de puentes deteriorados. Dicho fenómeno es posible con solo tener una concentración de CO_2 de 0.03% en el ambiente (Tronconis, 2005), que se encuentra normalmente en la atmósfera. Dicha concentración será mayor en zonas localizadas en ambientes urbano-industriales, acelerando por consecuencia el proceso de carbonatación.

Debido a que se manifiestan estos problemas, provocados por la corrosión por carbonatación en zonas localizadas de alta concentración industrial, se reflexiona en minimizar este tipo de fenómeno. Sin embargo para confrontarlo es necesario conocer el mecanismo de ataque, por lo cual se explicará brevemente.

1.8 ENFOQUE DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO

Como se comentó, la introducción de concreto reforzado, generó la creencia de que este material compuesto soportaría cualquier esfuerzo que se le aplicara. Sin embargo, desde hace poco más de medio siglo quedó en evidencia que no era cierto. En un principio, esta falta de durabilidad estuvo en la práctica constructiva: compactación o curado inadecuados, recubrimientos insuficientes para el acero, ejemplos claros de prácticas insuficientes de tecnología de construcción. Pero en las últimas tres décadas, la evidencia del crecimiento del deterioro prematuro, implicó la necesidad de analizar que ha ocurrido con la tecnología del concreto y con los criterios de diseño estructural.

Es por eso que diversos autores (Andrade, 1992; Trocónis, 1998; Borges 2001) han tratado de conocer los mecanismos y han sugerido algunas formas de luchar contra la corrosión por carbonatación. Varios métodos de prevención y protección de la corrosión basados principalmente en la eliminación en alguno de los elementos de la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico) o tan solo en la modificación de las propiedades físico-químicas del concreto.

Se ha propuesto una clasificación de los tipos de protecciones; la protección directa, que es la que se le da directamente al acero de refuerzo y la protección indirecta que es a través del concreto.

1.7.1 PROTECCIÓN DIRECTA

Este tipo de protección se puede aplicar en dos frentes: los recubrimientos y la protección catódica.

A. Los recubrimientos

Para prevenir, parar o retardar la corrosión del acero de refuerzo se puede minimizar o eliminar el acceso de alguno o todos los elementos que provocan la corrosión (CO₂,

humedad y oxígeno). Uno de los medios mecánicos más comunes para proteger al acero embebido en el concreto contra la corrosión es recubrirlo con materiales que funcionan como una barrera física hacia los agentes externos.

Los recubrimientos para el acero de refuerzo se pueden clasificar en:

- Recubrimientos no-metálicos: Podemos incluir dentro de éstos las pinturas, barnices, lacas, resinas naturales o sintéticas. Grasas, ceras, aceites, empleados durante el almacenamiento o transporte de materiales metálicos ya manufacturados y que proporcionan una protección temporal.
- Recubrimientos orgánicos de materiales plásticos: Esmaltes vitrificados resistentes a la intemperie, al calor y a los ácidos.
- Recubrimientos metálicos. Pueden lograrse recubrimientos metálicos mediante la electrodeposición de metales como el níquel, cinc, cobre, cadmio, estaño, cromo, etc.
- Inmersión en metales fundidos. zinc (galvanización en caliente), aluminio (aluminizado), etc. Proyección del metal fundido mediante una pistola atomizadora. Metalizaciones al zinc, aluminio, estaño, plomo, etc.
- Reducción química (sin paso de corriente). Mediante este procedimiento se pueden lograr depósitos de níquel, cobre, paladio, etc. Estos recubrimientos son formados por modificación química de la superficie del metal. Los llamados recubrimientos de conversión consisten en el tratamiento de la superficie del metal con la consiguiente modificación de la misma. Entre las modificaciones químicas de la superficie del metal se pueden incluir a los recubrimientos de fosfato, de cromato y aquellos producidos por anodizado.

El recubrimiento más común en la construcción es la galvanización. La galvanización consiste en sumergir el acero en un baño de zinc fundido a 450°C. El acero base reacciona con el zinc y se recubre de una capa de aleaciones de Fe-Zn, siendo la capa exterior cinc puro. El zinc puro es mucho más estable que el acero frente a la atmósfera y también es más resistente a la carbonatación (Andrade, 1994). Una desventaja clara de los galvanizados es que el debilitamiento acelerado de la galvanización puede ocurrir si estos refuerzos están en contacto con los que no están galvanizados.

La limpieza y puesta a punto de la superficie del acero antes de la aplicación de un recubrimiento metálico, son operaciones indispensables, sea cual sea el procedimiento de aplicación escogido. De la calidad de la preparación de la superficie dependerá la adherencia y, en consecuencia, la eficacia de la capa protectora.

Según el estado de la superficie por proteger, más o menos oxidada, se puede seleccionar el procedimiento mecánico de limpieza más adecuado. Desde el cepillado, chorros de arena (sand blasting), chorros de agua a presión, pasando por una limpieza química o electroquímica, como los baños ácidos, con corriente eléctrica o sin ella. La selección de un recubrimiento está en función de las dimensiones del metal y de la extensión de la superficie que se quiere recubrir.

B. Protección Catódica

La protección catódica consiste en situar en la zona de inmunidad (de los diagramas de Pourbaix) al acero de refuerzo. Esto se consigue aplicándole corriente y haciendo actuar a toda la armadura como cátodo. Es el único método capaz de detener una corrosión que ya ha iniciado. Puede aplicarse sobre cualquier estructura que cumpla determinadas condiciones, como por ejemplo que tenga continuidad eléctrica. Tiene como desventajas que requiere un mantenimiento continuo y personal calificado para su aplicación (Andrade et al, 2000).

Existen dos tipos de protección catódica: por corriente impresa o por ánodos de sacrificio.

La protección por ánodos de sacrificio se logra mediante la utilización de metales con menor potencial de reducción que el hierro, como el zinc y el aluminio (Heuzé, 1980). Estos materiales son conectados a la estructura para que ocurra la formación de macropilas de corrosión, donde la oxidación se produce en el metal de sacrificio.

El método de corriente impresa es la forma más común de protección catódica (Gjorv et al, 1979). Este emplea una fuente externa de corriente continua que oscila entre 3 y 20 mA/m² que mantiene polarizada negativamente la armadura que va a ser protegida, en general alrededor de 1000 mV vs ECS (Electrodo de Calomel Saturado), de tal forma que se impidan las reacciones de oxidación en su superficie. En la Figura 19, se muestra el sistema con la conexión de un ánodo suplementario a la terminal positiva de la fuente.

Siempre que se requiera emplear una protección catódica para detener una corrosión ya iniciada es preciso cumplir con una serie de condiciones [Andrade et al, 2000]:

1. Garantizar la conexión eléctrica entre los refuerzos.
2. Que el concreto no haya sido fabricado con agregados reactivos.
3. Buen contacto concreto-refuerzo.
4. Evitar contactos ánodo-cátodo.
5. Conocer el área de refuerzo a proteger.
6. Reponer el recubrimiento de concreto dañado.
7. Reponer el refuerzo, si es necesario reforzar la estructura.
8. Revisar el espesor de recubrimiento de concreto.
9. Comprobar si existe la presencia de corrientes erráticas.
10. Estudiar el efecto sobre la estructura de la carga adicional que supone la aplicación del método.

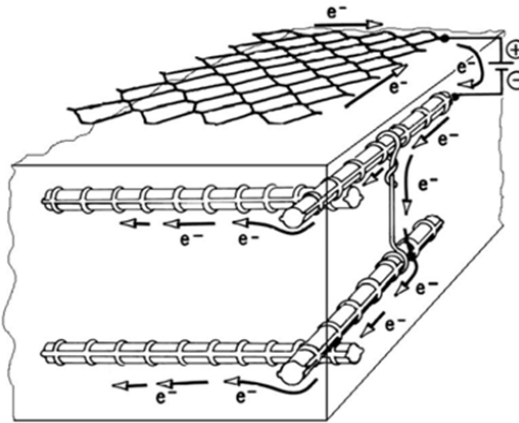


Figura 19. Principio de la protección catódica con corriente impresa.

Aunque en la gran mayoría de las reparaciones realizadas con protección catódica los resultados son bastante satisfactorios, no siempre es posible su empleo, ya sea por limitaciones económicas o causas intrínsecas a la propia estructura.

En la Figura 20 se presenta un resumen de los tipos de protecciones que se pueden realizar al acero de refuerzo. En esta figura se presentan las condiciones en las cuales se pueden aplicar los métodos de protección, sus ventajas y desventajas.



Figura 20. Aplicabilidad, ventajas e inconvenientes de los métodos de protección directa.

1.7.2 PROTECCIÓN INDIRECTA

Existen tres métodos de protección indirecta: recubrimientos y selladores para el concreto, inhibidores de corrosión y la realcalinización electroquímica.

A. Selladores y recubrimientos para el concreto

- Los selladores son solventes o líquidos base agua aplicados a la superficie previamente preparada. Existen dos categorías de selladores las cuales son utilizadas actualmente: selladores penetrantes y los selladores superficiales. Los penetrantes (incluyen a los xilanos y los xiloxanos), reaccionan con las paredes de los poros del concreto endurecido para crear una superficie no humectable o hidrófoba. Los selladores de tipo superficial, por otra parte, bloquean los poros e incluyen materiales epóxicos o aceite de linaza, con contenidos de sólidos por debajo del 50% en peso. Varias condiciones ambientales pueden influenciar la vida útil de los selladores. Estas incluyen la radiación ultravioleta, la humedad relativa y la acción del tráfico. La vida útil de los selladores penetrantes es de 5 a 7 años (Del Valle, 2000).
- Un recubrimiento es un líquido orgánico de uno o dos componentes (tales como epóxicos, acrílicos, metacrilatos y uretanos). Son aplicados en una o dos capas a una superficie preparada. El principal objetivo de los recubrimientos es evitar el paso de la humedad y del CO₂. A diferencia de los selladores, los recubrimientos tienen una permeabilidad baja al vapor de agua. La selección del recubrimiento se realiza en función de las condiciones individuales del sistema a proteger. Los epóxicos poseen buena resistencia a la abrasión y alta resistencia adhesiva, pero son susceptibles a la degradación por radiación ultravioleta. Los acrílicos son frágiles y por lo general con baja resistencia al impacto. Los uretanos tienen alta resistencia al impacto y buenas características de resistencia ambiental pero baja resistencia a la abrasión (Del Valle, 2000).

Los recubrimientos, deben ser aplicados desde la fabricación de la estructura, ya que una vez iniciado el deterioro, el uso de una barrera de este tipo puede agravar los problemas en lugar de mejorarlos, al no permitir el secado del concreto cuando ello fuera posible.

B. Inhibidores de la corrosión

Los inhibidores son sustancias químicas que protegen al metal contra el ataque electroquímico de soluciones agresivas. Son usados ampliamente por la industria para modificar el comportamiento de las aguas, a efectos de un mejor control de la corrosión.

Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que al disolverse en el electrolito, junto a la superficie del metal, reducen la velocidad de corrosión mediante algún mecanismo definido (Alonso, 1983).

A los inhibidores se les atribuye, algunas veces, la función de formar una capa pasiva, impidiendo la disolución de los iones metálicos en el agua intersticial del concreto. Los inhibidores se adsorben en la superficie de la armadura, reaccionando y formando una capa protectora de óxidos. Así, se cree que el mecanismo de acción de los inhibidores se acerca más a la adsorción de sus iones sobre el metal que a la influencia de los compuestos provenientes de reacciones (Lima, 1998).

El comportamiento de los inhibidores puede ser muchas veces peligroso, ya que en función de la concentración o de las circunstancias, pueden jugar tanto el papel de inhibidores como de estimuladores de la corrosión.

Existen tres tipos de inhibidores de la corrosión:

- a) Anódicos
- b) Catódicos
- c) Mixtos

Los inhibidores anódicos actúan controlando las reacciones anódicas a través de la formación de una capa protectora de óxido de hierro (Fe_2O_3) sobre el metal, reduciendo

la velocidad de corrosión. Estos productos aumentan la polarización anódica desplazando el potencial de corrosión hacia la dirección positiva. Cuando se presentan en cantidades insuficientes, estos inhibidores estimulan las reacciones catódicas sin impedir el proceso anódico, favoreciendo el comienzo de la corrosión localizada de forma aún más intensa que en la ausencia del inhibidor. Los inhibidores anódicos pueden ser oxidantes como los nitritos y cromatos o no oxidantes como los benzoatos y molibdatos.

Los inhibidores catódicos controlan la corrosión desplazando el potencial de corrosión hacia la dirección más negativa. Los más eficientes son los sulfitos, las hidracinas y las sales de Ca y Mg.

Los inhibidores mixtos son aquellos que interfieren tanto en las reacciones anódicas como en las catódicas, provocando el desplazamiento del potencial de corrosión en las dos direcciones. Entre los inhibidores mixtos están los polifosfatos y los de base orgánica, como la amina (Borges, 2001).

C. Realcalinización electroquímica

Esta técnica puede ser aplicada mediante dos métodos diferentes: sin y con corriente eléctrica.

La realcalinización electroquímica sin corriente (o pasiva) se basa en el hecho de la elevada movilidad de los iones realcalinizadores que son capaces de difundir desde zonas de elevado pH a otras de menor pH. La movilidad de sus iones es debida a la absorción capilar y a la difusión por diferencia de concentración, sin embargo, esta técnica tiene como inconveniente que es demasiado lenta, además que no se producen los OH^- que se generan por la electrólisis del agua y que elevan el pH alrededor de la varilla.

El otro método para realcalinizar con más rapidez se basa en aplicar una corriente eléctrica que fuerce a migrar hacia el interior a los iones realcalinizadores, y por otro

lado que se produzca la generación de iones OH⁻. El dispositivo es similar al de protección catódica y se muestra en la Figura 21 (Broomfield, 2004).

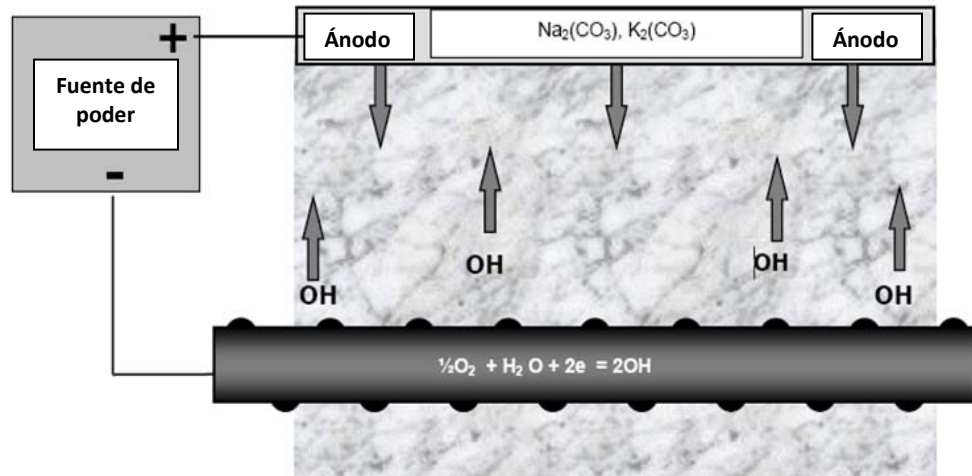


Figura 21. Esquema del sistema de realcalinización electroquímica.

En la Figura 22, se presenta un resumen de las diferentes formas de protección indirecta que se puede aplicar a estructuras de concreto reforzado. En esta figura se presentan las condiciones en las cuales se pueden aplicar los métodos de protección, sus ventajas y desventajas.

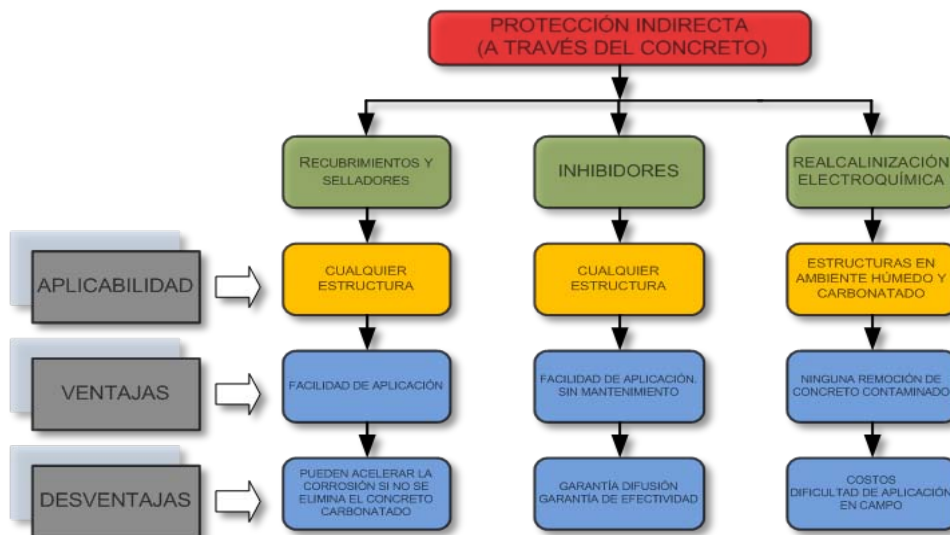


Figura 22. Esquema de protección indirecta.

Es importante señalar que todos los tipos de protecciones suelen ser útiles para tomar acciones de prevención de una estructura sobre la cual se haya detectado carbonatación, para tratar de detener o minimizar la corrosión del acero o en efecto, el deterioro del concreto por los esfuerzos de tensión. Sin embargo, de los métodos mencionados anteriormente, algunos suelen ser utilizados en el caso de estructuras nuevas o desde la elaboración o restauración del concreto. Una de las soluciones óptimas para prevenir la corrosión por carbonatación es la realcalinización electroquímica, ya que esta técnica es utilizada para restaurar la alcalinidad del concreto y lograr un medio favorable para la repasivación del acero (Bertolini et al, 2004), además que no es necesaria la remoción del concreto. También, si el acero se encuentra despasivado, con esta técnica, se puede volver a pasivar siempre y cuando, no se tenga un grado elevado de corrosión.

CAPÍTULO 2

Antecedentes y presentación del problema

2 ANTECEDENTES

La realcalinización electroquímica es una técnica relativamente nueva, ya que fue patentada en 1988 por John B. Miller (Miller, 1991) quien presentó el proceso electroquímico para transportar una solución alcalina (realcalinización) al interior del concreto, cuyo sistema poroso recupera la alcalinidad, inicialmente perdida por el proceso de carbonatación.

Esta patente explica brevemente el funcionamiento de la técnica registrada, sin embargo, varios estudios (Banfill, 1997; Hird, 2001; Yeih y Chang, 2005, Bertolini et al., 2008) explican que la técnica está basada en el paso de un electrolito realcalinizador en el concreto de forma activa o pasiva (con o sin aplicación de un campo eléctrico, respectivamente).

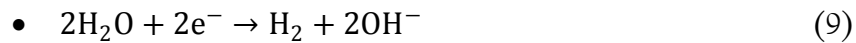
La realcalinización activa, supone forzar el paso de un electrolito por medio de una corriente directa en el concreto, entre el acero de refuerzo y un ánodo colocado en la superficie del concreto a realcalinizar. Por lo general, en los estudios mencionados la densidad de corriente es de 1 A/m^2 aplicada durante periodos que van desde los 7 a los 21 días. En una aplicación habitual se utiliza una esponja a base de celulosa saturada en una solución IM de carbonato de sodio o potasio.

Durante el tratamiento electroquímico, se desarrollan algunas reacciones teóricas (Yeih y Chang, 2005) debido al mecanismo que genera el electrolito en contacto con el concreto. Dichas reacciones son descritas a continuación y mostradas en la Figura 23:

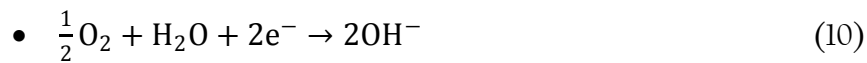
En la realcalinización pasiva (sin aplicación de campo eléctrico) co-existen:

- La absorción capilar, debido a los efectos de disociación de las soluciones alcalinas.
- La difusión de los componentes alcalinos por diferencia de concentración.

