

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Evaluación de la realcalinización de estructuras de concreto reforzado carbonatado:  
descripción del comportamiento postratamiento.

TESIS

Para la obtención de grado de:

M.C. con Orientación en Materiales de Construcción

Presenta:

Ing. Bonifacio Aquilino Manrique Márquez

Director de Tesis:

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel

Co-director:

Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez

San Nicolás de los Garza Nuevo León, Octubre del 2011



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

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

Estimado Dr. Valdez,

En relación a su oficio en el que me informa que fui designado DIRECTOR DE LA TESIS “EVALUACIÓN DE LA REALCALINIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO CARBONATADO: DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO POSTRATAMIENTO”, que presenta el **Ing. BONIFACIO AQUILINO MANRIQUE MÁRQUEZ**, 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. 24 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](http://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 “**Evaluación de la realcalinización de estructuras de concreto reforzado carbonatado: descripción del comportamiento postratamiento**”, que presenta el **Ing. Bonifacio Aquilino Manrique Márquez**, 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 24 de octubre de 2011

**Dr. Pedro L. Valdez Tamez**  
**Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación**  
Co-Director 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](http://www.ingenieriacivil.uanl.mx)



Universidad Veracruzana

**Dr. Ricardo Orozco Cruz**

Unidad AntiCorrosión  
Instituto de Ingeniería  
Universidad Veracruzana

Boca del Río, Ver., a 14 de octubre de 2011

**Asunto:** Dictamen de evaluación de tesis

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

**Presente**

En atención a su oficio, en la que se me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis *"Evaluación de la realcalinización de estructuras de concreto reforzado carbonatado: descripción del comportamiento postratamiento"*, que presenta el Ing. Bonifacio Aquilino Manrique Márquez, 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, agradeciendo su atención y poniéndome a sus órdenes para cualquier aclaración, me despido enviando cordiales saludos.

**Atentamente**

Dr. Ricardo Orozco Cruz  
Investigador  
Evaluador de Tesis de Posgrado



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Oficio SDEPI-383-2011**

**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 la **Ing. Bonifacio Aquilino Manrique Márquez**, 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 25 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](http://www.ingenieriacivil.uanl.mx)

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es el fruto de la contribución de un conjunto de personas las cuales directa o indirectamente han permitido la culminación de éste, por tal motivo me permito mencionar mi agradecimiento a ellos en este apartado.

En primer lugar agradezco a mis padres Julia Márquez del Ángel y Aquilino Manrique Castro, por brindarme su apoyo, por dar estabilidad y paz en mi vida, porque ellos me han brindado la base que me permite crecer personal y profesionalmente. También quiero agradecer a mis hermanos y a mis amigos por su apoyo durante la elaboración de este trabajo.

Quiero agradecer al Dr. Gerardo Fajardo San Miguel por invitarme a participar en este proyecto, porque guió y revisó su desarrollo durante toda la realización del mismo, agradezco también sus valiosos consejos. Al Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez, quien me brindó su apoyo y tiempo en la revisión de esta tesis. También agradezco al Dr. Ricardo Orozco Cruz por su participación en la revisión de mi libro de tesis.

Agradezco también al Laboratorio de Investigación en Materiales de Construcción, y al Laboratorio de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil “Dr. Raymundo Rivera Villarreal” porque me permitieron realizar en su totalidad mi experimentación.

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

forma, se agradece la beca otorgada durante la realización de mi formación como maestro en ciencias por parte de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL.

## INTRODUCCIÓN

La corrosión es un problema que impacta la economía de cada país en su producto interno bruto en porcentajes que se encuentran entre 3 y 4% en países desarrollados, siendo la industria de la construcción una de las principales generadoras de estas pérdidas (Garcés et al., 2008). Por otro lado, en Perú, un país en desarrollo, de acuerdo con la empresa Teknoquímica, en el año 2000 las pérdidas por corrosión representaron 8% del PIB (Orozco et al., 2007). Otro estudio (Orozco, 1998) encontró que los costos provocados por corrosión rebasan el 8% del PIB estatal (Yucatán). Es importante señalar que se considera que entre el 15 y 25% de los costos totales generados por la corrosión pudieron haberse evitado con técnicas anticorrosivas de prevención (Castro et al., 1995). Con respecto a la prevención de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto pueden considerarse alternativas convencionales tal como la protección física del acero de refuerzo o el uso de inhibidores de corrosión en el concreto. Sin embargo, también existen técnicas no convencionales de prevención como son la extracción electroquímica de cloruros, la protección catódica y la realcalinización electroquímica.

En estructuras de concreto reforzado el principal responsable del deterioro es la corrosión del acero de refuerzo ocasionado principalmente por la pérdida de la protección química que brinda el concreto al acero conocida como carbonatación y por el ingreso de iones cloro. En zonas urbanas el principal agente que provoca la corrosión es la carbonatación reconociéndose desde hace algunos años que la técnica de realcalinización electroquímica es una buena alternativa de prevención.

Existen estudios sobre la efectividad de la técnica, sin embargo, estos se basan en la medición de potenciales del acero, velocidades de corrosión y pH del concreto después de aplicar la técnica de realcalinización, sin embargo no se ha evaluado su comportamiento a mediano plazo. También se ha probado que esta técnica es poco

efectiva cuando el acero presenta velocidades de corrosión altas, por tal motivo este trabajo centra su estudio en su utilización de forma preventiva. Es importante identificar la condición óptima de carbonatación del concreto con el fin de obtener el mayor beneficio de su utilización.

En el primer capítulo se presenta el contexto general de este trabajo de investigación, se describen las características del concreto que infieren en la corrosión del acero de refuerzo, así como una visión general del efecto económico que ocasiona el deterioro de los metales en las diferentes industrias y sus posibles técnicas de reparación y prevención. Se presta una mayor atención al proceso de carbonatación del concreto y la técnica no convencional de realcalinización propuesta como una alternativa de prevención de la corrosión provocada por este proceso.

Posteriormente en el Capítulo 2 se incluyen los antecedentes de trabajos realizados sobre la evaluación de la realcalinización. Dicha revisión puso de manifiesto que no existen trabajos sobre ensayos acelerados de recarbonatación para realizar la evaluación de la técnica; y que en los trabajos encontrados el seguimiento de los parámetros de evaluación se realizó a corto y mediano plazo. En este mismo capítulo se presentan los objetivos e hipótesis que guiaron este trabajo de investigación.

En el Capítulo 3 se describe la metodología utilizada en la caracterización de materiales, fabricación de probetas de concreto, en la realización y evaluación de las pruebas de evaluación de los diferentes parámetros, así también se presenta la descripción de los equipos utilizados. Se optó por evaluar el grado de carbonatación del concreto antes de aplicar la técnica de realcalinización, la densidad de corriente y el espesor del recubrimiento del concreto. Para esto se llevó a cabo un proceso de carbonatación acelerada inicial del concreto, posteriormente se realcalinizó y finalmente se procedió a una exposición nuevamente a la carbonatación (o recarbonatación, como fue llamado en este trabajo) . Se evaluó el pH del concreto durante estos procesos, así como también se realizó un seguimiento electroquímico del estado de corrosión del acero y se evaluó la capacidad buffer del concreto realcalinizado por medio de la prueba de

resistencia a la neutralización propuesta por Mietz (Mietz, 1998) con algunas variantes descritas en dicho capítulo.

Finalmente, en el Capítulo 4 se muestran los resultados de las pruebas realizadas durante la experimentación, se realiza una descripción y discusión de lo observado. Es posible señalar que se encontró que el parámetro que tiene una mayor influencia en el comportamiento postratamiento fue la condición de carbonatación inicial del concreto antes de ser aplicada la técnica de realcalinización. En efecto, se encontró que cuando la técnica es aplicada en concretos con una carbonatación total (llamada condición CT) se obtuvo un incremento considerable de la resistencia a la recarbonatación que cuando se aplicó en un concreto con carbonatación parcial (condición CP). Con los resultados obtenidos, se puede concluir que cuando la técnica de realcalinización se utiliza con una carbonatación inicial CT, el pH del concreto se estabiliza en valores que oscilan entre 10 y 10.5. También se encontró que la resistencia a la recarbonatación fue mayor cuando se aplicó una densidad de corriente de  $2 \text{ A/m}^2$  que cuando se utilizó  $1 \text{ A/m}^2$ .

## ÍNDICE

<u>Título</u>		
1.	Generalidades	1
1.1	Estructuras de concreto reforzado	4
1.2	Deterioro de concreto reforzado	6
1.2.1	La carbonatación en el concreto	8
1.2.2	Los cloruros como agente de ataque en el concreto	11
1.3	La corrosión como un fenómeno de importancia	13
1.4	La corrosión en el acero de refuerzo en el concreto	18
1.5	Técnicas de mantenimiento y reparación en el concreto reforzado	19
1.5.1	Métodos convencionales	20
1.5.1.1	Eliminación del concreto dañado	20
1.5.1.2	Protección física de la armadura	21
1.5.2	Métodos no convencionales	22
1.6	Realcalinización del concreto	25
2.	Evaluación de la técnica de realcalinización	28
2.1	La vida útil de las estructuras	29
2.2	Métodos de medición de la carbonatación	31
2.2.1	Indicador fenolftaleína	31
2.2.2	Aplicación de varios indicadores	32

2.2.3	Termogravimetría y análisis químico	32
2.2.4	Difracción de rayos X en polvos de concreto	33
2.3	Modelos de avance en el frente de carbonatación	35
2.4	Parámetros de evaluación postratamiento de la técnica de Realcalinización	38
2.5	Carbonatación posterior a la técnica de Realcalinización	45
2.6	Etapas de la vida útil en la que es aplicada la Realcalinización	46
2.7	Justificación	48
2.8	Objetivos	49
2.8.1	Objetivo general	49
2.8.2	Objetivos particulares	49
2.9	Hipótesis	50
3.	Desarrollo experimental	51
3.1	Descripción de los procesos	52
3.1.1	Diseño experimental	52
3.2	Materiales utilizados	55
3.2.1	Cementantes	55
3.2.2	Agregados	55
3.2.3	Acero de refuerzo	55
3.2.4	Diseño de la mezcla	56
3.3	Fabricación de probetas	58
3.4	Ambiente de exposición acelerada	61
3.5	La técnica de realcalinización	63

3.5.1	Montaje experimental	63
3.5.2	Densidad de corriente aplicada	64
3.5.3	Duración de la aplicación	64
3.5.4	Control eléctrico	64
3.6	Técnicas de seguimiento en concreto sano, durante la carbonatación, realcalinización y recarbonatación	66
3.6.1	Pruebas de avance de carbonatación por medio del indicador a base de fenolftaleína	66
3.6.2	Medidas de pH en las probetas	67
3.6.3	Análisis por difracción de rayos X (DRX) en polvos	69
3.6.4	Análisis termogravimétrico (DTA/TGA)	70
3.6.5	Observación en el Microscopio electrónico de Barrido (MEB)	70
3.6.6	Prueba de resistencia a la neutralización	70
3.7	Estado de corrosión del acero	72
4	Resultados y análisis	74
4.1	Caracterización del concreto	74
4.1.1	Resistencia a compresión	74
4.1.2	Análisis químico del cemento	76
4.2	Seguimiento de la carbonatación	78
4.2.1	Pruebas de avance de carbonatación por medio del indicador a base de fenolftaleína	78
4.2.2	Medición del pH del concreto	79
4.2.3	Análisis por difracción de rayos X (DRX) en polvos	81
4.2.4	Análisis termogravimétrico (DTA/TGA)	83
4.2.5	Observación en el Microscopio Óptico de Barrido (MEB)	86

4.3	Tiempo total de tratamiento	89
4.4	Prueba de resistencia a la neutralización	90
4.5	Seguimiento del pH del concreto durante la recarbonatación	92
4.6	Estado de corrosión del acero	99
4.6.1	Seguimiento del potencial de corrosión $E_{corr}$	99
4.6.2	Seguimiento de la velocidad de corrosión $i_{corr}$	101
4.6.3	Seguimiento de la resistividad, $\rho$	103
4.7	Inspección visual	107
4.8	Discusión de resultados	117
4.8.1	Seguimiento electroquímico del estado de corrosión del acero	117
4.8.2	Influencia de la corriente aplicada	119
4.8.3	Influencia del espesor de recubrimiento	120
4.8.4	Influencia del tipo de concreto	121
4.8.5	Influencia la condición de carbonatación inicial	121
	Conclusiones	125
	Recomendaciones para trabajos futuros	128
	Referencias	129
	Apéndice 1	136
	Apéndice 2	137

## ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Nombre de Figuras</u>	<u>Páginas</u>
Figura 1	Diagrama de pH- Potencial: a) simplificado del hierro en contacto con agua y b) mostrando regiones termodinámicamente estables del diagrama (Pourbaix, 1996). 5
Figura 2	Deterioro en estructuras de concreto reforzado provocado por: a) carbonatación, b) cloruros (Andrade C. et al. 2003) 8
Figura 3	Avance de carbonatación con diferentes porcentajes de humedad relativa (Baron, 1992) 10
Figura 4	Ahorros generados (en %) por medidas preventivas de corrosión (Garcés et al., 2008). 14
Figura 5	Ley de evolución de costos, ley de Ssitter (Sitter, 1984) 15
Figura 6	Sistemas de protección y reparación de estructuras de concreto reforzado (Gonçalves, 2003) 20
Figura 7	Reacciones que se presentan durante la realcalinización (Mietz, 1995) 26
Figura 8	Diagrama esquemático del modelo de la vida útil propuesto por P. R. Helene. 30
Figura 9	Esquema del perfil de pH en un concreto parcialmente carbonatado (J Broomfield, 2000). 31
Figura 10	Resultados de TGA de muestras de concreto cortadas a diferentes profundidades (Villain et al., 2007). 33
Figura 11	Evolución de la calcita producTo de la carbonatación en mortero con cal (L), con cal e inclusor de aire (LA), con cal y una puzolana (LP) y con cal, puzolana e inclusor de aire (G. Cultrone et al., 2005). 34

Figura 12	Perfiles de alcalinidad en base al consumo de HCl (Mietz, 1998).	39
Figura 13	Distribución de los valores de pH antes y después de la realcalinización electroquímica (Mietz, 1998).	40
Figura 14	Resultados arrojados utilizando los dos criterios de eficiencia de realcalinización para Weichung (Weichung Y, et al., 2005).	41
Figura 15	Esquema de los posibles estados de carbonatación del concreto después de una prueba con el indicador de fenofltaleína.	47
Figura 16	Procesos que intervienen en el desarrollo experimental.	52
Figura 17	Condiciones de carbonatación del concreto antes de aplicar la técnica de realcalinización.	53
Figura 18	Diseño experimental.	54
Figura 19	Esquema de la ubicación del acero, acotaciones en mm.	56
Figura 20	Probeta preparada para la aplicación de la técnica de realcalinización, acotaciones en mm.	59
Figura 21	Cámara para acelerar el proceso de carbonatación.	61
Figura 22	Esquema del montaje utilizado para la aplicación de la realcalinización.	63
Figura 23	Circuito auxiliar controlador de la densidad de corriente.	65
Figura 24	Descripción de las técnicas utilizadas en cada proceso.	66
Figura 25	Prueba del avance de carbonatación.	67
Figura 26	Obtención de los polvos de concreto utilizado para la obtención del pH.	68
Figura 27	Muestra lista para ser medida en el pH-metro Orion 4 Star.	69
Figura 28	Prueba electroquímica y esquema del arreglo utilizado durante la medición.	73
Figura 29	Relación aproximada entre resistencia a la compresión y relación agua-material cementante (Kosmatka et al., 2004).	74
Figura 30	Análisis químico del cemento, % en masa.	75

Figura 31	Profundidad de carbonatación antes de aplicar la técnica de realcalinización.	78
Figura 32	Medida del pH del concreto en la zona A antes y después de ser expuestos a la carbonatación inicial.	79
Figura 33	Medida del pH del concreto en la zona B antes y después de aplicar la técnica de realcalinización.	81
Figura 34	Difracción de Rayos X (DRX) en polvos de concreto.	82
Figura 35 - a	Análisis DTA/TGA en un concreto sano con relación a/c de 0.8	83
Figura 35 - b	Análisis DTA/TGA de la zona A (al nivel de la varilla) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 antes de ser realcalinizado.	84
Figura 35 - c	Análisis DTA/TGA de la zona A (al nivel de la varilla) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 después de ser realcalinizado.	84
Figura 36	Contenido de hidróxidos en la zona A (al nivel del acero) en diferentes etapas de proyecto.	85
Figura 37	Registro de la observación en MEB.	87
Figura 38	Relación entre el tiempo de exposición a carbonatación y recarbonatación.	89
Figura 39	Prueba de resistencia a la neutralización en concretos realcalinizados, en zona A.	90
Figura 40 - a	Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.65, densidad de corriente de 1.0 A/cm <sup>2</sup> y recubrimiento de 40 cm.	93
Figura 40 - b	Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.65, densidad de corriente de 2.0 A/cm <sup>2</sup> y recubrimiento de 40 cm.	93
Figura 40 - c	Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.8, densidad de corriente de 2.0 A/cm <sup>2</sup> y recubrimiento de 20 cm.	94

Figura 40 - d	Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.7, densidad de corriente de 1.0 A/cm <sup>2</sup> y recubrimiento de 20 cm.	94
Figura 40 - e	Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.7, densidad de corriente de 2.0 A/cm <sup>2</sup> y recubrimiento de 20 cm.	95
Figura 40 - f	Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.8, densidad de corriente de 1.0 A/cm <sup>2</sup> y recubrimiento de 20 cm.	95
Figura 40 - g	Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.8, densidad de corriente de 2.0 A/cm <sup>2</sup> y recubrimiento de 20 cm.	96
Figura 41 - a	Seguimiento del potencial del acero, posterior a la realcalinización en probetas con carbonatación inicial NC.	98
Figura 41 - b	Seguimiento del potencial del acero, posterior a la realcalinización en probetas con carbonatación inicial CP.	99
Figura 41 - c	Seguimiento del potencial del acero, posterior a la realcalinización en probetas con carbonatación inicial CT.	99
Figura 42 - a	Seguimiento de la velocidad de corrosión, $i_{corr}$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial NC.	101
Figura 42 - b	Seguimiento de la velocidad de corrosión, $i_{corr}$ , durante la recarbonatación, en probetas con carbonatación inicial CP.	101
Figura 42 - c	Seguimiento de la velocidad de corrosión, $i_{corr}$ , durante la recarbonatación, en probetas con carbonatación inicial CT.	102
Figura 43 - a	Seguimiento de la resistividad, $\rho$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial SC.	103
Figura 43 - b	Seguimiento de la resistividad, $\rho$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial CP.	104
Figura 43 - c	Seguimiento de la resistividad, $\rho$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial CT.	104
Figura 44	Comportamiento del potencial de corrosión durante el proceso de recarbonatación.	116

Figura 45	Relación entre el pH después del proceso de recarbonatación y la disminución de pH en la prueba de resistencia a la neutralización.	120
Figura 46	Relación entre el pH inicial de carbonatación y el pH después de recarbonatación.	121
Figura 47 - a	Análisis DTA/TGA de la zona B (zona exterior a realcalinizar) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 antes de ser realcalinizado.	134
Figura 47- b	Análisis DTA/TGA de la zona B (zona exterior realcalinizada) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 después de ser realcalinizado.	134
Figura 48- a	Observación en MEB de concreto sano.	135
Figura 48- b	Observación en MEB de concreto realcalinizado en la zona A.	136

## ÍNDICE DE TABLAS

	<u>Nombre de Tablas</u>	Páginas
Tabla 1	Clasificación de daños en puentes en México en función del agente de ataque (López et al., 2006).	16
Tabla 2	Criterio de interpretación de la medida del $E_{corr}$ (ASTM C 876).	42
Tabla 3	Criterio de interpretación de la medida del Resistividad (Feliú et al., 1989).	43
Tabla 4	Criterio de interpretación de la medida de $icorr$ (Rodríguez et al., 1993; Andrade et al., 1990).	44
Tabla 5	Propiedades físicas de los agregados utilizados.	55
Tabla 6	Dosificación de los materiales.	57
Tabla 7	Descripción de probetas realizadas por mezcla.	60
Tabla 8	Análisis químico del cemento, % en masa.	76
Tabla 9	Contenido de óxidos alcalinos (las unidades se encuentran en % con respecto al peso del cemento).	77
Tabla 10	Contenido de Potasio en la interface acero-concreto obtenido por EDS.	88
Tabla 11 - a	Inspección visual en probetas con condición inicial NC (no carbonatada) y relación a/c de 0.7.	106
Tabla 11 - b	Inspección visual en probetas con condición inicial NC (no carbonatada) y relación a/c de 0.8.	106
Tabla 12 - a	Inspección visual en probetas con condición inicial CP (carbonatadas parcialmente) y Relación a/c de 0.65.	107
Tabla 12 - b	Inspección visual en probetas con condición inicial CP (carbonatadas parcialmente) y relación a/c de 0.7.	108

Tabla 12 - c	Inspección visual en probetas con condición inicial CP (carbonatadas parcialmente) y relación a/c de 0.8.	108
Tabla 13 - a	Inspección visual en probetas con condición inicial CT (carbonatadas totalmente) y relación a/c de 0.65.	112
Tabla 13 - b	Inspección visual en probetas con condición inicial CT (carbonatadas totalmente) y relación a/c de 0.8.	113

## CAPÍTULO 1

### Generalidades

El concreto reforzado es un material de construcción económico que presenta propiedades mecánicas interesantes, lo que justifica el desarrollo constante de las estructuras que utilizan este material. Las excepcionales virtudes del concreto armado como material de construcción, determinaron a fines del siglo pasado y principios del presente, una rápida expansión de su utilización. El volumen, pero sobre todo la variedad de las obras de concreto armado generó una tecnología en permanente transformación (J. Mietz, 1998; T. de Rincon 1994).

En principio, la durabilidad de estas construcciones es asegurada por el concreto que protege física y químicamente el acero de la corrosión. En efecto, las reacciones de hidratación del cemento producen una solución intersticial con un pH elevado (alcanzando valores cercanos a 13) que genera las condiciones óptimas para la estabilidad casi permanente del acero de las armaduras embebidas en el concreto (J. Mietz, 1998).

La Durabilidad del concreto se puede definir como la habilidad del concreto a resistir la acción del ambiente, el ataque químico y la abrasión manteniendo sus propiedades mecánicas. Los componentes del concreto, la proporción de estos materiales, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto. Debido a que muchas estructuras de concreto están reforzadas mecánicamente por varillas de acero, la durabilidad global del elemento dependerá del comportamiento frente a la corrosión de este acero (J. Mietz, 1998; T. de Rincon 1994).

En este sentido, en los últimos veinte años un cierto número de estructuras de concreto reforzado viene presentando algún tipo de problema ligado a la corrosión, unas veces más, otras menos pronunciados que limitan en cierta medida la vida útil de las estructuras, pero que sobre todo inducen a consecuencias económicas que pueden resultar mayores. Así según un reporte de la OCDE (Uller et al., 1998), 40 % de los puentes de concreto reforzado están en un grado de degradación inaceptable en los Estados Unidos. Entre las causas más comunes de degradación examinadas, el reporte pone en evidencia que la corrosión del acero de refuerzo en el concreto aparece como el problema más frecuentemente encontrado. En México desafortunadamente no se cuenta con un estudio específico sobre el estado actual de la infraestructura civil en lo que respecta este problema, pero se estima que el porcentaje puede ser mayor (la corrosión de la armadura del concreto consiste en la oxidación destructiva del acero por el medio que lo rodea). Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales: ánodo (donde ocurre la oxidación), cátodo (donde ocurre la reducción), un conductor metálico y un electrolito, el cual en este caso es el concreto.

Los costos de mantenimiento de las estructuras (cuando estos son técnicamente posibles), como los de corrosión de las patologías generadas por el fenómeno, son económicamente tan significativos como para que se estimulen los procesos de búsqueda de técnicas que generen mínimos costos y prolonguen la vida útil de las estructuras que sufren estos problemas (J. Mietz, 1998; T. de Rincon 1994).

Existen en México acciones (Castro et al., 2004) que tienen como objetivo evaluar las diferentes condiciones ambientales potencialmente agresivas para las obras de concreto reforzado y pretenden ser una base en la futura toma de decisiones. Sin embargo, la visión de las empresas dedicadas a la construcción de obras de ingeniería civil ha entrado en una etapa de transición. Hace apenas media década las actividades de estas empresas estaban organizadas como sigue: 60% dedicadas al diseño y la construcción y el 40% a la reparación. En los últimos años esta relación se ha venido

invirtiendo. Las futuras estructuras deben asegurar una durabilidad que justifique su inversión.

La necesidad de desarrollar estructuras durables ha llevado al desarrollo de soluciones para su protección efectiva. La aplicación de métodos no destructivos de reparación y mantenimiento ha despertado gran interés en el campo de la ingeniería civil (C. Hanin, 1984; O.E. Gjory, 1974). Sin embargo, existe un claro consenso en el que solo hay dos y en algunos casos tres técnicas (protección catódica, extracción electroquímica de cloruros y realcalinización) capaces de reparar o disminuir hasta un nivel despreciable la corrosión del acero de refuerzo (Broomfield, 1997). Dichas técnicas involucran la aplicación de un campo eléctrico al sistema acero - concreto, y dependiendo del mecanismo involucrado, corrosión inducida por cloruros o por el fenómeno de carbonatación, se refiere respectivamente de la extracción electroquímica de cloruros o realcalinización.

## 1.1 Estructuras de concreto reforzado

La capacidad del concreto reforzado con acero de resistir grandes esfuerzos es una cualidad que se logra gracias al trabajo en conjunto del acero de refuerzo y el concreto. Por sí solo, el concreto resiste a esfuerzos en tensión, aproximadamente el 10% de lo que resiste en compresión, por esta razón, el acero brinda una mayor seguridad a las estructuras. De esta forma, se consigue un material económico y técnicamente resistente. No obstante, la durabilidad es el resultado de una doble acción protectora que el concreto ejerce sobre el acero, una protección física y otra química gracias a su elevada alcalinidad.

El concreto es un conglomerado sólido constituido por las fases hidratadas del cemento, es decir un sólido compacto y denso, pero poroso. Una red de poros se encuentra en el concreto, que si bien no siempre están comunicados, permiten que el concreto presente una cierta permeabilidad a los gases y líquidos.

La alcalinidad del concreto es provocada principalmente por el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y los álcalis que pueden estar incorporados como sulfatos en el clinker. Esto genera un pH en el concreto de entre 12 y 13 (J. Mietz, 1998). Con estos valores y con la presencia de oxígeno, el acero se encuentra en un estado de pasivación, es decir cubierto por una capa de óxidos que lo mantiene protegido indefinidamente (Garcés et al. ,2008). Esta protección química tiene su fundamento en los estados termodinámicos del hierro en agua que han sido estudiados por Pourbaix (Pourbaix, 1996), y son presentados en el diagrama de pH-potencial de la Figura 1.

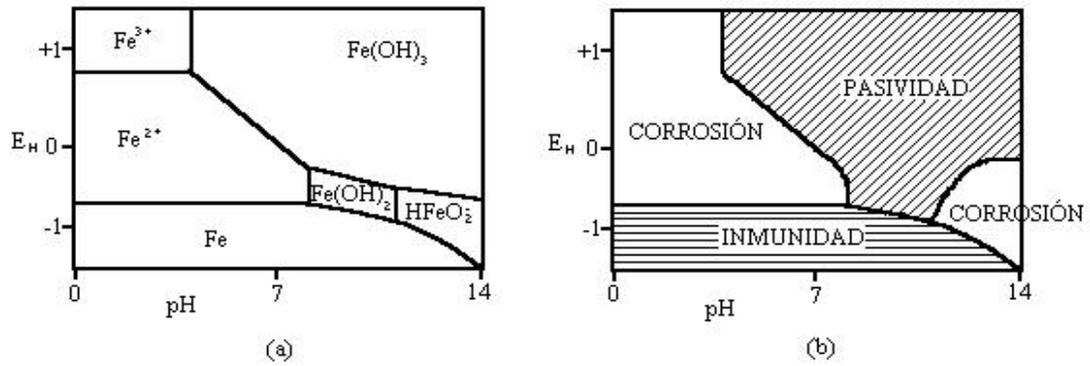


Figura 1. Diagrama de pH- Potencial a) simplificado del hierro en contacto con agua y b) mostrando regiones termodinámicamente estables del diagrama (Pourbaix, 1996).

En la Figura 1 puede observarse la relación que existe entre el potencial del acero y el pH del medio en el que se encuentra. Así, por ejemplo, si el concreto pierde su alcalinidad desde la colocación del concreto (por la inadecuada selección o por la utilización de materiales contaminados) puede activar inmediatamente el proceso de corrosión del acero de refuerzo.

## 1.2 Deterioro de concreto reforzado

La durabilidad es sinónimo de tener un largo periodo de vida útil, específicamente una estructura de concreto durable es aquella que mantiene las condiciones de servicio aceptables, tomando en cuenta no solo las condiciones estructurales, sino también el aspecto de confort, funcionalidad y estética.

El comité ACI 201 define la durabilidad del concreto como *“la facultad que este tiene de resistir la acción de la intemperie, ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro”*. Un concreto durable debe mantener sus cualidades de servicio originales, al estar expuesto a un medio ambiente, por un periodo de vida útil determinado.

Por otra parte, el comité ACI 365.1R-00 define la vida útil como *“el periodo de tiempo después de la instalación, en el cual, el desempeño de las estructuras cumplen con los valores mínimos de mantenimiento”*.

Como consecuencia de la interacción con el medio, todo el material modifica su microestructura y como resultado sufre un cambio en sus propiedades con el tiempo, hasta encontrarse en un punto en donde su uso se hace peligroso o poco rentable.