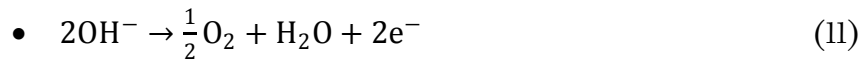
- En la realcalinización activa (ambos mecanismos anteriores, además de:)
- La migración de los iones por el campo eléctrico.
Iones negativos son movidos hacia el ánodo.
Iones positivos son movidos hacia el cátodo.
- La electrólisis en la superficie de los electrodos.
- Iones OH^- son generados en el cátodo:



- Debido a la difusión del oxígeno dentro del concreto, la siguiente reacción toma lugar:



- Por su parte, la oxidación que ocurre en el ánodo:



- Electroósmosis: El electrolito en la superficie de concreto se mueve hacia el cátodo, debido a su potencial zeta.

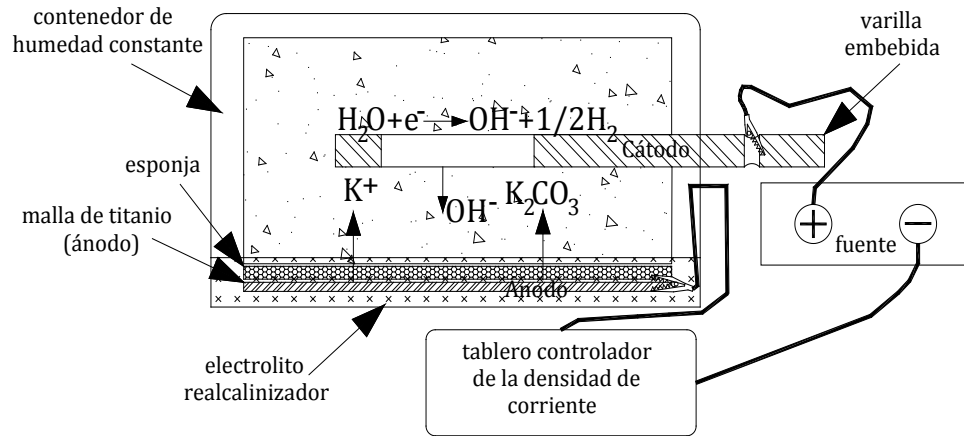


Figura 23. Reacciones teóricas de la realcalinización electroquímica.

El pH alrededor del acero aumenta debido a los iones hidroxilo generados en la zona catódica. El electrolito alcalino que penetra desde la superficie hacia el interior de los poros del concreto deberá recuperar el pH en la fase intersticial y prevenir de futuras disminuciones. Por ende, se presentan dos frentes de recuperación de la alcalinidad, desde adentro hacia afuera por la producción de los OH^- y de afuera hacia dentro por los K_2CO_3 y K^+ del electrolito.

Como se comentó, teóricamente son varios los mecanismos que hacen mejorar al concreto y lograr la pasivación del acero. Sin embargo, en cuanto a los parámetros que rigen el funcionamiento de la técnica, se encuentran pocos hallazgos, entre los cuales se resalta la falta de consenso sobre las variables que hay que considerar y su relación con los parámetros representativos de la estructura candidata a aplicar un procedimiento de realcalinización. A continuación se describen algunos de los trabajos.

En un estudio elaborado por P.F.G. Banfill (Banfill, 1997) se utilizaron especímenes prismáticos de concreto con espesores de 100mm sometidos a carbonatación total en una cámara a presión a 15 bares durante 2 semanas. Después de ser carbonatados se realcalinizaron en una solución electrolítica 1M de Na_2CO_3 , con una densidad de corriente de 1 A/m^2 . Los resultados revelaron que se mejoraron las propiedades del concreto como la resistencia a la compresión, flexión, el módulo dinámico de elasticidad

y la velocidad de pulso ultrasónico, y la tendencia a la expansión álcali sílice disminuye después de haber aplicado la técnica. De igual forma, la densificación de la matriz fue significativa en la zona donde se encontraba el cátodo. En este caso en particular, los especímenes usados no permiten inferir el tipo de estructura que puede ser candidata a ser realcalinizada, pues se usaron especímenes de 100 mm. No obstante, no se describe cuánto fue lo que se pudo mejorar a lo largo de todo el espesor de recubrimiento en función de su pH, además no se comenta cual fue el grado de carbonatación que tenían los especímenes antes de ser realcalinizados. Sin embargo, propone aplicar 1 A/m^2 por 2 semanas (equivalentes a $336 \text{ A}\cdot\text{h/m}^2$) y con ello sería suficiente para mejorar las propiedades físicas del concreto en estudio.

En una publicación de la REHABCON IPS (REHABCON IPS, 2000), se comenta que la realcalinización en concreto con cemento con escoria de alto horno es más difícil que en uno con cemento portland ordinario. Después de 14 días de realcalinización, (total de carga aplicada = $336 \text{ A}\cdot\text{h/m}^2$), fue observada, con el indicador de fenolftaleína, una mejor recuperación en los especímenes fabricados con cemento Portland. Sin embargo, después de los 28 días de tratamiento (total de carga = $672 \text{ A}\cdot\text{h/m}^2$) para el concreto con escoria, un pequeño aro alrededor de la varilla fue evidenciado con la fenolftaleína. Algunos resultados similares han sido obtenidos en concretos elaborados con ceniza volante. Este organismo aconseja aplicar entre 10 y 40 V de corriente directa con un flujo de carga de 200 a 450 A/m^2 y como óptimo usar una densidad de corriente de 1 A/m^2 de acero por 1 a 2 semanas. Se recomienda el uso de carbonato de sodio 1 M como electrolito realcalinizador.

En otro trabajo más completo realizado por Weichung Yeih (Yeih y Chang, 2005), se evaluó la eficiencia de la realcalinización electroquímica en especímenes cilíndricos de $\varnothing=100 \text{ mm}$ y 200 mm de alto con una varilla (del No. 4) al centro cuyo concreto se encontraba carbonatado. Fue fabricado con una relación A/C de 0.65. Utilizó como parámetros tres densidades de corriente de 0.8, 1.2 y 2 A/m^2 . Los resultados mostraron que a medida que se incrementa la densidad de corriente hay una ganancia en el pH en la zona del acero de refuerzo al igual que en la resistividad del concreto con respecto a los

días de realcalinización. Además, las medidas del potencial del acero muestran que la probabilidad de corrosión del acero resultó menor al 10% después de haber aplicado la técnica y que la degradación de las propiedades mecánicas del concreto debido a la aplicación del campo eléctrico no fue significativa. En resumen, a medida que aumenta la corriente aplicada, para un recubrimiento fijo de 5 cm, aumenta la alcalinidad en la cercanía del acero de refuerzo generado por la electrólisis del agua. Sin embargo, no se reportaron resultados que indiquen la probable recuperación de la alcalinidad en todo el espesor del recubrimiento. Otro punto importante, es que el pH inicial del concreto fue de 9.5, por lo cual, resultaría importante observar que la técnica logró elevar su pH a pesar de ser un pH inicialmente bajo en un tiempo de aplicación de 21 días.

A.M. Carvajal (Carvajal et al., 2005) publicó resultados sobre la aplicación de la técnica. Usando especímenes de concreto reforzado de 150x150x150 mm, con dos varillas de acero A 44-28 H, con diámetro de 10 mm elaborados con cemento puzolánico y usando una relación A/C de 0.5. Estos especímenes fueron carbonatados previamente en cámaras de penetración acelerada de CO₂ durante un periodo de 21 días. Se utilizó una fuente de poder que aplicó 25 mA durante 7 días y como electrolito realcalinizador usó Na₂CO₃. Los resultados demuestran que alrededor de la barra de acero se formó la película protectora pasivante de óxido, y que el potencial de los especímenes realcalinizados se situó en la zona de pasivación respecto al diagrama de Pourbaix. Se concluyó, que es necesario el tratamiento por más de 7 días para un mayor radio de recuperación de la alcalinidad del concreto alrededor del acero. En este estudio también se concluyó que para estructuras con un recubrimiento de 35 mm aproximadamente se logra una recuperación en la interface acero-concreto por efecto de la electrólisis. Sin embargo, en este estudio se midió el avance de carbonatación en mm con la prueba de fenolftaleína, por lo cual, sería importante, verificar el pH a lo largo del recubrimiento para obtener un índice de la efectividad de la técnica en el concreto propiamente tratado. No obstante, la cantidad de corriente que fue aplicada para este experimento no fue indicada.

Una empresa consultora que se encuentra en Europa (MG Associates, 2010), elaboró dos estudios. Uno para un edificio que se encuentra en Noruega y otro en una torre de control de un puente que se encuentra en Bélgica. En los proyectos, utilizaron la técnica como rehabilitación usando electrolito de Na_2CO_3 al 1M, como ánodo externo emplearon malla de titanio o acero revestido. En otro trabajo, en donde aplicaron esta técnica en un edificio de Corte de Magistrados con un área de 1500 m^2 y que la profundidad carbonatada se encontraba desde 5 a 25 mm. La ventaja de aplicación de la técnica en este fue que como la rehabilitación no provoca ruido por lo tanto el tribunal podía seguir en sesión.

En el primer caso, se aplicaron de 0.3 a 0.5 A/m^2 utilizando 12 V para 2000 m^2 durante 3 a 5 días, y en el otro se aplicó una densidad de corriente de 0.4 a 1.5 A/m^2 durante 12 días para 200 m^2 y en otra sección del mismo puente se aplicó de 1 a 2 A/m^2 en 9 días para 140 m^2 . De los resultados obtenidos se aconseja usar como electrolito el carbonato de sodio, no obstante, en caso de existir riesgo potencial de reactividad álcali agregado se recomienda disminuir la concentración de este electrolito o en su caso utilizar agua, por los efectos secundarios que puedan presentarse debido a esta reacción.

F. González (González, 2008), presentó resultados de la realcalinización utilizando electrolitos de K_2CO_3 y Na_2CO_3 en una concentración 1M. Fueron fabricados dos tipos de especímenes de concreto con un recubrimiento de 2 cm: un grupo elaborado con cemento puzolánico (CPP) y otro con cemento compuesto (CPC) usando relaciones A/C de 0.65. Posteriormente, éstos fueron parcialmente carbonatados en un ambiente de 30°C , 65% HR y 10% de CO_2 . La realcalinización fue aplicada durante 20 días utilizando 1 A/m^2 de acero. Los resultados reflejaron que durante los primeros 5 días se obtuvo una mayor ganancia de alcalinidad y que los anolitos no tienen influencia directa en la recuperación del pH en ambos tipos de concreto.

En cuanto a la cantidad de corriente aplicada para el punto de terminación de la técnica existen varias recomendaciones. Por ejemplo, Van der Hondel y Polder, (Van der Hondel y Polder, 1998), evaluaron dos concretos uno con cemento portland normal y otro con

adiciones de escoria y/o ceniza volante, ellos concluyen que es suficiente aplicar una cantidad de 100 Ah/m^2 para el primer concreto y para los segundos 350 Ah/m^2 . Por su parte, el Comité Europeo de Normalización (CEN) está elaborando una especificación técnica que define el punto final del proceso de la realcalinización electroquímica con un total de carga de 200 Ah/m^2 , desarrollado en la superficie del refuerzo; y la eficacia del proceso queda demostrada con la coloración rosada de la fenolftaleína en la zona del ánodo para un diámetro de 10 mm o menores. La tendencia en la mayoría de las aplicaciones de campo es relacionar la realcalinización directa con un valor de densidad de corriente aplicada y con el flujo total de carga. Los contratistas aplican este criterio y trabajan con un valor empírico comprendido entre 200 y 450 Ah/m^2 valores obtenidos con el tratamiento durante 8 a 18 días con una densidad de corriente óptima de 1 A/m^2 de superficie de acero.

Del análisis anterior se desprende la importancia de seguir el posible incremento del pH en la solución de poro a lo largo de su recubrimiento, ya que aportaría argumentos cuantitativos que permitan asegurar el incremento de la alcalinidad del concreto y la recuperación de las condiciones de estabilidad alrededor del acero de refuerzo. Se evidencia que existen pocos trabajos relacionados con él o los tipos de estructuras que pueden ser tratadas, pero sobre todo, se desconocen cuáles son los requisitos que deben cumplir. Por ejemplo, el efecto de los espesores de recubrimiento, el nivel de deterioro por CO_2 representado ya sea por el frente carbonatación o la disminución de la alcalinidad del concreto. Siendo este uno de los parámetros más importantes, pues depende del grado de carbonatación en que se encuentra la estructura para lograr una mayor efectividad en la recuperación de la alcalinidad por efecto de la técnica. Adicionalmente, la estructura de poro debido a la relación agua/cemento, la continuidad del acero, etc. se constituyen en otros aspectos relevantes.

Otros puntos a discutir como índice de la efectividad de la técnica es la densidad de corriente aplicada y el tiempo de aplicación de carga, que en conjunto ofrecen una indicación de la carga total aplicada. Como hemos visto, los estudios anteriores mencionan aplicaciones que van desde los 100 hasta 350 Ah/m^2 , equivalentes a

densidades de corriente desde 0.5 a 2 A/m² aplicadas en un tiempo entre los 7 a los 20 días. Sin embargo, en ningún caso el flujo total de carga puede ser el único indicativo que permita asegurar el éxito en la aplicación del tratamiento ya que por sí solo no puede dar información local sobre la repasivación del acero corroído; o la recuperación de la alcalinidad de todo el recubrimiento de concreto.

Por último y no menos importante, es el electrolito a utilizar, ya que del análisis anterior podemos comentar que los más usados son los carbonatos de sodio y de potasio. Sin embargo, se piensa que es factible el uso del carbonato de potasio, debido a los problemas que pueda llegar el uso del sodio en el electrolito por la reacción álcali agregado, aunque según Banfill (Banfill, 1997) esto es intrascendente.

2.1 JUSTIFICACIÓN

De los estudios presentados con anterioridad permiten reflexionar en algunas interrogantes sobre el uso de la técnica. Tal es el caso de:

- variación de las densidades de corriente utilizadas contra los espesores de recubrimiento,
- la efectividad de la técnica si la utilizamos como método de prevención sin un riesgo considerable de despasivación del acero de refuerzo,
- la cantidad de corriente óptima para lograr una realcalinización total,
- el tiempo necesario de aplicación de corriente,
- el efecto de la carbonatación en un avance menor que el espesor total de concreto.

Estas son algunas de las cuestiones que se tratarán de responder con este estudio.

Un caso que ejemplifica la justificación de la aplicación de diferentes densidades de corriente se presenta en la Figura 24, la cual fue obtenida del estudio de González, donde resume sus resultados además de los de Yeih y Chang. En ella se puede apreciar la evolución del pH en función de la carga aplicada, y esta última a su vez con el tiempo y la densidad de corriente, por lo tanto, es necesario hacer estudios para mejorar la efectividad de la técnica y así aportar respuestas a la interrogante: ¿qué es más práctico en estructuras reales, incrementar la densidad de corriente o la duración del método electroquímico?

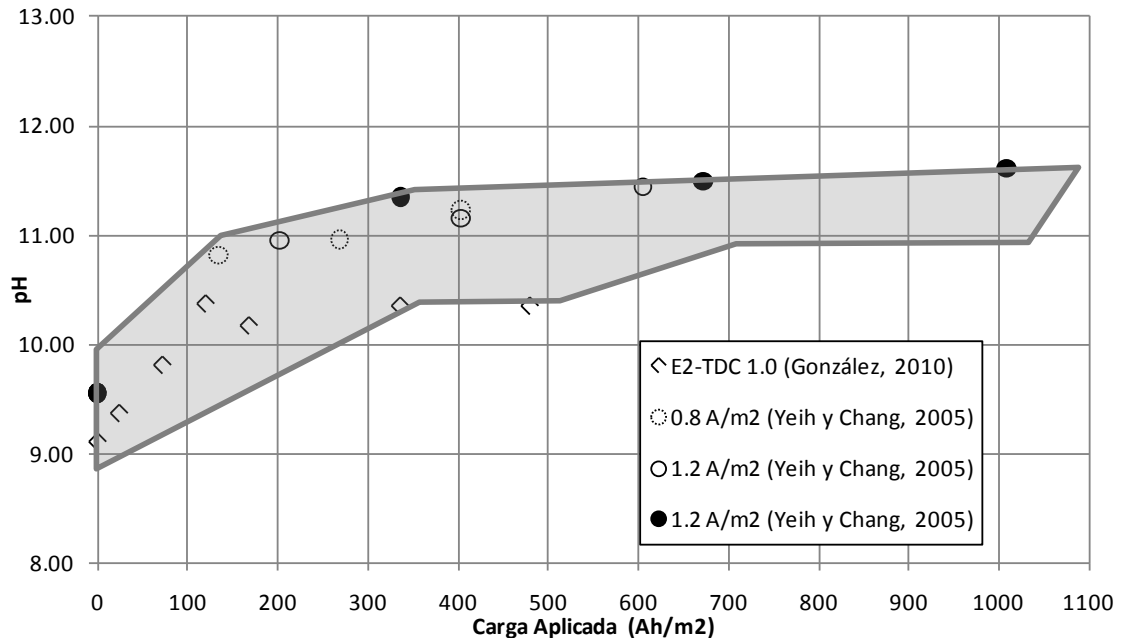


Figura 24. Evolución del pH en el concreto en función de la carga aplicada (a nivel del acero (González, 2010).

En adición a lo anterior, la técnica de realcalinización fue escogida por ofrecer muchas ventajas con respecto a otras técnicas comunes de reparación y por aportar una solución lógica y en constante mejora en su aplicabilidad. Además que soluciona uno de los principales problemas planteados anteriormente: la carbonatación.

Son bien conocidos los problemas que causa la carbonatación produciendo la corrosión del acero, sus consecuencias superficiales o hasta estructurales. Una de las soluciones de estos problemas es la utilización de una técnica convencional como el parcheo. Sin embargo, este proceso, afecta físicamente cualquier estructura, ya que involucra la sustitución parcial o total de cualquier elemento, perdiendo con ello su originalidad. Es por eso, que la utilización de la técnica de realcalinización electroquímica se presenta como una opción viable por su carácter temporal, cuya característica la hace muy atractiva en el ámbito de edificios históricos y patrimonios culturales, donde la conservación de los materiales originales y las superficies es un riguroso requisito en el diseño de la reparación.

Además, el uso de la técnica promueve la sustentabilidad, ya que se evita el uso de mortero o concreto nuevo, empleado comúnmente en los procedimientos de parcheo para sustituir las áreas afectadas por la corrosión.

No obstante, un elemento que se considera de primordial importancia y que justifica el trabajo por la aplicación de la técnica, es el aumento hipotético de la vida útil de las estructuras. Al respecto, se han producido varios modelos (Tuutti, 1982; Sarja et al. 1996; Borges et al., 2007) que relacionan la degradación de la corrosión del acero en concreto en función del tiempo. El modelo de Tuutti, uno de los más utilizados, se basa en dividir la vida de servicio en dos etapas: periodo de iniciación y periodo de propagación.

El periodo de iniciación comprende desde que se ha fabricado y puesto en servicio la estructura, hasta que los agentes externos la atacan y alcanzan el acero de refuerzo para empezar a despasivarlo y provocar su consecuente deterioro. El periodo de propagación abarca desde el fin del periodo de iniciación hasta que termina la vida útil de la estructura.

En este sentido, es prioritario propiciar el incremento de la vida útil y de servicio de una estructura, aplicando la realcalinización electroquímica en la parte final de la etapa de iniciación (despasivación del acero). Bajo este enfoque, se aplicaría la realcalinización como una técnica de prevención. En la Figura 25, se presenta el modelo de Tuutti adaptado a estructuras realcalinizadas, observando el incremento hipotético de la vida de servicio de la estructura.

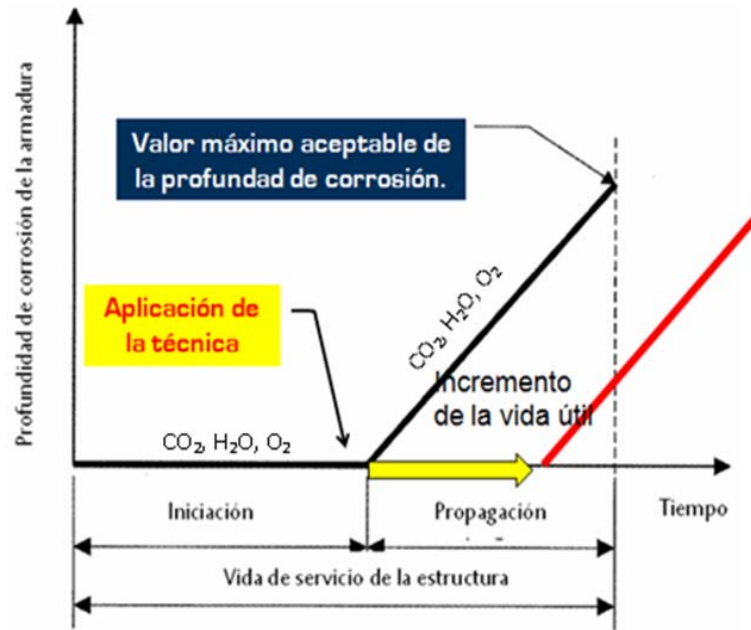


Figura 25. Adaptación del modelo de la vida útil de Tuutti.

Es por eso que un análisis de la técnica de realcalinización electroquímica es importante en el desarrollo y producción del conocimiento que se obtendrá, ya que, como sabemos se encuentra en desarrollo y se podrá evaluar la eficiencia de la técnica como método de prevención y/o mantenimiento; siempre y cuando, se marque la diferencia de condiciones en las que se planteará el estudio y complementando la investigación realizada previamente por F. González (González et al., 2008).

Resulta importante comentar que se avanzará en la línea de investigación de Durabilidad de Estructuras de Concreto del Cuerpo Académico Consolidado “Tecnología del Concreto” de la UANL, para poder desarrollar especificaciones sobre la degradación y mantenimiento de estructuras ocasionadas por la corrosión del acero de refuerzo, siendo la principal causa de problemas de durabilidad. Es por esto, que la formación universitaria de investigadores, la adquisición y manejo de los equipos de laboratorio utilizados para la evaluación y el seguimiento de los fenómenos de corrosión constituyen puntos importantes.

2.2 HIPÓTESIS

- Es factible relacionar los parámetros representativos de una estructura en proceso de carbonatación con los parámetros de aplicación de la realcalinización, con el fin de obtener las condiciones que propicien una extensión de la vida útil de la estructura.

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros mínimos relativos a la técnica y a la estructura que permitan aplicar la realcalinización con un enfoque de prevención en estructuras de concreto convencionales para prolongar su vida útil.

2.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar la influencia de diferentes espesores de recubrimiento en la efectividad de realcalinización de la técnica utilizando dos densidades de corriente.
- Evaluar la influencia del grado de carbonatación de los especímenes caracterizado por la carbonatación total o parcial del concreto frente a los parámetros establecidos en la aplicación de la técnica y del concreto.
- Identificar los posibles efectos no deseables en la aplicación de las densidades de corriente en el concreto reforzado.

2.4 METAS

- Aportar datos técnicos complementarios que permitan definir los límites de aplicabilidad de la técnica electroquímica de realcalinización como una opción de prevención.
- Divulgar los resultados obtenidos en distintos foros especializados, tanto nacionales como internacionales.

CAPÍTULO 3

Desarrollo Experimental

3.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

La realcalinización electroquímica analizada en este trabajo está orientada a ser aplicada sobre estructuras expuestas en condiciones representativas de zonas de alta densidad urbana e industrial o de altas concentraciones de CO₂, y cuya matriz de concreto presente problemas de carbonatación. Por lo tanto, el concreto utilizado en esta investigación, representa un concreto convencional con propiedades físicas similares a las de uno que haya sido elaborado hace aproximadamente 20 años. Por esta razón, tanto los componentes como los agregados seleccionados corresponden a los encontrados en la región. Además, el uso de aditivos reductivos fue suprimido.

3.1.1 CEMENTO

El material cementante utilizado fue un cemento hidráulico de uso convencional (cemento portland compuesto, denominado CPC 30R), que cumple con la norma NMX C 414, el cual tiene una resistencia a la compresión nominal de 30 MPa (306 kg/cm²) a los 28 días y una densidad específica de 3,160 kg/cm³.

Esta norma permite para este cemento 50 al 94 % de clinker pórtland+yeso, 6 al 35 % de escoria granulada de alto horno, 6 al 35 % de materiales puzolánicos, 1 al 10 % de humo de sílice, 6 al 35 % de caliza y minoritarios del 0 al 5 %, todos los rangos de valores expresados en masa.

3.1.2 AGREGADOS

En este estudio se utilizó un agregado fino típico de la región constituido por caliza triturada y denominado comúnmente como arena # 4. En Tablas 2 y 3 se presenta la granulometría y las propiedades físicas del material, determinadas de acuerdo a los métodos de prueba ASTM C 136 y ASTM C 128, respectivamente.

Tabla 2. Granulometría del agregado fino.

Tamaño	% Pasa	ASTM C 136-07	
		Límite superior	Límite Inferior
No. 4	99.7	100	95
No. 8	82.4	100	80
No. 16	54.0	85	50
No. 30	33.5	60	25
No. 50	17.3	30	5
No. 100	10.9	10	0
P No. 100	0	0	0

Tabla 3. Características físicas del agregado fino.

Propiedad	Cantidad
Masa específica (sss*), kg/m ³	2648.0
Absorción, %	1.51
Humedad Campo, %	0.6
Módulo de Finura	3.2

*sss = saturado superficialmente seco.

El agregado grueso utilizado fue el comercialmente disponible en la región, obtenido de caliza triturada. La granulometría fue adaptada para un concreto de tamaño máximo de 3/8", con los límites indicados en la especificación ASTM C 33 para esa dimensión y las características físicas fueron obtenidas de acuerdo al método de prueba ASTM C 127 y 136. En las Tablas 4 y 5 se muestran la granulometría y las características físicas del agregado grueso.

Tabla 4. Granulometría del agregado grueso.

Tamaño	% Pasa	ASTM C- 33	
		Límite superior	Límite Inferior
½”	100	100	100
3/8”	95	100	90
No. 4	40	55	20
No. 8	15	30	5
No.16	5	10	0
No. 50	0	5	0
Pasa No. 8	0	0	0

Tabla 5. Características físicas del agregado grueso.

Propiedad	Cantidad
Masa específica (sss), kg/m ³	2715
Absorción, %	0.44
Humedad Superficial, %	0.10
Peso volumétrico varillado seco, kg/m ³	1697

3.1.3 ACERO DE REFUERZO

El acero de refuerzo utilizado consistió en varillas convencionales grado 42 comercial, que cuenta con un límite de fluencia el cual cumple con la especificación NMX-407-ONNCCE de 42 kg/mm² y un diámetro de 95 mm (3/8”).

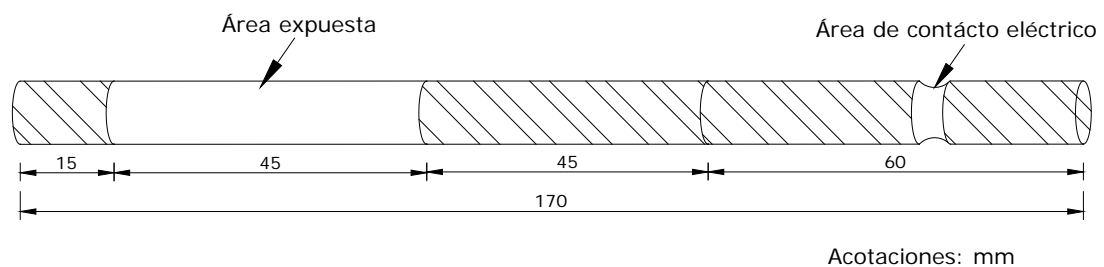


Figura 26. Arreglo de la varilla experimental.

El proceso de preparación de las varillas consistió en cortar con sierra, longitudes de 170 mm, posteriormente, se limpiaron con cardas de alambre colocadas en un torno para eliminar el exceso de óxido y por último se aplicó el recubrimiento consistente en pintura epóxica a base de resinas con bajo contenido de compuestos orgánicos, limitando previamente el área de exposición y la zona para las conexiones eléctricas.

En la Figura 26 y 27 se presentan, respectivamente, las dimensiones del refuerzo utilizado y el aspecto obtenido al final del proceso de preparación, en el cual puede observarse la zona para conexión eléctrica (de una longitud de 45 mm), utilizada ya sea, durante las mediciones electroquímicas o para la aplicación de la técnica de realcalinización.



Figura 27. Aspecto de las varillas posterior al proceso de preparación.

3.2 DISEÑO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO REFORZADO

El espesor del recubrimiento de concreto es importante para garantizar la protección natural del acero de refuerzo impidiendo el acceso de los agentes ambientales (efecto barrera). Existen normas internacionales, en donde se especifican los espesores adecuados de acuerdo a la agresividad ambiental. En la Figura 28, se muestran los valores de recubrimientos de concretos reforzados considerados en algunas normativas internacionales (Andrade y Feliu, 1989).

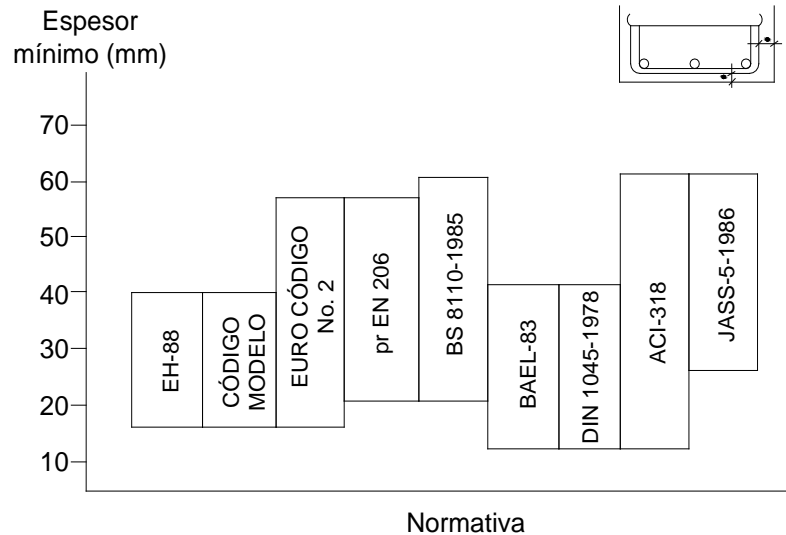


Figura 28. Espesores de recubrimiento de concreto contemplados en diferentes normas internacionales.

Tal y como se muestra en la figura anterior, existe un amplio rango de variación, con valores que oscilan entre 15 y 60 mm. Sin embargo, el ACI-318, en el apartado 7.7.1 referente a concreto construido en sitio con acero de 3/8" (no preesforzado), señala como recubrimiento mínimo 20 mm para losas, muros y viguetas, y 40 mm para vigas y columnas.

A su vez, pocos son los estudios que han tomado en cuenta el efecto del espesor de recubrimiento en la aplicación de la técnica de realcalinización electroquímica. Por lo tanto, dado que el ACI-318 se constituye como el código convencionalmente usado a nivel nacional, se decidió fabricar especímenes de concreto que tengan un recubrimiento dentro de estos rangos, como los son 20 y 40 mm. Una vez que de los recubrimientos fueron seleccionados, el diseño del espécimen fue establecido recurriendo a una geometría prismática por facilidad de fabricación, con dimensiones de 100x110x140 y de 60x70x140 mm para los recubrimientos de 40 y 20 mm respectivamente en la cara por realcalinizar. En la Figura 29 se presentan las configuraciones esquemáticas de los especímenes.

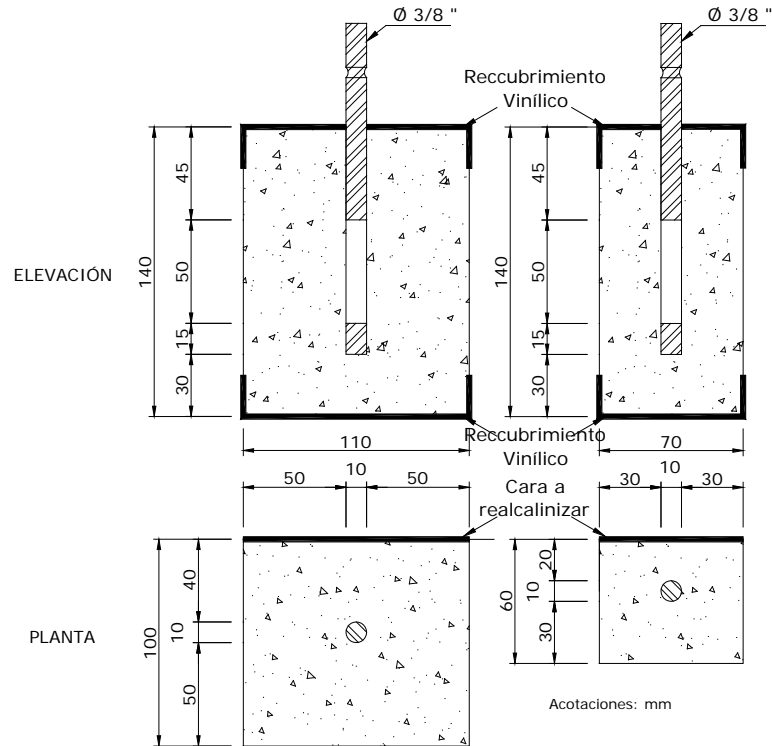


Figura 29. Configuración esquemática de los especímenes.

También en esta figura se muestra la localización del recubrimiento vinílico aplicado en en ambos extremos del espécimen. Esto para impedir y/o retrasar el ingreso de CO₂ por los extremos.

Para simplificación del nombre de los especímenes en función del recubrimiento de concreto, se optó por el uso de la nomenclatura para especímenes con recubrimiento de 2 cm como E2, agregando una P para carbonatación parcial o una T para total (E2-P, E2-T). Para los especímenes con recubrimiento de 4 cm como E4 agregando una P para carbonatación parcial o una T para total (E4-P, E4-T).

3.3 DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

Uno de los elementos más significativos en el desempeño de un concreto frente a la carbonatación es su composición, la cual está directamente relacionada a uno de los

factores más importantes en la protección de las armaduras: la relación A/C (Moreno et al, 2004). Este parámetro influye en el volumen de los vacíos, los cuales, se constituyen en el vehículo para el paso de los agentes agresivos. Con el objetivo de favorecer el ingreso de éstos agentes se optó por utilizar una relación A/C de 0.65 de un concreto convencional. Otra razón por la cual se ha optado por utilizar esta relación es debido a que de acuerdo a un estudio elaborado por la SCT (López et al, 2006), el mayor daño fue encontrado en puentes construidos hace 20 años; por lo tanto, se pretendió simular un concreto el cual haya sido colado hace 15 años o más. Considerando que el concreto cuenta con una relación A/C de 0.65 y de acuerdo a la Figura 30, la resistencia aproximada de los concretos producidos hace 20 años era de aproximadamente 25 MPa (Kosmatka et al, 2004).

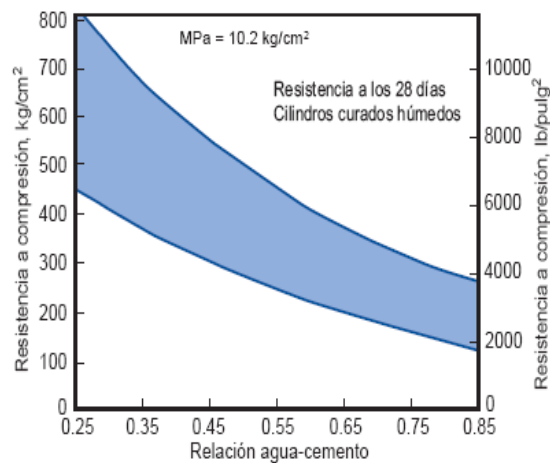


Figura 30. Variación de resistencias típicas para relaciones agua-cemento de concreto de cemento portland basadas en más de 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999.

El proporcionamiento elaborado fue basado en el cálculo de volúmenes absolutos propuesto por el Comité ACI 211. En la Tabla 6 se presenta la dosificación de la mezcla de concreto elaborada con una relación A/C de 0.65, manteniendo como constante la cantidad de cemento de 352 kg/m³.

Tabla 6. Proporcionamiento de la mezcla de concreto.

Cemento kg/m ³	Agua kg/m ³	Agregado Grueso kg/m ³	Agregado Fino kg/m ³
352	228.8	747	1009

3.3.1 PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Las pruebas que son realizadas al concreto en estado fresco son consideradas confiables para garantizar una calidad final del concreto en estado endurecido. Las pruebas aplicadas fueron las siguientes:

- Temperatura: la medición de la temperatura del concreto recién mezclado (de acuerdo al método de prueba estándar ASTM C 1064), en la Figura 31 (A y B) se ejemplifica la medición de la temperatura.



a)



b)

Figura 31. Medición de la temperatura en estado fresco.

- Revenimiento: la prueba de revenimiento (véase Figura 32) para determinar la consistencia del concreto. Esta es una medida de la fluidez o movilidad relativa de la mezcla de concreto. El revenimiento se realizó de acuerdo al método de prueba estándar ASTM C 143.



Figura 32. Medición del revenimiento.

- Masa unitaria: La determinación de la masa unitaria se realizó siguiendo el método de prueba estándar ASTM C 138 (véase Figura 33). Ésta es una herramienta importante utilizada para controlar la calidad del concreto recién mezclado. Una masa volumétrica nos puede variar debido a, 1) a un cambio en los materiales, 2) a un mayor contenido de aire, 3) a un mayor contenido de agua, 4) a un cambio en las proporciones de los ingredientes y/o, 5) a un menor contenido de cemento.



Figura 33. Enrase de la muestra de concreto para la determinación de la masa unitaria.

- Contenido de aire: Para determinar el contenido de aire de la mezcla por el método de presión (véase Figura 34) se utilizó el método de prueba estándar ASTM C 231. Esto nos ayudó a determinar la cantidad de aire de la mezcla. Éste método se utiliza para concretos normales (como es el caso del presente estudio) y pesados.



Figura 34. Determinación del contenido de aire por el método de presión.

3.3.2 ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES

Previo a la elaboración de los especímenes de concreto, se habilitaron los moldes de acero como se muestra en la Figura 35, los cuales fueron adaptados para los diseños de 100x110x140 y de 60x70x140 mm. Las varillas previamente preparadas fueron colocadas de acuerdo al recubrimiento de 20 y 40 mm, con respecto a una de las caras del espécimen. También se habilitaron especímenes cilíndricos de de 100x200 mm para determinar la resistencia a la compresión. La fabricación y curado de especímenes de concreto en laboratorio fue elaborado de acuerdo normal método de prueba estándar

ASTM C 192. Posterior a la colocación del concreto, los especímenes fueron mantenidos en los moldes por 24 horas a ambiente de laboratorio convenientemente protegidos del intercambio de humedad.



Figura 35. Habilitación de moldes de acero.

Posteriormente, los especímenes fueron desmoldados (véase Figura 36) y conducidos a un cuarto mantenido a 23 ± 1 °C, y una humedad relativa superior al 95 % en donde permanecieron 28 días para el consecuente curado estándar.



Figura 36. Desmolde de los especímenes.

3.3.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La única prueba que se realizó en estado endurecido para caracterizar la mezcla de concreto fue la resistencia a compresión. Esta prueba fue realizada para todas las mezclas elaboradas y para los días 1, 7, 14 y 28 días. Los especímenes cilíndricos de concreto fueron previamente cabeceados con mortero de azufre de acuerdo normal método de prueba estándar ASTM C 617 y fueron probados de acuerdo a la norma ASTM C 39, llevándose a cabo en una prensa hidráulica de marca ELE, con una capacidad máxima de 200 toneladas. En la Figura 37 se muestra el equipo utilizado para la determinación de la resistencia a compresión de un cilindro de concreto.



Figura 37. Prueba de resistencia a compresión.

3.4 CARBONATACIÓN DEL CONCRETO

Para carbonatar al concreto, fue necesario exponer los especímenes a un proceso de carbonatación acelerada en un ambiente rico en CO_2 , debido a que, en condiciones atmosféricas normales, la velocidad de carbonatación es relativamente lenta, ya que la concentración de CO_2 presente en el ambiente se encuentra alrededor del 0.03% por volumen de aire (Duran, 2003).

En primer instancia se realizó un secado de los especímenes en un horno de ventilación forzada a 40°C por 24 horas, posteriormente, se introdujeron en una cámara ambiental

(Figura 38) diseñada y fabricada en el Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, estableciéndose las condiciones más críticas para acelerar la carbonatación, con una concentración de CO₂ al 20% y una humedad relativa interior de 65 ± 10 % (Verbreck, 1958 y Wierig, 1984).



Figura 38. Cámara ambiental para acelerar el proceso de carbonatación.

Las condiciones ambientales se mantuvieron constantes hasta alcanzar el frente de carbonatación deseado. Algunos especímenes fueron regularmente extraídos únicamente para determinar el frente de carbonatación, el pH del concreto, y las mediciones electroquímicas. Este monitoreo fue importante, debido a que el enfoque de prevención pretendido en este estudio depende en gran medida del estado de degradación del acero en el concreto carbonatado, el cual debe cumplir como máximo con una degradación por corrosión del acero incipiente.