En la actualidad, los diseños deben realizarse atendiendo además del aspecto estructural, el aspecto de durabilidad. Se estima que en países desarrollados el 40% de los recursos de la construcción se utilizan en la reparación y mantenimiento de la infraestructura existente (Neville, 2001).

Es sabido que el agua es el principal agente tanto de creación como de destrucción del concreto, ya que es la causa de muchos procesos físicos de degradación, cumple la función de vehículo de iones agresivos, así como también puede ser fuente de procesos químicos de degradación. Otro factor importante son los poros, ya que en un sólido

poroso la tasa de deterioro depende de si los productos químicos se limitan a la superficie del concreto, o si también se encuentran en el interior del mismo. Un tercer factor es la concentración de iones agresivos en el agua y la composición química del material, en este caso el concreto. Los procesos de deterioro físico del concreto se pueden clasificar en dos categorías:

a) Debido al desgaste de la superficie o la pérdida de masa debido a la abrasión, la erosión o a la cavitación.

b) Debido a grietas provocadas por la temperatura y los gradientes de humedad, la cristalización de las sales en los poros, la carga estructural y la exposición a las temperaturas extremas, tales como la congelación o el fuego.

Por su parte, los deterioros químicos se pueden agrupar en:

a) La hidrólisis de los componentes de la pasta de cemento por las aguas blandas o ácidas.

b) Flujo de iones agresivos como los cloruros o sulfatos.

c) Reacciones formadoras de productos tal como la reacción álcali-agregado, la carbonatación y la corrosión del acero de refuerzo.

Tanto el deterioro físico como el químico actúan de manera conjunta, al presentarse uno generalmente contribuye al desarrollo de otro, exhibiéndose esta interacción de una manera compleja (Mehta et al., 2006).

En estructuras de concreto reforzado el principal responsable del deterioro es la corrosión del acero de refuerzo ocasionado principalmente por la pérdida de la protección química que brinda el concreto al acero conocida como carbonatación y por el ingreso de iones cloro, esto es posible apreciarlo en la Figura 2.

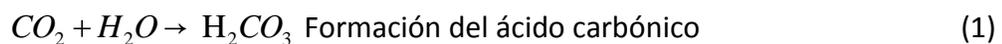


- a) Reparación en viga de fachada dañada por corrosión del acero de refuerzo provocada por carbonatación (Mérida, México).      b) Corrosión de acero de refuerzo por acción de cloruros en un puente (Mongagua , Brasil)

Figura 2. Deterioro en estructuras de concreto reforzado provocado por : a) carbonatación, b) cloruros (Andrade C. et al. 2003).

### 1.2.1 La carbonatación en el concreto

Se le llama carbonatación a la pérdida de alcalinidad del concreto, siendo un fenómeno que se agudiza en donde las concentraciones de  $CO_2$  son elevadas. Es el resultado de la interacción del dióxido de carbono que se encuentra en forma de gas en la atmósfera con los hidróxidos alcalinos del concreto. Además de disminuir el pH del concreto se estima que la calcita generada por la carbonatación es 17% veces más grande que la portlandita (CUR, 1975) lo cual genera agrietamiento y pérdida del recubrimiento en concretos altamente carbonatados. El dióxido de carbono disuelto en agua forma ácido carbónico, sin embargo, este no ataca la pasta de cemento, pero neutraliza los álcalis que se encuentran en los poros formando carbonato de calcio, lo anterior se puede ver más claramente en las siguientes ecuaciones (Broomfield, 2004):



La disminución en el pH del concreto permite el rompimiento de la capa pasiva que anteriormente había sido formada por el hidróxido de calcio, los iones de sodio y de potasio y que protegía al acero de la corrosión. Se considera que un pH de 11 es suficiente para que inicie este fenómeno (ACI Committee 222, 1990), pero el concreto carbonatado puede alcanzar valores de hasta 7, cuando después de encontrarse en este estado permanecen las condiciones agresivas de exposición.

La carbonatación puede ocasionar daños más rápidos cuando el recubrimiento del concreto es muy pequeño por lo que esta alcanzará más rápidamente al acero en estos casos. Una porosidad alta, una relación a/c igualmente alta o un mal curado puede promover un rápido avance de carbonatación.

Los factores que determinan el frente de carbonatación son: el contenido de humedad, el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y la permeabilidad del concreto. Si la humedad se encuentra entre 50 y 70% aproximadamente, la carbonatación avanzará más rápido. Valores alejados de este rango no benefician la carbonatación, valores inferiores son insuficientes para que el CO<sub>2</sub> se disuelva y valores mayores bloquean el paso de este gas por los poros, (Broomfield, 1995; López et al., 2006; Giulliano, 2006).

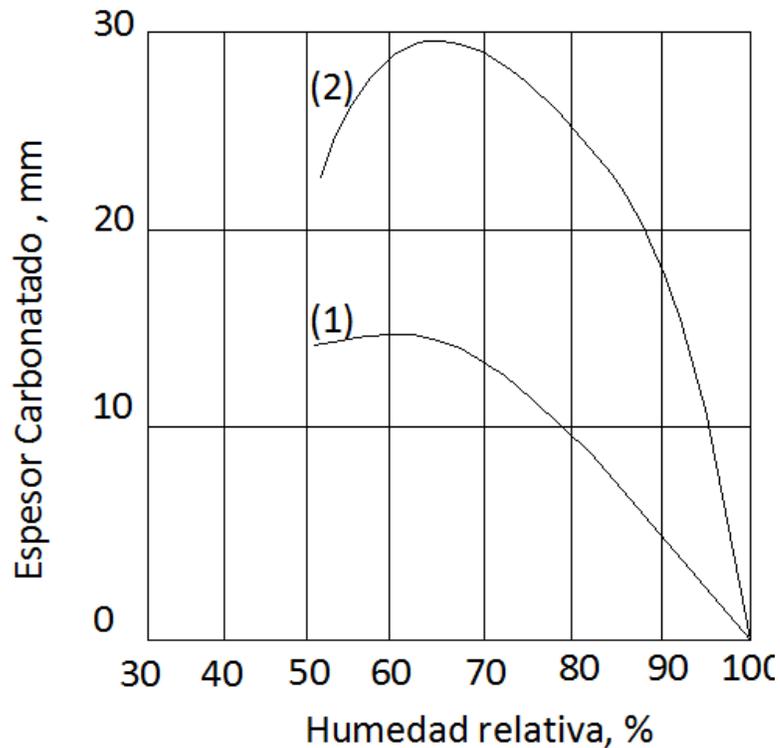


Figura 3. Avance de carbonatación con diferentes porcentajes de humedad relativa (Baron, 1992).

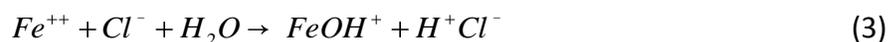
En la Figura 3 se ejemplifica lo anterior, la curva 1 muestra una relación a/c de 0.5 (relativamente baja), y la curva 2 representa una relación de 0.75, la cual en la práctica es muy convencional. Puede observarse que un concreto con una relación a/c baja tiene un menor avance de carbonatación en un mismo tiempo con respecto de otro con una relación a/c mayor, así también se observa que el rango en que la influencia de la humedad relativa es óptima para que se presente la reacción es independientemente de la relación a/c.

Es común que el método simple de colorimetría se utilice para monitorear la carbonatación del concreto que consiste en el rociado de la fenolftaleína diluida en alcohol, con esto es posible calcular la profundidad de carbonatación correspondiente a un valor de pH igual o cercano a 9.5 y es utilizado en condiciones reales o en el laboratorio. Este método colorimétrico está ligado a modelos de carbonatación, los

cuales están basados en el proceso de difusión del CO<sub>2</sub> a través del concreto poroso, esto indica un frente de carbonatación. Sin embargo, diversos estudios (Villain G. et al., 2003; Parrott L. J. et al., 1989) indican que el frente de carbonatación no es puntual sino gradual. Para obtener una mejor descripción de este fenómeno es necesario tener una medida cuantitativa de los perfiles de carbonatación para monitorear el progreso a través del tiempo y que permita conocer en qué momento la activación del acero de refuerzo se encuentra comprometida.

### 1.2.2 Los cloruros como agente de ataque en el concreto

Los cloruros pueden ser muy agresivos para el concreto, esto se debe a que no es necesario que el concreto pierda su alcalinidad para que este pueda ser atacado. Los cloruros pueden estar presentes debido al uso de agua de mar en la mezcla, a que los agregados estén contaminados, a la presencia de una atmósfera marina, al contacto con agua de mar, al contacto con sales de deshielo o a procesos industriales. Se considera que los cementos ricos en C<sub>3</sub>A son más resistentes a los cloruros, esto debido a que el aluminato tricálcico se enlaza químicamente con los cloruros. La reacción química que degrada al acero de refuerzo causada por los cloruros es la siguiente:



Los cloruros provocan un ataque localizado en la superficie del acero. Cuando el concreto se encuentra sumergido estos se propagan por difusión, mientras que cuando se encuentra seco la propagación es por capilaridad. Este último caso es comúnmente ejemplificado con las mareas en donde la absorción capilar genera una mayor rapidez de avance y por ende promueve un mayor ataque.

En el concreto se presentan ligados y libres, sin embargo, los límites que marcan las normas para el contenido máximo de cloruros se refiere a los cloruros libres, ya que éstos son los causantes de la corrosión, los cloruros ligados forman parte del concreto.

Sin embargo, la carbonatación del concreto produce la liberación del cloruro ligado, pasando a ser cloruro libre y por lo tanto aumentando el riesgo de corrosión de la armadura.

La permeabilidad es un factor determinante en las estructuras de concreto, ya que la penetración de los cloruros será mayor cuando esta sea igualmente mayor. Una relación a/c baja y un contenido de cemento alto disminuirá la velocidad de penetración de los cloruros esto debido a la disminución de la porosidad de la pasta de cemento a causa de una mayor densificación, así como el aumento en el contenido de  $C_3A$ .

El límite de cloruros que puede generar una despasivación es de aproximadamente 0.4% del peso del cemento (Comité Européen du Béton, 1992), o bien una relación  $[Cl^-]/[OH^-]$  de 0.6, si se trata de cloruros que penetran desde el exterior (Mena, 2005).

### 1.3 La corrosión como un fenómeno de importancia

A mediados del siglo XX, el concreto comenzó a presentar diferentes patologías de significativa incidencia e importancia. El aumento de esbeltez, la disminución del recubrimiento y el aumento de las tensiones de trabajo de las estructuras, así como el incremento en la agresividad del ambiente causado por la industrialización, son contados entre los factores incidentes.

Una patología puede ser definida como el seguimiento o estudio de los síntomas, mecanismos y las causas que originan los defectos de las obras civiles, es decir, el estudio de las partes que componen el problema. Una buena terapia da solución al problema patológico y es consecuencia de un proceso de investigación (Polito, 2006). La corrosión del acero se encuentra como una de las patologías más importantes y más riesgosas dado que involucra productos expansivos que pueden provocar fisuras al concreto. Normalmente, el concreto presenta buenas condiciones de protección contra la corrosión, sin embargo esta condición es disminuida en la medida en que el concreto es atacado por sustancias agresivas existentes en el ambiente, como son principalmente el CO<sub>2</sub> y los cloruros.

En el tema de deterioro prematuro de estructuras de concreto debido a la corrosión han trabajado diversos organismos a nivel mundial como Portland Cement Association (PCA); American Society for Testing and Materials (ASTM), The National Association of Corrosion Engineers (NACE); Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux; Systèmes de Constructions et Ouvrages (RILEM); Comité Eléctrotechnique Belge (CEB); The National Materials Advisory Board (NMAB) y la Red Durar, Prevenir y Rehabilitar (Iberoamérica).

El proceso de la corrosión en la actualidad es un problema de gran importancia, lo cual ha motivado a estudios que evalúan el impacto que tiene en cada país. Como se ha

comentado, el parámetro utilizado para evaluar este fenómeno es la pérdida económica expresada como porcentaje del PIB (Producto Interno Bruto). Según comités de expertos las pérdidas anuales causadas por corrosión en cada país es de aproximadamente 3 a 4% del PIB para países desarrollados como son Estados Unidos e Inglaterra. Sin embargo, en países en vías de desarrollo se estiman pérdidas del orden de 8% del PIB (Orozco et al., 2007; Orozco, 1998). Estos estudios indican que la industria de la construcción es una de las principales generadoras de pérdidas, siendo superada solo por la industria del transporte y naval. Sin embargo, entre un 20 y 25% de los costos totales generados por la corrosión pudieron haberse evitado con la aplicación de técnicas anticorrosivas o de prevención (Ávila, 1996; Garcés, 2008).

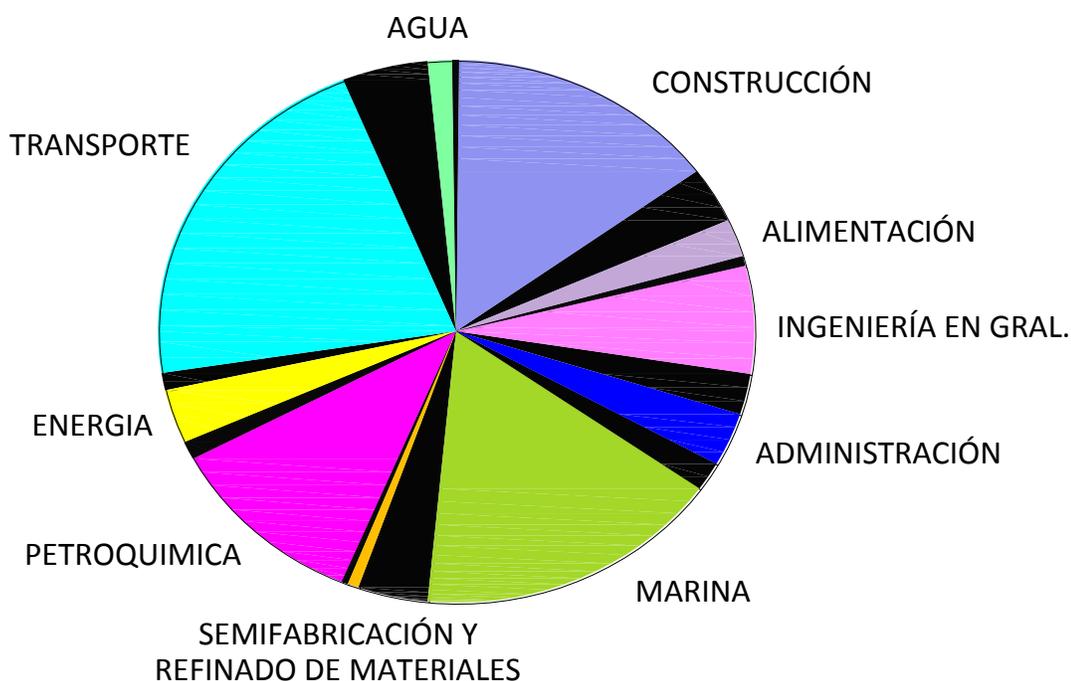


Figura 4. Ahorros generados por medidas preventivas de corrosión (Garcés et al., 2008).

El ahorro potencial generado por la correcta prevención de la corrosión se esquematiza en color negro, enseguida de su correspondiente sector en el sentido de las manecillas del reloj. Es importante hacer notar que el ahorro que se puede generar con la correcta

aplicación de medidas preventivas contra la corrosión se ha estudiado en otros países, llegando a la conclusión sobre la necesidad de implementar programas de prevención. Es posible afirmar que las reparaciones serán más durables, más efectivas, más fáciles de ejecutar y mucho más económicas, cuanto antes es llevada a cabo la intervención. Esta afirmación es demostrada por la “ley de Sitter” que prevé los costos crecientes según una progresión geométrica, esto puede comprenderse mejor en el esquema ilustrado en la Figura 5.



Figura 5. Ley de evolución de costos, ley de Sitter (Sitter, 1984)

El deterioro de la infraestructura existente es un problema que afecta no solo a las dependencias responsables de éstas, sino que repercute en la sociedad debido a que estas estructuras quedan inservibles antes de cumplir su vida útil de proyecto.

Debido a la falta de una cultura de prevención y/o mantenimiento, es común que las estructuras de concreto reforzado presenten diversos grados de daño a causa de la corrosión en el acero de refuerzo. Los dos principales agentes de este problema son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cual genera la carbonatación del concreto provocando una

corrosión generalizada en el acero y el ataque por cloruros, este ataque se presenta de forma localizada, sin embargo en este caso, los productos de la oxidación se presentan más rápidamente. Contrario a lo que se podría pensar, según un estudio realizado en México en el 2006 (véase Tabla 1) los daños provocados por la carbonatación son en cantidad muy similares a los provocados por los cloruros.

Tabla 1. Clasificación de daños en puentes en México en función del agente de ataque (López et al., 2006).

<b>Puentes dañados por corrosión</b>		
Clasificación según grado de daño	Cloruros	Carbonatación
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

Los problemas de corrosión en las estructuras dependen en gran parte de las condiciones en las que se encuentran expuestas, por lo que es necesario analizarlas de acuerdo a sus condiciones ambientales.

Sin lugar a dudas, el mayor problema de sustentabilidad corresponde al calentamiento global que es originado por la emisión de gases de invernadero, principalmente el dióxido de carbono, siendo la industria de concreto el productor del 7% de emisiones de este gas (Mehta et al., 1999). No obstante, la gran cantidad de materiales que son desperdiciados debido al deterioro prematuro de estructuras agrava este problema.

Por lo tanto, para realizar estructuras sustentables es posible atacar el problema desde dos frentes, con soluciones a corto plazo, tal como la práctica de la ecología industrial. Es decir, fomentar la reutilización de los propios productos de desecho, y en la medida de lo posible, también los productos de desecho de otras industrias. Esto se puede

complementar con el incremento de la durabilidad de las estructuras (Mehta et al., 2004).

El uso eficiente de los materiales ofrece ventajas importantes, tales como la disminución del agotamiento de los recursos naturales y la disminución de la contaminación. Además la optimización del uso de los recursos generaría un aumento en la producción.

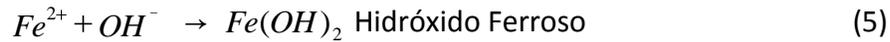
#### 1.4 La corrosión en el acero de refuerzo en el concreto

Como se dijo anteriormente, el concreto brinda un medio alcalino al acero que forma una capa de óxidos pasivante que lo protege de la corrosión, esto es debido a que la corrosión del acero es más factible en un medio ácido. La capa pasivante es parte óxido/hidróxido y parte mineral del cemento.

Al ser atacada esta capa pasivante por agentes agresivos, como lo son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o los cloruros (Cl<sup>-</sup>), puede iniciarse la corrosión del acero, generándose la siguiente reacción en la zona anódica, (Ávila, 1996; Broomfield, 1997):



Posteriormente:



El óxido férrico ocupa aproximadamente el doble del volumen original que ocupa el acero, esto en condiciones avanzadas genera el agrietamiento del concreto.

## 1.5 Técnicas de mantenimiento y reparación en el concreto reforzado

Aun y cuando el concreto fuese construido según criterios de durabilidad, en ambientes agresivos las estructuras de concreto tarde o temprano resultarán dañadas, por esto es necesario utilizar un método que brinde protección al acero de refuerzo o que retarde el probable deterioro por corrosión.

Sin embargo, previamente a cualquier intervención sobre la estructura dañada, es necesario conocer cuál ha sido la causa que originó la corrosión, sus efectos y su influencia. Para actuar sobre el fenómeno corrosivo se pueden adoptar algunas de las siguientes medidas:

- 1) Demolición de la estructura dañada o sustitución del elemento dañado.
- 2) Control y seguimiento del avance del deterioro, pero sin intervenir en el proceso de corrosión.
- 3) Actuar sobre el proceso de corrosión, que en función del daño producido se puede utilizar un método u otro (protección catódica, extracción electroquímica de cloruros, etc.)

Es importante resaltar que en la rehabilitación de una edificación, la evaluación y el diagnóstico constituyen los pasos, quizá, más importantes puesto que de acuerdo con su definición vendrá la decisión de la intervención. Acertar en el diagnóstico representa el éxito de la inversión y por supuesto en la solución de las patologías causantes del problema.

La optimización de las intervenciones surge como una necesidad de cambiar la imagen de la industria de la reparación de “medio servicio”, es decir de una industria que hasta ahora solo repara lo reparado. La resistencia a la corrosión de las reparaciones podrá

ser “ingenieralizada” si se puede mejorar el entendimiento y control de la corrosión y los problemas de la protección de la corrosión.

Existen varios métodos que pueden ser utilizados para proteger el acero de refuerzo de la corrosión como se muestra en la Figura 6, a continuación se describen de acuerdo a su frecuencia en su utilización.

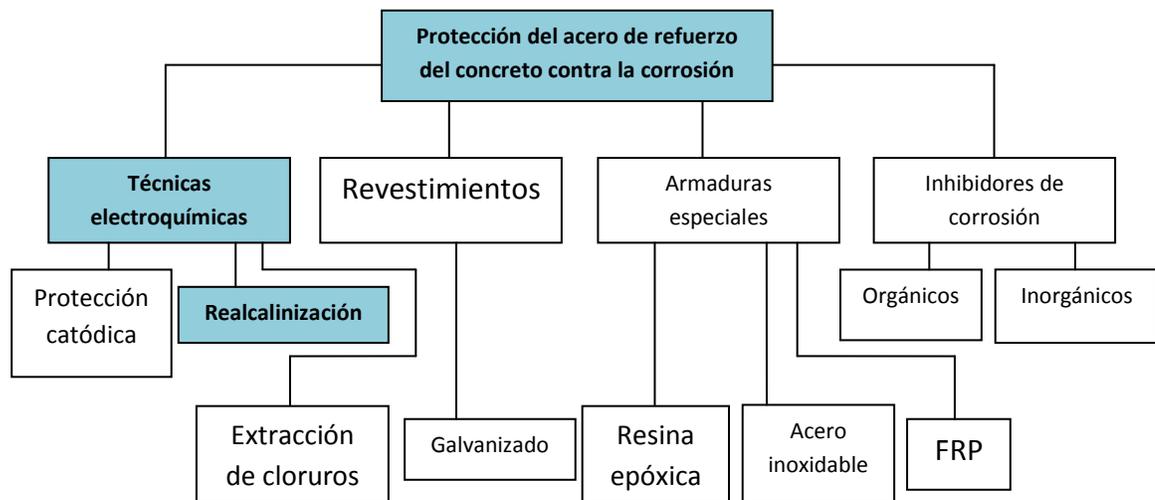


Figura 6. Sistemas de protección y reparación de estructuras de concreto reforzado (Gonçalves, 2003).

### 1.5.1 Métodos convencionales

#### 1.5.1.1 Eliminación del concreto dañado

Los métodos tradicionales se basan en una reparación del concreto deteriorado, sustituyéndolo parcial o totalmente. Esta técnica se conoce como “reparación por parcheo”. Con ella se pretende reconstituir las propiedades físicas y estéticas de la estructura de concreto, y también la protección de las armaduras utilizando un material que recupera la capa pasiva del acero y forme una barrera de protección.

El procedimiento a seguir para reparar el concreto dañado es:

- Preparación previa de la estructura: apuntalamiento provisional si la capacidad resistente no es la suficiente.
- Eliminación del hormigón dañado hasta unos 2,5 cm por detrás de la armadura, para poder limpiarlas fácilmente.
- Limpieza del óxido que recubre las armaduras con un chorreado de arena o cepillado. Sólo se realiza si la corrosión es debida a los cloruros.
- Colocación del material de reparación. Se suele colocar algún tipo de resina asegurando la perfecta adherencia.

Si se produce una pérdida de sección de las armaduras de alrededor del 15-25 %, éstas se sustituyen por otras en buen estado.

A pesar de ser muy utilizado este método de reparación es común que no exista un diagnóstico y evaluación del problema, por lo tanto en estos casos la duración de la intervención es corta.

#### 1.5.1.2 Protección física de la armadura

La armadura puede ser protegida contra la corrosión utilizando un recubrimiento sobre su superficie, el recubrimiento puede ser de otro metal más estable o de materiales orgánicos.

a) Galvanizado. Consiste en sumergir la armadura en un baño de zinc fundido, en su superficie se formarán dos capas. Una más intensa formada por zinc-hierro y otra externa compuesta por zinc puro. Este recubrimiento cumple una doble función, actúa como una barrera física del ambiente y funciona como un ánodo de sacrificio. El zinc tiene un comportamiento anfótero, es decir, es capaz de existir tanto en medios básicos como en medios ácidos, además sus productos de corrosión tienden a llenar los poros del concreto inhibiendo el ataque (Helene, 1986). Sin embargo, se debe tomar en

cuenta que un alto contenido de álcalis inhibe la formación de la capa pasivante de zinc (Andrade, 1992). Otro factor que se debe tomarse en cuenta es la falta de adherencia que presenta el acero galvanizado con el concreto a edades tempranas, esto es debido a que se libera hidrógeno al formarse óxidos y silicatos de zinc.

b) Uso de resinas epóxicas. Funciona como una barrera física, tiene buenas propiedades de adherencia y resistencia química, alta resistencia a la abrasión y al impacto. Una buena aplicación debe encontrarse en un rango de espesores de 180  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$ , valores mayores de 250 $\mu\text{m}$  pueden reducir la adherencia entre el acero y el concreto hasta en un 60%. Un inconveniente que presenta esta técnica es que una vez que se inicie la corrosión en el acero no será posible aplicar tratamientos electroquímicos, (Gonçalves, 2003).

c) Protección química o inhibidores de corrosión. Un inhibidor de corrosión es un compuesto químico que cuando es introducido en el concreto en cantidades reducidas, puede evitar o disminuir la corrosión en la armadura sin afectar negativamente las propiedades físicas de la microestructura del concreto, (Monteiro, 2005). Los inhibidores pueden clasificarse por ser de origen orgánico e inorgánico, además pueden ser agrupados por su función catódica, anódica o mixta. Como su nombre lo indica los inhibidores anódicos permiten reducir la velocidad de corrosión anódica reaccionando con el producto de la corrosión y formando un revestimiento en la superficie del acero. Ejemplos de inhibidores son hidróxidos, carbonatos, silicatos boratos y fosfatos de metales alcalinos. Un inhibidor muy utilizado es el nitrito de sodio. Cuando el agente de ataque son los cloruros es recomendable usar relaciones  $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^- > 1.5$ , Andrade concluye en su trabajo que este inhibidor es eficaz en presencia de cloruros y carbonatación, (Andrade, 1995). Los inhibidores de absorción funcionan como películas protectoras, actúan en las zonas anódicas y catódicas, pertenecen a este grupo coloides y sustancias orgánicas con átomos de oxígeno, nitrógeno o azufre. Su eficacia depende del espesor de la película formada (Gonçalves, 2003).

### 1.5.2 Métodos no convencionales

Existen tres técnicas de reparación y prevención de estructuras dañadas por corrosión del acero. Protección catódica, extracción electroquímica de cloruros y realcalinización. El principio de estas técnicas consiste en aplicar una corriente eléctrica continua a la armadura, la cual cumple la función del cátodo en el circuito, y un electrodo auxiliar externo que cumple la función de ánodo. La principal diferencia está en la variación de la densidad de corriente y en la duración de la aplicación.

a) Protección catódica. Consiste en colocar el potencial de la armadura por debajo del potencial de corrosión, esto es conseguido por el flujo de una corriente directa. Es el proceso de eliminar artificialmente las zonas anódicas de la superficie metálica, de modo que toda la estructura tiene un comportamiento catódico. Como consecuencia el flujo de electrones es detenido y la corrosión es detenida totalmente (Gentil, 2003).

Al aplicar la protección catódica existen tres razones para que la corrosión se vea disminuida:

- Toda la superficie del acero es transformado en cátodo.
- El electrolito próximo a la superficie del acero se transforma en más básico por efecto de la hidrólisis (catolito).
- Un elevado pH puede causar la precipitación de sustancias insolubles como el  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{Mg(OH)}_2$  que forman una capa protectora del metal.

La protección catódica se puede aplicar de dos formas distintas. En el primer caso es utilizado el zinc como ánodo y puede ser aplicado cuando el electrolito presenta una baja resistencia eléctrica. Existen en el mercado aleaciones de zinc listas para ser unidas a las estructuras de acero como precaución de una posible corrosión en el futuro.

En el caso de la protección catódica por corriente impresa, una corriente continua es generada por una fuente externa, son utilizados comúnmente ánodos de platino. Con esta técnica es posible trabajar tanto con electrolitos de alta como de baja resistividad (Gentil 2003).

b) Extracción de cloruros. La extracción de cloruros se realiza por la acción de un campo eléctrico de un electrodo externo. Debido a que los iones cloro se encuentran cargados negativamente, estos son transportados hacia el exterior del concreto por migración e iones hidroxilos son producidos en la superficie de la armadura.

El tiempo de tratamiento varía de acuerdo a la contaminación a la cual fue sometido el concreto, ya sea externa, por medio de agregados contaminados o por agua de mezclado contaminada, también de acuerdo al tipo de contaminante (NaCl, CaCl<sub>2</sub>), la concentración y distribución de cloruros, profundidad de carbonatación, temperatura y espesor del recubrimiento. El tiempo de aplicación varía de 8 a 12 semanas, mientras que la densidad de corriente utilizada normalmente es de 1 A/m<sup>2</sup> (Fajardo et al. 2006).

Para poder comparar el efecto del tratamiento es necesario medir el contenido de cloruros en el concreto, (Eggers, 1997; Gonçalves, 2003).