La inducción de la carbonatación fue conducida hasta obtener dos niveles de carbonatación en el recubrimiento del concreto: uno parcial y otro total. Es decir, se

obtuvieron especímenes parcialmente carbonatados, en los cuales la carbonatación alcanzó la mitad de su recubrimiento (siendo de 10 mm para los especímenes de 20 mm de recubrimiento y de 20 mm para aquellos de 40 mm de recubrimiento). De igual forma, se obtuvieron especímenes con carbonatación total del recubrimiento en estudio. El avance fue inspeccionado regularmente con el uso de la fenolftaleína. Por lo tanto, la técnica de realcalinización fue analizada en función de la recuperación del pH del concreto en dos diferentes niveles de carbonatación del recubrimiento: parcial y total.

3.4.1 CARACTERIZACIÓN DE UN CONCRETO CARBONATADO

Un punto importante en la evaluación del avance de carbonatación, es en los especímenes totalmente carbonatados, debido a que la técnica de realcalinización es utilizada con fines de prevención o de un estado incipiente de corrosión. La caracterización del concreto carbonatado es necesaria debido que los objetivos suponen la aplicación de la técnica sin despasivación del acero. El seguimiento nos dio información necesaria de la evolución del avance del frente de carbonatación y se evaluó con ella el grado de avance de la carbonatación.

3.4.1.1 ESPESOR DE CARBONATACIÓN

El espesor de carbonatación fue medido al obtener muestras de concreto recién cortado, posteriormente se le roció un indicador ácido-base. Este indicador, debe pigmentar al concreto que permanece alcalino y permanece incoloro cuando el pH de la fase intersticial es menor a 9 (Trocónis et al, 1998). Existen varios indicadores que suelen ser empleados como la timolftaleína, el amarillo de Alizarin, indicadores universales y la fenolftaleína, siendo este último el más utilizado.

Se optó por utilizar el indicador de fenolftaleína por ser el más común, además se puede inspeccionar visualmente el frente de carbonatación en el concreto recién expuesto. El indicador se elaboró a partir de una solución de alcohol al 1% de fenolftaleína, y fue aplicada inmediatamente después de hacer el corte del espécimen. De esta manera, la fenolftaleína pigmenta en un color rosa púrpura en la escala de potencial de hidrógeno

(pH) por encima de 9.5. El frente de carbonatación fue obtenido con el promedio de las distancias medidas con un vernier de precisión de 0.01 mm desde la cara expuesta, hacia la varilla en distintos puntos del perfil. En la Figura 39, se representa el corte fresco de un perfil carbonatado rociado con fenolftaleína.

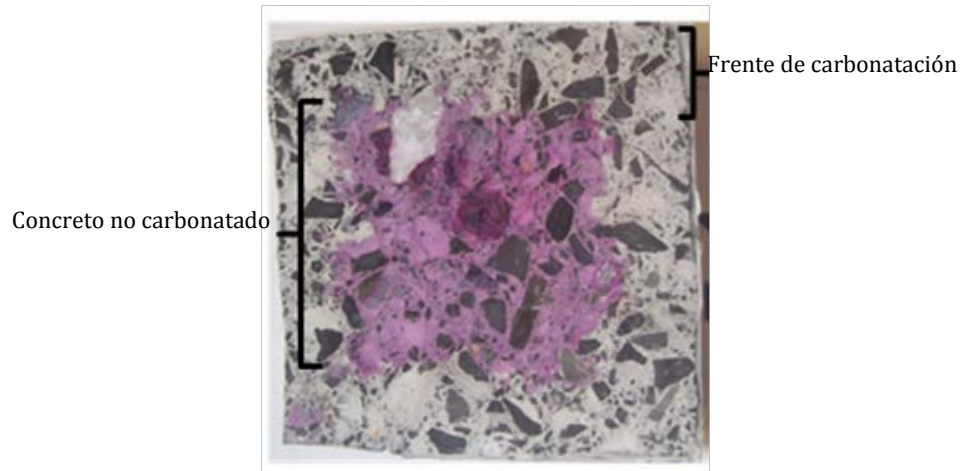


Figura 39. Aspecto de un concreto después de la aplicación de fenolftaleína.

Con el promedio de la profundidad de carbonatación del concreto, se procedió a estimar el avance del fenómeno a cualquier edad, para lo cual se utilizó la fórmula de la primera Ley de Fick [Broomfield, 1997]:

$$X_{co_2} = K_{co_2} t^{1/2} \quad (12)$$

Donde:

X_{co_2} = es el espesor carbonatado, en mm

K_{co_2} = coeficiente dependiente del estado del concreto, en mm/año

t= tiempo, en años

Una vez obtenido el espesor carbonatado, se pudo obtener el valor del coeficiente “ K_{co_2} ” de la ecuación (10). Por lo tanto, fue posible predecir el tiempo que tardaría en carbonatarse el concreto hasta una distancia X_{co_2} , o hasta la profundidad de la varilla, lo anterior conociendo el espesor del recubrimiento de concreto.

Dado que el avance del frente de carbonatación es función directa de las características del concreto de recubrimiento, dicho avance fue monitoreado periódicamente con el método de la fenolftaleína y mediciones de pH. De esta forma se obtuvieron los perfiles necesarios para estimar el tiempo requerido para alcanzar la carbonatación parcial (10 y 20 mm para espesores de recubrimiento de 20 y 40 mm, respectivamente) o total del concreto (para los 20 y 40 mm del recubrimiento), pero sin llegar a la despasivación del acero.

3.4.1.2 MEDICIÓN DE PH

Debido a que la prueba de fenolftaleína solo muestra el rango de alcalinidad cuando el concreto tiene un pH menor aproximadamente de 9 o mayor a 10; fue necesario elaborar mediciones de pH en los especímenes. Esto para obtener valores reales del avance de la carbonatación o también en la recuperación de su pH después de aplicación de la técnica de realcalinización. Las mediciones de pH son importantes para asegurar la eficiencia en la aplicación de la técnica como preventiva.

Es por esto que se obtuvieron valores de pH de varias profundidades, dependiendo del tipo de espécimen. Preferentemente, los especímenes de 20 mm de recubrimiento fueron divididos en tres profundidades a cada 6.6 mm aproximadamente y los especímenes de 40 mm dividido en cuatro profundidades a cada 10 mm.

Para determinar el pH en estas zonas, se siguió el procedimiento siguiente:

- Se realizaron cortes representativos de cada profundidad mencionada lo anterior utilizando una sierra con disco de diamante.
- La muestra representativa se introdujo a un horno de temperatura constante a 40°C por 24 h.

- Se pulverizó la muestra en un mortero de ágata.
- Se preparó una solución de la muestra representativa pulverizada con agua destilada en una relación 1:10 por masa de concreto.
- Posteriormente, la solución se agitó vigorosamente por un tiempo de 5 minutos hasta alcanzar su homogenización y se dejó reposar durante 20 minutos.
- Por último se procedió a medir esta solución resultante en un pH-metro digital marca Orion 4-Star Thermo Scientific como se muestra en la Figura 40.



Figura 40. Equipo de medición de pH en muestras de concreto pulverizado.

Previo a las mediciones se verificó la calibración del equipo con buffers estándar de pH. El equipo, recrea una curva de regresión de calibración cercana al 95 % con la cual el equipo compara el pH de cualquier solución con dicha curva. Por cada muestra representativa se obtenían 2 mediciones de pH para verificar la certidumbre de la medida.

3.5 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE REALCALINIZACIÓN

Una vez alcanzada la profundidad de carbonatación parcial y total de los especímenes se procedió a aplicar la técnica de realcalinización. Para seguir la evolución de la técnica de realcalinización y verificar su efectividad se utilizó el mismo procedimiento de evaluación del concreto carbonatado, es decir, la aplicación de fenolftaleína y mediciones de pH. Al final de la aplicación de la técnica se realizaron pruebas electroquímicas para evaluar el efecto de despolarización del acero de refuerzo e identificación de los probables efectos de postratamiento por el efecto de la alta densidad de corriente.

3.6 MONTAJE EXPERIMENTAL

Para la aplicación de la técnica de realcalinización, se utilizó un montaje clásico (véase Figura 41). Éste consiste en conectar desde un tablero controlador que suministra un voltaje determinado por una fuente de alimentación de corriente directa a la varilla de refuerzo (cátodo). Se propuso una malla de titanio (ánodo) embebida en una solución 1 M de carbonato de sodio (NaCO_3) como electrolito realcalinizador.

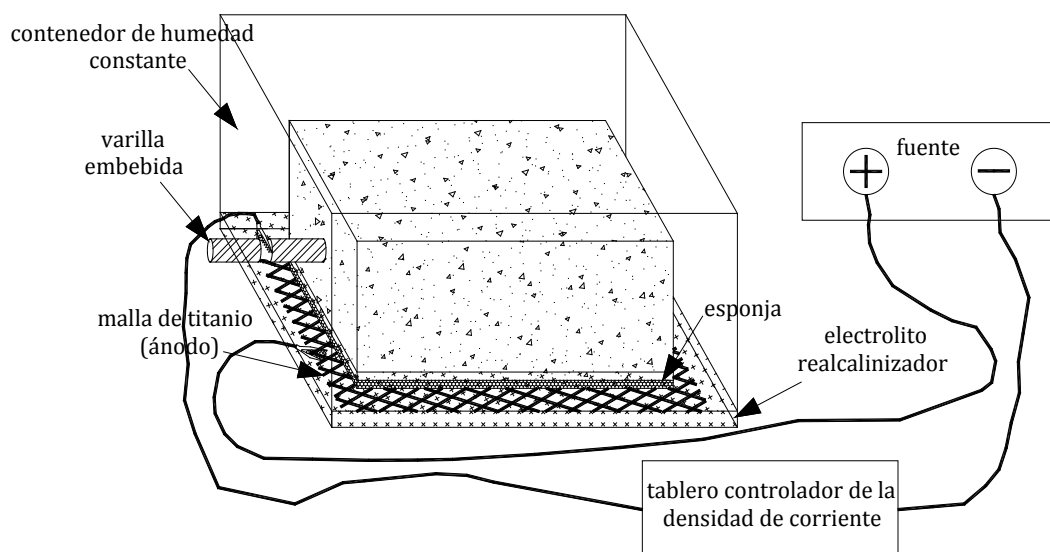


Figura 41. Esquema de montaje clásico de la celda de realcalinización.

3.6.1 TABLERO DE CONTROL

El tablero de control (véase Fig. 42) tiene el fin de controlar la densidad de corriente. El tablero fue constituido por circuitos en serie para la conexión de varios especímenes. Cada espécimen fue conectado con un reóstato de 0 a 50 Ω y una resistencia de 1.5 Ω para determinar la medición de la corriente aplicada a cada espécimen.

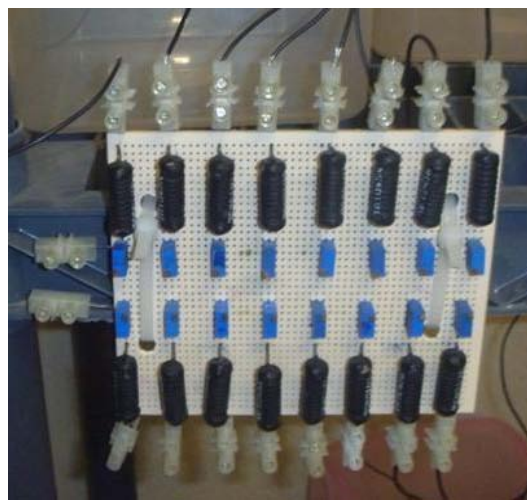


Figura 42. Tablero de control.

Utilizando un multímetro se midieron los voltajes que pasan a través de la resistencia y de esta forma se determinó la densidad de corriente suministrada de acuerdo con la ley de Ohm.

3.6.2 DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA

No existe prácticamente una justificación en cuanto a la densidad de corriente que debe ser aplicada durante el tratamiento de realcalinización. Diversas investigaciones han utilizado valores que oscilan desde 1 hasta 5 A/m^2 . Sin embargo, densidades de corriente altas puede causar efectos secundarios. Es por esto, que se eligió en este trabajo densidades de corriente de 1 y 2 A/m^2 , además que en la mayoría de los estudios

descritos se utilizó un rango de 0.8 a 2 A/m². La densidad de corriente correspondiente a cada ensayo fue aplicada durante 21 días, que incluye un día sin aplicación de corriente para minimizar la resistividad inicial del concreto y los siguientes 20 días con aplicación de corriente con controles a los 1, 3, 5, 7, 14 y 20 basados en el estudio hecho por F. González (González, 2010 y Manrique, 2010). Los días de control se establecieron con el objetivo de evaluar la evolución de la técnica con la aplicación de fenolftaleína y las mediciones de pH, siguiendo el procedimiento descrito en 3.4.1.1.

CAPÍTULO 4

Análisis y discusión de resultados

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO

La caracterización del concreto se realizó con el fin de tener parámetros de calidad sobre los componentes de la mezcla utilizados, además, de las condiciones en las que estuvo expuesto. Es de principal importancia debido a la confiabilidad de los resultados, agregando que se mantiene como una constante para el análisis de los resultados en la aplicación de la realcalinización.

4.1.1 EL CEMENTO

En la Tabla 7 muestran los compuestos químicos del cemento utilizado, cabe mencionar que la norma admite del 0 al 5 % de componentes minoritarios de los cuales puede ser filler de caliza, que es un material que no tiene valor cementante en la mezcla.

Un efecto secundario de la aplicación de la técnica realcalinización electroquímica es el aumento de los álcalis que puede provocar el deterioro por reacción álcali-agregado (RAS) por efecto del electrolito usado, o por la acumulación de los OH^- . Esta reacción forma un gel que se expande cuando absorbe agua de la pasta de cemento en la interface de los agregados. Los productos de la reacción de RAS tienen una gran afinidad con la humedad. Este gel, al absorber agua, puede inducir presión, expansión y fisuración del agregado y de la pasta (Mehta y Monteiro, 2006). La reacción se puede visualizar en dos etapas (Kosmatka et al, 2004):

1. Hidróxido alcalino + gel de sílice reactiva \rightarrow producto de la reacción (gel álcali-sílice)
2. Gel del producto de la reacción + humedad \rightarrow expansión

Los factores que deben estar presentes en la RAS son:

1. Una forma reactiva de sílice en el agregado,
2. Una solución en el poro altamente alcalina (pH) y
3. Humedad suficiente.

Tabla 7. Componentes químicos del cemento utilizado.

Compuestos químicos		CPC 30 R % en masa
SiO ₂	Dióxido de silicio	16.9
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	4.3
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	1.6
CaO	Óxido de calcio	59.5
MgO	Óxido de magnesio	1.5
SO ₃	Anhídrido sulfúrico	3.39
Na ₂ O	Óxido de sodio	0.41
K ₂ O	Óxido de potasio	0.72
TiO ₂	Óxido de titanio	0.18
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo	0.018
Mn ₂ O ₃	Óxido de magnesio	0.04
PxI	Pérdida por ignición	7.3
Na ₂ O equivalente	Álcalis	0.884

Para que ocurra es necesario el gel de sílice reactiva, la humedad y el hidróxido alcalino. Como se comentó en el capítulo 2, estos últimos son producidos por la realcalinización electroquímica para elevar la alcalinidad del concreto disminuida por la carbonatación.

El contenido de álcalis principalmente es aportado por el cemento, sin embargo, al aplicar la técnica de realcalinización electroquímica, estos aumentan con la introducción del electrolito realcalinizador hacia la fase intersticial del acero. Por lo que se puede considerar crítico, si este, antes de aplicar la técnica ya presenta una cantidad elevada de álcalis.

Conforme a ASTM C 150, los álcalis equivalentes se pueden calcular como:

$$Na_{equiv} = Na_2O + 0.658K_2O \quad (13)$$

El cemento usado tiene un contenido de **0.884** en masa de cemento. Cuando se tienen agregados reactivos, este valor debe ser inferior a 0.6% (Aitcin, 2005). Sin embargo, podría verse incrementado debido a la naturaleza del electrolito utilizado en la realcalinización.

Los álcalis ya hidratados posteriormente se transforman en los hidróxidos de sodio, potasio y en conjunto con los hidróxidos de calcio, son los que producen la alta alcalinidad al concreto. Por lo tanto, hipotéticamente al tener mayor contenido de álcalis, será más lento el mecanismo de carbonatación, debido a que éstos tendrán que ser consumidos totalmente por el CO₂ para reducir el pH de la solución del poro del concreto. Según la Red DURAR (Tronconis et al, 1998) cuando mayor sea el contenido de CaO y de óxidos alcalinos (Na₂O y K₂O) menor será la velocidad de carbonatación.

A pesar de la cantidad de álcalis o del problema de reactividad álcali agregado, el agregado de la región (utilizado en esta investigación) es de origen calizo y, es considerado como potencialmente no reactivo, por tal razón, no fue necesario utilizar un cemento especial, asimismo, se pretendió fabricar un concreto convencional, por lo que una modificación en el tipo de cemento podría resultar en un concreto no convencional.

4.1.2 EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

La Tabla 8 muestra los resultados de las pruebas en estado fresco (obtenidas a 25°C y con una HR de 50%) realizadas en el concreto elaborado para la fabricación de los especímenes reforzados.

Tabla 8. Pruebas en estado fresco.

Revenimiento, cm	19
Contenido de aire, %	1.8
Peso Volumétrico, kg/m ³	2329.2

Como se mencionó en la sección 3.1, se pretendió utilizar un concreto convencional, además, se diseñó de acuerdo con el método del ACI 211 de volúmenes absolutos, proponiendo que la mezcla obtuviera un revenimiento entre 15 y 18 cm. El revenimiento obtenido fue de 19 cm, ligeramente superior al estimado. Por otro lado, el contenido de aire, resultó menor al valor de 3% estimado en el diseño.

4.1.2 EL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Teniendo el concreto en estado endurecido, se determinó su resistencia mecánica a compresión, se usaron 3 cilindros por cada edad para posteriormente obtener un valor promedio de la resistencia. Estos valores son presentados en la Tabla 10 y en la Figura 43 se muestra la comparación de los resultados.

Tabla 9. Resultados de resistencia a compresión.

Días	Resistencia a compresión (Mpa)
1	11.1
7	20.8
14	23.5
28	25.2

Como se observa en la figura 43, el ACI 211.1 con relación a los resultados de la resistencia a compresión a los 28 días y las relaciones agua/cementante (en nuestro caso cemento CPC 30R), la resistencia mínima aproximada para un concreto de relación A/C de 0.65 fabricado sin aire incluido, es del orden de 220 kg/cm². La resistencia obtenida a 28 días, en nuestro caso, fue de 25.2 MPa (257.3 kg/cm²) 17% más que la resistencia mencionada por el ACI. Este incremento probablemente se deba a diversos factores como lo son; la naturaleza de los materiales utilizados y/o la técnica de colocación del concreto en los moldes. Además, el contenido de aire fue relativamente menor al considerado en el diseño de la mezcla, lo cual repercute en la densificación de la matriz.

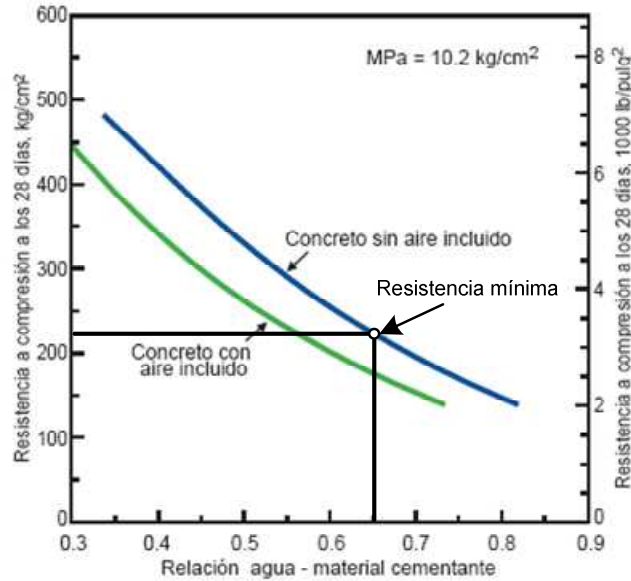


Figura 43. Relación aproximada entre la resistencia a la compresión y relación agua-material cementante. La resistencia se basa en cilindros curados durante 28 días en ambiente húmedo, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). Adaptado de la tabla 9-3 del ACI 211.1, ACI 211.3 y Hover 1995.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO CARBONATADO

Como ya se ha mencionado, la carbonatación es un fenómeno relativamente lento pues modifica las estructuras de concreto y promueve la corrosión del refuerzo, lo anterior, en función del avance del frente, que es de aproximadamente 1 mm/año (Broomfield, 1997).

Debido a que el mecanismo de carbonatación en las estructuras se produce gradualmente con el tiempo, se optó por acelerar el proceso de carbonatación. Para ello, fue necesario identificar y manipular las variables que influyen en la velocidad de progresión del fenómeno (CO_2 , HR, y temperatura). Sin embargo, la cámara acelerada fabricada en el lugar, solamente controla la concentración de CO_2 (hasta 20% en el interior), por lo cual, se decidió utilizar la concentración máxima de $20 \pm 2\%$, lo cual representa poco más de 600 veces la concentración del ambiente (0.03%) (Duran, 2003). Siendo la humedad una de las principales variables antes de introducir los especímenes a la cámara, se sometieron a un secado previo de 24 h a 40°C con la ayuda

de un horno con circulación forzada de aire. Después de este paso, se introdujeron los especímenes con recubrimiento de 4 cm a la cámara y a los 14 días se abrió para verificar el avance de carbonatación. La elección del tiempo fue basado en un estudio previo hecho por Manrique (Manrique, 2010), en donde utilizando especímenes similares, se tenía un avance de 10 mm de carbonatación evidenciado con la prueba de fenolftaleína y utilizando un 10% de CO₂.

Sin embargo, al llevar a cabo la verificación del avance de la carbonatación en los especímenes, el avance no correspondió con el esperado, debido a que la HR del interior de la cámara se mantenía en un 85 %. Con el objetivo de fijar este parámetro, se decidió introducir contenedores con sales de carbonato de potasio (véase Figura 44) ya que esta sal tiene la capacidad de establecer un equilibrio en la HR alrededor de 40 %, a una temperatura de 25° C (Galleguillos y Cid, 2003).

Después de esta corrección los especímenes fueron sometidos a secado nuevamente e introducidos posteriormente a la cámara ambiental la cual contaba en su interior ya con los contenedores de carbonato de potasio.



Figura 44. Contenedores de carbonato de potasio.

Los especímenes con recubrimiento de 20 mm (E2) se sacaron de la cámara de carbonatación a los 21 y 45 días, a estas edades el concreto se encontraba parcial y totalmente carbonatado respectivamente. Los especímenes con recubrimiento de 40 mm (E4), fueron extraídos entre los 60 y 75 días para las series de parcialmente carbonatados y entre los 120 y 150 días para los especímenes totalmente carbonatados.

En la Tabla 10 se muestra la evolución de la carbonatación en mm y los coeficientes de carbonatación para los especímenes E2 expuestos durante 21 y 45 días en la cámara de carbonatación. Se realizaron tres mediciones y posteriormente se obtuvo un valor promedio, con este valor se calculó el coeficiente de carbonatación.

Tabla 10. Evolución de la carbonatación a los 21 y 45 días de los especímenes E2.

	Frente de carbonatación	mm	Promedio mm	X _{CO2} mm	t ^{0.5} años	K _{CO2} mm/año ^{0.5}
21d	A	13.5	13.86	13.86	0.240	58
	B	14.7				
	C	13.4				
45d	A	20.0	20.00	20.00	0.370	54
	B	20.0				
	C	20.0				

La Tabla 11 muestra la evolución de la carbonatación para los especímenes E4 con sus coeficientes.

En las Tablas 10 y 11, se puede observar un comportamiento similar en cuanto a la evolución de la K_{CO2} del concreto. Por lo tanto, se cumplió con el objetivo de fabricar un concreto con propiedades de transporte similar en todos los especímenes fabricados.

Tabla II. Evolución de la carbonatación a los 60 y 120 días de los especímenes E4.

	Frente de carbonatación	mm	Promedio mm	X_{CO_2} mm	$t^{0.5}$ años	K_{CO_2} mm/año ^{0.5})
60d	A	23.2	25.54	24.54	0.405	61
	B	24.7				
	C	25.8				
150d	A	40.0	40.00	40.00	0.641	62
	B	40.0				
	C	40.0				

En la Figura 45 se hace una comparación de los resultados obtenidos con aquellos de Kobayashi (Kobayashi y Uno, 1989), quien evaluó varios concretos con diferentes relaciones agua cemento, utilizando una exposición de sus especímenes al 10% de CO₂. Se puede observar que el concreto fabricado tiene un comportamiento similar al obtenido por Kobayashi. No obstante, los espesores de carbonatación obtenidos en este trabajo en comparación con los de Kobayashi, son superiores debido a la diferencia en la concentración de CO₂ utilizado y en las relaciones agua/cemento del concreto, pues en este proyecto se utilizó una relación A/C de 0.65 y Kobayashi A/C de 0.6, 0.5 y 0.4.

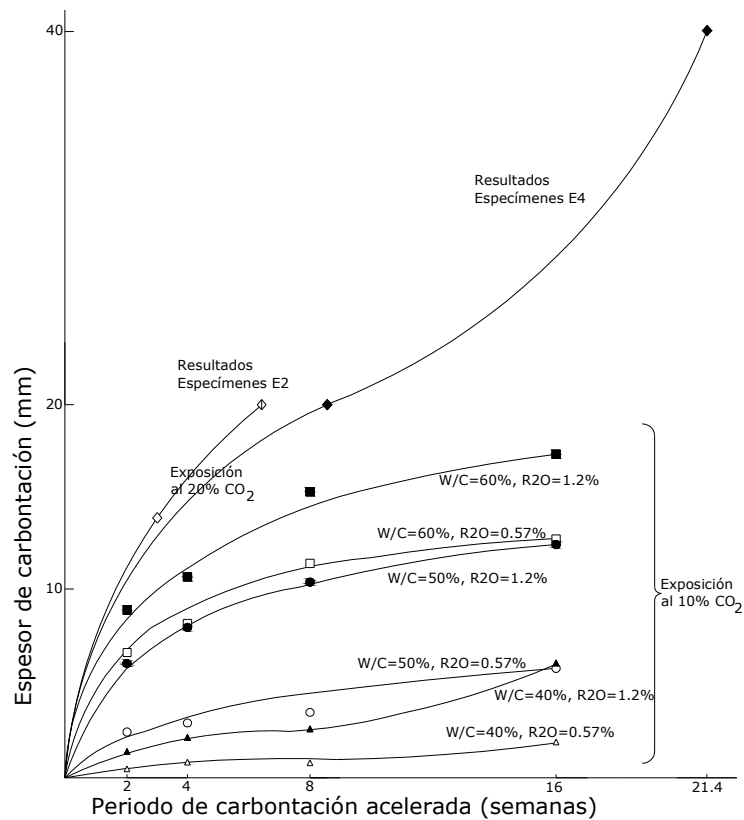


Figura 45. Espesor de recubrimiento carbonatado en función de las semanas de exposición (extraída del trabajo de Kobayashi).

El monitoreo llevado a cabo con fenolftaleína principalmente tiene como objetivo evidenciar una carbonatación parcial y total del concreto localizado en la cara de interés (correspondiente a la superficie del concreto en contacto con el electrolito), cuyo recubrimiento es de menor magnitud. En las imágenes de la Figura 46 se puede observar que el frente de carbonatación parcial en los especímenes con recubrimiento de 40 mm (E4-P) es más uniforme que aquel de los especímenes con 20 mm de recubrimiento (E2-P).

Por su parte, en los especímenes totalmente carbonatados y con recubrimiento de 20 mm (E2-T), se logra observar una pequeña zona con corrosión incipiente. En aquellos especímenes fabricados con 40 mm (E4-T) se observa una zona de color púrpura por el efecto de la fenolftaleína, esto es consecuencia a que dichos especímenes tienen 40 mm por el lado de la cara a realcalinizar y 50 mm del lado de la cara posterior, por lo tanto la

distancia a recorrer por el CO_2 es mayor. Además, se observa el efecto de la aplicación del recubrimiento vinílico utilizado en la parte inferior del espécimen (correspondiendo a la parte lateral izquierda de la figura) aplicado con el objetivo de evitar la penetración del CO_2 por esa zona.



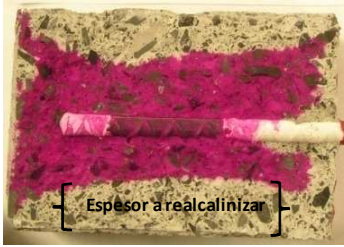

		Carbonatación	
Recubrimiento		Parcialmente	Totalmente
20 mm			
40 mm			

Figura 46. Carbonatación de especímenes evidenciada por la prueba de la fenolftaleína.

Los especímenes carbonatados fueron cortados y su alcalinidad fue medida en las 3 profundidades para los especímenes E2 (6, 12 y 18 mm) y 4 profundidades para los E4 (a 10, 20, 30 y 40 mm), correspondiendo el valor de 6 mm para E2 y 10 mm para E4 en la interface del concreto más cercano a la superficie del espécimen, y 20 mm para E2 y 40 mm para E4 a la interface formada entre el concreto y el acero. Las mediciones se realizaron en un par de especímenes y por duplicado de cada profundidad.

En la Figura 47 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de pH realizadas en el recubrimiento a las profundidades ya comentadas. En los especímenes E2-P y E2-T, en la profundidad de los primeros 6 mm, se observa que el valor de pH se encuentra aproximadamente en 9, lo que confirma lo mostrado en las imágenes mostradas en la

Figura 46, ya que no hay hidróxidos que se encargan de mantener la alcalinidad del concreto. En la profundidad entre 12 y 18 mm para los especímenes E2-T, podemos observar que sigue la misma tendencia de pérdida de la alcalinidad. Sin embargo, para los especímenes E2-P podemos observar que en la zona de transición hacia los 12 mm, tienen un pH cercano a 10.5 por lo que los OH^- podrían empezar a consumirse en esta zona, lo anterior por efecto de la carbonatación; y en la zona hacia los 18 mm el concreto de los especímenes se encuentra sin carbonatarse.

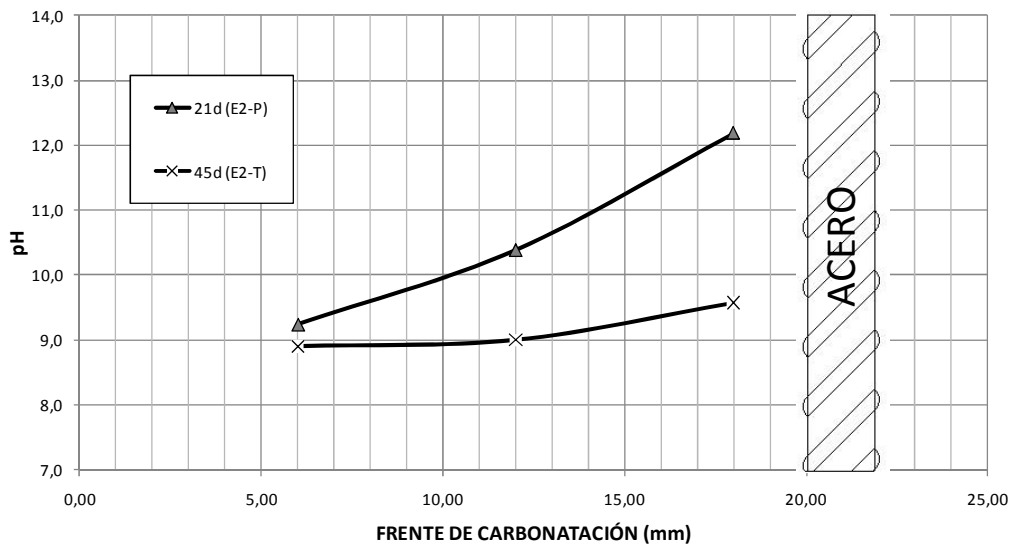


Figura 47. Disminución de la alcalinidad por el efecto de la carbonatación en los especímenes E2-P y E2-T.

En la Figura 48 se presenta la evolución de la alcalinidad obtenida en los especímenes E4 a diferentes profundidades y edades durante la inducción de la carbonatación.

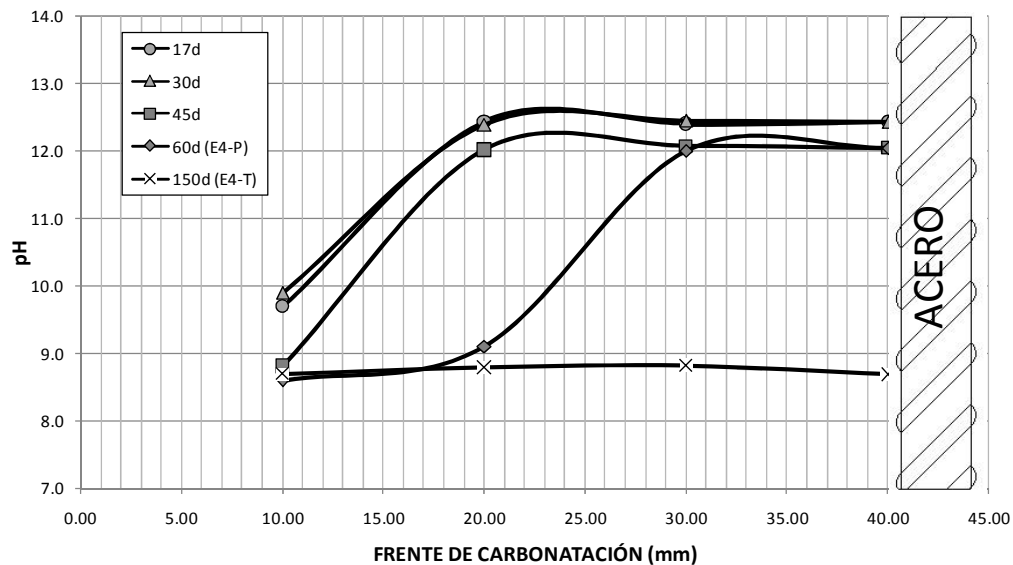


Figura 48. Disminución de pH por la carbonatación especímenes E4-P y E4-T.

Como se puede observar, para obtener un espécimen parcialmente carbonatado (E4-P), es decir con 20 mm de avance, bastaron 60 días para llegar a disminuir la alcalinidad del concreto a valores cercanos a 9.0 en las dos primeras zonas (de 0-10mm y 10-20mm). En el concreto restante, es decir la segunda mitad hacia el interior del concreto (entre 20-30mm y 30-40mm) se obtuvo un valor de pH cercano a 12. Para la serie de especímenes totalmente carbonatados (E4-T) fueron necesarios 150 días dentro de la cámara de carbonatación para lograr una disminución de la alcalinidad del concreto en todo el espesor del recubrimiento. En efecto, se observa un valor de pH oscilando entre 8.5 y 9.0 en los 40 mm de recubrimiento, en todo caso, representativos de concretos carbonatados. Del mismo modo, se concluye que hay ausencia de alcalinidad debido a que se consumen los OH.

Después de carbonatar los especímenes, se procedió a la preparación para aplicar la técnica de realcalinización como se mencionó en la metodología experimental.

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO REALCALINIZADO PARA ESPECÍMENES CON RECUBRIMIENTO DE 20 MM (E2)

4.3.1 ESPECÍMENES PARCIALMENTE CARBONATADOS (E2-P)

Como se mencionó en los antecedentes, González (González, 2010) trabajó con esta técnica, aplicando una densidad de corriente de 1.0 A/m^2 en el concreto elaborado con dos cementantes (CPP y CPC), y usó una relación A/C de 0.65. Los resultados que se referencian en esta investigación son los tomados de las series M3-CPC (Carbonatación parcial) y M4-CPC (Carbonatación total). En la primera serie se utilizó como electrolito realcalinizador K_2CO_3 y en la segunda Na_2CO_3 .

En la Tabla 12 se muestra una comparativa de los resultados de la alcalinidad del concreto en los dos estudios. Podemos observar que en el trabajo de González, se obtuvo un frente de carbonatación un poco mayor con la prueba de fenolftaleína. Sin embargo la alcalinidad inicial (antes de aplicar la realcalinización) del concreto en la zona cercana al acero resultó ser ligeramente mayor que el obtenido en este estudio.

Para la identificación de las diferentes densidades de corriente, a las nomenclaturas establecidas se les agregó las sigas DC1.0 para especímenes realcalinizados pasivamente a 0.0 A/m^2 ; DC1.0 realcalinizados con 1.0 A/m^2 y DC2.0 realcalinizados con 2.0 A/m^2 como se muestra a continuación:

E2-PDC0.0 Espécimen con recubrimiento de 2 cm parcialmente carbonatado realcalinizado pasivamente.

E2-PDC1.0 Espécimen con recubrimiento de 2 cm parcialmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 1.0 A/m^2 .

E2-PDC2.0 Espécimen con recubrimiento de 2 cm parcialmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 2.0 A/m^2 .

E2-TDC0.0 Espécimen con recubrimiento de 2 cm totalmente carbonatado realcalinizado pasivamente.

E2-TDC1.0 Espécimen con recubrimiento de 2 cm totalmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 1.0 A/m².

E2-TDC2.0 Espécimen con recubrimiento de 2 cm totalmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 2.0 A/m².

E4-PDC0.0 Espécimen con recubrimiento de 4 cm parcialmente carbonatado realcalinizado pasivamente.

E4-PDC1.0 Espécimen con recubrimiento de 4 cm parcialmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 1.0 A/m².

E4-PDC2.0 Espécimen con recubrimiento de 4 cm parcialmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 2.0 A/m².

E4-TDC0.0 Espécimen con recubrimiento de 4 cm totalmente carbonatado realcalinizado pasivamente.

E4-TDC1.0 Espécimen con recubrimiento de 4 cm totalmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 1.0 A/m².

E4-TDC2.0 Espécimen con recubrimiento de 4 cm totalmente carbonatado realcalinizado con densidad de corriente 2.0 A/m².

Tabla 12. Avances de carbonatación de los especímenes E2-PDC0.0, E2-PDC1.0 (González, 2010) y E2-PDC2.0, antes de la aplicación de la realcalinización (REA).

Serie	Profundidad de carbonatación, mm	pH en profundidad:		
		6mm	12mm	18mm
E2-PDC 0.0-2.0	Parcial, 13.8	12.2	10.4	9.2
M3-CPC (González, 2010)	Parcial, 16	13.1	11.7	9.3

En la Figura 49 se muestran los resultados obtenidos de los especímenes parcialmente carbonatados realcalinizados pasivamente (E2-PDC0.0) y en los que se utilizó una densidad de corriente 1.0 (E2-PDC1.0) (González, 2010) y 2.0 A/m² (E2-PDC2.0).

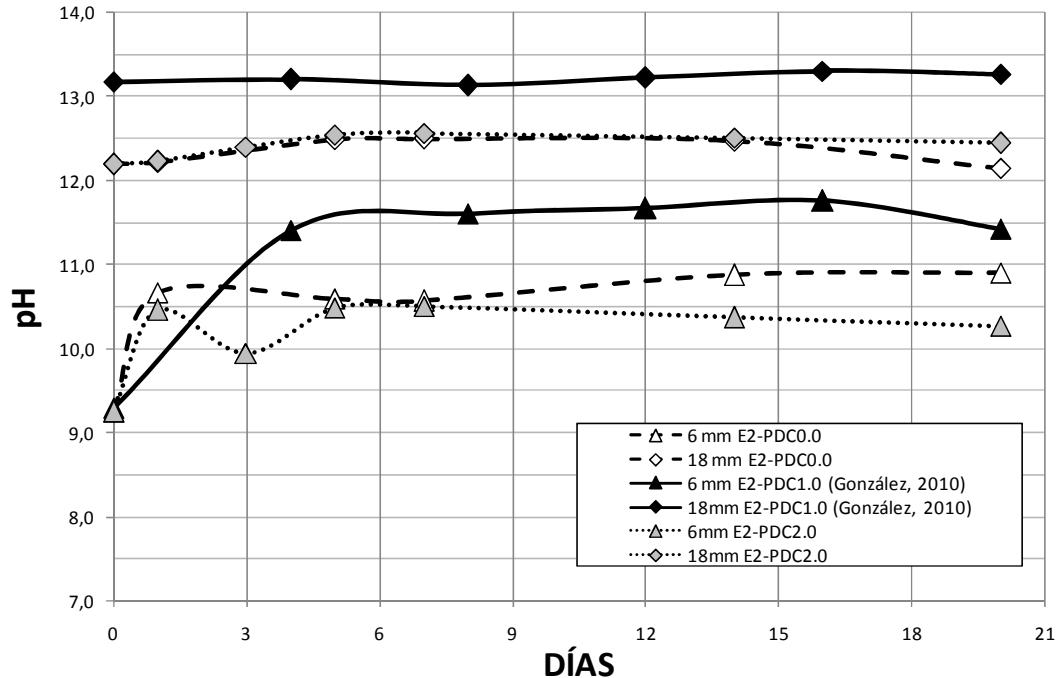


Figura 49. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la realcalinización, especímenes E2-PDC0.0, E2-PDC1.0 (González, 2010) y E2PDC2.0.