## 1.6 Realcalinización del concreto

Es un método que se aplica a concretos que se carbonatan como consecuencia de la interacción del concreto y el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del ambiente, es muy similar a la técnica de extracción electroquímica de cloruros, sin embargo, la duración de la aplicación es de alrededor de una semana, comúnmente son usadas densidades de corriente de entre 1 y 5  $\text{A/m}^2$ . Los componentes de la aplicación de esta técnica son una fuente de corriente directa, un electrolito que puede ser carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) o carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y un ánodo externo provisional comúnmente de titanio. En la aplicación de esta técnica, la varilla de refuerzo actúa como cátodo, la cual debe cumplir el requisito (para la correcta aplicación de la corriente directa) de tener continuidad eléctrica a través de todo el refuerzo. La aplicación de la corriente produce reacciones catódicas al nivel de la varilla generando iones hidroxilo en esta zona, esto aumenta el pH del concreto alcanzando valores superiores a 11.5 (Eggers, 1997)

Estas reacciones que se generan durante el tratamiento electroquímico dan origen a los siguientes mecanismos (Mietz, 1995):

- Absorción: debido a los efectos capilares el electrolito ingresa al concreto.
- Difusión: debido a las diferentes concentraciones.
- Migración: de los iones a través del campo eléctrico.
- Electrólisis en la superficie de los electrodos, desprendiéndose iones hidroxilos e hidrógeno gaseoso.
- Electroósmosis: el electrolito en la superficie del concreto se mueve hacia el cátodo, debido a la presencia de un potencial  $\zeta$ .

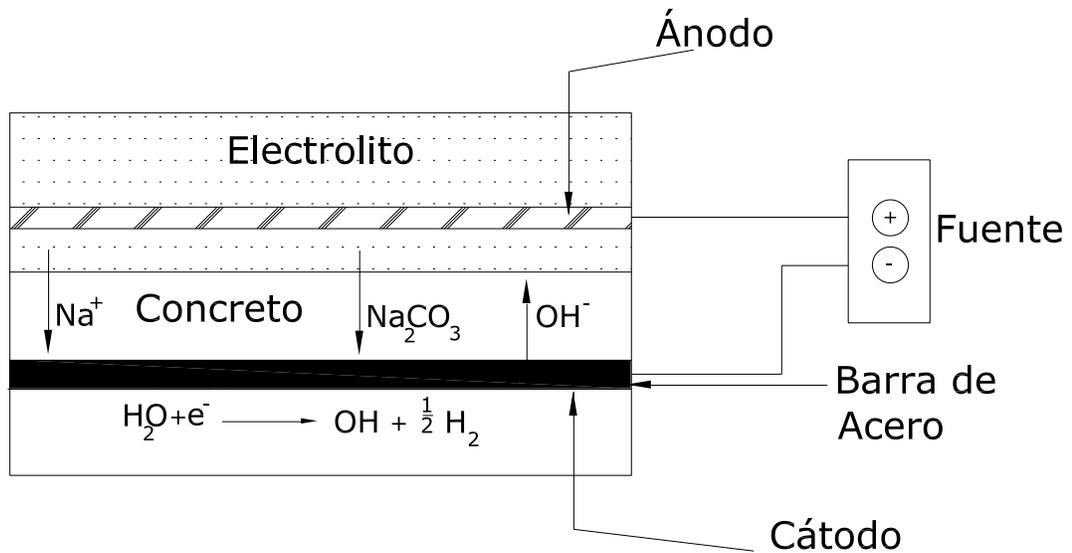


Figura 7. Reacciones que se presentan durante la realcalinización (Mietz, 1995).

El pH al nivel del refuerzo aumenta debido a los iones hidroxilo generados en el cátodo, mientras que el electrolito alcalino que penetra en los poros del concreto previene las disminuciones futuras de pH (ver Figura 7).

Al final de la realcalinización, la evaluación se realiza por medio del indicador de pH de fenolftaleína, aunque existen diversos indicadores, este es muy aceptado debido a su practicidad. Otro criterio de aceptación es la evaluación de la polarización anódica del sistema tratado (Mietz, 1998; Sergi et al. 1996). El Comité Europeo de Estandarización dio como criterio de fin de realcalinización la aplicación de  $200 \text{ Ah/m}^2$  sobre el acero de refuerzo, además de demostrar por medio del indicador de fenolftaleína que cada zona anódica ha sido realcalinizada y que alrededor del acero de refuerzo se encuentra una coloración rosa de un espesor de 10mm, o el equivalente al diámetro de la varilla.

A pesar su amplia aplicación en países Europeos y Norteamérica, existen pocos registros sobre su desempeño una vez que se ha realizado la intervención y por esto existen interrogantes tales como ¿en qué condiciones de carbonatación es mayormente eficiente la técnica?, en comparación con la carbonatación inicial ¿qué tanto dura la recarbonatación para poner de nuevo en peligro la capa pasiva que

protege el acero? Otro aspecto es el electrolito, recientemente se ha optado por utilizar el  $K_2CO_3$ , por la ventaja de no presentar eflorescencias y también por no presentar riesgo de reacción álcali-agregado, sin embargo no existen registros de su desempeño.

## CAPÍTULO 2

### Evaluación de la técnica de realcalinización

Como se ha mencionado extensamente el concreto reforzado es un material durable que permite incluso considerarlo como un material que no se deteriora. Sin embargo, cuando no existe un mantenimiento sistemático y programado de las estructuras diferentes mecanismos de deterioro se presentan en él, originando problemas patológicos que afectan las condiciones de seguridad y/o las condiciones de servicio y funcionalidad de la edificación. Estos problemas normalmente son evolutivos, es decir, tienden a agravarse al transcurrir el tiempo además de estimular nuevos problemas adicionales (Andrade C. et al. 2003).

En este trabajo, se presenta la técnica de realcalinización como un tratamiento preventivo del concreto reforzado con problemas por corrosión del acero ocasionado por una baja alcalinidad del concreto. La efectividad de la técnica ha sido cuestionada (Broomfield J. 2004; González J.A et al. 2000), los criterios de aceptación de este procedimiento cuando es utilizado como rehabilitación están basados en pruebas de pH del concreto por medio del indicador de fenolftaleína y medidas de potencial de corrosión y, en algunos casos, la velocidad de corrosión del acero.

Estudios previos han mostrado que posterior a la aplicación de la técnica de realcalinización existe un aumento de la alcalinidad del concreto en la zona cercana al acero (González F et al. 2009; Mietz J., 1998), y con esto se asegura la restauración de la capa pasiva. Sin embargo, el acero puede ser reactivado después de un cierto periodo de tiempo de exposición a condiciones agresivas.

## 2.1 La vida útil de las estructuras

Trabajos anteriores (Miranda et al., 2005; González et al., 2000) han cuestionado la eficiencia de la realcalinización, en las conclusiones de estos trabajos se ha encontrado que la eficacia de la técnica es dependiente del estado de corrosión del acero de refuerzo, por esta razón es importante ubicar la estructura a realcalinizar previamente a la aplicación de la técnica en su correspondiente periodo de vida útil.

En la sección 1.2 al mencionar el tema de durabilidad de estructuras de concreto se mencionó la definición de vida útil dada por el comité 365 del ACI. Sin embargo, en este trabajo se tomará como referencia el modelo esquemático realizado por Paulo Helene en 1998, el cual a su vez fue basado en el modelo esquemático de Tuutti. La principal aportación de este modelo es la incorporación del concepto de vida residual.

Cuando se refiere a la vida útil de estructuras de concreto, y en el caso particular de deterioro por corrosión del acero de refuerzo, se pueden encontrar tres condiciones que dependen del estado de la estructura en la cual se considera como aceptable (Helen P. R., 1998).

La vida útil de proyecto, la cual se asocia al periodo de tiempo en el cual el acero es despasivado por el ingreso de agentes agresivos, tal como los cloruros o la carbonatación. Es importante resaltar que el hecho de que el frente de carbonatación o el contenido mínimo permisible de cloruros haya alcanzado el acero no significa que a partir de ese momento exista una corrosión importante.

El periodo de vida útil de servicio, este periodo es asociado con el tiempo en el cual la estructura es utilizable, lo cual resulta variable porque depende de cada caso en especial; tal como puede ser el momento de aparición de manchas en el concreto, la

aparición de fisuras o incluso hasta cuando se presenta el desprendimiento del recubrimiento del concreto.

La vida última o total, corresponde al periodo de tiempo en el cual habrá una reducción significativa de la sección resistente de la armadura o una pérdida importante de adherencia del sistema acero-concreto, provocando el colapso parcial o total de la estructura.

Como se mencionó anteriormente la importancia de este modelo está en la incorporación del concepto de vida útil residual, que corresponde al periodo en el cual la estructura aún puede cumplir con sus funciones contando a partir de la fecha de evaluación. Es importante hacer notar que la evaluación y su correspondiente diagnóstico puede ser realizado en cualquier instante de la vida en uso de la estructura. En la Figura 8 puede observarse de manera esquemática las diferentes etapas de una estructura de concreto reforzado. Su importancia radica en el apoyo que ofrece en la elección de un método o técnica de rehabilitación o prevención.

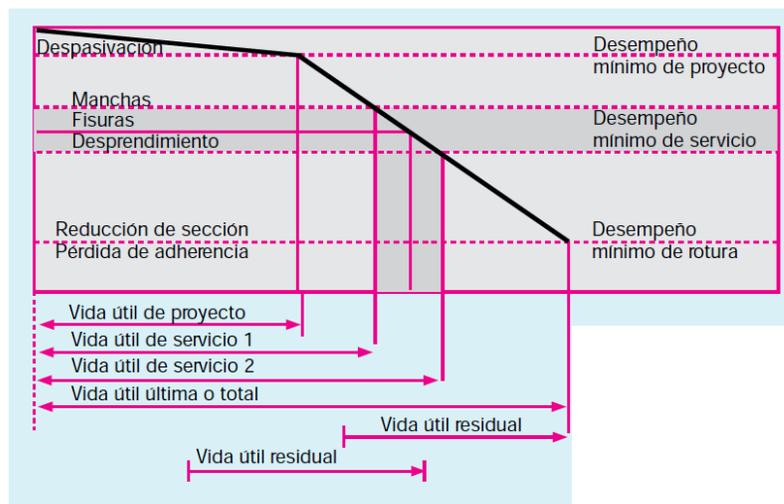


Figura 8. Diagrama esquemático del modelo de la vida útil propuesto por P. R. Helene.

## 2.2 Métodos de medición de la carbonatación

Dado que en este trabajo se pretende describir el comportamiento postratamiento de la técnica de realcalinización es necesario conocer los métodos de la evaluación de la carbonatación del concreto, los cuales pueden ser utilizados en la evaluación de la realcalinización y en la recarbonatación (exposición a altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  posterior a la realcalinización).

### 2.2.1 Indicador fenolftaleína

Este método fue citado en la Sección 1.2.1, su principales ventajas son su forma práctica, esquemática y rápida de aplicación. Este método denota un frente de carbonatación representado por el viraje de color del indicador a base de fenolftaleína. Sin embargo, como su nombre lo indica, este método es un indicador de pH y solo se limita a conocer que en el concreto existe un área con un pH igual o superior a 9.5 y otra área que es menor o igual a este valor de pH como puede observarse en la Figura 9.

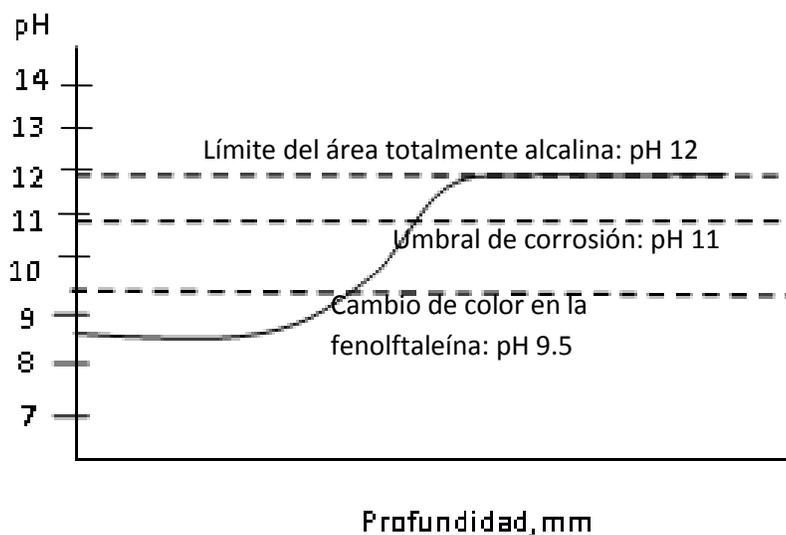


Figura 9. Esquema del perfil de pH en un concreto parcialmente carbonatado (J Broomfield, 2000).

### 2.2.2 Aplicación de otros indicadores

Con el fin de tener una mejor descripción del perfil de carbonatación es posible utilizar un conjunto de indicadores de pH tal como ha sido propuesto anteriormente (Krajčič L. et al., 2000; Sergi et al., 1996). En un trabajo realizado por Weichung (Weichung et al., 2005) se utilizó un indicador llamado rainbow, el cual pinta rosa en un rango de pH de entre 9 y 11, además de presentar un color morado cuando se encuentra en un pH superior a 11. Existen más indicadores, sin embargo la limitante de estos es que sean visibles en el concreto, algunos ya utilizados son la fenolftaleína (9.5), el nitromin (11.5), la timolftaleína (10.0) y el m-nitrofenol (8.0).

### 2.2.3 Termogravimetría- Análisis Químicos

Este método consiste en la medida constante de la masa de una muestra sujeta al incremento constante de la temperatura con el objetivo de cuantificar las reacciones que envuelven las emisiones de gases. Por tanto, esta técnica es aplicable a la medición de la carbonatación, ya que es posible cuantificar la portlandita y el carbonato de calcio proveniente de la carbonatación. Sin embargo, dado que el concreto es heterogeneo y también que la calcita de la arena caliza puede perturbar las medidas del carbonato de calcio producto de la carbonatación, las muestras para TGA son poco representativas y por tanto es comunmente aplicado para pastas (A.A. Rahman et al., 1989; G.W. Groves et al., 1991; N.Rafai et al., 2002). En este sentido, los análisis de TGA son combinados con análisis químicos aplicado en una muestra de concreto, la cual se conoce como “concreto- mortero” por no contener agregados gruesos, los cuales son extraídos en una pre trituración. Esta combinación de métodos es con el objetivo de conocer el contenido de cemento y el contenido de arena y de esta forma tener una muestra representativa.

En la Figura 10 se observa el perfil de un concreto parcialmente carbonatado por la prueba de TGA.

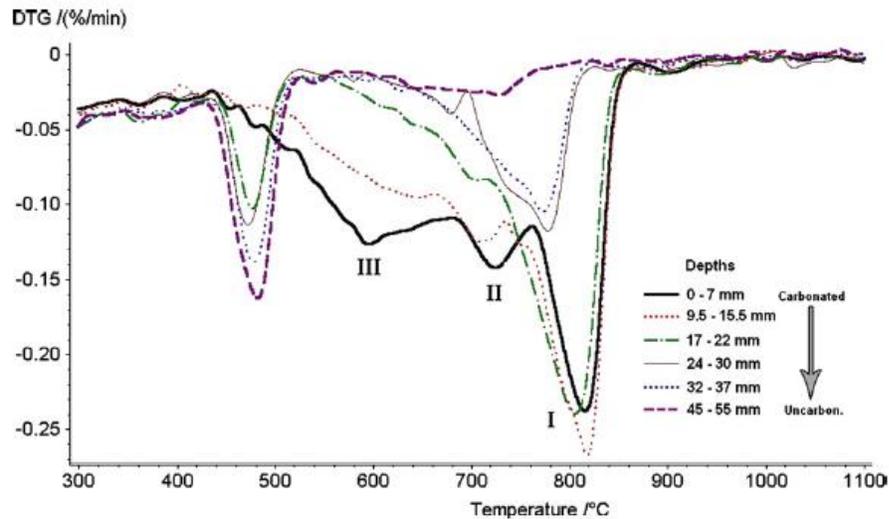


Figura 10. Resultados de TGA de muestras de concreto cortadas a diferentes profundidades (Villain et al., 2007).

El pico I se asocia a la carbonatación de la portlandita ya que el proceso de carbonatación origina carbonatos bien cristalizados y por tanto necesitan más temperatura para disociarse, mientras que los picos II y III se asocian a la carbonatación de los silicatos de calcio hidratados (S-C-H). Sin embargo, dado que la presencia de agregados calcareos complica el cálculo en base a los carbonatos es óptimo basar los cálculos en el pico que aparece en el rango de temperatura de 430-530 °C que corresponde a la presencia de portlandita (Villain et al., 2007).

#### 2.2.4 Difracción de rayos X en polvos de concreto

Es posible calcular el perfil de carbonatación de un concreto por medio de este método (G. Cultrone et al. 2005; Cheng-Feng et al. 2004) dado que los resultados pueden ofrecer la cuantificación de las fases cristalinas presentes en el concreto y así obtener la evolución de la portlandita y los carbonatos a través del tiempo, como lo

muestra la Figura 11 (H.P. Klug et al., 1967). Este método, en su forma semicuantitativa, encuentra un margen de error de  $\pm 5\%$ , sin embargo comparado con otros métodos, esto es de poca importancia.

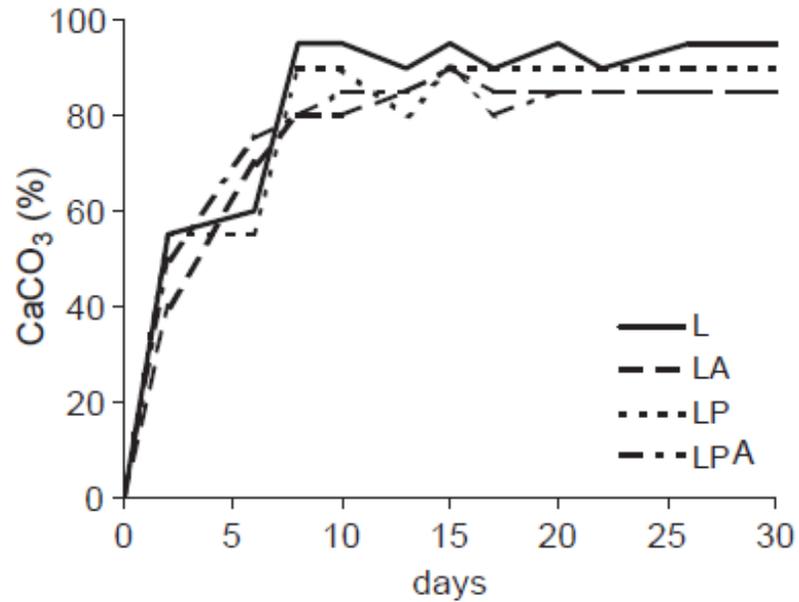


Figura 11. Evolución de la calcita producto de la carbonatación en mortero con cal (L), con cal e inductor de aire (LA), con cal y una puzolana (LP) y con cal, puzolana e inductor de aire (G. Cultrone et al., 2005).

### 2.3 Modelos de avance del frente de carbonatación

La permanencia de la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado es asociada al medio ambiente y el tiempo de exposición. Es decir, depende de la capacidad de los agentes del medio de interactuar con el concreto a través del tiempo para causar un deterioro. La principal causa de deterioro de las estructuras de concreto reforzado es la corrosión del acero de refuerzo y uno de los principales agentes que causan la corrosión del acero de refuerzo en medios urbano-industriales es el  $\text{CO}_2$ , el cual al carbonatar al concreto deshabilita la protección química que este proveía al acero.

La necesidad de desarrollar estructuras duraderas ha llevado al desarrollo de soluciones para su protección efectiva, estos pueden basarse en criterios tradicionales prescriptivos o en modelos de predicción de vida de servicio los cuales cada vez son más ampliamente utilizados (FIB, 2006; CEB, 1997), existen una gran cantidad de modelos de predicción, a continuación se describen algunos de estos:

a) Modelo basado en la ecuación de Tuutti K. (Tuutti K. 1982.). Supone que el coeficiente de difusión del concreto es el parámetro controlador de la carbonatación. Se basa en la medida de un frente de carbonatación en un tiempo dado y el contenido de material carbonatable del concreto, este segundo factor es calculado en función del contenido de óxido de calcio (CaO) que se tiene en el proporcionamiento de la mezcla (contenido en el cemento), así como el grado de hidratación de este. Es conveniente hacer notar que este modelo no toma en cuenta el contenido de humedad del concreto, por tanto, para su utilización es necesario tener un control de este factor.

b) Modelo de Kritsada Sisomphon, (Sisomphon K. et al., 2007). Este modelo parte de la ley de difusión de Fick. Según la primera ley de Fick la cantidad de  $\text{CO}_2$  que entra en el concreto es directamente proporcional a la concentración de  $\text{CO}_2$ , a su coeficiente de

difusión e inversamente proporcional a la profundidad de penetración en la que se encuentra. Al igual que el modelo de Tuutti K. supone la existencia de un frente de carbonatación y concluye que cada mezcla tiene un coeficiente constante de carbonatación. Sin embargo, en este modelo al igual que en el descrito anteriormente no se toman en cuenta las condiciones ambientales, otro aspecto importante es que la ley de la difusión de Fick se basa en la condición de un estado estable por tanto no considera que la reacción de carbonatación influye en la estructura porosa, especialmente en la reducción del volumen de los poros, la producción del carbonato de calcio como producto del proceso de carbonatación es el causante de la disminución de la difusividad del gas  $\text{CO}_2$ .

c) Modelo CEB 1997 (Marques P. et al., 2009). Al igual que los modelos anteriores este modelo se basa en la medida de un frente de carbonatación y en que el coeficiente de difusión del  $\text{CO}_2$  es un parámetro determinante de la carbonatación del concreto, pero a diferencia de los modelos anteriores toma en cuenta condiciones tales como el método de prueba, la humedad relativa y el curado que se realizó en el concreto.

d) Modelo numérico de la carbonatación del concreto basado en indicadores de durabilidad (M. Thiery et al., 2007). Este modelo se basa en una descripción de la composición química de la carbonatación con el fin de predecir la caída de pH en la solución del poro del concreto, el transporte de agua e iones a través del medio poroso parcialmente saturado, la reducción de porosidad y el aumento de agua inducida por la reacción de carbonatación. La aplicación del modelo toma en cuenta indicadores de durabilidad, los cuales son propiedades clave del concreto, tales como la porosidad accesible al agua, la permeabilidad al agua y el contenido de portlandita, estos indicadores son complementados con otros más específicos con respecto a la carbonatación. El aporte principal de este modelo es el demostrar que la cinética de la reacción de la carbonatación es la controladora de la velocidad del proceso y no el coeficiente de difusión (M. Thiery et al., 2007), lo cual explica la inexistencia de un frente de carbonatación sino una zona de transición gradual entre una zona

carbonatada y una no carbonatada (Géraldine V. et al., 2007; M. Thiery et al., 2007; Cheng F. et al., 2004).

La descripción de las consideraciones de estos modelos así como de sus limitantes nos dan una idea más clara del proceso de carbonatación, y en el caso particular de esta investigación de la recarbonatación posterior a la realcalinización, los cuales son procesos complejos, ya que involucran variables del concreto y del ambiente de exposición que al interactuar provocan efectos en el concreto que son característicos solo de esas condiciones específicas.

## 2.4 Parámetros de evaluación postratamiento de la técnica de Realcalinización

La realcalinización es una técnica reciente debido a que fue en 1988 que Miller (Miller, 1994) registró la patente del proceso electroquímico para transportar una solución alcalina al interior del concreto. A partir de entonces, cientos de miles de metros cuadrados han sido tratados en varios países, principalmente en Noruega y Gran Bretaña (Weichung et al., 2004). Sin embargo, la mayoría de estos trabajos no se encuentran documentados y los parámetros de evaluación de la técnica de realcalinización se basan en trabajos de laboratorio.

Algunos trabajos indican que la medida de pH con un indicador que muestre un valor alto es suficiente, y en este caso el indicador más utilizado es la fenolftaleína. El Comité Europeo de Normalización (CEN) desarrolló una especificación técnica que define como parámetro del final de la realcalinización cuando  $200 \text{ Ah/m}^2$  ( $20 \text{ Ah/ft}^2$ ) han sido aplicados sobre la superficie del refuerzo, y la efectividad será comprobada por la prueba de la fenolftaleína, la cual deberá pintar 10mm alrededor del acero o el diámetro de este, lo que sea menor. Sin embargo, como lo muestra la figura 5, el viraje de color de la fenolftaleína es diferente al valor considerado como mínimo para que la capa pasiva sea desestabilizada.

Castellote (Castellote et al., 2005) realizó un estudio por medio de difracción de electrones en el cual se concluye que la electroósmosis es la fuerza impulsora de los carbonatos hacia el acero de refuerzo. No obstante, previamente, Mietz, en el año de 1998, cuestionó la existencia de este fenómeno y se planteó como un mecanismo complementario de la hidrólisis al nivel del acero y la electromigración de iones, estos serían los principales mecanismos de realcalinización. La importancia de la electroósmosis radica en la posibilidad de atrapar el carbonato de sodio el cual previene una posterior recarbonatación.

Hondel (Hondel et al., 1998) investigó la redistribución de sodio/hidroxilo y/o la recarbonatación en el concreto por medio de espectroscopia de absorción atómica. El resultado encontrado fue una insignificante redistribución. Para efecto de comparación fue realizada una prueba en la cual se utilizó ácido nítrico como disolvente de la matriz cementante, se encontró que no todo el sodio constituía carbonato de sodio, por tanto un análisis de la redistribución de sodio no es suficiente para evaluar la efectividad de la técnica ya que el sulfato de sodio no tiene un buffer alto. Un trabajo realizado por Mietz (Mietz, 1998) demostró que la medida de potenciales del acero posterior a la técnica de realcalinización es más efectiva en la determinación de la repasivación del acero, él encontró en medidas realizadas un mes después de la aplicación de la técnica que la despolarización del acero se estabilizaban en  $-0.2V$  (vs. SCE) que corresponde al valor del acero pasivo en concreto húmedo. La presencia de estos valores de potencial, así como su homogeneidad es un fuerte indicativo de la repasivación del acero. En este mismo trabajo, estudió la capacidad del concreto realcalinado de actuar como buffer (capacidad de resistir el cambio de pH debido a la adición de un ácido o base). La prueba consistió en preparar una solución con polvo de concreto obtenido a diferentes profundidades, agua destilada y fenolftaleína, esta solución fue titulada con HCl, es decir, se midió el consumo de ácido necesario para disminuir el pH del concreto a valores menores a 9.5.

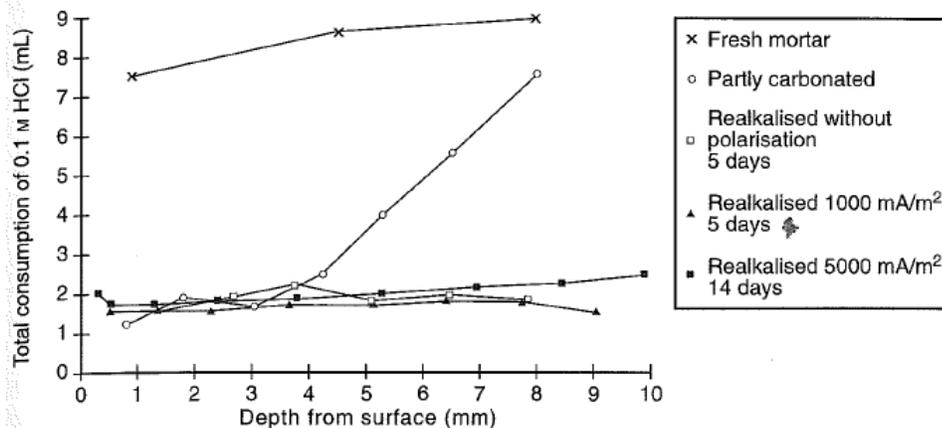


Figura 12. Perfiles de alcalinidad en base al consumo de HCl (Mietz, 1998).

Como se muestra en la Figura 12, independientemente de la corriente y el tiempo utilizado en la realcalinización, el concreto tratado mostró un menor consumo de ácido que un concreto sano, es decir una menor capacidad de buffer.

Se han desarrollado dos procedimientos para calcular la efectividad de la técnica (Sergi et al., 1996), el primer método consiste en aplicar varios indicadores de pH en el rango de 10 a 13 en cortes frescos de concreto recién realcalinizado. El segundo consiste en realizar medidas anódicas galvanostáticas y al mismo tiempo la medida de potenciales con el objetivo de determinar el grado de repasivación del acero.

En la Figura 13 se observan los resultados obtenidos por Mietz (Mietz, 1998), en donde se muestra la recuperación del pH alcalino necesario para la restauración de la capa pasiva del acero.

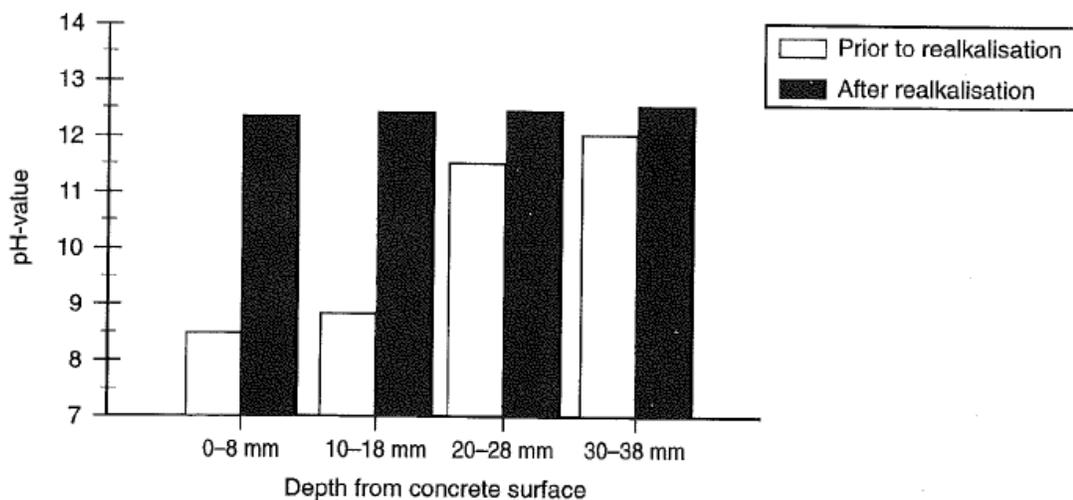


Figura 13. Distribución de los valores de pH antes y después de la realcalinización electroquímica (Mietz, 1998).