Los resultados mostrados en la gráfica representan la zona cercana al acero (indicada como 18 mm) y la que se encuentra en la superficie (indicada como 6 mm), ya que aquellos obtenidos en la fase intermedia (indicada como 12 mm) tuvieron mucha variación debido a que se trata de concretos cuyos especímenes se encuentran parcialmente carbonatados, por lo tanto, es la zona de transición del frente de carbonatación, lo que influye en la alcalinidad medida.

En la zona localizada en la sección cercana al acero, la realcalinización no afectó la alcalinidad del concreto. El valor de pH permaneció alto, entre 12 y 13, es decir, muy cercano al valor obtenido en la misma zona antes de la aplicación de la técnica. Se constató que la carbonatación parcial del concreto no permite el incremento del pH.

En la zona cercana a la superficie del concreto, se observó una ganancia de pH en todas las series. Particularmente, en los especímenes E2-PDC1.0, dicha ganancia es mayor a la obtenida por nuestro estudio. Esto probablemente se debió a que el electrolito

realcalinizador usado por González tiene un pH inicial de 12.18, y el usado en esta investigación es de 11.7 (Véase Figura 50).

Podemos concluir que los parámetros como el recubrimiento de 20 mm, y las distintas densidades de corriente, además de las propiedades físicas de este tipo de concreto, hacen que sea más eficiente el uso de una realcalinización pasiva (E2-PDC0.0), puesto que el pH alcanzado es de valores superiores a los 10.7, por lo tanto, no es necesario aplicar la corriente. Sin embargo, es necesario probar la efectividad de la realcalinización si el frente de carbonatación en el recubrimiento de concreto se incrementa. Esto se pretende analizar en la sección siguiente, en donde se discuten los resultados de los especímenes con recubrimiento de concreto totalmente carbonatado.

En la Figura 50 se muestra la evolución del electrolito en el periodo de aplicación de la técnica. Una de las características de esta técnica es poder equilibrar el ambiente ácido (mayores a 8.5 de pH) del concreto y que tienda a ser alcalino por medio del electrolito.

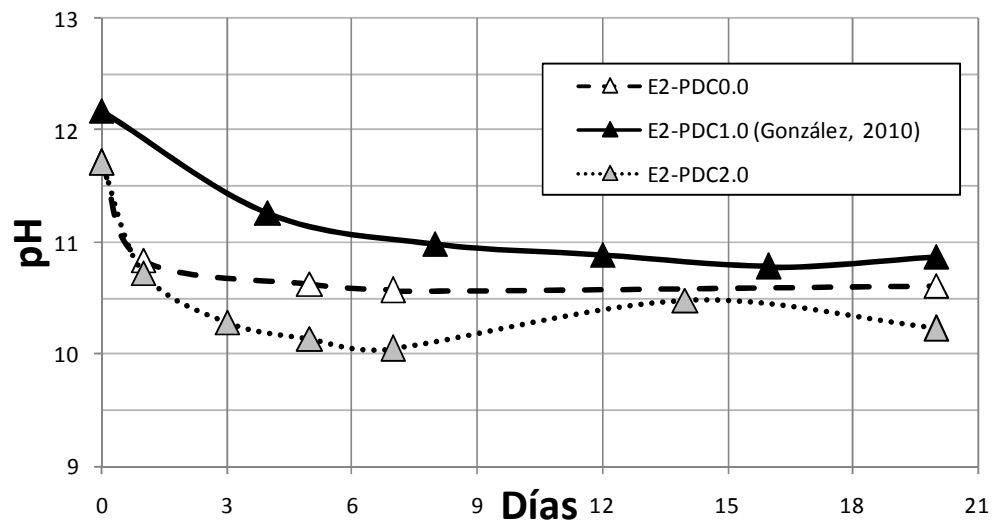


Figura 50. Evolución de los electrolitos en los especímenes E2-PDC0.0, E2-PDC1.0 (González, 2010) y E2PDC2.0.

Durante los primeros 7 días se observa que hay una disminución importante en el pH del electrolito. Sin embargo, después de estos días se estabiliza manteniendo su misma alcalinidad, lo anterior probablemente sea debido a que el pH del concreto en contacto con este ya no tenga el poder suficiente para incrementarse. No obstante, se esperaría que con el tiempo pueda seguir penetrando para alcanzar un mayor avance de frente de realcalinización.

Independientemente de la capacidad máxima que haya tenido el electrolito en la recuperación de la alcalinidad, hay otra reacción que se genera en el ánodo externo al aplicar la corriente (Böhni, 2005):



Podemos inferir, que los iones OH^{-} generados por la electrolisis se transportan por medio de la fase intersticial del concreto. Ya que estos tienen valencia negativa, estos iones se mueven por medio de la corriente hasta llegar al ánodo (la malla), por lo tanto, empieza a ocurrir la reacción II consiguiendo acidificar el electrolito. Por lo tanto, la neutralización del pH entre el concreto y el electrolito puede ocurrir en los primeros 7 días. Posteriormente la acidificación ó disminución de la alcalinidad en los siguientes días.

En la Figura 51 se muestran los cortes frescos de los especímenes E2-P para las diferentes edades, posterior a la aplicación de la fenolftaleína. Se observa el avance de la recuperación de la alcalinidad en la matriz cementante.




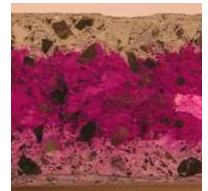
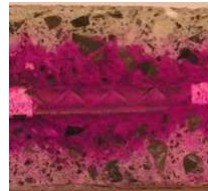
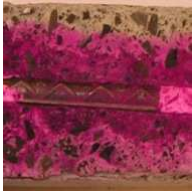






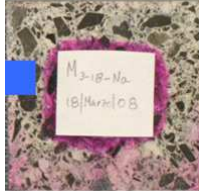
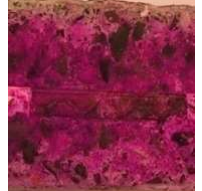

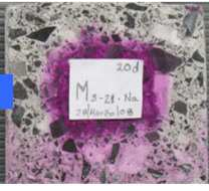

	Densidad de corriente		
	0 A/m ²	1 A/m ²	2 A/m ²
Día 0		_____	
Día 1		_____	
Día 3	_____	_____	
Día 5		4d 	
Día 7		12d 	
Día 14		16d 	
Día 20		20d 	

Figura 51. Aspecto de los cortes frescos en los especímenes E2-PDC0.0, E2PDC2.0 y (4 días) (González, 2010) posterior a la aplicación de la fenolftaleína.

4.3.2 ESPECÍMENES TOTALMENTE CARBONATADOS (E2-T)

En la Tabla 13, se muestran los resultados de la alcalinidad del concreto de los especímenes E2 (totalmente carbonatados) posterior a la inducción de la carbonatación. Podemos mencionar que los especímenes de González se encuentran en un grado mayor de carbonatación por su valor de pH en las tres zonas.

Tabla 13. Avance de carbonatación de los especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC1.0 (González, 2010) y E2-TDC2.0, antes de la aplicación de la REA.

Serie	Profundidad de carbonatación, mm	pH en profundidad:		
		6mm	12mm	18mm
E2-TDC 0.0-2.0	Total, 20.00	9.6	9.0	8.9
M4-CPC-GI (González, 2010)	Total, 20.24	8.3	8.3	8.3

En la Figura 52 se presentan los resultados del mejoramiento del pH de los especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC1.0 (González, 2010) y E2-TDC2.0 a nivel del acero y en la zona superficial. Podemos observar que los resultados del presente trabajo, muestran una tendencia de aumento de pH del concreto en el día 1, y se estabiliza a partir del día 3. En los especímenes E2.TDC2.0, el incremento de la alcalinidad del concreto fue mayor, debido a la producción de los OH^- que se generan por la electrólisis del agua en el nivel del acero. En los resultados de González, se observa que se alcanzó un aumento de pH no mayor de 10.4 a los 20 días. Sin embargo, en la Tabla 14, se muestran los resultados de la alcalinidad en la zona intermedia de las tres series diferentes, de donde podemos observar que el pH en esta zona para la serie E2-TDC1.0 no logra aumentar por ninguno de los dos frentes, ni por la función del electrolito realcalinizador, ni por el efecto de la electrólisis. En recomendaciones de ese estudio se menciona como una posible solución, elevar la densidad de corriente para poder realcalinizar esta zona. Como podemos observar en la figura, los resultados muestran que fue posible incrementar la alcalinidad en esta zona debido a que se incrementó la densidad de corriente, alcanzando valores de pH cercanos a 11.

Como se aprecia en la Figura 52, en los especímenes E2-TDC0.0, se logró una recuperación alcalina de la fase intersticial del concreto en la zona próxima a la superficie desde el primer día, obteniéndose una realcalinización pasiva. Posteriormente, el pH se mantuvo constante hasta el final de la prueba.

Tabla 14. Valores de pH en la zona intermedia para los especímenes E2-T.

Series	Días						
	0	1	3	5	7	14	20
E2-TDC0.0	9.0	10.4	-	10.4	10.4	10.4	10.4
E2-TDC1.0 (González, 2010)	8.4	8.3	8.7	8.7	8.7	8.6	9.0
E2-TDC2.0	9.0	10.2	10.3	10.5	10.4	10.7	11.1

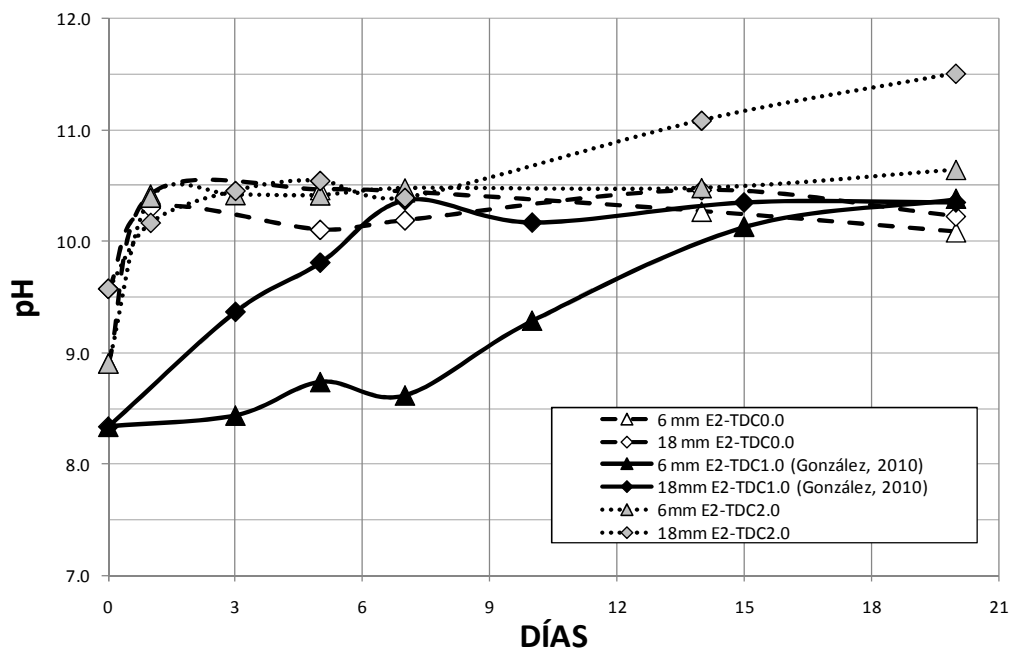


Figura 52. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la realcalinización, especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC1.0 (González, 2010) y E2-TDC2.0.

La serie E2-TDC2.0 aumentó considerablemente su pH después del día 7, logrando un valor de 11.5. Por lo tanto, para estas series podemos decir, que para concretos carbonatados con recubrimiento de 20 mm es más viable aplicar una densidad de corriente de 2.0 para lograr elevar el pH del concreto.

En la Figura 53 se muestra la evolución del electrolito de las tres series. Podemos observar un comportamiento similar a los especímenes parcialmente carbonatados realcalinizados. A partir del día 7, el electrolito empieza a llegar a su punto de equilibrio con el pH del concreto. Por lo tanto, lo único por lo que podría seguir elevando su alcalinidad sería por la producción de OH del agua en el cátodo.

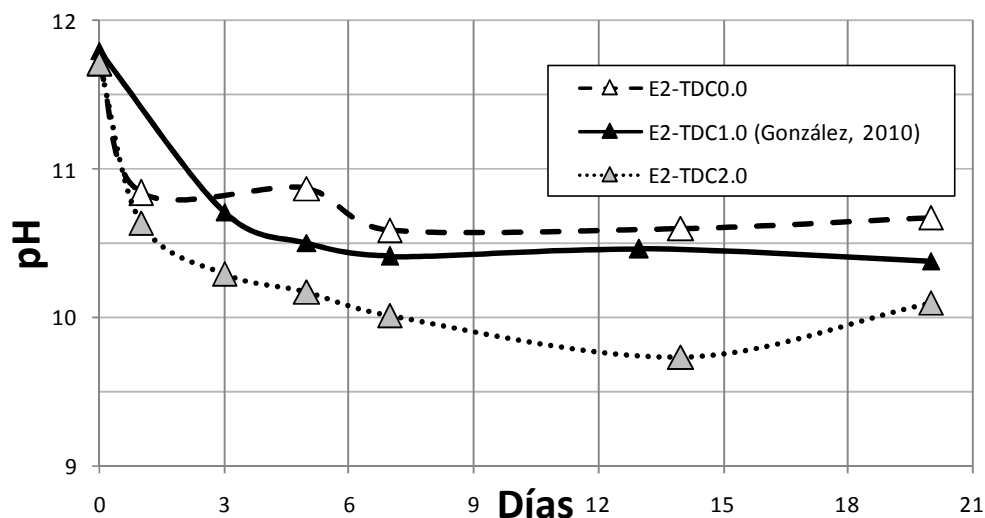


Figura 53. Evolución de los electrolitos en los especímenes E2-TDC0.0, E2-TDC1.0 (González, 2010) y E2-TDC2.0.

En la Figura 54 se observan los cortes frescos con la aplicación de fenolftaleína de las tres series. En las imágenes a los 13 y 20 días con aplicación de corriente se alcanza a observar el aro que se genera por la producción de OH debido a la electrolisis del agua principalmente, y podemos constatar con los cortes frescos de la series de González que no alcanza a realcalinizarse en la fase intermedia. Sin embargo, como se observa en las E2-TDC2.0 se alcanzó una realcalinización total, logrando un incremento de la alcalinidad más allá del acero, en el lado posterior de la cara a realcalinizar.


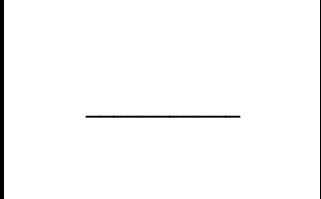




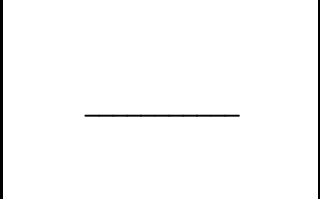
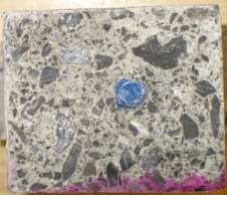





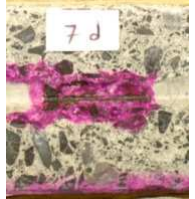
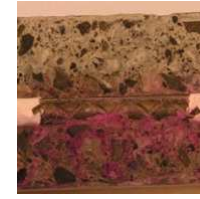
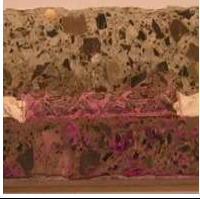





	Densidad de corriente		
	0 A/m ²	1 A/m ²	2 A/m ²
Día 0			
Día 1			
Día 3			
Día 5			
Día 7			
Día 14			
Día 20			

Figura 54. Aplicación de fenolftaleína en los especímenes E2-TDC0.0, E2TDC2.0 y E2-TDC1.0 (González, 2010).

4.4 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO REALCALINIZADO PARA ESPECÍMENES CON RECUBRIMIENTO DE 40 MM (E4)

4.4.1 ESPECÍMENES PARCIALMENTE CARBONATADOS (E4-P)

Otro de los parámetros considerados en este trabajo, fue investigar que tan efectiva es la aplicación de la técnica de realcalinización contra el espesor de recubrimiento, en este caso siendo de 40 mm. En la siguiente tabla se muestra el estado en que se encontraba el concreto antes de ser realcalinizado para la serie E4-P.

Tabla 15. Alcalinidad del concreto (pH) a diferentes profundidades en los especímenes E4-P.

Serie	Tipo de carbonatación	(Zona D)	(Zona C)	(Zona B)	(Zona A)
		10mm	20mm	30mm	40mm
E4-P	Total (25.54 mm)	9.10	8.60	12.00	12.00

Como se mencionó anteriormente, para que los especímenes estuviesen parcialmente carbonatados (E2-P) fue necesario carbonatar aproximadamente la mitad del espécimen, corroborando lo anterior con la prueba de fenolftaleína (véase figura 57) y las mediciones de pH como se muestra en la Tabla 15.

Después de la carbonatación, se procedió a la aplicación de la técnica de realcalinización. En la Figura 55 se muestran los resultados de las tres series de las cuatro profundidades, obtenidas éstas a partir de los cortes frescos y posteriormente se les midió el pH. Observamos que en las zonas A y B (40 y 30 mm de profundidad respectivamente), correspondientes a aquellas más cercanas al acero de refuerzo, el pH se mantiene igual que como se encontraba antes de ser aplicada la técnica de realcalinización. Sin embargo, en comparación con los resultados anteriores de las E2-P, se registró un ligero incremento en el pH llegando a un valor de 12.3, probablemente producto de la electrólisis. En la zona superficial, el comportamiento es similar a las E4-PDC1.0 y a las E4-PDC2.0, es decir, al inicio es donde se presenta un incremento de pH

mayor, desafortunadamente con el paso del tiempo el valor no se incrementa y se mantiene en un valor cercano a los 10.6. En la zona C (20 mm de profundidad), los resultados son un poco confusos posiblemente a la cercanía al electrolito realcalinizador, pero se observa una tendencia a incrementar el pH del concreto, sin embargo, al final vuelve a descender, probablemente debido a que los electrolitos en contacto, pudieron haber perdido la alcalinidad inicial, tendiendo a su vez a un equilibrio con el concreto que se encontraba en su entorno.

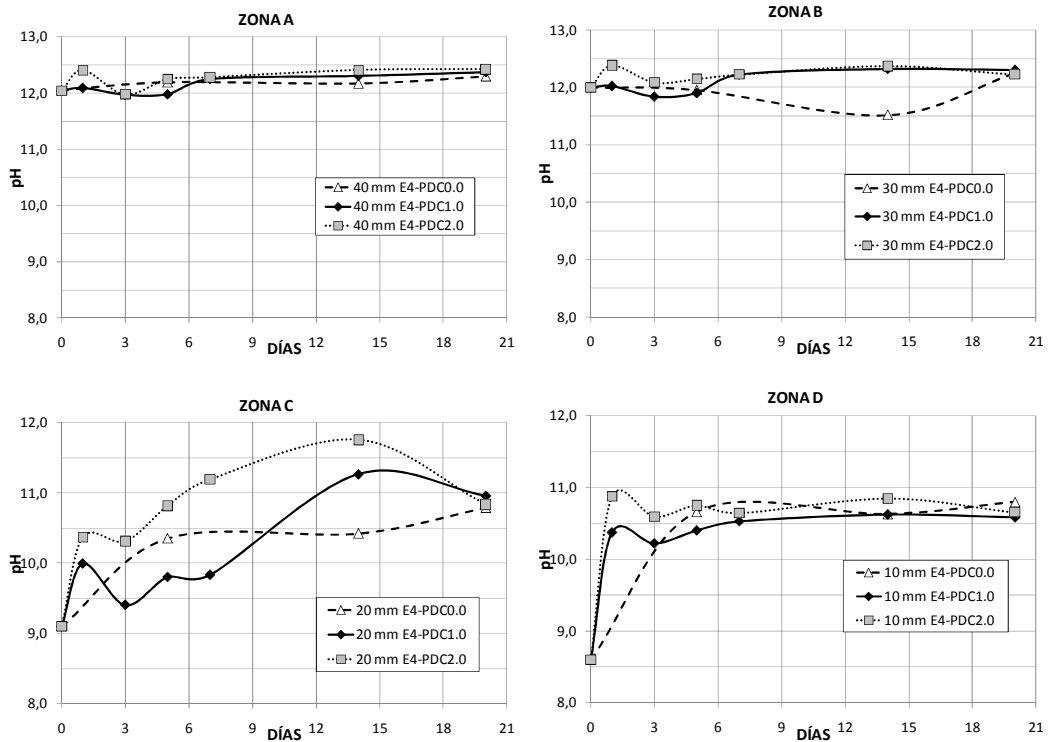


Figura 55. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la realcalinización, especímenes E4-PDC0.0, E4-PDC1.0 y E4-PDC2.0 en sus cuatro profundidades.