En un trabajo reciente (Weichung Y, et al., 2005) se observó que existe una fuerte dependencia de las propiedades del concreto realcalinizado con un parámetro, el cual fue calculado como el producto de la densidad de la corriente catódica  $i_c$  y el tiempo de polarización  $t_p$ . Dicho parámetro fue utilizado como una forma directa de evaluar la

eficiencia de la realcalinización en función de dos indicadores: la medida del potencial posterior a la despolarización y la velocidad de corrosión instantánea, para los cuales fueron fijados los valores de -120 mV (vs. SCE) y 0.046 mpy (pérdida de acero en milésimas/año) respectivamente. Los valores de carga total necesarias correspondientes fueron de 807 y 1335  $\mu\text{A-días}/\text{cm}^2$ .

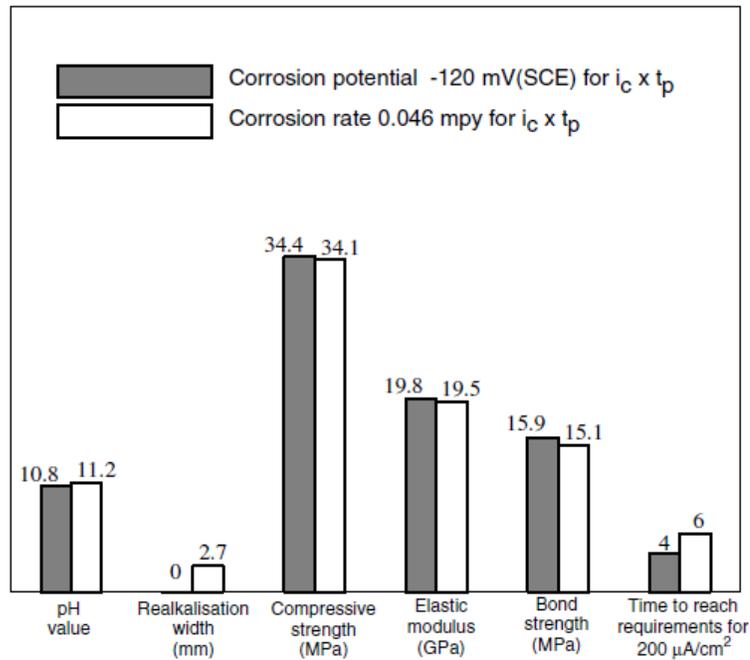


Figura 14. Resultados arrojados utilizando los dos criterios de eficiencia de realcalinización para Weichung (Weichung Y, et al., 2005).

En la Figura 14 se observan las magnitudes de las propiedades del concreto obtenidas según los correspondientes criterios de eficiencia, así como la dependencia de estas propiedades del concreto a la carga total aplicada. Cabe resaltar que las muestras utilizadas presentaban un bajo nivel de corrosión y se logró una realcalinización satisfactoria según los criterios utilizados.

### 2.4.1 Seguimiento electroquímico del acero de refuerzo

Es posible hacer medidas electroquímicas para determinar de manera probabilística la corrosión en el acero una vez que se ha aplicado el proceso de realcalinización. La medida del potencial de corrosión es una de ellas. En principio, se considera que la armadura se encuentra en un medio acuoso y el fenómeno de corrosión engloba dos semirreacciones, por un lado se oxida el Fe a  $Fe^{2+}$ , y por otro lado, la reducción del oxígeno, la intensidad del proceso anódico y el proceso catódico son iguales y son identificadas como la intensidad de corrosión del proceso,  $i_{corr}$ , que es la magnitud eléctrica utilizada como medida de la velocidad de corrosión. En estas condiciones, el metal se corroe a un potencial característico a su naturaleza y a la del medio. A este potencial, al que se encuentra el metal, se le denomina potencial mixto o de corrosión,  $E_{corr}$ . La medida de  $E_{corr}$  consiste en determinar la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia que se coloca en la superficie del concreto. La interpretación de las medidas de potencial de corrosión se suele hacer según el criterio descrito en ASTM C 876, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterio de interpretación de la medida del  $E_{corr}$ , (ASTM C 876).

<b><math>E_{corr}</math> (SCE)/mV</b>	<b>Riesgo de corrosión</b>
> -200	10%
-200 a -350	50%
< -350	90%

Otro parámetro usado es la medida de la resistividad del concreto, el cual ayuda a interpretar el valor de la velocidad de corrosión del acero, este parámetro está muy relacionado con el grado de humectación del concreto y se calcula en función de la resistencia eléctrica del concreto, utilizándose como unidad de medida normalmente el

kΩ. La resistividad se calcula tomando en cuenta el factor geométrico, por tanto, sus unidades son kΩ·cm. Se puede tomar el criterio mostrado en la Tabla 3, (Feliú et al., 1989):

Tabla 3. Criterio de interpretación de la medida del Resistividad (Feliú et al., 1989).

Resistividad	Probabilidad de corrosión
> 100-200 kΩ·cm	No permite distinguir entre acero en estado activo o pasivo de corrosión. Las velocidades de corrosión, $i_{corr}$ , serán muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o nivel de carbonatación.
50-100 kΩ·cm	Velocidades de corrosión bajas.
10-50 kΩ·m	Velocidades de corrosión moderadas o altas, en concretos carbonatados o con cloruro.
< 10 kΩ·cm	La resistividad no es el parámetro controlante del proceso. El valor de $i_{corr}$ obtenido reflejará la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o un nivel de carbonatación

Una medida más de ayuda es la resistencia a la polarización, es considerada una técnica cuantitativa no destructiva que permite conocer la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un medio, esta técnica es la más utilizada con el fin de medir velocidades de corrosión. El procedimiento se basa en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión. En la práctica se aplica una pequeña polarización,  $\Delta E$ , de  $\pm 10$  mV y se mide la densidad de corriente resultante,  $\Delta I$ , dando nombre al método el hecho de que las dimensiones del cociente  $\Delta E/\Delta I$  sean las de una resistencia. La resistencia de polarización está relacionada con la velocidad de corrosión instantánea a través de la fórmula de Stern, (Stern, 1957), que referida a la unidad de superficie es:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (19)$$

Las unidades habituales en las que se expresa la velocidad de corrosión son  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . El valor de B puede variar entre 13 y 52 mV en la mayoría de los sistemas metal-medio. En el concreto reforzado se toman valores de 26 mV para el acero activo y de 52 mV para el acero pasivo. De acuerdo a experiencias de laboratorio (véase Tabla 4) se ha adoptado el siguiente criterio (Rodríguez et al., 1993; Andrade et al., 1990):

Tabla 4. Criterio de interpretación de la medida de  $i_{corr}$  (Rodríguez et al., 1993; Andrade et al., 1990).

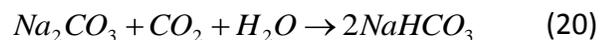
Velocidad de corrosión, $i_{corr}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable.
0.1 a 0.5	Baja
0.5 a 1	Moderada
>1	Alta

Estos métodos de evaluación de la técnica de realcalinización son recomendables utilizarlos de manera conjunta para la elaboración de una correcta interpretación. Sin embargo, a pesar de encontrar resultados favorables posteriores a la evaluación esto no garantiza la permanencia de la repasivación del acero.

## 2.5 Carbonatación posterior a la técnica de realcalinización

Una vez que el concreto fue tratado se ha comprobado por diferentes estudios que es lograda la repasivación del acero, sin embargo existe una incertidumbre acerca del comportamiento postratamiento (González J. et al., 2000). Es importante resaltar que las técnicas de evaluación mencionadas en el Apartado 2.4 han sido aplicadas en el corto plazo, es decir, no existe un estudio sobre el comportamiento a mediano plazo mediante ensayos acelerados de recarbonatación.

En el trabajo de Mietz realizado con electrolito de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se describe el comportamiento postratamiento de la siguiente manera: al nivel del acero se generan iones hidróxido los cuales brindan un ambiente alcalino al acero y lo repasivan, posteriormente el reingreso de  $\text{CO}_2$  en el concreto reacciona con el hidróxido para formar carbonato de sodio, posteriormente existe una posterior reacción entre el carbonato de sodio y el dióxido de carbono para generar el bicarbonato de sodio como se muestra en la ecuación 20:



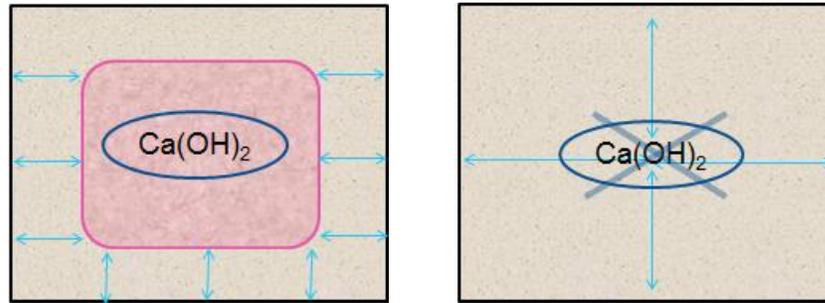
En una exposición atmosférica existirá un equilibrio entre los respectivos valores de pH del carbonato y el bicarbonato de sodio, esta neutralización se ha encontrado que es muy lenta y difícil de llevarse a cabo. En este sentido, González (González J. et al., 2000) afirma que la realcalinización del concreto no altera las fases sólidas que son producto de la carbonatación por lo que el efecto benéfico podría ser duradero.

## 2.6 Etapas de la vida útil en la que es aplicada la realcalinización

La etapa de la vida útil en la cual es aplicada la técnica cobra importancia debido a que en cada periodo existen diferentes compuestos en el concreto, así como en el acero y por tanto, en una posterior exposición atmosférica se presentará un comportamiento diferente en cada condición. Es importante resaltar que la técnica de realcalinización no modifica los productos de carbonatación o corrosión.

Se pueden considerar tres condiciones diferentes del sistema acero-concreto al momento de aplicar la técnica, a continuación estas condiciones se referencian al modelo esquemático de Paulo Helene:

- a) Primer caso. El concreto se encontraría parcialmente carbonatado, el acero se encuentra en un ambiente alcalino y por tanto en condición pasiva. Este momento correspondería a la vida de proyecto de una estructura (véase Figura 15a).
- b) El segundo. El concreto se encontraría totalmente carbonatado en el cual la capa pasiva ha sido desestabilizada, sin embargo aún no se presentan velocidades de corrosión altas. Esto correspondería al fin de la vida de proyecto (véase Figura 15b).
- c) El tercer caso. El concreto se encuentra totalmente carbonatado, pero las velocidades de corrosión son altas, este caso estaría ubicado en la vida útil de servicio.



a) Concreto parcialmente carbonatado    b) Concreto totalmente carbonatado

Figura 15. Esquema de los posibles estados de carbonatación del concreto despues de una prueba con el indicador de fenoftaleína.

De acuerdo a estudios realizados (González, 2000), cuando la técnica es aplicada en la condición del tercer caso los resultados son poco efectivos. En este trabajo la aplicación de la técnica de Realcalinización se realizará de acuerdo a los dos primeros casos ya que se presenta como una técnica preventiva.

## 2.7 Justificación

La mayor parte de las estructuras de nuestro país son de concreto reforzado, por tanto es importante conocer las posibles técnicas de prevención de su posible deterioro. Además, dado que su principal deterioro es por corrosión del acero de refuerzo y que el agente que provoca la corrosión en un medio urbano es la carbonatación provocada por el CO<sub>2</sub> atmosférico, la técnica de realcalinización se puede presentar como una buena alternativa de prevención.

Desde el punto de vista de sustentabilidad, el ahorro en la posible utilización de un concreto sano que sustituya al dañado por un deterioro avanzado de las estructuras de concreto reforzado engloba varios aspectos tales como: el ahorro de agregado, cemento y tiempo, dado que la duración de la aplicación de esta técnica es relativamente corta comparado con otras opciones.

La recuperación de la protección química que provee el concreto al acero ha sido demostrada, sin embargo, es conveniente estudiar esta técnica a mediano plazo bajo una metodología científica rigurosa para evaluar objetivamente sus ventajas, inconvenientes y límites, ya que la necesidad de comprender los mecanismos que ocurren en una posterior recarbonatación se juzga importante para asegurar una correcta aplicación, pero sobre todo, para establecer bajo qué condiciones se obtendrá el mayor grado de eficacia y de esta forma obtener el mayor beneficio de su aplicación.

## 2.8 Objetivos

### 2.8.1 Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de estructuras de concreto con diferentes condiciones iniciales de carbonatación posterior a un proceso de realcalinización electroquímica aplicada como método preventivo de la corrosión del acero.

### 2.8.2 Objetivos particulares

- Evaluar el comportamiento postratamiento de la alcalinidad generada por la realcalinización del concreto mediante medidas del pH del concreto.
- Realizar un seguimiento electroquímico de los parámetros indicadores del grado de corrosión del acero.
- Realizar una descripción de los compuestos, así como de su evolución antes, durante y posterior a la técnica de realcalinización.
- Establecer las condiciones mínimas características de la estructura en proceso de carbonatación en las cuales debe ser aplicada la realcalinización con el objetivo de obtener el mayor beneficio de la aplicación de la técnica.

## 2.9 Hipótesis

El comportamiento de la matriz de concreto posterior a la realcalinización electroquímica no puede ser representada como un proceso de carbonatación similar al que ocurre en estructuras expuestas a  $\text{CO}_2$ . Por ello, los modelos existentes para estimar el tiempo de vida útil no pueden ser utilizados.

Como resultado de la carbonatación, el material susceptible de carbonatarse es consumido en muy cerca de su totalidad, por lo cual, un concreto realcalinizado y re-expuesto a condiciones de exposición agresiva presenta diferentes comportamientos que dependerán del grado de carbonatación del concreto al momento de aplicar la técnica de realcalinización. Por lo tanto, la re-exposición a la carbonatación de concretos realcalinizados previamente permitiría la identificación del conjunto de parámetros con los cuales se estará en posibilidad de garantizar una intervención óptima.

## CAPÍTULO 3

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la metodología para la preparación de especímenes, para las técnicas de caracterización, evaluación de parámetros y propiedades de los materiales y del propio concreto. Para cumplir con el objetivo de evaluar el comportamiento postratamiento que aporta la realcalinización de estructuras de concreto reforzado se realizó un diseño experimental que cumpliera en lo posible con el tiempo previsto para esta investigación y que además permitiera observar una tendencia en los resultados.

### 3.1 Descripción de los procesos

En la Figura 16 se puede observar esquemáticamente los procesos que se realizaron durante esta investigación.



Figura 16 . Procesos que intervienen en el desarrollo experimental.

#### 3.1.1 Diseño experimental

Es sabido que la relación agua/material cementante es inversamente proporcional al grado de densificación de la matriz cementante, es posible esperar que esta relación influya en la efectividad de la técnica de realcalinización, por tanto se optó por variar este parámetro en el diseño del concreto. Del proceso de ejecución de la técnica de realcalinización se varió la densidad de corriente, sin embargo, se optó por usar densidades relativamente bajas para evitar efectos contraproducentes tanto en la adherencia del sistema acero-concreto como en la producción de hidrógeno en esta misma zona. También se tomó en cuenta el espesor de recubrimiento del acero y el grado de carbonatación del concreto, para esto se consideraron tres condiciones de

carbonatación (véase Figura 17), las cuales se basaron en el frente de carbonatación indicado por la prueba de fenolftaleína y fueron las siguientes:

a) Sin carbonatación (NC), que corresponde a un concreto sano, este caso se utilizó para observar el comportamiento de un concreto parcialmente carbonatado de una forma más clara y tener más elementos que nos permitan observar la condición de carbonatación óptima.

b) Carbonatación parcial (CP). En esta condición el frente de carbonatación alcanzó 10 mm aproximadamente cuando se utilizó recubrimiento de 20 mm, y 20 mm cuando se utilizó recubrimiento de 40 mm.

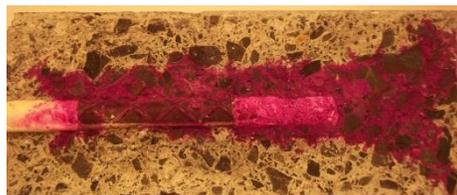
c) -Carbonatación total (CT). El frente de carbonatación fue igual o mayor a 15 mm en las probetas de 20 mm de recubrimiento y de 50 mm en las probetas de 40 mm de recubrimiento.



a) Sin carbonatar,  
concreto sano (NC)



b) Carbonatación  
parcial (CP)



c) Carbonatación total  
(CT)

Figura 17. Condiciones de carbonatación del concreto antes aplicar la técnica de realcalinización.

En la Figura 18 puede observarse el diseño de experimentos resultado de la combinación de las densidades de corriente, recubrimientos y condiciones de carbonatación a los cuales fueron sometidos las diferentes probetas.

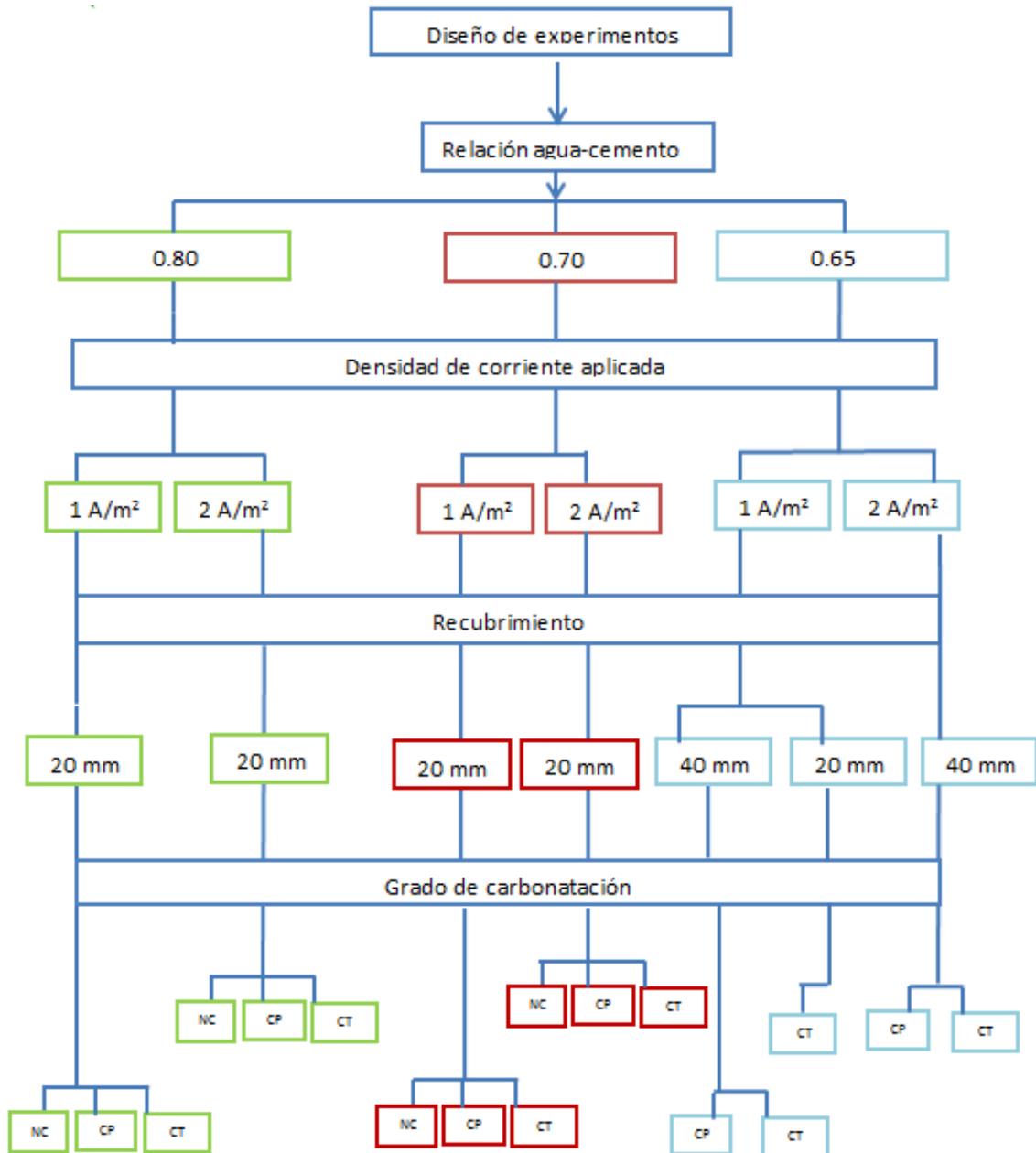


Figura 18 . Diseño experimental

## 3.2 Materiales utilizados

### 3.2.1 Cementantes

Se utilizaron dos cementantes diferentes, un cemento Portland compuesto de fraguado rápido con una resistencia a la compresión de 30MPa a 28 días (CPC 30R, según NMX C 414) y un cemento portland ordinario con una resistencia a la compresión de 40 MPa a 28 días (CPO 40, según NMX C 414). La elección de un cemento CPC y CPO fue con el objetivo de evaluar los tipos de cementos más utilizados en México.

### 3.2.2 Agregados

Los agregados utilizados fueron los comercialmente disponibles de la región. Con la finalidad de tener un mayor control en el concreto se ajustó la granulometría del agregado grueso, tomando en cuenta las dimensiones de las probetas que posteriormente serían fabricadas. Se optó por tener un tamaño máximo de 3/8", aproximadamente 1 cm y arena #4. En la Tabla 5 se muestran las características físicas de los agregados.

Tabla 5. Propiedades físicas de los agregados utilizados.

	<b>Grava de 3/8"</b>	<b>Arena #4</b>
Densidad	2.70	2.67
PVVS (Peso Volumétrico Varillado Seco), kg/m <sup>3</sup>	1627	----
PVSS (Peso Volumétrico Seco Suelto), kg/m <sup>3</sup>	1494	1629
Absorción, %	<b>1.55</b>	<b>0.84</b>
Módulo de Finura (MF), adimensional	-----	2.6

### 3.2.3 Acero de refuerzo

El acero utilizado es un acero comercial grado 42 (según la norma mexicana NMX-C-407-ONNCCE) en forma de varilla corrugada. Su resistencia nominal a la fluencia es de  $4200 \text{ kg/cm}^2$  con un diámetro de  $0.95 \text{ cm}$  ( $3/8''$ ). La varilla se sometió a una preparación con el propósito de controlar el área expuesta (o de estudio). En la Figura 19 se observan las medidas de una varilla después del proceso de preparación, el cual se describe a continuación:

- Se cortaron varillas de 150 mm de largo.
- Se limpió la superficie de la varilla con un cepillo de cerdas metálicas.
- Una vez limpia la varilla se cubrió con una pintura epóxica anticorrosiva, dejando una zona expuesta de 50 mm.

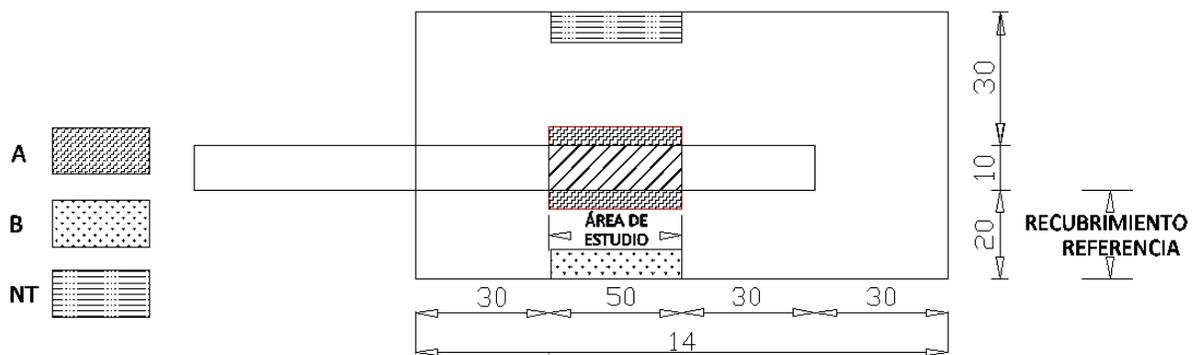


Figura 19. Esquema de la ubicación del acero, acotaciones en mm.

### 3.2.4 Diseño de la mezcla

Existía la opción de utilizar concreto o mortero. El utilizar mortero ofrece la ventaja de tener un frente de carbonatación uniforme cuando se realiza la prueba con el indicador fenolftaleína, sin embargo se optó por utilizar concreto para tener resultados que pudieran ser extrapolados a la práctica.

Las mezclas de concreto se realizaron siguiendo las recomendaciones que se encuentran en ACI 211.1. El resumen de las cantidades de materiales utilizados se presenta a continuación en la Tabla 6

Tabla 6. Dosificación de los materiales.

	<b>Cantidades en kg/m<sup>3</sup> de concreto</b>	
	<b>0.80-0.70</b>	<b>0.65</b>
Relación agua-cemento		
Grava 3/8"	781	747
Arena #4	862	1009
Cemento	350	352

En el diseño de mezclas se fijaron relaciones agua/cemento de 0.65, 0.7 y 0.8. Los especímenes fueron fabricados de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM C 192.

### 3.3 Fabricación de probetas

Para la fabricación de las probetas se optó por una geometría prismática, lo cual facilita la aplicación de la técnica de realcalinización en lo que respecta al área en contacto con el electrolito. Para ello, se utilizaron moldes de acero los cuales proporcionaron a las probetas las dimensiones de 70X60X140 mm. Previo al colado de los especímenes se colocaron las varillas pre-acondicionadas anteriormente, teniendo en cuenta que el recubrimiento de concreto de la zona a la cual se aplicará la realcalinización fuese de 2cm y 4 cm, tal como se señaló en el diseño experimental de la Figura 18 (recubrimientos convencionales en las estructuras de concreto). Las probetas fueron desmoldadas después de 24 horas y curadas de acuerdo con ASTM C 192 por 28 días. En la Figura 20 se muestra la probeta descrita anteriormente.

Posterior al curado, las probetas recibieron el siguiente tratamiento:

- Se eliminaron los rastros de pintura de la superficie de las probetas producidos por la cimbra y el proceso de curado.
- Se identificaron en las caras que no entrarán en contacto con el electrolito en el proceso de realcalinización.
- Se verificó que las varillas no estén oxidadas en el extremo que se encuentra fuera del concreto, ya que esta parte es más propensa a deteriorarse en el periodo de curado. En caso de encontrarse óxido en la varilla, este se eliminó y posteriormente se recubrió con pintura epóxica.
- Se colocó pintura para concreto en los extremos superior e inferior de la probeta, teniendo cuidado de no recubrir los costados de la probeta.
- Se dejó secar la pintura por un día.

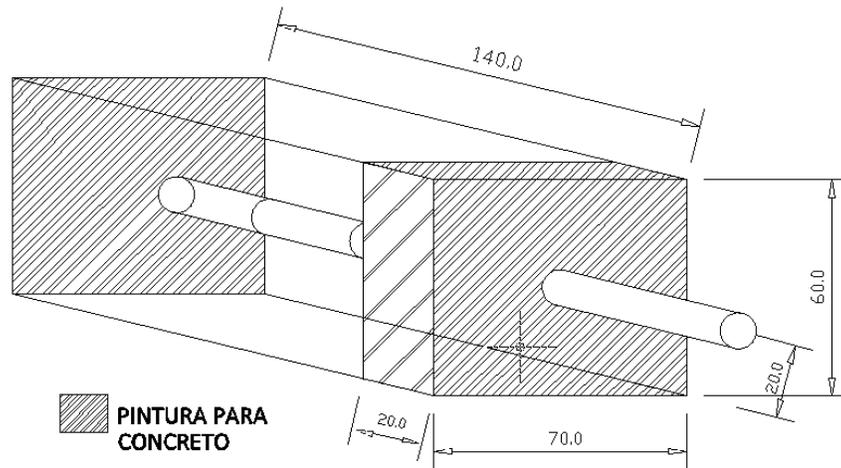


Figura 20. Probeta preparada para la aplicación de la técnica de realcalinización, acotaciones en mm.

La descripción así como la cantidad de las probetas se especifican en la Tabla 7. En esta tabla se puede observar que después del diseño de experimentos se realizaron 18 grupos diferentes, el número de probetas para cada grupo fue el mismo. La nomenclatura utilizada para la designación de cada grupo corresponde a lo siguiente: la relación agua/cemento (adimensional), la densidad de corriente ( $A/m^2$ ), el recubrimiento (mm) y el grado de carbonatación. Por ejemplo, la nomenclatura (0.65-2.0)-(20-CT) B, corresponde al grupo de probetas que tiene una relación agua-cemento de 0.65, en las cuales se aplicó una densidad de corriente de  $2 A/m^2$  sobre un recubrimiento de 20 mm y con un grado de carbonatación parcial. Para este grupo en particular la B simboliza que es un grupo de prueba, sin embargo se encontraron resultados interesantes y por tanto se reportarán en el Capítulo 4.

Tabla 7. Descripción de probetas realizadas por mezcla.