En la Figura 56 se presenta la evolución del pH de los electrolitos en los que fueron inmersos los especímenes. Se constata un descenso de pH a medida que el tiempo avanza. Y en el caso de los E4-PDC2.0, el pH disminuyó hasta valores de 9, por tal motivo (en particular los E2-PDC2.0), la alcalinidad del concreto logra incrementarse en

la mayoría del tiempo de aplicación, pero al final disminuyó debido a la pérdida de alcalinidad del electrolito.

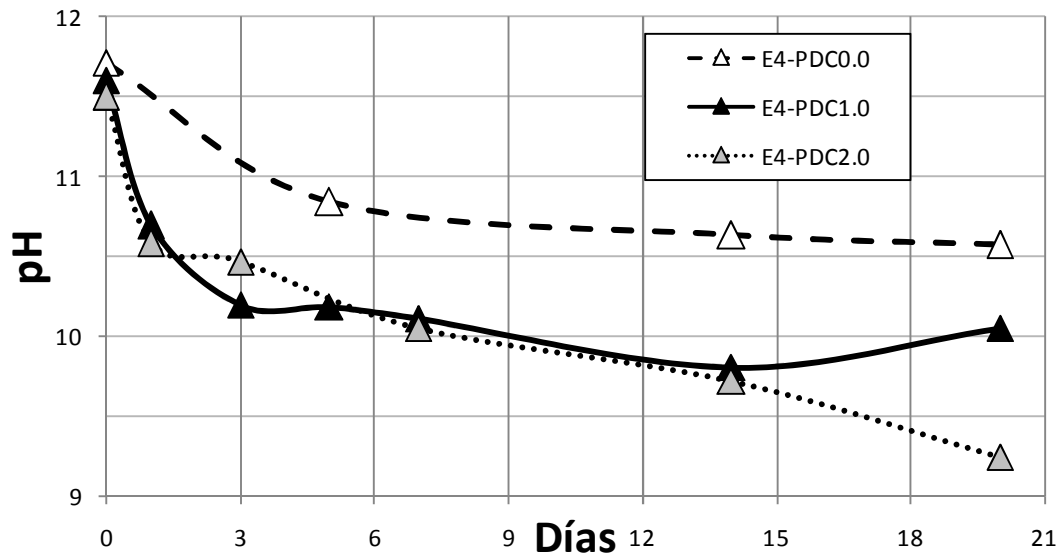


Figura 56. Evolución del electrolito realcalinizador para las series de E4-P.

En la Figura 57, se observa el avance de realcalinización para los especímenes E4-P mediante la aplicación de fenolftaleína. Se constata que para las series E4-PDC0.0, que son las que se realcalinizan sin la aplicación de corriente, alcanzan un incremento en su pH pero su tonalidad es muy baja respecto a las realcalinizadas con corriente. Por lo anterior se resalta la importancia de las mediciones de pH, debido a que el viraje de color de la fenolftaleína es muy poco reducido, y por lo tanto podríamos pensar que con la absorción capilar o por diferencia de concentración es suficiente para que el concreto pueda elevar su pH. No obstante, como se mencionó, observando las tonalidades que son más intensas en los especímenes E2-PDC2.0, la alcalinidad se constata con las mediciones de pH que alcanza elevarse hasta un valor cercano a 11.

En resumen, la aplicación de la realcalinización durante 3 días con una densidad de corriente de 2.0 A/m^2 resultó suficiente para lograr el máximo incremento de pH en la superficie del concreto. Si pretendemos obtener un ahorro en la corriente se tendría que usar una realcalinización pasiva y será necesario aplicarla por al menos 7 días, para lograr un pH elevado.





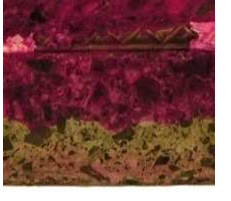
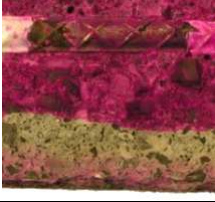





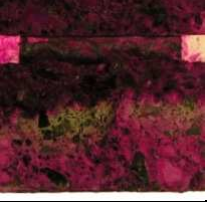

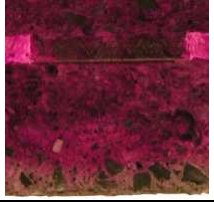
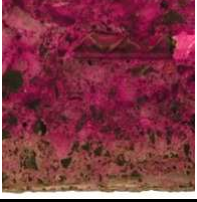


	Densidad de corriente		
	0 A/m ²	1 A/m ²	2 A/m ²
Día 0			
Día 1	_____		
Día 3	_____		
Día 5		_____	
Día 7	_____		
Día 14			
Día 20		20d 	

Figura 57. Aplicación de fenolftaleína en los especímenes E4-PDC0.0, E4PDC1.0 y E4-PDC2.0.

4.4.2 ESPECÍMENES TOTALMENTE CARBONATADOS (E4-T)

En la Tabla 16 se presentan los valores de pH del concreto para las series E4-T, antes de ser realcalinizados. Se constata que el pH del concreto en todo el espesor del recubrimiento es inferior a 9.0 con lo que se demuestra que los especímenes se encontraban totalmente carbonatados. En esta serie en particular, las mediciones se realizaron directamente sobre especímenes a los cuales se les aplicó posteriormente la técnica de realcalinización. Para ello, se extrajeron núcleos (véase Fig. 58) de la cara posterior donde se le aplica la recuperación alcalina, se observan manchas en el concreto donde el acero empieza a despasivarse. Con la aplicación de fenolftaleína se observó una carbonatación total, ya que el concreto no provocó el cambio de coloración en el indicador, lo que fue corroborado con las mediciones de pH en polvo del mismo concreto.

Tabla 16. Alcalinidad del concreto (pH) antes de la aplicación de la REA en los especímenes E4-T.

Serie	Tipo de carbonatación	(Zona D)	(Zona C)	(Zona B)	(Zona A)
		10mm	20mm	30mm	40mm
E4-T	Total (40 mm)	8.7	8.7	8.8	8.7



Figura 58. Núcleos de especímenes E4-T.

En las imágenes de la Figura 59 se muestra la evolución de los pHs del concreto realcalinizado. Para la profundidad superficial (Zona D), se observa un comportamiento similar que en las series anteriores, es decir se presenta un incremento importante a partir del día uno y después dicho incremento es menos significativo, dado a que el electrolito pierde rápidamente su alcalinidad. Sin embargo, el aumento del pH en el concreto es importante, ya que se tenía un pH inicial de 8.7 y se incrementó hasta valores cercanos de 10.6.

Para la profundidad representada por la Zona C, se puede observar de igual forma una recuperación alcalina importante desde el arranque de la aplicación de la corriente. En las series de E4-TDC1.0 la recuperación máxima llegó a los 7 días y después de ese tiempo se mantuvo en valores cercanos a los 10.8, valor similar al obtenido en la serie E4-TDC2.0. La realcalinización pasiva llegó a valores de 10.6 a los 3 días y se mantuvo en ese valor durante el transcurso de la prueba.

Para la profundidad de 30mm (Zona B), la realcalinización en las series E4-TDC1.0 incrementó drásticamente el pH del concreto desde el día 1 y hasta el día 5 en donde el pH se mantuvo en valores cercanos a 11. Para los valores de la serie E4-TDC0.0 y E4-TDC2.0 la tendencia es similar llegando a valores cercanos a 10.7.

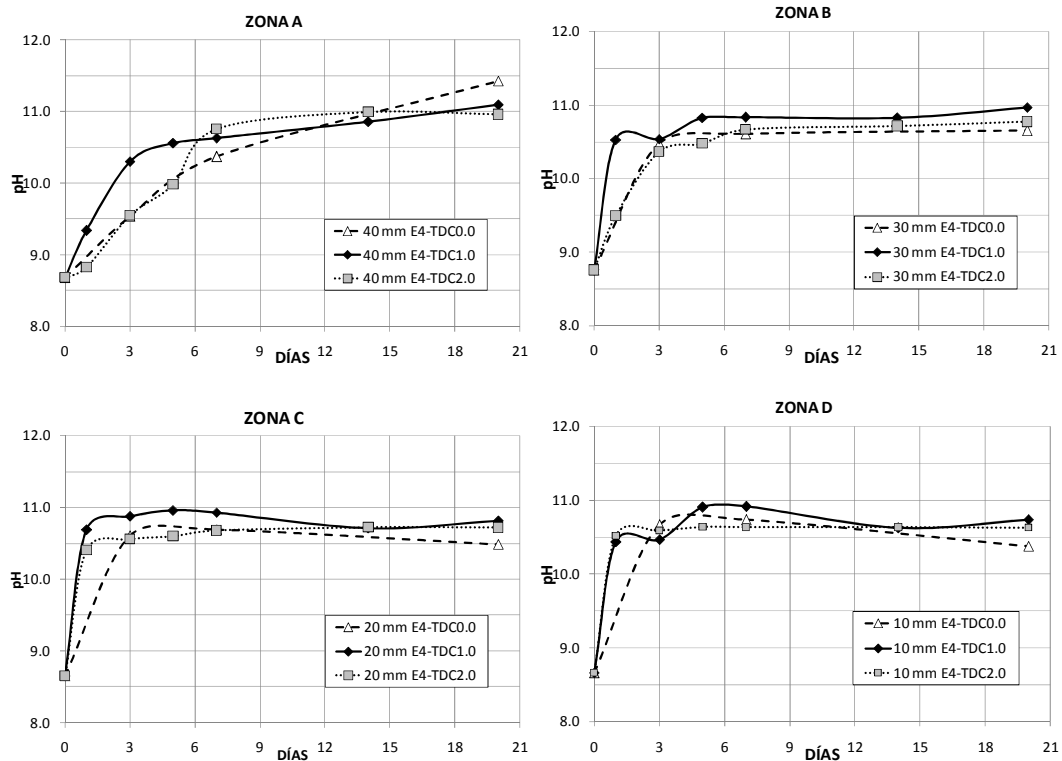


Figura 59. Evolución del pH del concreto durante la aplicación de la realcalinización, especímenes E4-TDC0.0, E4-TDC1.0 y E4TPDC2.0 en sus cuatro profundidades.

Para los valores de pH medidos en la Zona A, que es la localizada cerca del acero de refuerzo, se demuestra que el mecanismo de realcalinización es muy lento, ya que es hasta el día 14 que se observaron valores cercanos a 10.8. Lo anterior, se atribuyó a la electrólisis, que es la producción de los OHs generados por la reducción del agua por medio de la corriente. Probablemente, el espécimen se encontraba relativamente seco, por lo que la solución realcalinizadora demoró más tiempo en ejercer su efecto para liberar el oxígeno y formar los OHs. Para las series E2-TDC0.0, es mucho más lento el proceso de realcalinización, localizando hacia el final de periodo en valores cercanos a los 10.4. Cabe mencionar que como se observa en la Figura 59, existen valores cercanos a los 11.5 en la zona cercana al acero, este valor podría atribuirse a que el espécimen le faltó carbonatarse pues es imposible llegar a esos valores de realcalinización con absorción o difusión del electrolito para este recubrimiento.

En resumen para estas series con carbonatación total, se constata que es más factible utilizar la aplicación de la realcalinización activa, es decir, con ambas densidades de corriente. Por el contrario, sin aplicación de corriente (o realcalinización pasiva), no se alcanzan valores altos de pH. Se constató que el pH cercano al acero es muy bajo, y la distancia que tiene que recorrer el electrolito es mayor (40mm de recubrimiento) para tratar de minimizar la baja alcalinidad provocada por la carbonatación. Del mismo modo, se puede apreciar en la Figura 60, que el mejoramiento del pH es evidente, ya que también en la cara opuesta a realcalinizar, el avance de la realcalinización es aproximadamente 15 mm al final de la prueba.





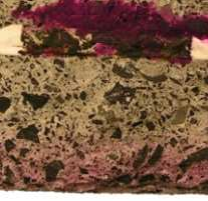




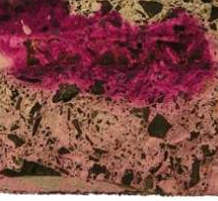


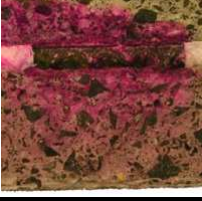
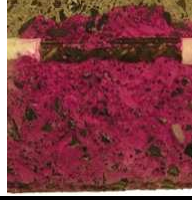




	Densidad de corriente		
	0 A/m ²	1 A/m ²	2 A/m ²
Día 0			
Día 1	_____		
Día 3			
Día 5	_____		
Día 7			
Día 14	_____		
Día 20		20d 	

Figura 60. Aplicación de fenolftaleína en los especímenes E4-TDC0.0, E4TDC1.0 y E4-TDC2.0.

En general, de la prueba colorimétrica utilizando la fenolftaleína como un método cualitativo, genera incertidumbre anteriormente un rango de valores de pH entre 9 y 10, sin embargo, con los resultados observados de las diferentes series realcalinizadas, nos muestran zonas pigmentadas totalmente en los espesores realcalinizados, principalmente las de densidad de corriente 2.0 A/m^2 , por lo tanto, podemos llegar a afirmar que se puede asegurar la estabilidad físico química del acero de refuerzo al lograr un entorno alcalino.

4.5 EFECTO DE LA CARGA APLICADA

De acuerdo con la Figura 6l, se puede ratificar que la cantidad de corriente aplicada, es directamente proporcional al aumento del pH. En la gráfica se presentan los resultados de los concretos totalmente carbonatados y su mejoramiento de pH gracias a la aplicación de la realcalinización, se observan comportamientos similares entre los resultados de la presente investigación y los reportados por Yeih y Chang (Yeih y Chang, 2005) y González (González, 2010).

La figura nos indica que la recuperación de la alcalinidad a nivel del acero depende del pH inicial del concreto carbonatado, es decir, del grado de carbonatación inicial, por lo que, cuando el pH es alto, su recuperación es mayor. Por el contrario, si el pH del concreto es bajo, el incremento de la alcalinidad será menor comparado con un concreto con pH inicial alto. Gracias a lo anterior, podemos decir, que la efectividad de la técnica de realcalinización depende básicamente del grado de carbonatación que tenga el concreto. También es oportuno mencionar, que la efectividad de la técnica disminuirá si se presenta el caso en que el concreto haya sido carbonatado, a tal grado, de despasivar al acero de refuerzo y llegar a un estado de alcalinidad muy inferior (menor de 8.5).

Por otro lado, y similar a lo manifestado por González (González, 2010), a partir de los 300 Ah/m^2 , el incremento del pH del concreto disminuye a medida que la carga se aplica.

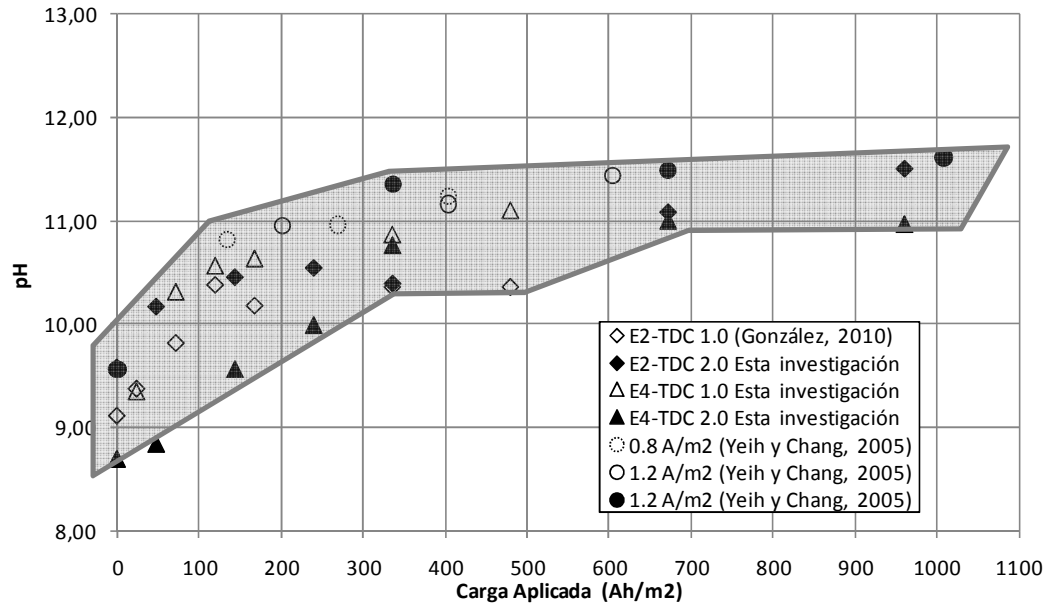


Figura 61. Progreso del pH en el concreto en función de la carga aplicada a nivel de la interface acero-concreto.

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES
PARA TRABAJOS
FUTUROS**

CONCLUSIONES

El concreto reforzado es el principal material usado en la construcción, y como cualquier material en el planeta, tiene una vida útil finita. El concreto en sí, puede durar varias décadas, siempre y cuando esté bien diseñado, con mantenimientos adecuadas, etc. y así lograr una protección al acero de refuerzo. Con el avance de la tecnología ingenieril se ha logrado incrementar la vida útil del concreto, sin embargo, se han ido presentando problemas en el transcurso de los años, deteriorando al concreto y posteriormente al acero de refuerzo.

La corrosión del acero de refuerzo por la carbonatación es uno de los problemas que tiene más énfasis en las investigaciones recientes, debido a los daños que puede ocasionar, ya sea de pérdidas económicas y en muchos casos de vidas humanas.

Los daños provocados por la disminución de la alcalinidad del concreto, puede llegar a afectar la capa pasiva y producir la corrosión generalizada, provocando botaduras, agrietamientos, manchas, y si continua, la corrosión puede producir fallas estructurales por la pérdida de sección del acero de refuerzo. Por lo cual, se hace prioritario minimizar este mecanismo de ataque. En la actualidad existen varias técnicas para combatir este mecanismo. Algunas son aplicadas desde la concepción de la estructura, tratando de evitar lo más posible la carbonatación; y otras en estructuras de edad avanzada y que presentan ya los síntomas de la carbonatación. Algunos productos son: inhibidores, recubrimientos y una gran variabilidad de tipos de concretos que pueden minimizar este problema al aplicarlos previo a la producción del concreto. Sin embargo, cuando el problema se presenta en estructuras que ya han sido construidas, y que posiblemente ya presentan un grado de deterioro incipiente por corrosión del acero, existe la realcalinización como una solución innovadora, ya aplicada en Europa, y que se abordó en este trabajo.

Esta técnica preventiva sustentable, se basa en la recuperación de la alcalinidad por medio de un electrolito sin y con corriente, minimizando las áreas afectadas por carbonatación. Estas áreas afectadas son recuperadas por mecanismos que incrementan la alcalinidad del concreto. En la realcalinización pasiva, principalmente se presenta la absorción capilar del electrolito y la difusión de los medios alcalinos por diferencia de concentración y para la realcalinización activa, los mecanismos anteriores persisten, agregando otros por efecto de la aplicación de corriente como la migración de los iones por campo eléctrico y la electrólisis.

En el Capítulo 2 se pudo constatar la falta de información técnica en cuanto a los parámetros de funcionamiento de la técnica agregando ciertos parámetros propios de la estructura. Es por esto que nuestro objetivo general en la presente tesis fue determinar los parámetros mínimos

relativos a la técnica y a la estructura que permitan aplicar la realcalinización con un enfoque de prevención en estructuras de concreto convencionales para prolongar la vida útil.