Cemento	a/c	Densidad de corriente (J), A/m <sup>2</sup>	Rc, mm	Grado de carbonatación	Designación	No. de Probetas
CPO	0.70	1	20	No Carbonatada	(0.70-1.0)-(20-NC)	10
				Carbonatación Parcial	(0.70-1.0)-(20-CP)	10
				Carbonatación Total	(0.70-1.0)-(20-CT)	10
		2		No Carbonatada	(0.70-2.0)-(20-NC)	10
				Carbonatación Parcial	(0.70-2.0)-(20-CP)	10
				Carbonatación Total	(0.70-2.0)-(20-CT)	10
	0.80	1		No Carbonatada	(0.80-1.0)-(20-NC)	10
				Carbonatación Parcial	(0.80-1.0)-(20-CP)	10
				Carbonatación Total	(0.80-1.0)-(20-CT)	10
		2		No Carbonatada	(0.80-2.0)-(20-NC)	10
				Carbonatación Parcial	(0.80-2.0)-(20-CP)	10
				Carbonatación Total	(0.80-2.0)-(20-CT)	10
CPC	0.65	1	40	Carbonatación Parcial	(0.65-1.0)-(40-CP)	10
				Carbonatación Total	(0.65-1.0)-(40-CT)	10
		2	20	Carbonatación Total	(0.65-2.0)-(20-CT)	10
				40	Carbonatación Parcial	(0.65-2.0)-(40-CP)
			Carbonatación Total		(0.65-2.0)-(40-CT)	10
			20		Carbonatación Total	(0.65-2.0)-(20-CT)B

Para llevar el control de la carbonatación se fabricaron probetas sin acero de refuerzo con las mismas proporciones de los materiales en barras de 50X50X500 mm. Las condiciones y el modo de prueba para el control de la carbonatación se describen a continuación.

### 3.4 Ambiente de exposición acelerada

Para inducir la carbonatación de las probetas fue necesario exponerlas a un ambiente que acelerara la cinética de avance de la carbonatación. Esto es debido a que en condiciones naturales el concreto se carbonata aproximadamente a razón de 1 mm/año (Broomfield, 1997). Por lo tanto, dado que este estudio no pretende simular las condiciones ambientales de una región específica y dada la demanda de tiempo que involucra la carbonatación ambiental, se optó por una condición acelerada de exposición. La carbonatación acelerada se logró mediante una cámara de carbonatación acondicionada para una concentración variable de  $\text{CO}_2$ , la cual se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Cámara para acelerar el proceso de carbonatación.

La velocidad de avance del frente de carbonatado es función del contenido de humedad en el concreto y su porosidad (comúnmente representada por la relación agua/cemento). El contenido de humedad es determinante, ya que si los poros están completamente secos, el  $\text{CO}_2$  no podrá reaccionar y si están completamente saturados, su penetración será muy lenta debida a la baja solubilidad del  $\text{CO}_2$  en el agua. Solo cuando los poros están parcialmente llenos de agua (50-80%) es cuando se dan las condiciones óptimas para acelerar el proceso de carbonatación.

El proceso de carbonatación del concreto consistió en secar las probetas en un horno con circulación forzada de aire a  $40\text{ }^\circ\text{C}$  por 48 horas. Después de este proceso, las probetas fueron expuestas en un ambiente rico en dióxido de carbono (20%  $\text{CO}_2$  y 80% de aire) y una humedad relativa de  $60 \pm 15\%$ . Permanecieron en estas condiciones hasta obtener el nivel de carbonatación en el concreto previamente establecido. Para ello, como se describe a continuación, fue necesario un monitoreo periódico del avance de la carbonatación.

### 3.5 La técnica de realcalinización

#### 3.5.1 Montaje experimental

Para la aplicación de la técnica de realcalinización, se utilizó un montaje clásico, en el cual la parte descubierta de la varilla embebida en el concreto forma parte de circuito y permite la circulación de la corriente que pasará a través de una malla recubierta con óxido de titanio activado (ánodo) previamente colocada sobre la superficie de concreto. El voltaje fue suministrado por medio de una fuente de alimentación estabilizada. El arreglo de la celda de realcalinización se muestra en la Figura 22. Como electrolito realcalinizador (anolito) se empleó una solución de carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) y una solución de carbonato de sodio en la mezcla de prueba ( $Na_2CO_3$ ), ambas en una concentración 1M. El anolito más comúnmente utilizado es el carbonato de sodio por ser más económico, sin embargo el carbonato de potasio no representa un peligro potencial en la reacción álcali-agregado, además de no presentar eflorescencias al final del tratamiento.

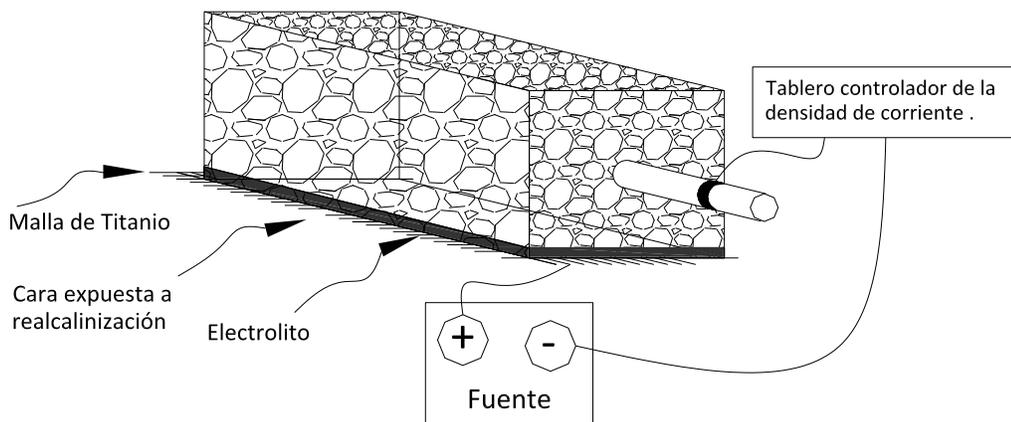


Figura 22. Esquema del montaje utilizado para la aplicación de la realcalinización.

### 3.5.2 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. Así, se encontró en la literatura valores que van desde 1 hasta 5 A/m<sup>2</sup> (la densidad de corriente se hace con referencia al acero).

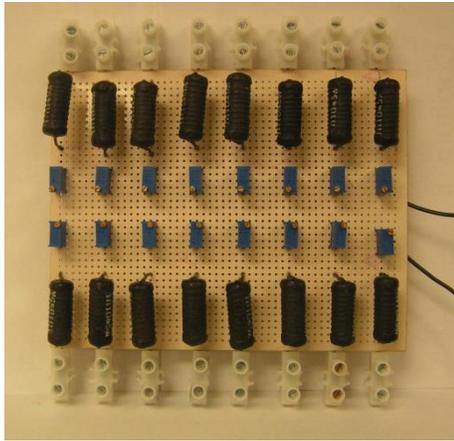
En este trabajo de investigación, se consideró de importancia no perturbar el estado electroquímico de la interface acero-concreto, se ha optado por aplicar una densidad de corriente baja, fija en 1 y 2 A/m<sup>2</sup> de acero desnudo, lo anterior a todos y cada uno de los grupos de probetas.

### 3.5.3 Duración de la aplicación

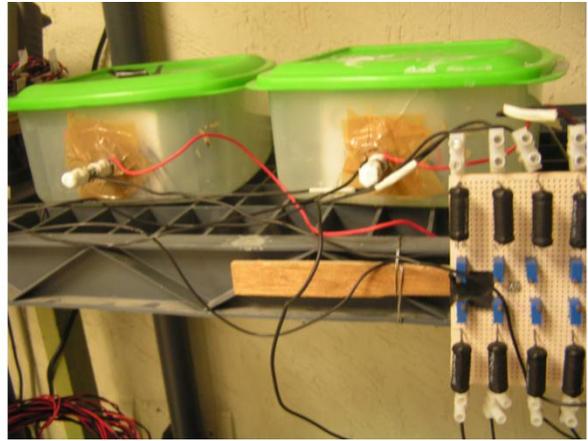
La técnica de realcalinización fue aplicada de forma continua, es decir, el campo eléctrico se mantuvo constante durante 20 días.

### 3.5.4 Control eléctrico

La manipulación y verificación de la corriente de cada celda se efectuó con la ayuda de un circuito auxiliar prefabricado constituido de un reóstato (de 0 a 50k $\Omega$ ) en serie con una resistencia de 1.5 $\Omega$  (véase Figura 23). Estos dos elementos fueron colocados en serie entre el polo negativo de la alimentación y el acero (que actuó como cátodo). De esta forma, a partir de la medida de la diferencia de voltaje de los bordes de la resistencia es posible conocer la corriente que circula entre el cátodo y el ánodo aplicando la ley de Ohm.



a) Tablero de control de la densidad de corriente fijada a  $1 \text{ A/m}^2$



a) Probetas conectadas al tablero de control.

Figura 23. Circuito auxiliar controlador de la densidad de corriente.

### 3.6 Técnicas de seguimiento en concreto sano, durante la carbonatación, realcalinización y recarbonatación

Durante los procesos ilustrados en la Figura 16 se realizaron diferentes pruebas en el concreto. En la Figura 24 se muestran las diferentes pruebas realizadas en cada proceso, es importante señalar que las pruebas de monitoreo en la etapa de carbonatación así como de recarbonatación fueron realizadas cada 15 días.

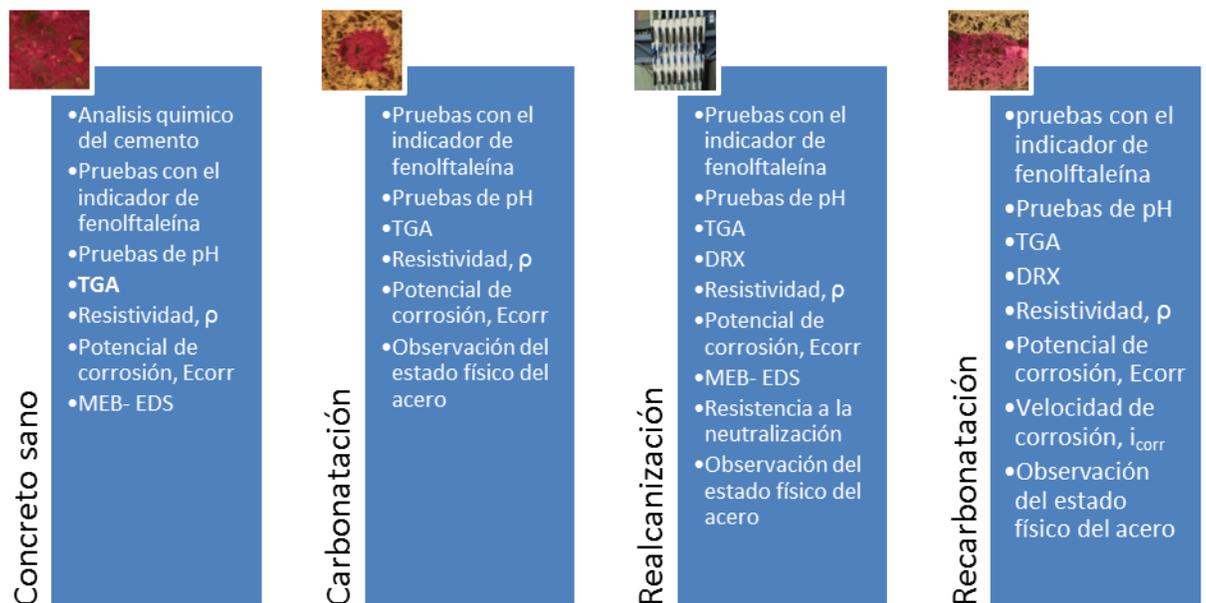
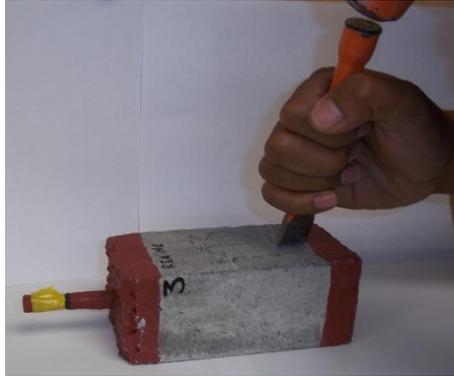


Figura 24. Descripción de las técnicas utilizadas en cada proceso.

#### 3.6.1 Pruebas de avance de carbonatación por medio del indicador a base de fenolftaleína

El espesor carbonatado se determinó por medio de cortes transversales de 30 mm de espesor por probeta (véase Figura 25), al corte fresco se le aplicó el indicador alcalino de fenolftaleína. La porción de la muestra que no está pigmentada (la cual

representa el espesor carbonatado) es comparada con la distancia a la cual se encuentra el acero de refuerzo (aproximadamente 20 mm o 40mm).



- a) El corte se realizó con un cincel para evitar contaminar el concreto.      b) Perfil de concreto parcialmente carbonatado

Figura 25. Prueba del avance de carbonatación.

### 3.6.2 Medidas de pH en las probetas

La medición del pH de las probetas carbonatadas se realizó con el fin de tener un valor cuantitativo del estado de carbonatación del concreto, este valor de pH del concreto fue tomado antes, y después de aplicar la técnica de realcalinización, así como durante la nueva exposición a altas concentraciones de  $\text{CO}_2$ . Es importante resaltar que estas medidas son necesarias ya que la prueba de la fenolftaleína es un indicador cualitativo de nivel de carbonatación del concreto. Sin embargo, para poder cumplir los objetivos fue necesario contar con una medida más precisa de la condición en la que se encuentra el concreto. Como se esquematiza en la Figura 19 estas mediciones se realizaron en tres zonas diferentes: a nivel de la varilla en un radio de 2 mm más allá de la interface acero- concreto (zona A), en una zona exterior, es decir de 0 a 6mm de la cara realcalinizada (zona B) y en la zona que no fue tratada igualmente de 0 a 6mm (zona NT).

Para determinar el pH en cada una de las zonas, se siguió el proceso que se describe a continuación:

- Se realizó un corte fresco en la probeta, para lo cual se marcó la probeta con disco de diamante para guiar el corte que posteriormente se provocaría con un cincel y un mazo (corte fresco).
- Una vez obtenido el perfil de la muestra se cortaron en seco para conseguir cada zona (A, B y NT).
- Se pulverizó el concreto en un mortero de Ágata (véase Figura 26) y se tamizó por la malla No. 100, durante la trituración la mayor parte del agregado grueso fue separado.



a) Mortero de ágata utilizado para la molienda de concreto.



b) Tamizado de polvo de concreto

Figura 26. Obtención de los polvos de concreto utilizado para la obtención del pH.

- Se preparó una solución con el polvo obtenido con una relación 1:10 (masa de concreto: agua destilada) para lo cual se fijó una cantidad de 3:30.
- Se agitó la solución vigorosamente durante 3 minutos hasta homogenizar la muestra y posteriormente se dejó reposar durante 20 minutos.

- Posteriormente, la muestra fue agitada ligeramente para homogenizar y se procedió a medir el valor del pH de la solución (véase Figura 27).

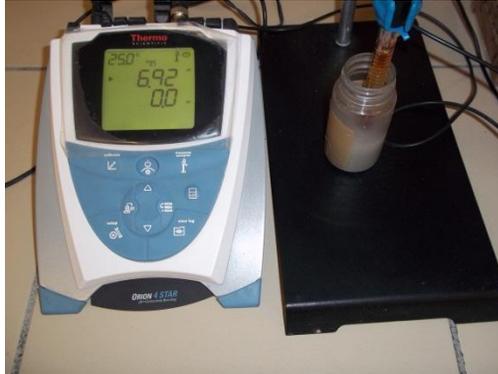


Figura 27. Muestra lista para ser medida en el pH-metro Orion 4 Star.

### 3.6.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) en polvos

Se realizaron análisis de difracción de rayos x en polvos utilizando para dicho propósito un difractómetro BRUKER ADVANCED X-RAY SOLUTIONS D8 con radiación de  $\text{Cu } k\alpha$  ( $\lambda_{\text{RX}} = 1.5418 \text{ \AA}$ ), equipado con un detector Vantec de alta velocidad y filtros de Ni.

Las condiciones de operación fueron las siguientes: un intervalo  $2\theta$  de  $10$  a  $70^\circ$  con un tamaño de paso de  $3^\circ/\text{min}$  y un tiempo de  $0.5$  segundos por cada paso. El análisis se realizó utilizando un porta muestras de acrílico donde fue depositada la muestra que previamente fue obtenida como fue descrito en el Apartado 3.7.2.

El propósito de realizar esta prueba es tener un mayor conocimiento del estado de carbonatación, así como también para corroborar que la realcalinización no altera las fases que previamente se encontraban en el concreto (González et al., 2000), para esto se identificaron los picos de  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de calcio) y  $\text{Ca(OH)}_2$  (portlandita), es importante resaltar que el grado de carbonatación del concreto puede apreciarse más

claramente por el contenido de portlandita ya que el contenido de carbonato de calcio puede estar influenciado por los agregados. Es decir, un concreto en el que no esté presente la portlandita estará totalmente carbonatado y análogamente para un concreto no carbonatado.

#### 3.6.4 Análisis termogravimétrico (DTA/TGA)

El propósito de realizar esta prueba fue el mismo expuesto en 3.7.3, el análisis se llevó a cabo en un equipo TGA Q500 V20.10 Build 36. Las condiciones de operación fueron de un tamaño de paso de 10 °C/min en un rango de 20 a 1000 °C, y el modo de obtención de la muestra es el mismo que se describió en el Apartado 3.7.2 para la obtención de una muestra para pH.

#### 3.6.5 Observación en el Microscopio electrónico de Barrido (MEB)

Se realizaron observaciones en el microscopio electrónico de barrido marca Joel JSM Modelo 6490 LV utilizando un alto vacío, estas observaciones fueron complementadas con EDS en zonas de interés. Las pruebas se realizaron en concreto sano y realcalinizado con el propósito de tener información sobre el potasio introducido durante la realcalinización.

#### 3.6.6 Prueba de resistencia a la neutralización

De acuerdo con lo encontrado por Mietz (Mietz, 1998) es posible medir la capacidad buffer de una solución, como lo describe en su trabajo, por medio de una titulación con fenolftaleína (esto se describe más a detalle en la Sección 2.4). Se decidió medir el pH del concreto directamente como se describe en el Apartado 3.7.2 en lugar

de usar fenolftaleína para tener un valor cuantitativo. El procedimiento se describe a continuación:

- En primer lugar se obtuvo el pH del concreto en la zona A (Apartado 3.7.2) después de que el concreto fue realcalinado y se registró como  $pH_0$ .
- Se agregó 10 ml de HCl 0.1N en la solución previamente preparada.
- Se midió nuevamente el pH de la solución y se registró el valor como el pH a cero días.
- Se realizó un seguimiento de la variación del pH hasta que el valor permaneciera constante (7 días), siendo este último el valor registrado.

Este seguimiento descrito se realizó con el objetivo de no encontrar una variación significativa al momento de hacer la medida del pH, lo cual corresponde con lo descrito en un trabajo anterior (Glass G. K. et al., 1999).

### 3.7 Estado de corrosión del acero

La técnica de realcalinización ha sido frecuentemente aplicada en laboratorio, sobre probetas en las cuales se ha inducido un frente de carbonatación por exposición acelerada. Como se mencionó en el Apartado 2.4 una forma de evaluar la efectividad de esta técnica es por medio del monitoreo electroquímico del sistema acero-concreto, para lo cual se realizaron las siguientes medidas:

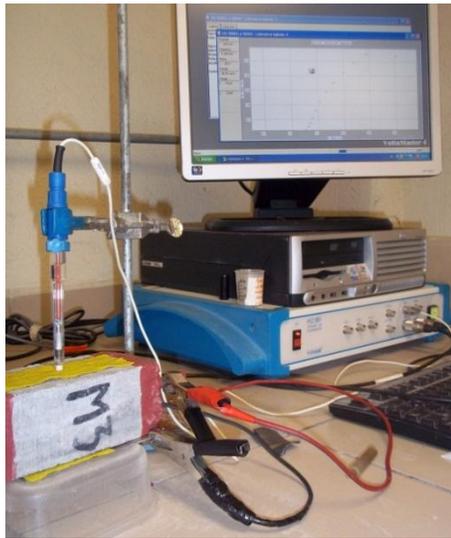
- Medida del potencial del acero (E): con respecto a un electrodo de calomel saturado (SCE, 240 mV vs ENH).

- Resistencia a la polarización (RP): perturbación del sistema a 20 mV en sentido catódico y anódico. Velocidad de barrido 0.2 mV/s para acero activo y 0.1 mV/s para acero pasivo.

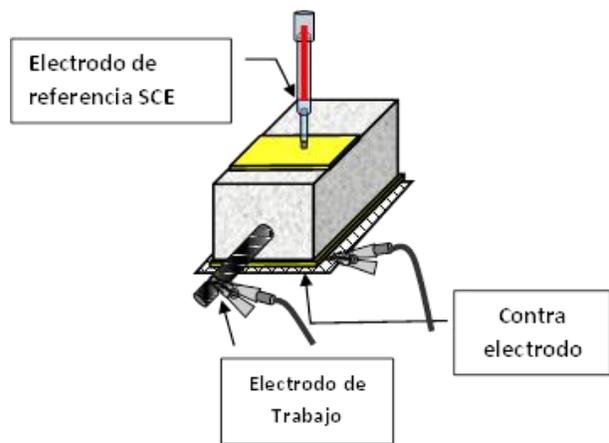
- Resistividad del concreto: espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). La perturbación de 10 mV pico a pico a partir del potencial de reposo del acero y un rango de altas frecuencias de 10 Hz a 100 kHz.

– Observación del estado físico del acero: Se realizaron cortes antes y después de la realcalinización e igualmente durante la recarbonatación para revisar visualmente el estado superficial del acero.

En la Figura 28 puede observarse el arreglo utilizado para realizar las pruebas electroquímicas, (en las tres pruebas se utilizó el mismo arreglo) sus componentes son: un contra electrodo o electrodo auxiliar de acero inoxidable, el electrodo de trabajo (que en este caso es la varilla embebida), un electrodo de referencia de calomel (formado por mercurio cubierto por una capa de cloruro insoluble) y esponjas húmedas para establecer contacto entre el electrodo auxiliar y el concreto y también entre el concreto y el electrodo de referencia.



a) Medidas electroquímicas realizada en una probeta de concreto.



a) Arreglo utilizado para el monitoreo de las medidas electroquímicas.

Fig. 28. Prueba electroquímica y esquema de del arreglo utilizado durante la medición.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 4.1 Caracterización del concreto

##### 4.1.1 Resistencia a compresión

En la Figura 29 se muestra la resistencia a la compresión obtenida a los 28 días para las dos mezclas fabricadas según ASTM C 39.

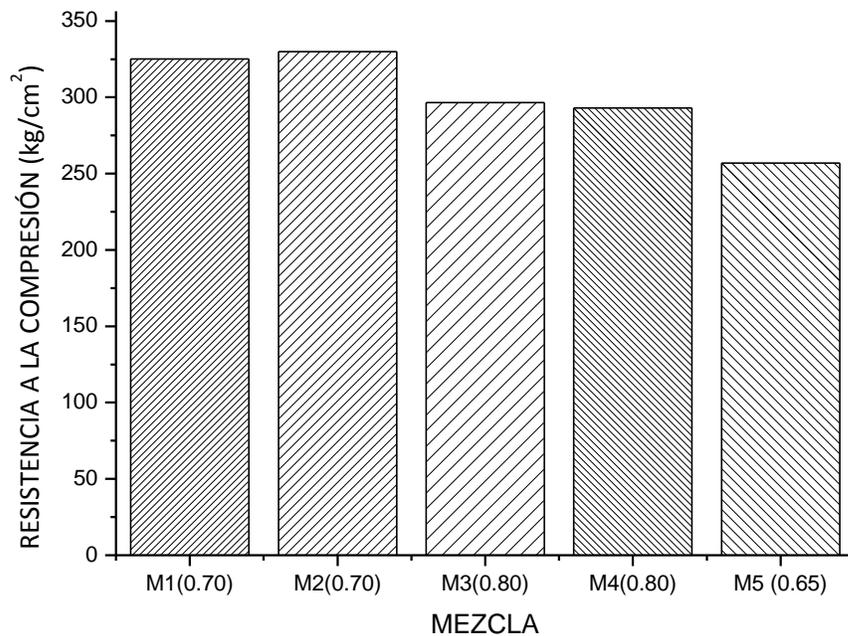


Figura 29. Resistencia a compresión del promedio de tres cilindros de concreto, el número entre los paréntesis representa la relación a/c.

Como se observa, las resistencias obtenidas para las cinco mezclas reportadas en la Figura 29 son superiores a la resistencia mínima señalada en la Figura 30, que corresponde a una relación a/c de 0.65. Con lo anterior se infiere que el concreto

utilizado en la experimentación es representativo de un concreto convencional, lo cual es uno de los objetivos de la presente investigación. Es importante resaltar que en las mezclas 1 y 2 se utilizó cemento CPO 40 y una relación a/c de 0.7, en las mezclas 3 y 4 se utilizó cemento CPO 40 y una relación a/c de 0.8 y en la mezcla 5 se utilizó cemento CPC 30R y una relación a/c de 0.65. A partir de estos parámetros era de esperarse que las resistencias de las mezclas 1 y 2 fueran superiores a la 3 y 4, y a su vez estas últimas fueran superiores a la mezcla 5. Con respecto a la referencia que se tomó en la Figura 30 (utilizada para mencionar que se fabricó un concreto convencional) se debe resaltar que en los datos presentados en esta figura se utilizó agregado de 3/4" de pulgada, pero el tipo de cemento utilizado no fue especificado. Sin embargo, por no contar con estadísticas de resistencias a la compresión de concretos con tamaño máximo de 3/8" se optó por utilizarla.

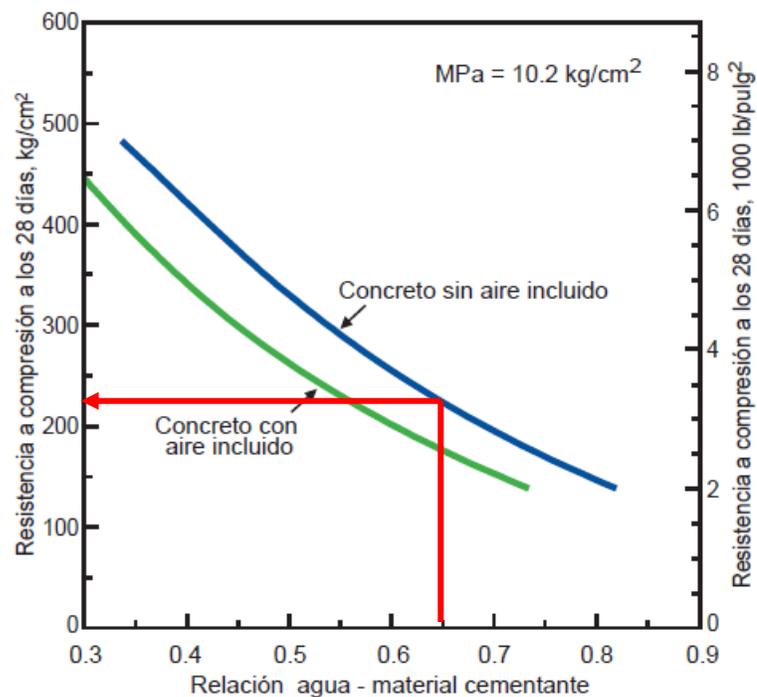


Figura 30. Relación aproximada entre resistencia a la compresión y relación agua-material cementante (Kosmatka et al., 2004).

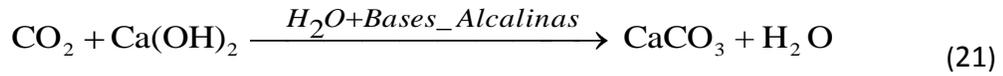
#### 4.1.2 Análisis químico del cemento

En la Tabla 8 se presentan los resultados del análisis químico realizado a los cementos CPO y CPC utilizados en la fabricación del concreto.

Tabla 8. Analisis quimico del cemento, % en masa.

Compuesto químico		CPO-40	CPC-30R
		%	%
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Silicio	21.2	16.9
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de Aluminio	3.41	4.3
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de Hierro	1.81	1.6
<b>CaO</b>	<u>Óxido de Calcio</u>	<u>62.9</u>	<u>59.5</u>
<b>MgO</b>	Óxido de Magnesio	1.53	1.5
<b>SO<sub>4</sub></b>	Sulfatos	5.95	----
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<u>Óxido de Sodio</u>	<u>0.46</u>	<u>0.41</u>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<u>Óxido de Potasio</u>	<u>0.71</u>	<u>0.72</u>
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de Manganeso	0.11	0.04
<b>Pxl</b>	Pérdida por Ignición	2	7.3

Según la Red DURAR (Troconis et al, 1998) los álcalis al hidratarse se transforman en hidróxidos de sodio, potasio y en conjunto con los hidróxidos de calcio son los que le confieren la alta alcalinidad al concreto en su fase intersticial y por tanto el contenido de álcalis presentes en el cemento influye en la capacidad de fijación del CO<sub>2</sub>. Sin embargo, según una investigación (Kobayashi et al., 1990) contrario a los óxidos de calcio, los óxidos de sodio y potasio al hidratarse aumentan la velocidad de carbonatación en el concreto, según este trabajo, esto sucede debido a la mayor solubilidad que presenta el hidróxido de calcio en presencia de los productos de hidratación de los óxidos de sodio y potasio del cemento. La reacción de carbonatación se presenta de la siguiente manera (véase ecuación 21).



Para hacer una comparación más clara de los cementos utilizados se obtuvo el equivalente de sodio (Aïtcin, 2005).

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O} \quad (22)$$

De acuerdo a la ecuación 22 se realizó la Tabla 9 que muestra de manera comparativa los contenidos de óxidos alcalinos en los dos cementos utilizados.

Tabla 9. Contenido de óxidos alcalinos (las unidades se encuentran en % con respecto al peso del cemento).

<b>Cemento</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O<sub>equiv</sub></b>
CPO	0.46	0.71	62.9	0.93
CPC	0.41	0.72	59.5	0.88

De la Tabla 9 puede observarse que no hay una diferencia significativa en cuanto al contenido de óxidos alcalinos, por tanto, para nuestros fines esta característica del concreto puede considerarse como una constante.

## 4.2 Seguimiento de la carbonatación

### 4.2.1 Pruebas de avance de carbonatación por medio del indicador a base de fenolftaleína

Como se describió en el Capítulo 3, previo a la aplicación de la técnica de realcalinización se realizaron pruebas para determinar la profundidad de carbonatación, esto con el fin de verificar las diferentes condiciones de carbonatación del concreto de acuerdo a nuestros objetivos.

Debido a la cantidad de probetas fabricadas, se realizaron periodos de carbonatación de 15 días con el propósito de optimizar el consumo de gas CO<sub>2</sub>. El tiempo que permanecieron en la cámara de carbonatación, así como la profundidad de carbonatación de cada grupo de probetas se presenta en la Figura 31.

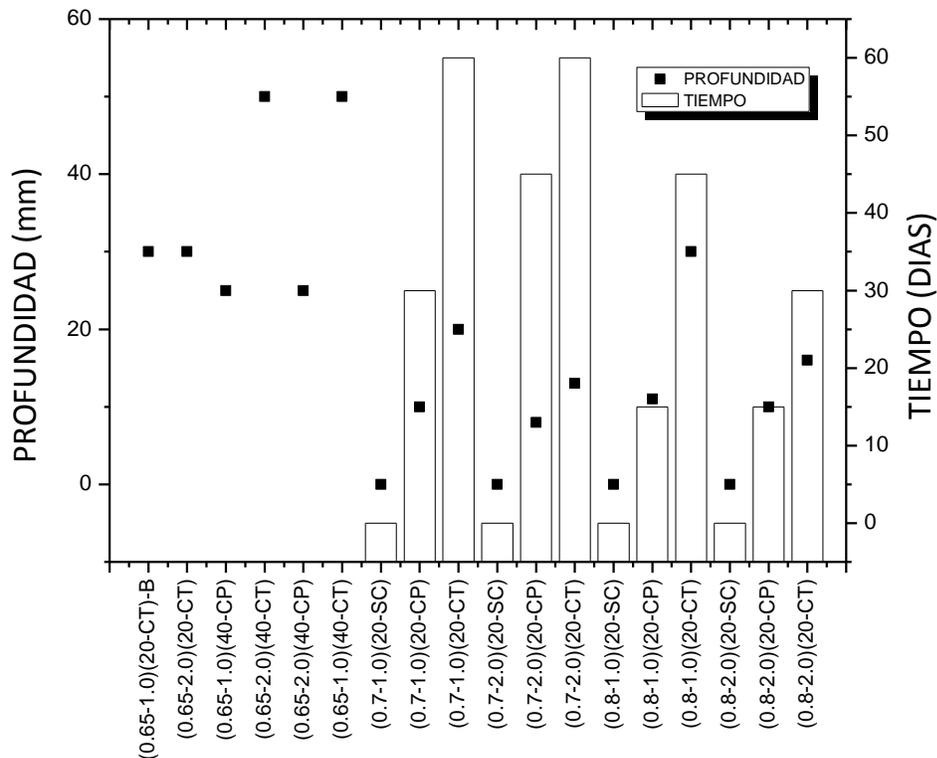


Figura 31. Profundidad de carbonatación antes de aplicar la técnica de realcalinización.

Como era de esperarse (Baron, 1992), cuando la relación a/c del concreto es mayor, la velocidad en el avance del frente de carbonatación también aumenta. En este punto es conveniente resaltar que la condición de carbonatación mencionada en la clasificación de cada grupo está basada en la prueba de la fenolftaleína y que los criterios sobre los espesores de carbonatación fueron descritos en el Capítulo 3.

#### 4.2.2 Medición del pH del concreto

Se realizaron medidas de pH del concreto antes y después de la inducción de la carbonatación en los especímenes (el seguimiento de la etapa de recarbonatación se presentará más adelante). En la Figura 32 y 33 se presentan las medidas de pH del concreto en la zona A (al nivel de la varilla) y en la zona B (parte exterior próxima a la superficie de realcalinización) respectivamente. La línea horizontal punteada representa el valor de pH de cambio de color de la fenolftaleína (J. Broomfield, 2000).

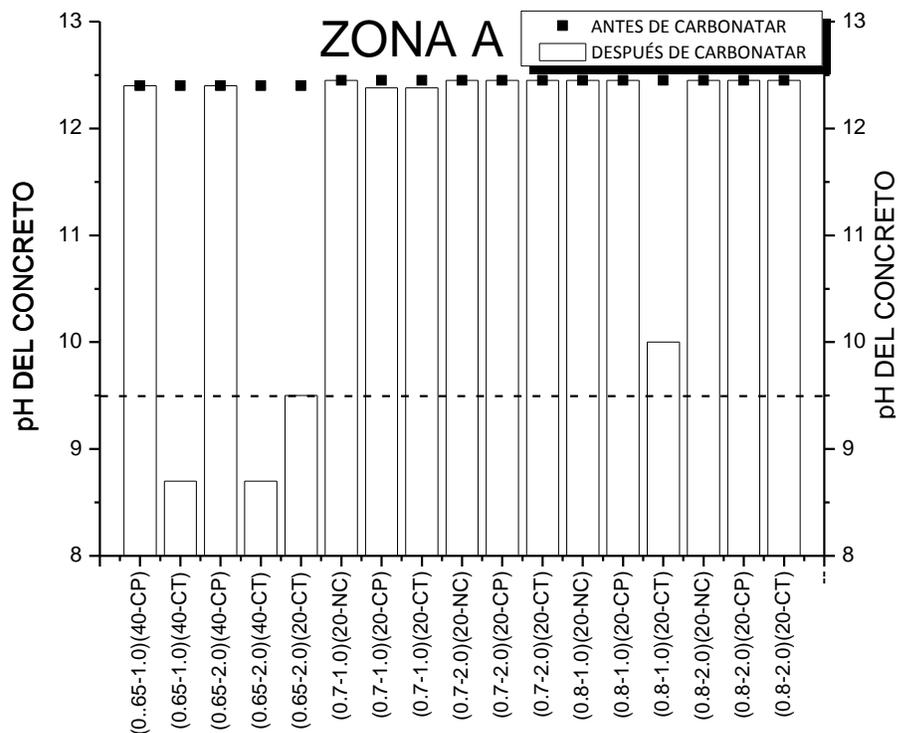


Figura 32. Medida del pH del concreto en la zona A antes y después de ser expuestos a la carbonatación inicial.

Puede observarse que algunos grupos de probetas en los cuales los concretos parecen estar totalmente carbonatados, según la prueba de la fenolftaleína, aún tienen un pH elevado (aproximadamente 12.5), excepto los grupos (0.65-1.0)(40-CT), (0.65-2.0)(40-CT), (0.65-2.0)(20-CT) y (0.8-1.0)(20-CT), en donde el frente de carbonatación fue más allá del acero. Este comportamiento puede ser explicado por dos razones, como se ha mencionado en trabajos anteriores (Cheng-Feng et al., 2004; J. Broomfield, 2000) por el efecto gradual que produce la carbonatación en el concreto cuya reacción no genera propiamente una frontera con un pH superior o inferior a 9.5, sino que hay una zona de transición en donde el concreto presenta valores de pH entre 9.5 y 11.5. La segunda razón es que en estos grupos en los que el concreto tiene un alto pH en la zona A, la profundidad de carbonatación determinada usando el indicador de fenolftaleína se encontraba en la interface acero-concreto (véanse Figuras 17 y 19), de tal forma que en estos grupos había concreto de la zona de transición descrita anteriormente y concreto sano (no carbonatado).

Cabe resaltar que después de observar estos resultados, del total de los grupos con condición inicial CT (carbonatados totalmente) se optó por analizar solo los grupos en donde la profundidad de carbonatación fue más allá del acero, es decir, donde se encontró un pH igual o menor a 10 en la zona A (al nivel del acero).

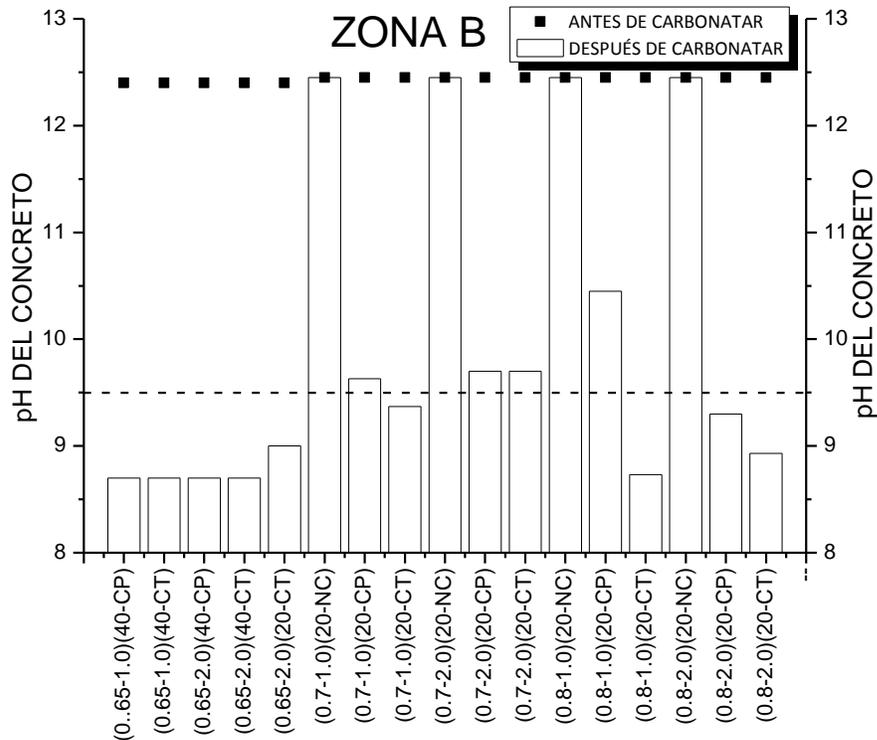


Figura 33. Medida del pH del concreto en la zona B antes y después de aplicar la técnica de realcalinización.

Es posible observar de las Figuras 32 y 33 que el pH del concreto sano se ubica alrededor de 12.5 en ambas zonas. Así mismo, la disminución del pH en la zona B es muy notoria, lo cual resultó como esperado por ser la zona que se encuentra más rápidamente en contacto con el CO<sub>2</sub> y el ácido carbónico formado en los poros del concreto en la etapa de carbonatación.

#### 4.2.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) en polvos

Se realizaron pruebas de difracción de Rayos X (DRX) en polvos obtenidos del concreto en el grupo (0.8-1.0)(20-CP). Como se había comentado anteriormente, el cemento utilizado para fabricar esta mezcla fue CPO. Los ensayos se realizaron a dos tiempos: después de realcalinizar el concreto y cuando el concreto había sido recarbonatado por 30 días. Los difractogramas se presentan en la Figura 34.

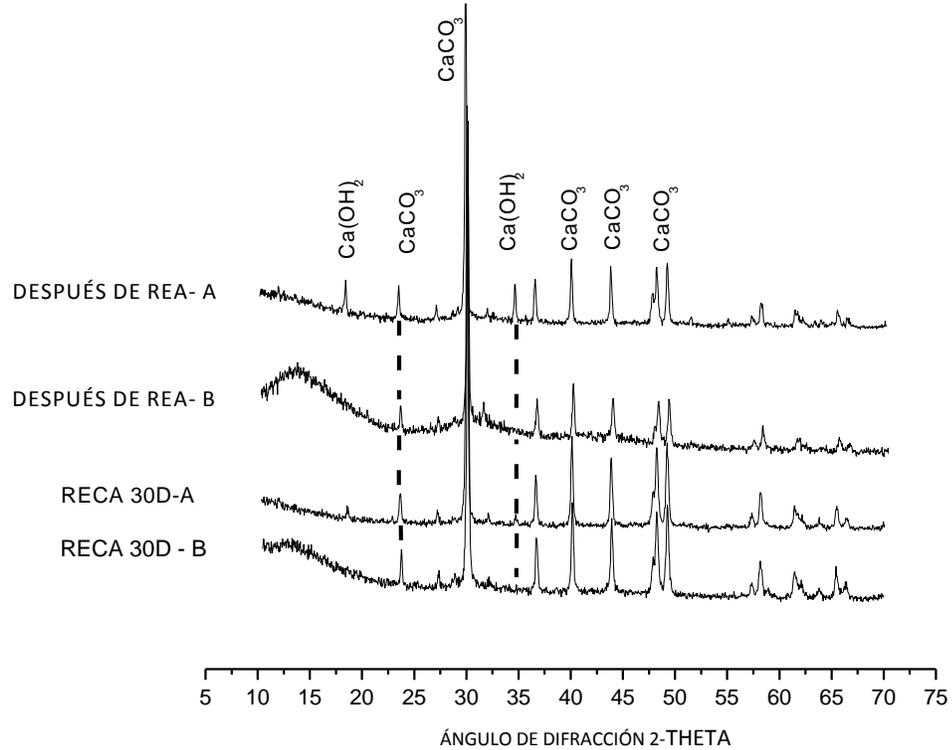


Figura 34. Difracción de Rayos X (DRX) en polvos de concreto.

Los resultados obtenidos de la DRX posterior a la realcalinización, demuestran que en la zona B (zona exterior realcalinizada) no se encontró el pico de portlandita. Así mismo, al observar la zona A (al nivel de la varilla) se encontraron picos correspondientes al hidróxido de calcio, lo que se atribuye al hecho de que el concreto de dichos especímenes no se encontraba carbonatado en dicha zona (grupo de especímenes parcialmente carbonatado). Por otro lado, después de treinta días de recarbonatación, en la zona A prácticamente toda la portlandita ha sido consumida en su totalidad. Es importante resaltar que la posible formación de hidróxido de potasio o carbonato de potasio es difícil de ser observada con esta técnica, ya que no es común encontrarlos sólidos en el concreto, posiblemente debido a sus características fisicoquímicas.

#### 4.2.4 Análisis termogravimétrico (DTA/TGA)

Con el objetivo de contar con una mayor información que nos asista en una mejor descripción de los compuestos que podrían estar presentes en el concreto, este mismo grupo (0.8-1.0) (20-CP) fue analizado por termogravimetría. Las pruebas se realizaron en la zona A y B de las probetas. Como era de esperarse en la zona B solo se encontró carbonato de calcio (las curvas DTA/TGA se muestran en el Apéndice 1). A continuación se muestran las curvas obtenidas en un ensaye de una muestra de concreto con una relación a/c de 0.8. En la Figura 35-a se presenta una muestra de concreto sano, en la Figura 35-b una muestra de concreto carbonatado de la zona A antes de ser realcalinizado y en la Figura 35-c una muestra de concreto realcalinizado de la misma zona.

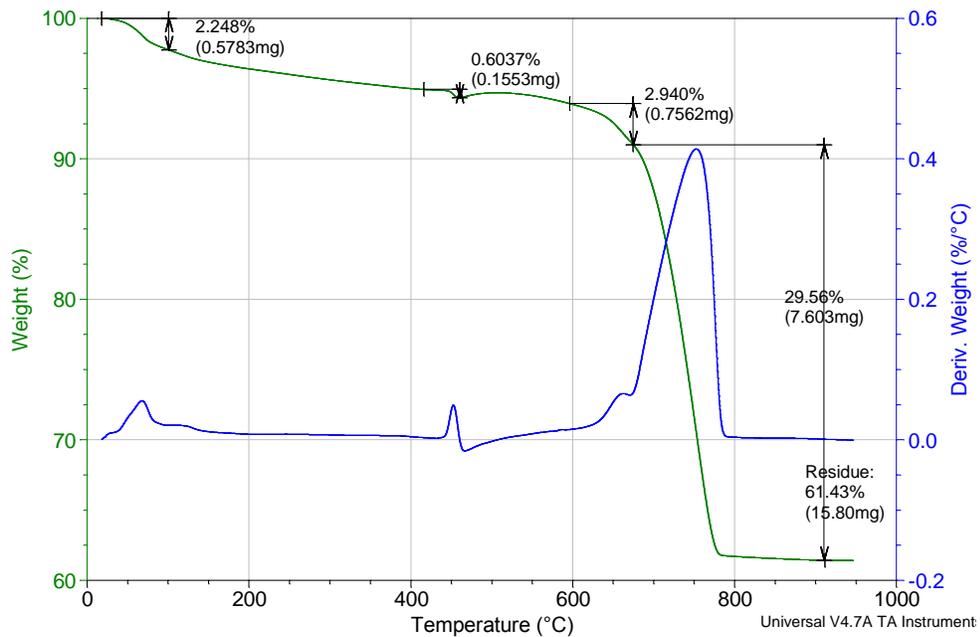


Figura 35-a. Análisis DTA/TGA en un concreto sano con relación a/c de 0.8.

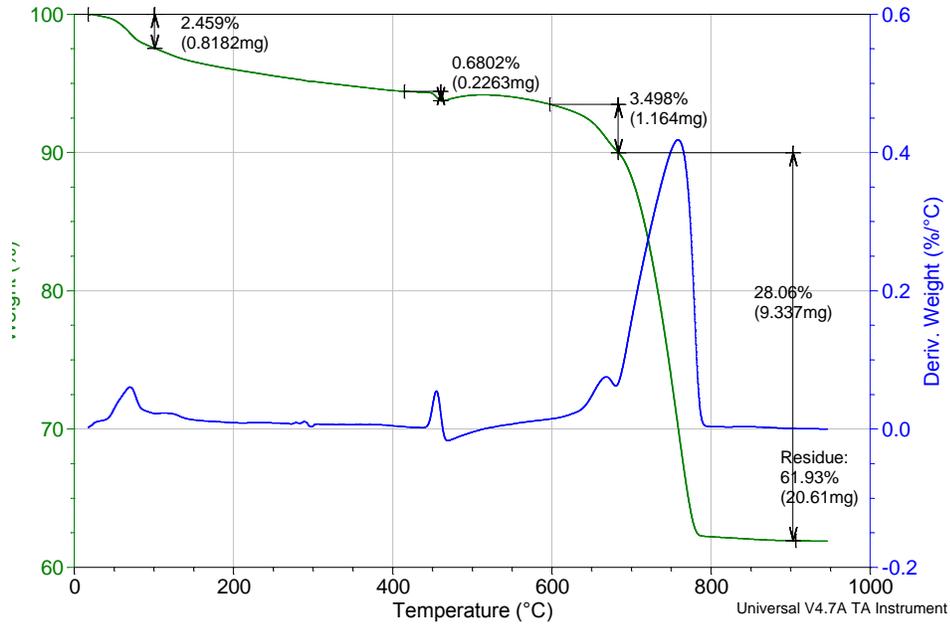


Figura 35-b. Análisis DTA/TGA de la zona A (al nivel de la varilla) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 antes de ser realcalinizado.

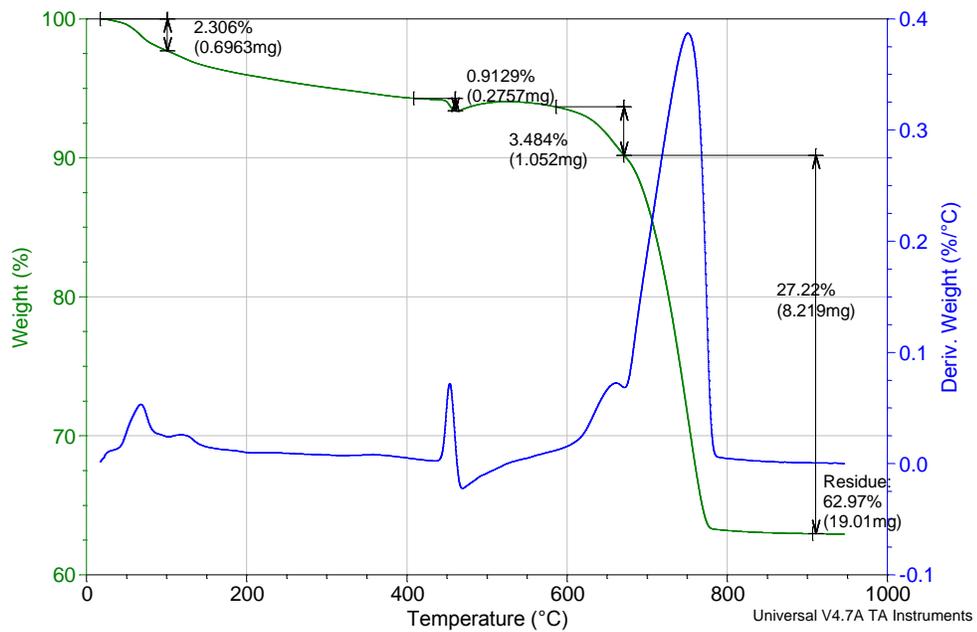


Figura 35-c. Análisis DTA/TGA de la zona A (al nivel de la varilla) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 después de ser realcalinizado.

En la curva de la derivada de la masa se puede observar un pico entre 50-100 °C que corresponde a la liberación del agua que se encontraba en los poros del concreto. El pico encontrado aproximadamente a 450 °C es característico de la descomposición del  $\text{Ca(OH)}_2$ , este pico y su respectiva pérdida de masa obtenida de la curva termogravimétrica fue utilizado para el cálculo del contenidos de hidróxidos a diferentes tiempos de tratamiento.

En la Figura 36 se presenta el resumen de los resultados obtenidos por medio del cálculo estequiométrico en la zona A (al nivel de la varilla).

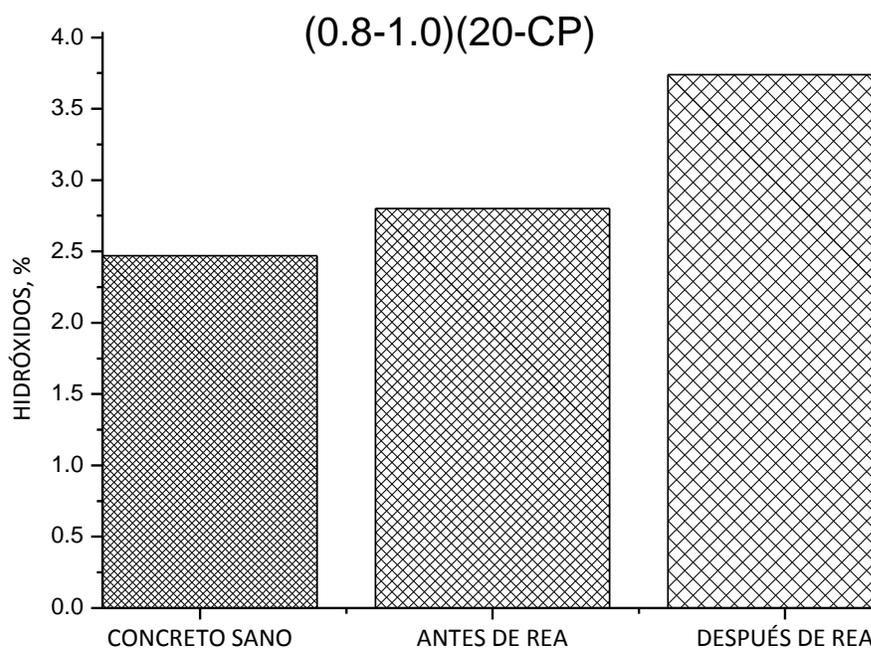


Figura 36. Contenido de hidróxidos en la zona A (al nivel del acero) en diferentes etapas de proyecto.

Se constata una ligera variación en el contenido de hidróxidos entre el concreto sano y antes de aplicar la técnica de realcalinización, la cual podría ser debida a la diferencia en las características del concreto propiamente. En estas dos primeras etapas este hidróxido es mayoritariamente lo que conocemos como portlandita o hidróxido de calcio. Sin embargo, la variación que existe entre un concreto antes y después de

aplicar la técnica de realcalinización resultó ser significativa. Este aumento podría ser atribuido a la producción de hidróxidos resultado de las reacciones catódicas generadas de la aplicación de la realcalinización.

#### 4.2.5 Observación en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

El grupo (0.8-1.0) (20-CT) se analizó por medio del MEB y por espectroscopia de energía dispersiva (EDS), que proporciona un análisis químico elemental en un punto dado de la muestra. En la Figura 37 se presenta el registro de la observación de una muestra de concreto realcalinizado y de un concreto sano, este último fue utilizado como testigo para seguir puntualmente el contenido de potasio por efecto del tratamiento de realcalinización (el registro completo se muestra en el Apéndice 2).

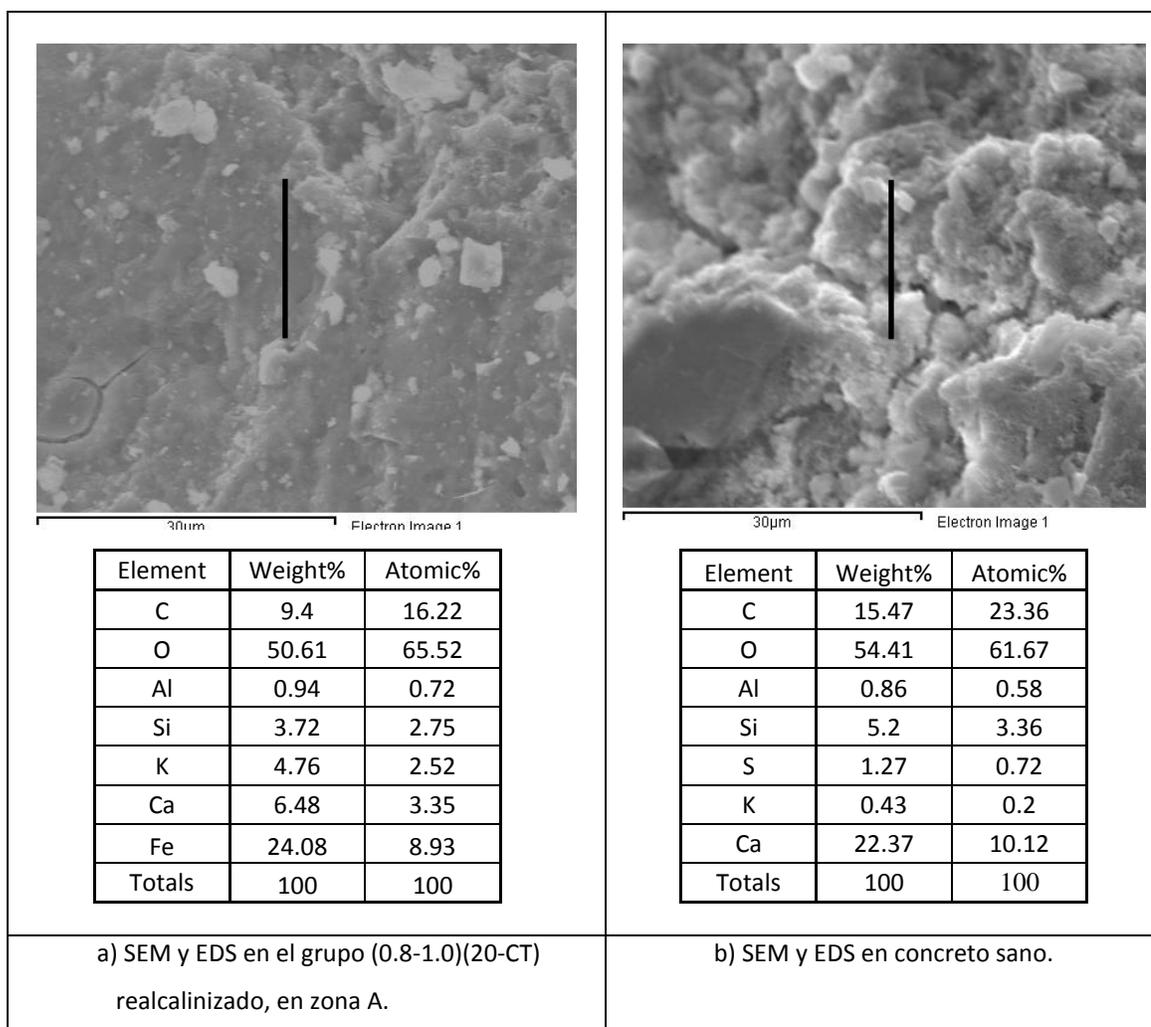


Figura 37. Registro de la observación en MEB.

El análisis EDS se realizó de forma lineal como se muestra en la Figura 37, en las proximidades de la interface acero-concreto. Los datos que se muestran representan el promedio del contenido de cada elemento a lo largo de la línea ilustrada. Posteriormente, con estos resultados se realizó una comparación entre el concreto realcalinizado y un concreto sano (testigo). En la Tabla 10 son presentados los resultados en donde cada dato es un promedio de dos observaciones.

Tabla 10. Contenido de Potasio en la interface acero-concreto obtenido por EDS

	Peso, %	Átomos, %
TESTIGO	0.44	0.21
REA (0.8-1.0)(20-CT)	4.52	2.35

Es posible apreciar que la concentración de potasio es mayor en el concreto realcalinizado que la que se presenta en un concreto no realcalinizado para la misma zona analizada. De acuerdo a trabajos previos (Mietz, 1995; Weichung Y. et al., 2005) esto es atribuible principalmente a la migración de iones hacia la varilla de refuerzo (cátodo), ya que los fenómenos de absorción y difusión no permiten un incremento tan significativo en el contenido de iones hasta la profundidad del concreto analizada en esta investigación.