De acuerdo a los resultados obtenidos experimentalmente y del análisis de los mismos se desprenden las siguientes conclusiones que han aportado elementos para determinar los parámetros mínimos relativos a la técnica y a la estructura:

- Durante la exposición de los especímenes a los ambientes acelerados de CO₂, se encontró un coeficiente de carbonatación prácticamente constante del concreto utilizado, siendo esta de aproximadamente 60 mm/año^{1/2} para todos los especímenes fabricados. La velocidad de carbonatación acelerada (con 20% de concentración de CO₂) es aproximadamente 600 veces mayor que la velocidad de carbonatación en condiciones de exposición de ambientes industriales.
- Para especímenes PARCIALMENTE carbonatados con una profundidad de recubrimiento de 20 mm, es factible aplicar la técnica de realcalinización en su carácter pasivo o activo. Sin embargo, la efectividad de la técnica es mayor con aplicación de corriente en un tiempo de 7 días. Pensando en forma sustentable la técnica es eficaz sin aplicar corriente en un tiempo mayor de los 7 días.
- Para los especímenes TOTALMENTE carbonatados y con 20 mm de recubrimiento, la aplicación de una densidad de corriente de 2.0 A/m² mejora la realcalinización sustancialmente en las tres profundidades en cualquier tiempo de aplicación. Se concluye que para obtener un óptimo desempeño, en cuanto al consumo de corriente, es factible aplicar una realcalinización pasiva durante 7 días y posteriormente una realcalinización activa con 2.0 A/m² con duración de 13 a 14 días más.
- Para los especímenes PARCIALMENTE carbonatados, con recubrimiento de 40 mm, principalmente en las zonas entre los 10 y 20 mm de profundidad (que representa la zona carbonatada) mediante el uso de una realcalinización activa, se obtuvo una recuperación importante de la alcalinidad desde el primer día y con ambas densidades de corriente. Sin embargo, con la densidad de corriente de 2.0 A/m² se presenta un mayor incremento en la alcalinidad durante las primeras etapas de aplicación de la corriente. Este mismo efecto fue obtenido en los especímenes con recubrimiento de 20 mm totalmente carbonatados. Al

respecto se infiere que, para este concreto y en estas condiciones, se recomienda aplicar la REA en un tiempo de 7 días con una densidad de corriente de 2 A/m^2 .

- Para los resultados de especímenes TOTALMENTE carbonatados, con espesor de recubrimiento de 40 mm, la realcalinización activa es necesaria. La forma pasiva en ningún caso representa una opción. Optimizando la aplicación de corriente, podemos pensar en aplicar en los primeros 7 días una densidad de 1.0 A/m^2 y posteriormente una de 2.0 A/m^2 y con esto lograr un incremento en la alcalinidad en la zona cercana al acero de refuerzo.
- La aplicación de más de 300 Ah/m^2 debe reconsiderarse ya que con nuestros resultados y los obtenidos por otros investigadores, el incremento del pH es poco significativo. Sin embargo, esto es válido para concretos con un espesor carbonatado de 20 mm. Para estructuras con espesores mayores de carbonatación, esta cantidad de carga deberá incrementarse hasta alcanzar valores cercanos a 700 Ah/m^2 . En cualquier caso, densidades de carga mayores a 700 Ah/m^2 podrían resultar ser poco costeadas, dada la poca ganancia en la alcalinidad.
- En relación al efecto del grado de carbonatación, es decir, el valor inicial de pH del concreto, se encontró que la técnica depende del pH inicial que tenga el concreto. En concretos con pH inferior a 8.5, es posible que la REA no logre recuperar la alcalinidad del concreto a un grado que logre la repasivación del acero de refuerzo.
- Durante la aplicación de la realcalinización pasiva y activa de 1.0 A/m^2 , se encontró que durante los primeros 7 días el electrolito pierde la mayor parte de la alcalinidad y posiblemente tiende al equilibrio con el concreto. Para la realcalinización activa con 2.0 A/m^2 , se puede presentar el fenómeno de migración de los OH^- del cátodo hacia el ánodo por efecto de la corriente después de los primeros 7 días, posiblemente debido a la cantidad de carga transmitida para el movimiento de los iones, causando un efecto adverso en la

solución electrolítica, ya que tiende a disminuir el pH a medida que pasa el tiempo.

- La ganancia del pH por la realcalinización activa de 2.0 A/m^2 mejora considerablemente en la zona del acero de refuerzo y crea un aro que puede llegar a recuperar la alcalinidad en la zona posterior al acero de refuerzo donde se forma el campo eléctrico, fenómeno que corroboró la producción de OH^- en la vecindad del refuerzo y el movimiento de los mismos que obedece a la dirección de las líneas de corriente.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

La presente tesis aporta información adecuada sobre algunos parámetros de la funcionalidad de la técnica para determinadas estructuras, sin embargo, es conveniente proponer algunas líneas de investigación que complementen las contribuciones de la investigación, como:

- Evaluar la extensión de la vida útil para concretos realcalinizados. Efecto de la recarbonatación posterior a la aplicación del tratamiento.
- Revisar la efectividad de la técnica de realcalinización para concretos con relaciones agua/cemento bajas y proponer criterios de aceptación.
- Evaluar el efecto de la técnica en un estado de deterioro significativo del acero de refuerzo.
- Evaluar la realcalinización en su modalidad de paro y arranque, cambiando el electrolito para observar la evolución de la alcalinidad del mismo y del concreto.
- Para estudios posteriores de realcalinización hacer pruebas de adherencia acero – concreto para densidades de corriente entre 1 y 2.0 A/m^2 y evaluar el efecto de la fragilización del acero de refuerzo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI-201R-92, American Concrete Institute. Guide to Durable Concrete, 1997.
2. ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Prácticas Estándares para la Elección de las Proporciones de los Concretos Normal, Pesado y Masivo), ACI 211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1991.
3. Aïtcin Pierre Claude, 2005, "Ingeniería de los cementantes hidráulicos", Cuerpo Académico de Tecnología del Concreto, Monterrey, N.L., México, pp. 5 y 86.
4. Alonso, C., 1983, "Inhibición de la corrosión de armaduras provocada por amasado del hormigón con agua de mar", Tesis de Licenciatura, Fac. de Ciencias Químicas, Universidad de Zaragoza, España.
5. Andrade, C, 1992, "Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de Armaduras", Editorial Pini, 1ª edición, São Paulo, 1992, pp 1-104.
6. Andrade, C. y Alonso, C., 2000, "Corrosión y protección de armaduras de hormigón", Memorias del tercer curso internacional sobre corrosión en puentes y estructuras concreto metal, SCT, IMT, Veracruz, México. ISSN 0188-7297, pp 139.
7. Andrade C., Alonso C., Gonzalez J.A., 1990, "An initial effort to use corrosion rate measurements for estimating rebar durability corrosion rates of steel in concrete", ASTM STP 1065, N.S.Berke et al. editors. ASTM, Philadelphia, pp. 29-37.
8. Andrade, C., Alonso, C., Sarría J., Río O., "Técnicas de estructuras dañadas por corrosión de armaduras", Memorias del tercer curso internacional sobre corrosión en puentes y estructuras concreto metal, SCT, IMT, Veracruz, México. ISSN 0188-7297, pp 160.
9. Andrade, C. y Feliu, S., 1989, "Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras", publicado ICCT, Madrid, España.
10. Andrade C., Gulikers J., Polder R. and Raupach M., 2003, "Half-cell potential measurements- Potential mapping on reinforced concrete structures", RILEM TC 154-EMC, Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 36, pp 461-471.
11. Andrade, C., Holst, J. D., Nurnberger, U., Whitheley, J. J. y Woodman, N., 1994, "Protection Systems for Reinforcement", Preparado por Task Group VII/8 de Permanent Commission VII CEB.
12. Andrade, C., Soler, L. and Nóvoa, X. R., 1995, "Advances in electrochemical impedance measurements in reinforced concrete" Materials Science Forum, Trans. Tech. Publications, Switzerland, Vols. 192-194, pp 843-856.

13. ASTM C 136-07, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Developed by Subcommittee: C09.20, Book of Standards Volume: 04.02.
14. ASTM C 39-03, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Developed by Subcommittee: C09.61 on Testing Concrete for Strength, Book of Standards Volume: 04.02.
15. ASTM C 127-01, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, Developed by Subcommittee: C09.20, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
16. ASTM C 128-01, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, Developed by Subcommittee: C09.20, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
17. ASTM C 138-01, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, Developed by Subcommittee: C09.20, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
18. ASTM C 143-03, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Developed by Subcommittee: C09.60 on Fresh Concrete Testing, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
19. ASTM C 192-02, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Developed by Subcommittee: C09.61 on Testing for Strength, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
20. ASTM C 231-03, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, Developed by Subcommittee: C09.60 on Fresh Concrete Testing, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
21. ASTM C 617-03, Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, Developed by Subcommittee: C09.61 on Testing for Strength, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
22. ASTM C876-91(1999), Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Developed by Subcommittee: G01.14, Book of Standards Volume: 03.02.
23. ASTM C 1064-03, Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete, Developed by Subcommittee: C09.60 on Fresh Concrete Testing, Book of ASTM Standards, Volume: 04.02.
24. Ávila J. y Genescá J., 1996, "Más allá de la herrumbre", 2° Reimpresión, La ciencia desde México, México, D.F., ISBN 968-16-3153-6, pp. 9-11.

25. Banfill P.F.G., 1997, "Re-alkalisation of carbonated concrete - effect on concrete properties", Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 4, pp. 255-258.
26. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R., 2004, "Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis and Repair", Wiley-VCH, Weinheim.
27. Blezard, R.G., 1998, The history of calcareous cements, dans Lea's Chemistry of Cement and Concrete, édité par P.C. Hewlett, publié par Arnold, ISBN 0-340-56589-6, p. 6.
28. Böhni H., 2005, "Corrosion in reinforced concrete structures", publicada por Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, ISBN 1-85573-768-X, pp 231.
29. Broomfield, J.P., 1997, "Corrosion of steel in concrete, Understanding, investigation and repair", E & FN Spon, pp. 1,17,21 y 53.
30. Broomfield, J. P., 2004, "Electrochemical Realkalisation of Steel Reinforced Concrete A State of the Art Report", Corrosion Prevention Association, Technical Notes No. 9, ISBN 0 9544994-0-9.
31. CANACEM, 2008, http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm
32. Carcajal, A.M., Acuña, A., Acuña, F., Herrera, A., Vera, A., 2005, "Estudio sobre un Método de Recuperación de Hormigones Carbonatados: Proceso de Realcalinización", Revista de la Construcción, Vol. 4, No.1, Chile, ISSN 0717-7925, pp. 35-40.
33. Castro, P., 2001, "Corrosión en estructuras de concreto armado", 2° edición, IMCYC, México, ISBN 968-464096-X, pp. 24-25, 93-114.
34. Castro, P., Helene P., 2007, "Service life of reinforced concrete structures", New approach, Sagüés A.A., Castañeda-López H., Castro-Borges P., Torres-Acosta A. editors in Corrosion of infrastructure, ECS Translations, Vol. 3, Issue 13, ISBN 978-1-56677-540-3, pp. 9-14.
35. Davidovits, J., 1987, Ancient and modern concretes: what is the real difference. Concrete International, Vol. 9, No. 12, December, pp. 23-35.
36. De Romero E., Aponte B., Arias S., De García F., De Rincón O. y Larreal O., 2005, "Diseño de un modelo matemático computarizado de costos por corrosión", Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, vol.28, no.1, ISSN 0254-0770, pp.28-41.
37. Del Valle A., 2000, "Métodos de prevención y protección contra la corrosión", Memorias del tercer curso internacional sobre corrosión en puentes y estructuras concreto metal, SCT, IMT, Veracruz, México. ISSN 0188-7297, pp. 73-83.
38. Del Valle A., Pérez T. y Martínez M., 2001, "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado", Publicación Técnica No. 182, Sanfandila, Qro, ISSN 0188-7297.

39. Dhouibi-Hachini, L., Triki, E., Grandet, J. and Raharinaivo, A. , 1996 , “Comparing the steel-concrete interface state and its electrochemical impedance”, Cement and Concrete R Langford y Broomfield esearch, Vol. 26, No. 2, pp.253-266.
40. Duran C., 2003, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash”, Construction and Building Materials 17, pag 147.
41. Fernández Cánovas, M., 1994, “Patología y terapéutica del hormigón armado”, 3ª edición cap. IV, pp. 69-90. Madrid.
42. FICEM, 2008, Federación Interamericana del cemento, La historia del cemento, el concreto y el concreto reforzado, <http://www.ficem.org/site/media/LA%20HISTORIA%20DEL%20CEMENTO,%20EL%20CONCRETO%20Y%20EL%20CONCRETO%20REFORZADO.pdf>
43. Galleguillos F. y Cid P., Julio, 2003, “Sensores de humedad”, Departamento de electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
44. Gjørv O. E., Vennesland F., 1979, "Evaluation and Control of Steel Corrosion in Offshore Concrete Structures", Cement and Concrete Research Institute. Trondheim, NTH, Report STF 65 f79069, Mayo, pp. 32.
45. González F., Fajardo G., Arliguie G., Juárez C., Escadeillas G., 2008, “Realcalinización electroquímica de concreto reforzado parcialmente carbonatado utilizando electrolitos de K_2CO_3 y Na_2CO_3 ”, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México D.F.
46. González F, 2010, “Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión”, Tesis de doctorado, UANL, México.
47. González J.A., Cobo A., Otero E., 2006, “On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures”, Materials and Corrosion 51, pp 97-103.
48. Hachini, L., Fiaud, C., Triki, E. and Raharinaivo, A., 1994, “Characterisation of steel/concrete interface by electrochemical impedance spectroscopy”, British Corrosion Journal, Vol 29, No. 2, pp. 122-127.
49. Hernández O. y Mendoza C.J., 2006, “Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico”, Inv. Y Tecnología v.7, No. 1, México.
50. Heuzé B., 1980, "Cathodic protection on concrete offshore", Materials Performance, vol. 19, No. 5, pp. 24-33.
51. Hird, P., 2001, “Process for the Electrochemical Treatment of Concrete. United States Patent N° US 6258236 B1.

52. Hover K., “Graphical Approach to Mixture Proportioning by ACI 211.1-91 (Enfoque Gráfico para el Proporcionamiento de Mezclas a través del ACI 211.1-91),” Concrete International, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Septiembre, 1995, páginas 49 a 53.
53. <http://www.taringa.net/posts/imagenes/1758907/La-presa-mas-grande-del-mundo.html>
54. Kobayashi K. y Uno Y., 1989, “Influence of alkali on carbonation of concrete, part 2. Influence of alkali in cement on rate of carbonation of concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 619-622.
55. Koch H., Brongers P.H., Thompson G., Virmani P, Payer J.H., 2002, “Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States”, NACE, publicación No. FHWA-RD-01-156.
56. Kosmatka H., Kerkhoff B., Panarese W., y Tanesi J., 2004, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, Portland Cement Association, primera edición, ISBN 0-89312-233-5, pp. 121, 122 y 369.
57. Lima M.A., 1996, "Inibidores e corrosão. Avalicao e a eficiencia frente a corrosão e armaduras provocada por cloretos", Tesis Doctoral, Univ. De Sao Paulo, Brasil.
58. López R., Pérez J.T., Torres A.A., Martínez M., Martínez W., Ariza L.E., Zamudio E., Genescá J., Valdez B., 2006, “Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México”, Publicación Técnica No 292, Sanfandila, Qro, ISSN 0188-7297.
59. Malinowski and Garfinkel, 1991, “Prehistory of concrete”, Concrete International, Vol. 13, No. 3, March, pp. 62-68.
60. Manrique B.A., 2010, “Estudio de la realcalinización aplicada en concretos reforzados convencionales como método preventivo de la corrosión provocada por carbonatación”, Tesis de Licenciatura, UANL, México, paginas 97.
61. Mehta P.K. y Burrows R.W., 2001, “Building Durable Structures in the 21st Century”, Concrete International. Nº3. pp. 57-63.
62. Mehta P.K. y Monteiro P. J. M., 2006, “Concrete, Microstructure, Properties, and Materials”, 3 ed., Mc Graw-Hill, United States of America, pp 170-176, 207.
63. Miller J.B., 1991 “Method for electrochemical treatment of porous building materials, particularly for drying and re-alkalization”, United States Patent, Patent Number 5015351.
64. MG Associates Construcción Consultancy, 2010, Concrete Repair, Realcalisation, http://www.concrete-testing.com/Concrete%20Repair.htm#_concrete-realcalisation.

65. Moreno E.I., Domínguez G.G., Cob E.J., Duarte F., 2004, “Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración”, Ingeniería 8-2, 117-130
66. NMX-C-407 ONNCCE, Industria de la Construcción; Varilla Corrugada de Acero proveniente de lingote y palanquilla para Refuerzo de Concreto; Especificaciones y Métodos de Prueba.
67. NMX-C-414-ONNCCE-2004, Industria de la Construcción; Cementos Hidráulicos; Especificaciones y Métodos de Prueba, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Febrero 2005.
68. Pade C. y Guimaraes M., 2007, “The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective”, Cement and Concrete Research 37, pp. 1348.
69. Pourbaix M., Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solutions, trans. From French by J.A. Franklin (New York, NY: Pergamon Press, 1996), p. 409-410.
70. REHABCON IPS-2000-00063, “Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures”, Annex D, Electrochemical techniques.
71. RILEM Report 14, “Durability design of concrete structures”, Eds. Sarja A. y Vesikari E., London, UK: E & FN SPON, 1996.
72. Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno, Pedro Castro Borges, 2005, “Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera”, artículo de divulgación, Ingeniería 9-1, pp. 13-18.
73. Sagoe K.K., Glasser F. P. and Irvine J. T, 1992, “Electrochemical characteristics of reinforced concrete corrosion as determined by impedance spectroscopy ” . British Corrosion Journal, Vol. 27, No. 2, pp. 113-118.
74. Sánchez de Rojas Noguera, María José, 2004, Tesis doctoral “Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento”, Universidad de Alicante.
75. Sarja A., Vesikaeri E., 2000, , “Durability Design of Concrete Structures”, Reporte del Comité de la RILEM 130-CSL, Materials and Structures, Materiaux et Constructions, Vol. 33, enero febrero 2000, pp 14-20
76. Spencer J.N., Bodner G.M., Rickard L.H., 2000, “Química: estructura y dinámica”, Primera edición,CECSA, México, D.F., pp. 555, ISBN 0-471-05387-2.
77. Stern, M., Geary A., J., 1957, “Electrochemical Soc”, Vol. 104, p. 56.

78. Stratful, R.F., 1957, "The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge", Corrosion 13, pp 43-48.
79. Taylor, H.F.W., 1967, "La Química de los cementos", Urmo, S.A. de Ediciones Bilbao.
80. Thornton, G., 1996, Cast in Concrete – Concrete Construction in New Zealand 1850-1939, Reed Books, Auckland, No. 2, ISBN 0-7900-04682, pp.12-13.
81. Torres J., 2007, <http://www.imcyc.com/ct2007/jun07/ingenieria.htm>
82. Trabajo en progreso por la CEN "Electrochemical remediation of reinforced concrete— Part I: Realkalisation" (Brussels, Belgium: CEN).
83. Trocónis O., Romero A., Andrade C., Helene P., Díaz I., 1998, "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado", Red DURAR 1998 CYTED, pp. 18,42 y 103.
84. Tuutti K., 1982, "Corrosion of Steel in Concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. pp.145-152 y 468.
85. U.S. Geological Survey, 2009, "Mineral commodity summaries 2009", U.S. Department of the Interior, Science for a Changing World.
86. Van der Holden A.W.M., Polder R., 1998, "Laboratory investigation of electrochemical realcalisation of reinforced concrete", EUROCORR 98, Utrecht, 1998.
87. Verbreck G., 1958, "Carbonation of hydrated Portland cement, PCA Bulletin", Chicago, n.87.
88. Wenger, F., Galland, J. and Lemoine, L., 1987, "Application of electrochemical impedance measurements to the monitoring of corrosion of reinforced concrete structures in marine environment". EUROCOR '87, Karlsruhe, Germany.
89. Wierig H., 1984, "Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure", Proc. RILEM Seminar, Hannover, 3, 176-186.
90. Yeih W., Chang J., 2005, "A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete", Construction and Building Materials, No. 19, pp. 516-519.