### 4.3 Tiempo de carbonatación y recarbonatación

A continuación en la Figura 38 se presenta la relación que existe entre el tiempo de carbonatación con respecto al tiempo de recarbonatación para las probetas fabricadas con relación a/c de 0.7 y 0.8, así como sus respectivas condiciones iniciales de carbonatación de acuerdo al diseño experimental (véase Figura 18).

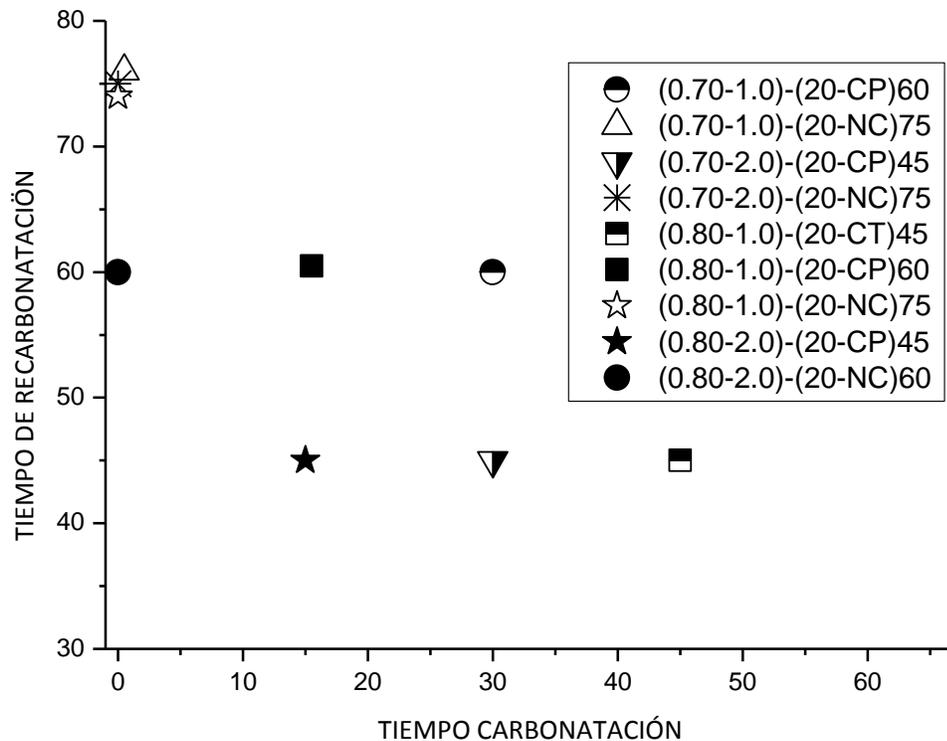


Figura 38. Relación entre el tiempo de exposición a carbonatación y recarbonatación.

Como puede apreciarse, las probetas que inicialmente no fueron carbonatadas, identificadas como NC, permitieron un mayor tiempo de exposición a  $\text{CO}_2$  después de haber sido realcalinizadas. Puede observarse también en esta figura que a mayor grado de carbonatación inicial (i.e. carbonatación total) las probetas de concreto necesitaron menos tiempo para ser recarbonatadas.

#### 4.4 Resistencia a la neutralización

En el trabajo realizado por Mietz (Mietz, 1998) se propuso un procedimiento para medir de forma rápida la capacidad buffer de un concreto posterior a un proceso de realcalinización, con el objetivo de evaluar la eficiencia de la realcalinización de forma rápida. La prueba utilizada en el presente estudio está basada en el procedimiento utilizado por Mietz (Mietz, 1998), con las variantes descritas en el Capítulo 3. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 39. No obstante, estos resultados obtenidos con dicho procedimiento fueron corroborados con el seguimiento del pH del concreto durante el proceso de recarbonatación. Dicha comparación será discutida más adelante.

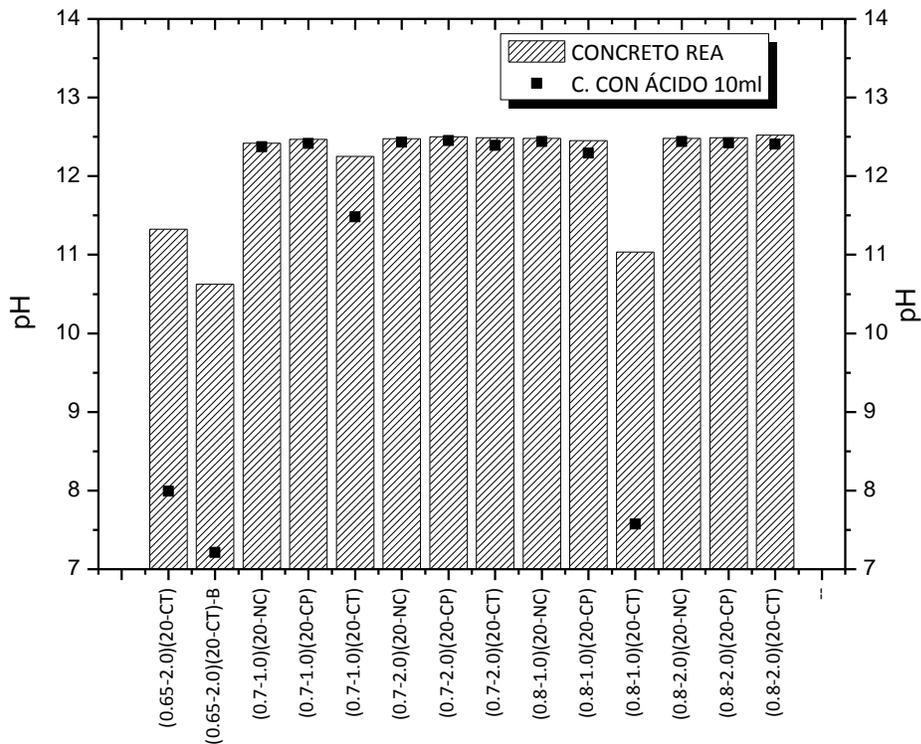


Figura 39 Prueba de resistencia a la neutralización en concretos realcalinizados, en zona A.

Puede observarse que, en concretos con condición de carbonatación inicial NC (no carbonatada) y CP (carbonatada parcialmente) existe una mejor capacidad buffer que en concretos con carbonatación inicial CT (carbonatación total). Es decir, mediante esta prueba se infiere una mayor estabilidad de la alcalinidad del concreto cuando se le adicionó ácido. Con lo observado, se infiere que un concreto no carbonatado previamente y realcalinizado (como podría ser un concreto parcialmente carbonatado) presentaría una mayor resistencia a una posterior recarbonatación, es decir, el tiempo de vida residual podría considerarse mayor. Por el contrario, y de acuerdo a los resultados obtenidos, los concretos con condición inicial CT presentan una menor capacidad buffer, por lo tanto presentarían una menor resistencia a la recarbonatación.

Es importante mencionar que, los grupos (0.7-1.0)(20-CT), (0.7-2.0)(20-CT) y (0.8-2.0)(20-CT) presentan una capacidad buffer similar a la de un concreto con condición inicial NC. Esto es porque la condición de carbonatación se especificó en base a la prueba de profundidad de carbonatación con el indicador de fenolftaleína, sin embargo en las pruebas de pH (véase Figura 32) se puede apreciar que en estos grupos existió un pH alto del concreto, de alrededor de 12.5 al nivel del acero (zona A), antes de aplicar la técnica de realcalinización.

#### 4.5 Seguimiento del pH del concreto durante la recarbonatación

Se realizó el seguimiento del pH del concreto durante la etapa de recarbonatación. Para el análisis, las probetas fueron concentradas en siete grupos y los resultados se presentan en las Figuras 40-a a la 40-g. Con el objetivo de resaltar el efecto de la realcalinización en la zona no carbonatada de un concreto parcialmente carbonatado, en algunas figuras se incluyen resultados de series que se realcalinizaron sin haber sido carbonatas previamente (NC). También son presentados concretos con condición inicial CP (carbonatados parcialmente) y CT (carbonatados totalmente). En estas figuras se presenta el pH a diferentes tiempos del tratamiento, en primer lugar se muestra el pH del concreto antes de ser realcalinizado (Antes de REA), en esta etapa del tratamiento el concreto se encontró en su estado inicial de carbonatación. Posteriormente se reporta el pH del concreto después de ser realcalinizado (después de REA). Finalmente el seguimiento en recarbonatación (RECA), en donde la sigla D en la nomenclatura de las etiquetas del eje x representa el tiempo en días de recarbonatación de las probetas, el cual se realizó en periodos de 15 días.

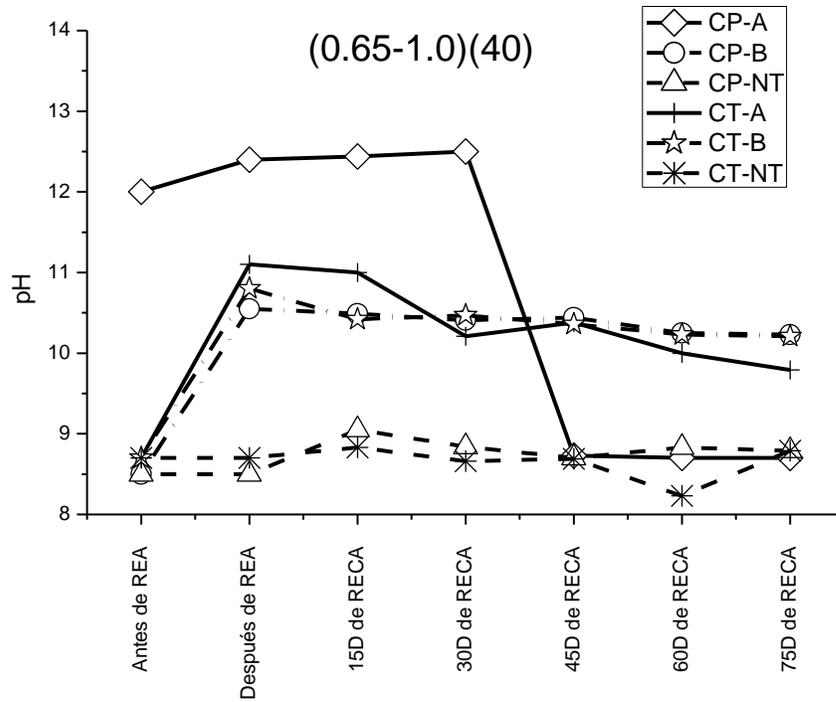


Figura 40-a. Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.65, densidad de corriente de 1.0 A/cm<sup>2</sup> y recubrimiento de 40 mm.

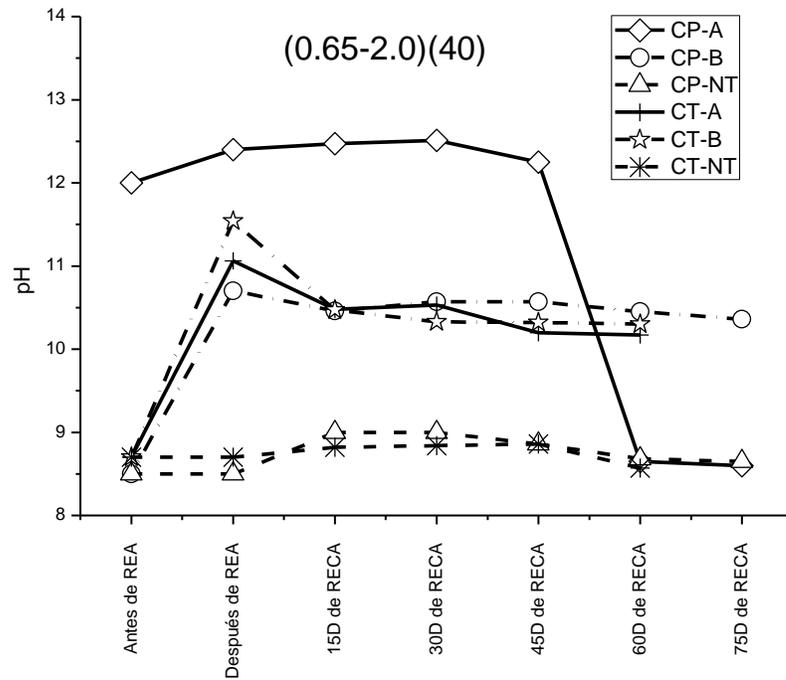


Figura 40-b. Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.65, densidad de corriente de 2.0 A/cm<sup>2</sup> y recubrimiento de 40 mm.

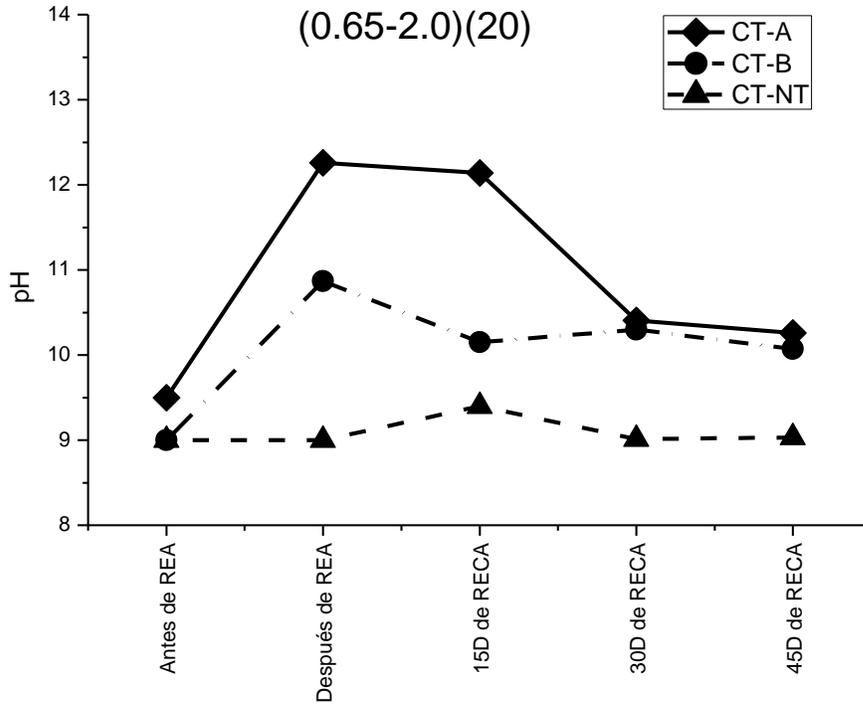


Figura 40-c. Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.8, densidad de corriente de 2.0 A/cm<sup>2</sup> y recubrimiento de 20 mm.

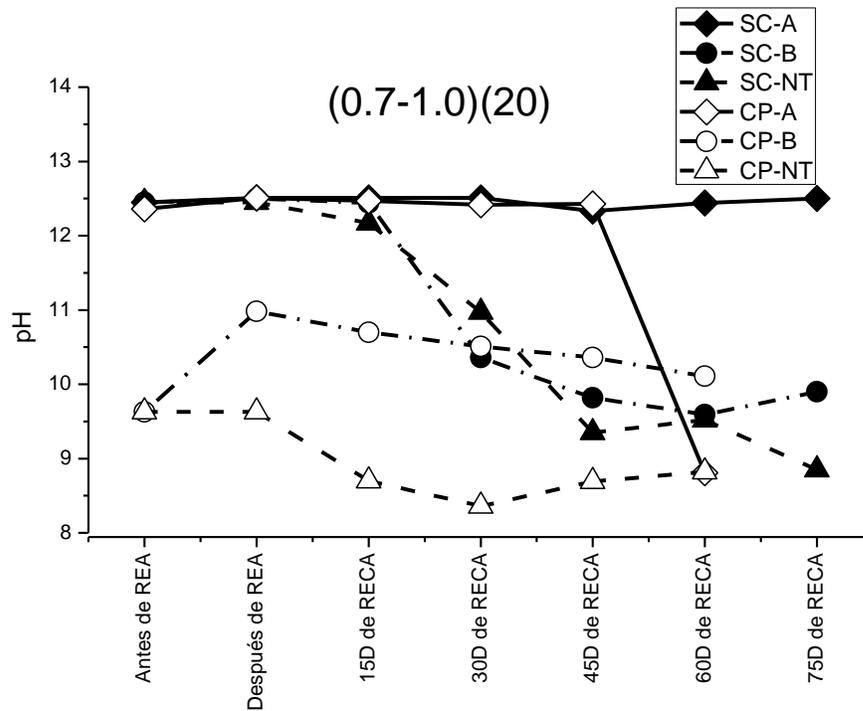


Figura 40-d. Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.7, densidad de corriente de 1.0 A/cm<sup>2</sup> y recubrimiento de 20 mm.

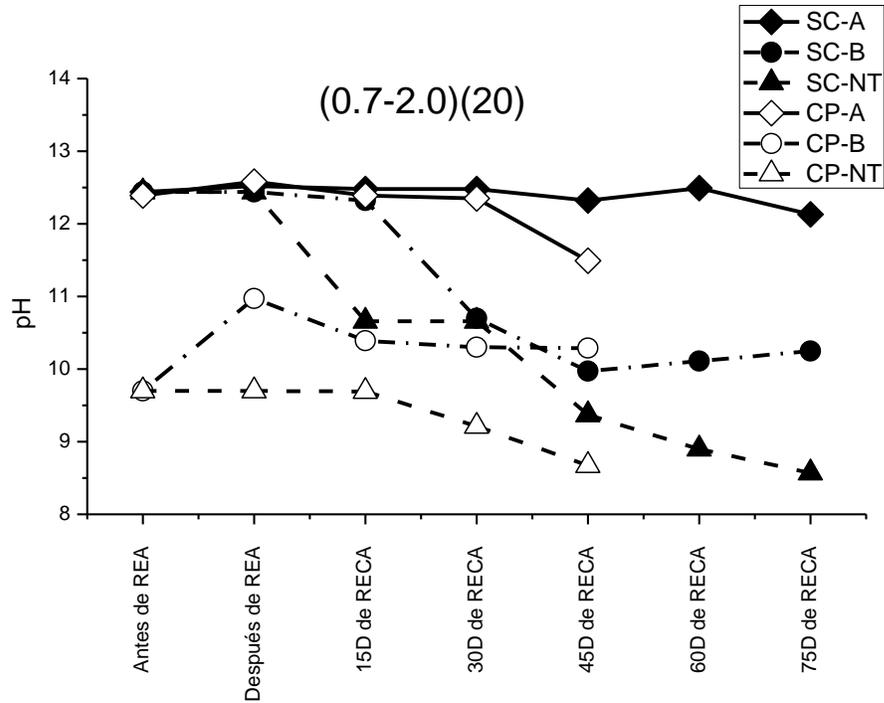


Figura 40-e. Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.7, densidad de corriente de 2.0 A/cm<sup>2</sup> y recubrimiento de 20 mm.

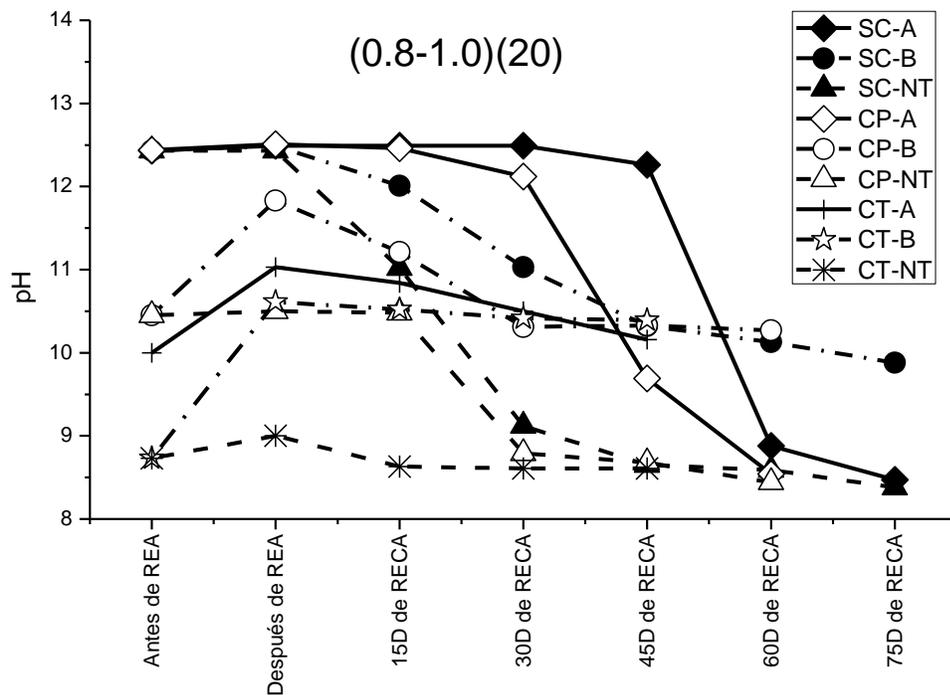


Figura 40-f. Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.8, densidad de corriente de 1.0 A/cm<sup>2</sup> y recubrimiento de 20 mm.

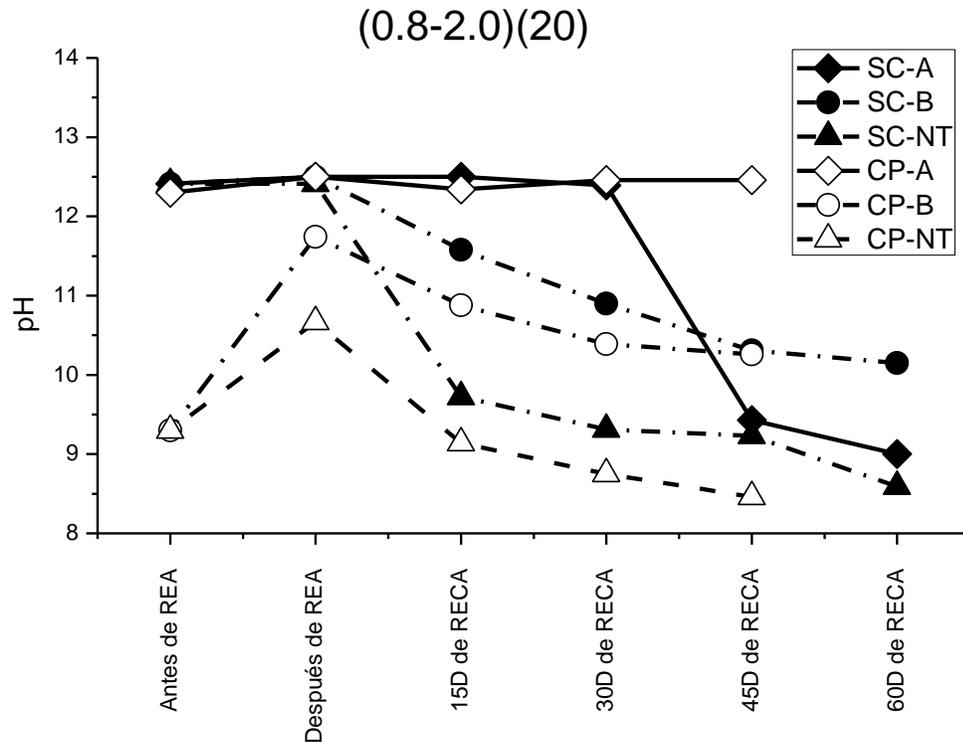


Figura 40-g. Seguimiento del pH del concreto de las probetas con relación a/c 0.8, densidad de corriente de 2.0 A/cm<sup>2</sup> y recubrimiento de 20 mm.

En concretos con carbonatación inicial similar puede observarse una tendencia repetitiva la cual se describe a continuación:

- 1) En las series de concretos realcalinizados que inicialmente no fueron carbonatados (NC) se observa lo siguiente: en la zona A se presenta un valor de pH de 12.5, sin embargo la carbonatación tiende a avanzar como en un concreto no realcalinado y el pH desciende bruscamente a valores inferiores a 9. Por su parte, el pH de la zona B tiende a disminuir más rápidamente que en la zona A, sin embargo se estabiliza en un valor aproximado de 10.
- 2) En las series de concretos realcalinizados que inicialmente fueron parcialmente carbonatados (CP) se observa lo siguiente: En la zona A se presenta un comportamiento similar al descrito en 1, es decir, se presenta un descenso brusco de pH similar al de un concreto no tratado por la técnica de realcalinización y parece estabilizarse en un valor de pH inferior a 9. Sin

embargo en la zona B se alcanza un valor de equilibrio de pH de 10. Este comportamiento igualmente parece ser independiente tanto de la relación a/c como de la densidad de corriente aplicada.

- 3) En las series de concretos realcalinizados que inicialmente fueron carbonatados totalmente (CT) se observa una tendencia al equilibrio en la zona A y B en donde los valores de pH oscilan entre 10.5 y 10. Dicha tendencia es independiente de la relación a/c del concreto, del recubrimiento y de la densidad de corriente aplicada. Este valor de equilibrio es congruente con el pH del bicarbonato de potasio  $\text{KHCO}_3$  (Engineeringtoolbox, 2011), y con lo encontrado por Mietz para el  $\text{NaHCO}_3$  (Mietz, 1998).

Del análisis anterior se puede deducir que, en concretos parcialmente carbonatados en los que se aplica la técnica de realcalinización, en la zona A (al nivel del acero) no tiene lugar la formación del carbonato de potasio o en su caso de sodio (dependiendo del electrolito utilizado). Por lo tanto, una recarbonatación representa un mayor riesgo de provocar corrosión del acero, es decir, el proceso de recarbonatación es similar que el de carbonatación. Por otra parte, en un concreto totalmente carbonatado el mecanismo de recarbonatación es diferente al de carbonatación. Es decir, la carbonatación afectará a los carbonatos de potasio (o sodio) presentes en el concreto transformándolos en bicarbonatos, y estos se mantendrán estables en un valor de pH que oscila entre 10.5 y 10.

## 4.6 Estado de corrosión del acero

### 4.6.1 Seguimiento del potencial del acero.

Se realizó el seguimiento de la despolarización del acero posterior a la aplicación de la técnica de realcalinización. Es importante resaltar que el seguimiento de la despolarización fue realizada en los especímenes expuestos en recarbonatación. En los resultados se omitió el reporte del tiempo cero el cual corresponde al momento en que fueron desconectadas las probetas. Dicha omisión se realizó para observar de forma clara el comportamiento de cada serie de probetas. Sin embargo, cabe señalar que en ese instante el potencial del acero se encontró en valores de aproximadamente -1000 mV vs SCE en todas las series. Los resultados del seguimiento del potencial del acero se muestran en la Figura 41-a, b y c.

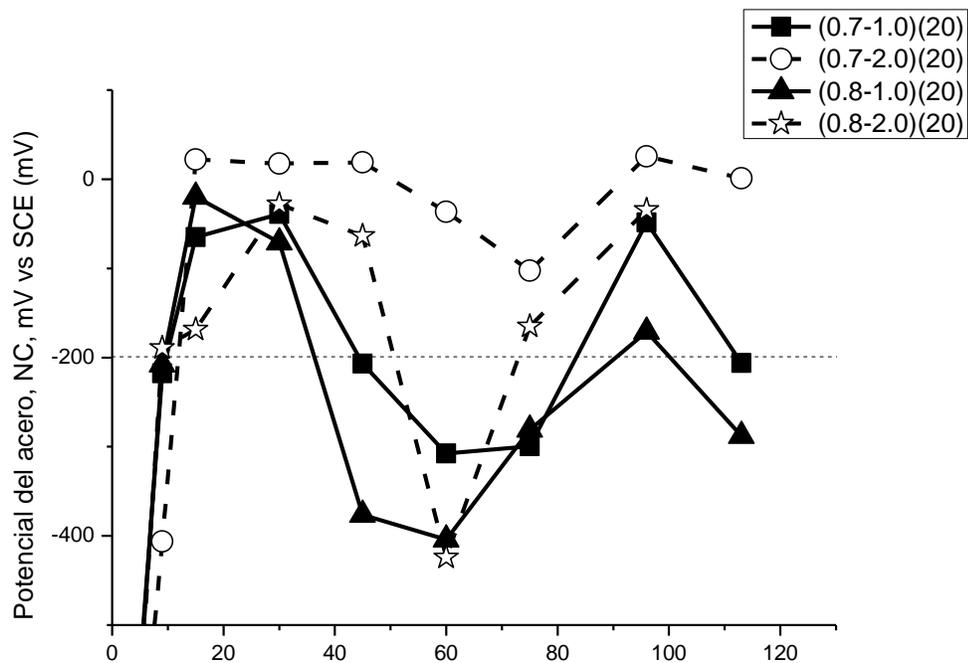


Figura 41-a. Seguimiento del potencial del acero, posterior a la realcalinización en probetas con carbonatación inicial NC.

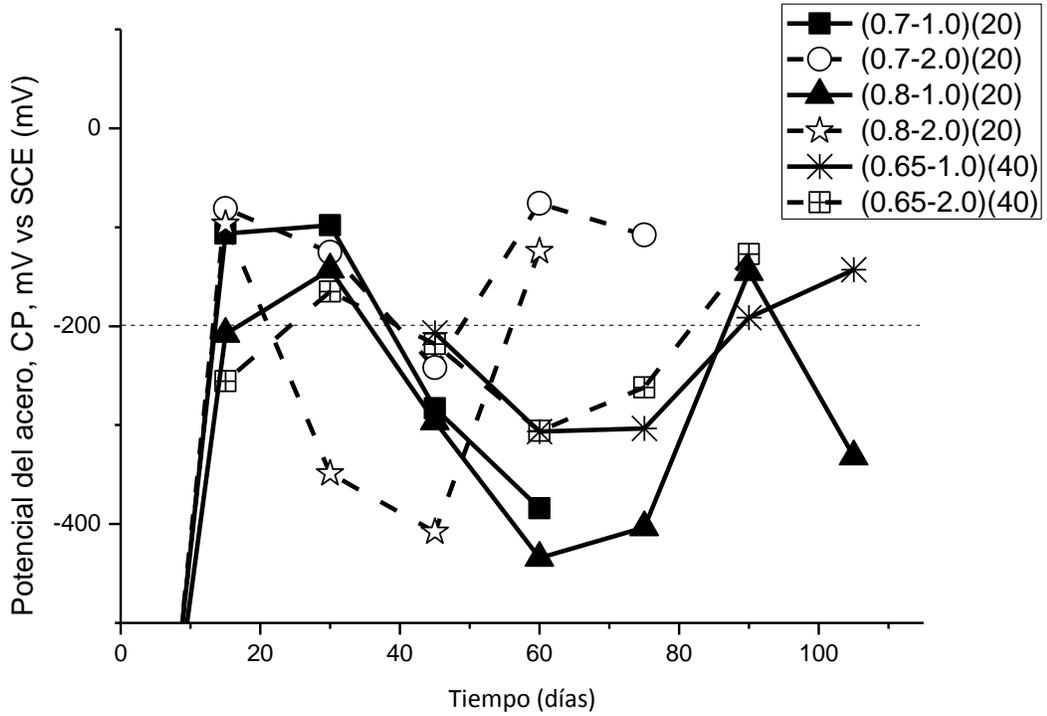


Figura 41-b. Seguimiento del potencial del acero, posterior a la realcalinización en probetas con carbonatación inicial CP.

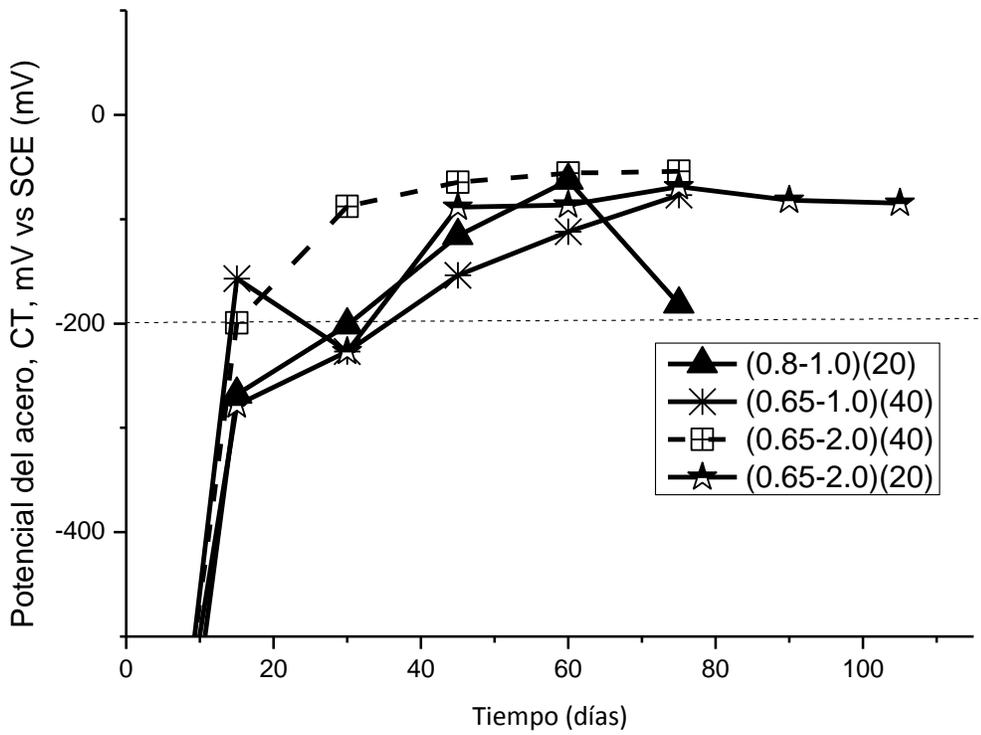


Figura 41-c. Seguimiento del potencial del acero, posterior a la realcalinización en probetas con carbonatación inicial CT.

Puede observarse que después de 20 días todas las series tienden a estabilizarse en un potencial de -200 mV vs SCE. Dicho valor ha sido considerado como indicativo de la despolarización del sistema acero concreto (Mietz, 1998). Posteriormente, los grupos con condición inicial de carbonatación NC (no carbonatadas) y CP (carbonatadas parcialmente) presentaron un descenso de hasta -400 mV para luego recuperarse para permanecer en un potencial de -200 mV o superior (véanse Figuras 41-a y b). Esto concuerda con lo encontrado en el trabajo de Mietz, en donde los potenciales después de un mes se estabilizaban en -200 mV. Sin embargo, las condiciones de exposición difieren de las utilizadas en este trabajo, en donde el concreto se sometió a una recarbonatación acelerada. Por otra parte, la recuperación del potencial que se observa posterior al descenso de -400 mV no corresponde a los criterios de interpretación de la medida de potenciales (ASTM C-876-91), ya que esto nos indicaría una repasivación del acero. Es posible que por efecto de la alteración del potencial de equilibrio que se le provoca al acero al utilizar la técnica de realcalinización, la aplicación de los criterios establecidos no sea de manera directa.

#### 4.6.2 Seguimiento de la velocidad de corrosión, $i_{corr}$

El seguimiento de la velocidad de corrosión se presenta en las Figuras 42-a, b y c. Según los criterios de interpretación de  $i_{corr}$ , (Rodríguez et al. 1993; Andrade et al. 1990) puede observarse que para las probetas en las que se aplicó la realcalinización con condición inicial de carbonatación CP (carbonatadas parcialmente) los valores indican una velocidad de corrosión de moderada a alta. Para los grupos que se realcalinizaron con carbonatación inicial NC (no carbonatadas) y CT (carbonatadas totalmente), las velocidades de corrosión encontradas al final de la recarbonatación fueron de moderadas a bajas, las cuales mostraron un comportamiento relativamente estable. Las medidas de las velocidades de corrosión,  $i_{corr}$ , se discutirán con la inspección visual que se presentará más adelante.

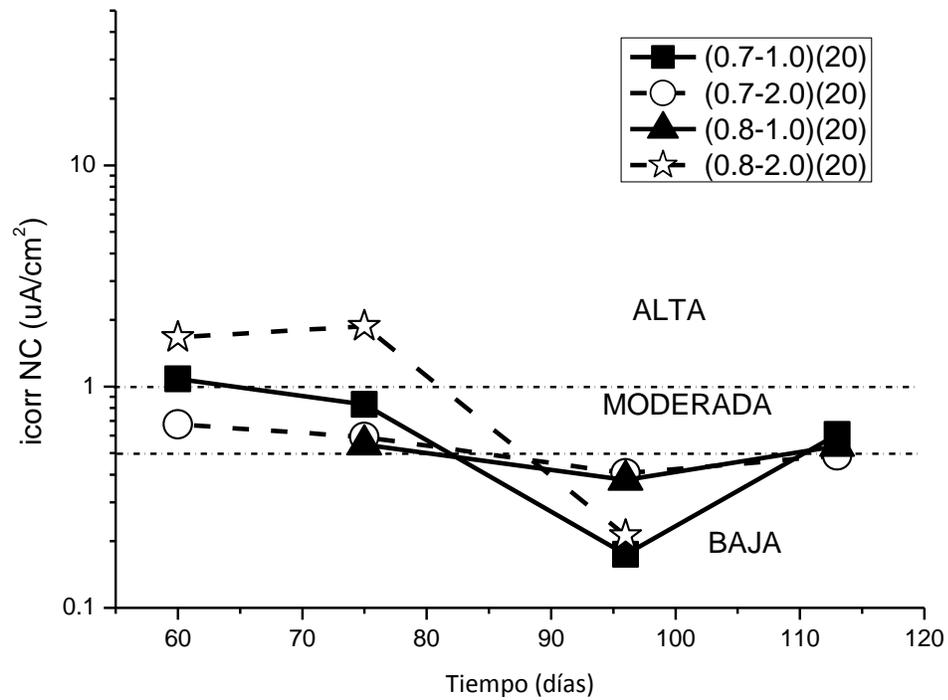


Figura 42-a Seguimiento de la velocidad de corrosión,  $i_{corr}$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial NC.

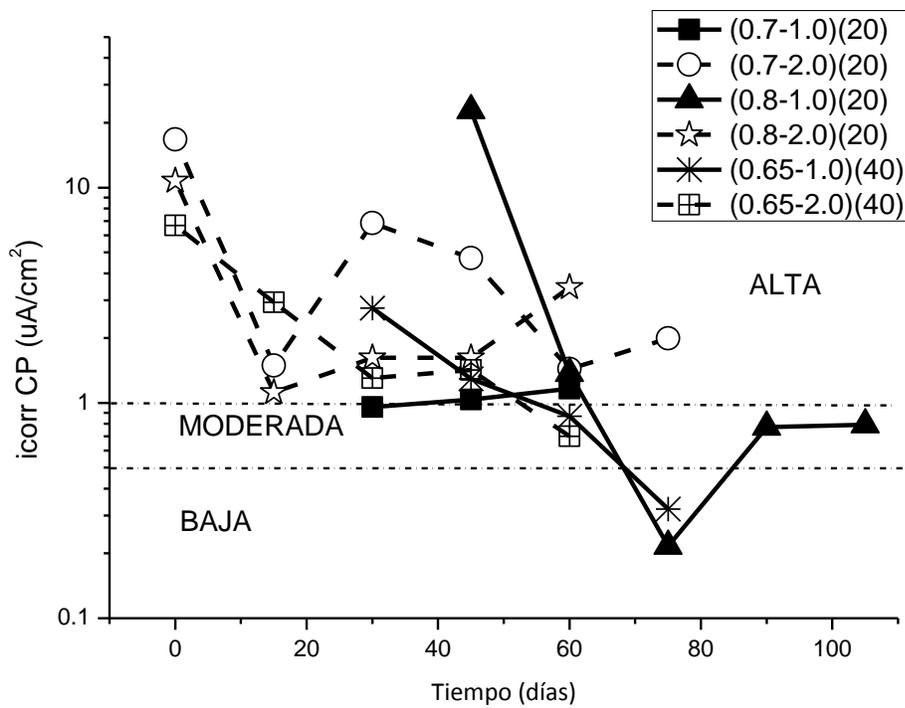


Figura 42-b. Seguimiento de la velocidad de corrosión,  $i_{corr}$ , durante la recarbonatación, en probetas con carbonatación inicial CP.

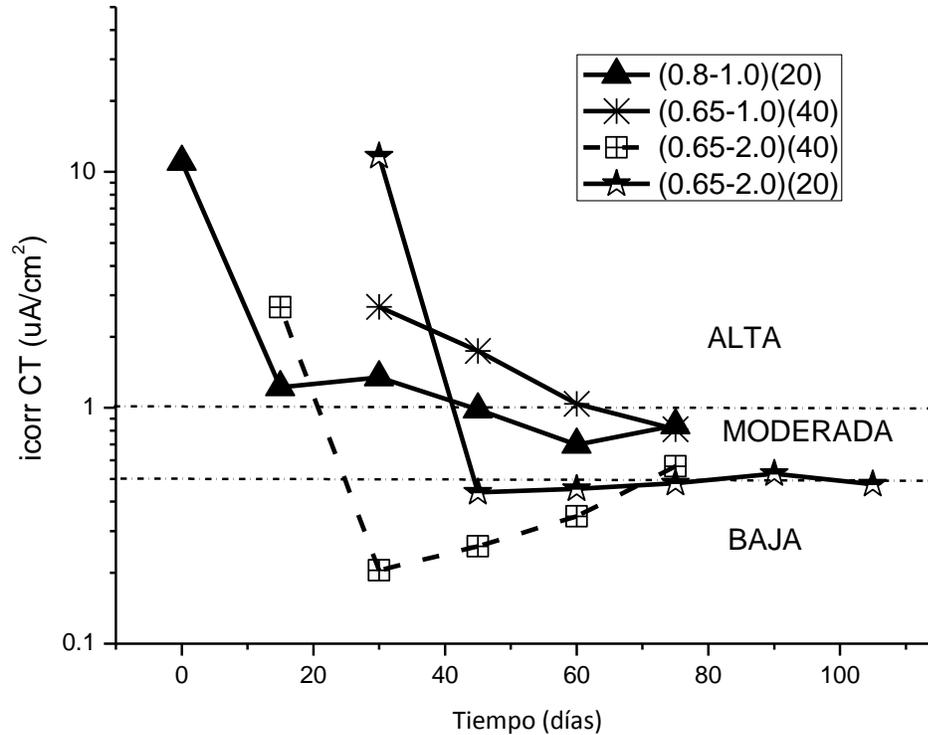


Figura 42-c. Seguimiento de la velocidad de corrosión,  $i_{corr}$ , durante la recarbonatación, en probetas con carbonatación inicial CT.

#### 4.6.3 Seguimiento de la resistividad, $\rho$

La resistividad del concreto puede referirse como un índice de durabilidad, ya que refleja la microestructura de los poros y de esta forma la movilidad de los iones en la matriz (Weichung et al., 2005).

En la Figura 43-a, b y c se presenta evolución de la resistividad del concreto, es importante mencionar que estas medidas se tomaron en condición parcialmente saturada (saturada aproximadamente al 70%). Es sabido que en la literatura se recomienda realizar las medidas en condición saturada superficialmente seca, sin embargo al llevar a cabo mediciones preliminares bajo estas condiciones se observó una alteración en las velocidades de corrosión del acero. Debido a ello, se optó por realizar las medidas en la condición mencionada al inicio del párrafo. Por esta razón, el

criterio preestablecido (Feliú et al., 1989) no puede ser utilizado directamente para interpretar estos resultados.

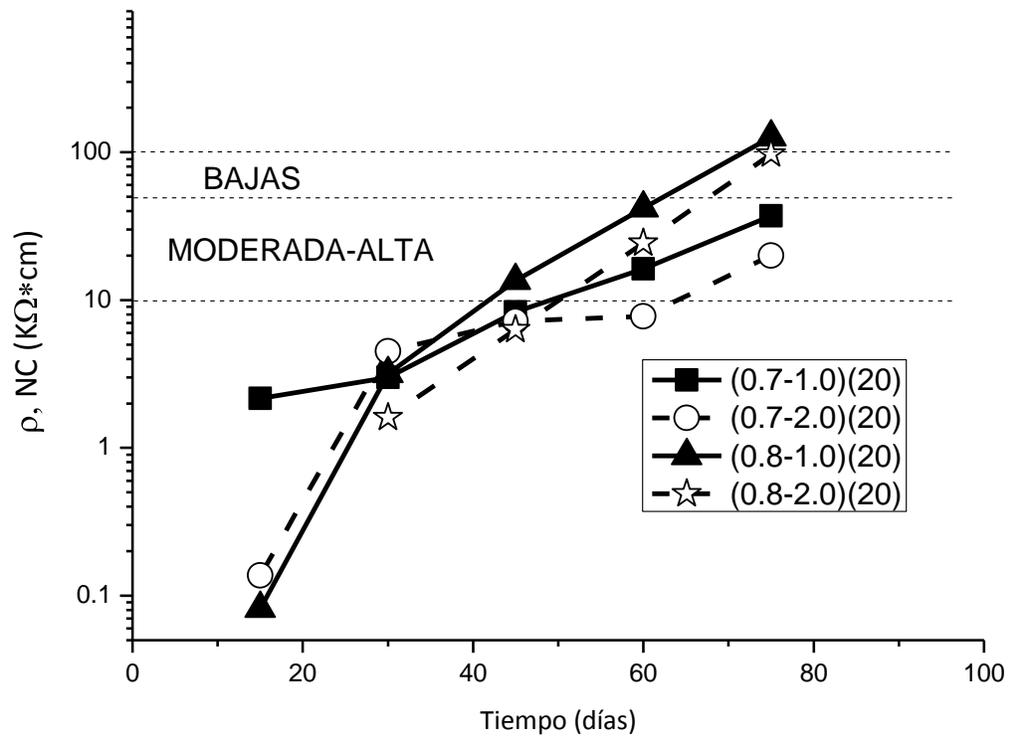


Figura 43-a. Seguimiento de la resistividad,  $\rho$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial SC

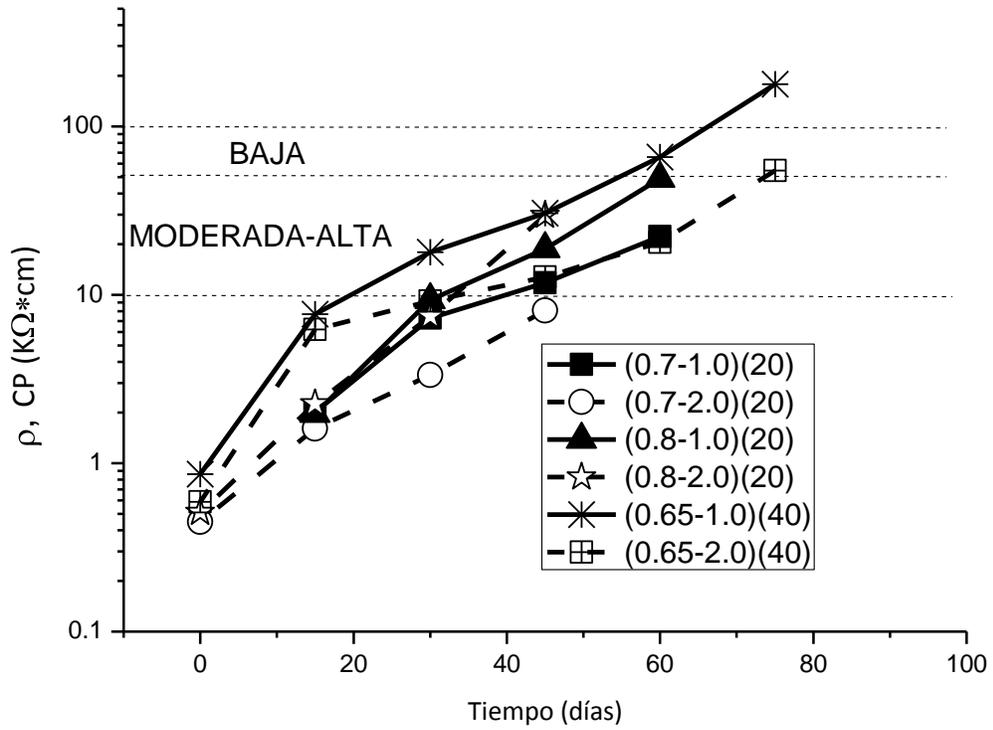


Figura 43-b. Seguimiento de la resistividad,  $\rho$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial CP.

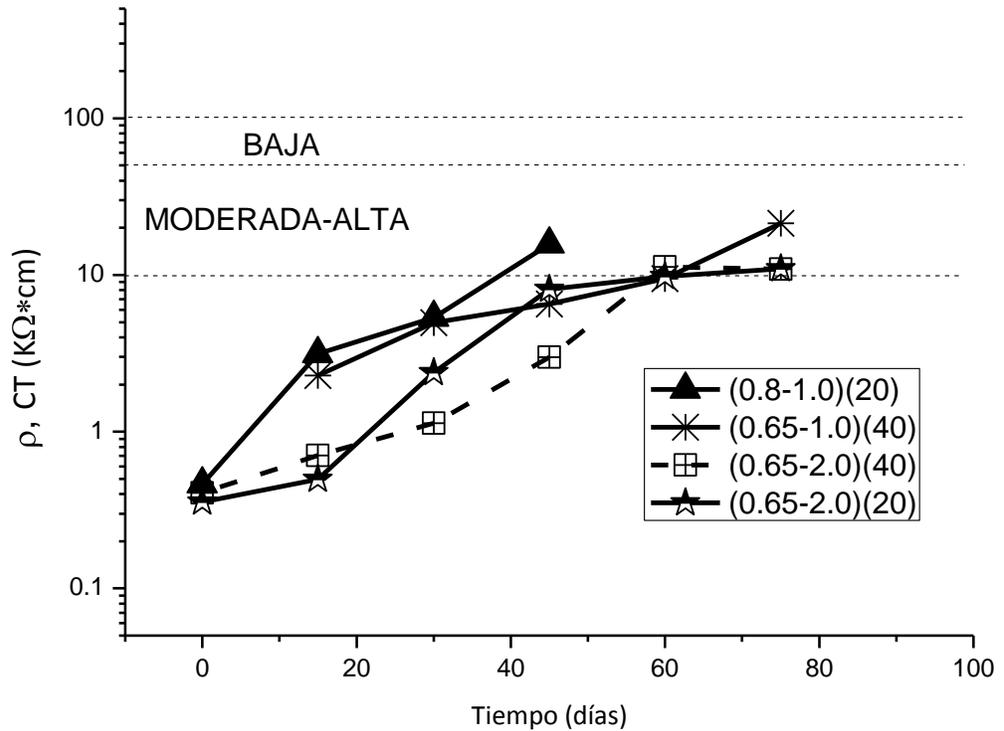


Figura 43-c. Seguimiento de la resistividad,  $\rho$ , durante la recarbonatación en probetas con carbonatación inicial CT.

Se ha encontrado (Polder, 2001) que la resistividad de un concreto convencional en condición saturada superficialmente seco oscila entre 5 y 20  $k\Omega \cdot cm$ . En este trabajo, antes de aplicar la técnica de realcalinización se obtuvieron valores que se encontraban entre 20 y 30  $k\Omega \cdot cm$  (en condición parcialmente saturada). Puede observarse que en todos los grupos de probetas la resistividad se encuentra en valores inferiores a 1  $k\Omega \cdot cm$  al inicio de la recarbonatación, estos valores son bajos y probablemente se deban al efecto provocado por el flujo de la corriente eléctrica que se hizo pasar durante la realcalinización. Sin embargo, es posible observar un incremento gradual durante la recarbonatación que tienden a llegar a valores de resistividad (superiores a 10  $k\Omega \cdot cm$ ) que hacen suponer que las velocidades de corrosión serán de moderadas a muy bajas (Feliú et al., 1989). Lo anterior puede decirse aun y cuando las condiciones de saturación no son las recomendadas para utilizar los criterios preestablecidos (véase Tabla 3). Por tanto, se puede constatar la densificación de la matriz del concreto debido a la recarbonatación (Weichung et al., 2005) que provoca la reacción química del  $K_2CO_3$  con  $CO_2$  para producir  $KHCO_3$  que precipita en los poros del concreto como se describe en la Ecuación 20.

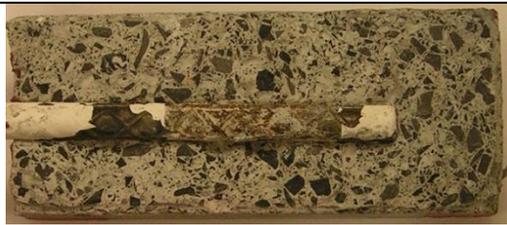
#### 4.7 Inspección visual

En la Tabla 11-a y b se muestra el registro de la inspección visual de las probetas con condición inicial NC (no carbonatada), después de la aplicación de la técnica de realcalinización y al final de la recarbonatación.

Tabla 11-a. Inspección visual en probetas con condición inicial NC (no carbonatada) y relación a/c de 0.7.

Identificación	Probetas REA	Probetas RECA	Tiempo RECA, días.
(0.70-1.0)-(20-NC)			75
(0.70-2.0)-(20-NC)			75

Tabla 11-b. Inspección visual en probetas con condición inicial NC (no carbonatada) y relación a/c de 0.8.

Identificación	Probetas REA	Probetas RECA	Tiempo RECA, días.
(0.80-1.0)-(20-NC)			75
(0.80-2.0)-(20-NC)			60

Estos grupos de probetas tuvieron una condición de carbonatación inicial NC. Después de la aplicación de la fenolftaleína justo después de la realcalinización se observó una coloración rosa intenso en todo el concreto, esto de acuerdo a lo dicho en el Apartado 2.2.1, indica que todo el concreto se encuentra a un pH superior a 9.5. Después de la recarbonatación existe un visible viraje de coloración en el concreto después de la aplicación del indicador de fenolftaleína. Es decir, al igual que en el proceso de carbonatación, por medio de esta prueba se pueden determinar dos zonas, una con un pH superior a 9.5 (en donde la fenolftaleína cambia a un color rosa intenso) y otra con un pH menor a este valor (en donde la fenolftaleína permanece incolora). Por otro lado, en las probetas recarbonatadas, se constata la presencia de zonas con visibles procesos de corrosión sobre el acero. También puede apreciarse la influencia de la relación a/c en el estado de corrosión del acero. En las series con relación de 0.8 (véase Tabla 11-b) los procesos de corrosión se observan de forma generalizada a diferencia de las mezclas con relación 0.7 (véase Tabla 11-a) en donde la corrosión se presentan principalmente en las nervaduras. En las Tabla 12-a, b y c se presenta el registro de la inspección visual de las probetas con condición inicial de carbonatación CP (carbonatadas parcialmente).

Tabla 12-a. Inspección visual en probetas con condición inicial CP (carbonatadas parcialmente) y Relación a/c de 0.65.

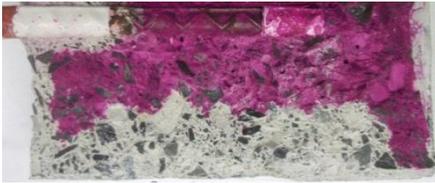
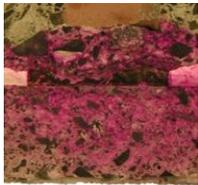
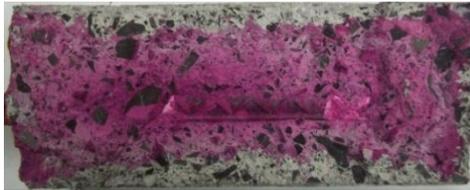
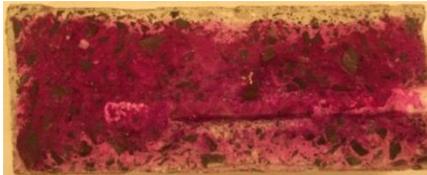
Identificación	Carbonatación inicial	Probetas REA	Probetas RECA	T RECA, días.
(0.65-1.0)-(40-CP)				75
(0.65-2.0)-(40-CP)				75

Tabla 12-b. Inspección visual en probetas con condición inicial CP (carbonatadas parcialmente) y relación a/c de 0.7

Identificación	Carbonatación inicial	Probetas REA	Probetas RECA	T RECA, días.
(0.70-1.0)-(20-CP)				60
(0.70-2.0)-(20-CP)				45

Tabla 12-c. Inspección visual en probetas con condición inicial CP (carbonatadas parcialmente) y relación a/c de 0.8

Identificación	Carbonatación inicial	Probetas REA	Probetas RECA	T RECA, días.
(0.80-1.0)-(20-CP)				60
(0.80-2.0)-(20-CP)				45

En las Tablas 12-a,b y c se muestran las probetas en su condición de carbonatación inicial, después de aplicar la técnica de realcalinización y al final del periodo de recarbonatación.

En la condición inicial de carbonatación puede observarse el viraje de coloración de la fenolftaleína, con esto se pone en evidencia que el pH en la zona B es inferior a 9.5, en tanto que en la zona A (al nivel de la varilla) se encuentra un pH superior a este valor. Después de aplicar la técnica de realcalinización, se observó una coloración rosa en toda la zona tratada. Al terminar la etapa de recarbonatación se aprecia una coloración rosa tenue en la zona B (zona exterior, que inicialmente fue carbonatada) y en la zona A (concreto al nivel del acero) el concreto permaneció incoloro, lo que indica que en la zona A que inicialmente no fue carbonatada se presenta un mecanismo de carbonatación similar al de las probetas con condición inicial de carbonatación NC.

Con respecto al estado de corrosión del acero, en las series con relación a/c de 0.65 y 0.8 (véase Tabla 12-a y c), se aprecia un estado de corrosión similar al que se encontró en las probetas con condición inicial de carbonatación NC, ya que se observan procesos de corrosión de una forma generalizada sobre el área de estudio del acero. No obstante, en las probetas con relación a/c de 0.7 (véase Tabla 12-b) las manchas de corrosión se presentan de forma aislada y principalmente sobre las nervaduras.

Es importante señalar que en la mezcla con relación a/c de 0.65 se utilizó cemento CPC 30R, mientras que en la mezcla con relación a/c de 0.8 se utilizó CPO 40. Posiblemente esto explique el comportamiento similar que presentaron estas mezclas en recarbonatación. Al respecto, en los resultados del análisis químico no se presentaron diferencias significativas en cuanto al contenido de los óxidos alcalinos de estos dos cementos. Sin embargo, se apreció una considerable mayor pérdida por ignición en el cemento CPC 30R (véase Tabla 8), esto indicaría una posible mayor presencia de materiales suplementarios (estos materiales principalmente actúan como filler debido a que no reaccionan dentro del concreto) en dicho cemento, y por tanto la matriz cementante formada es menos densa que la formada con un cemento CPO 40.

En la Tabla 13-a y 13-b se presenta el registro de las probetas con condición inicial de carbonatación CT.

Tabla 13-a. Inspección visual en probetas con condición inicial CT (carbonatadas totalmente) y relación a/c de 0.65.

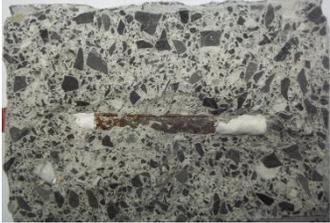
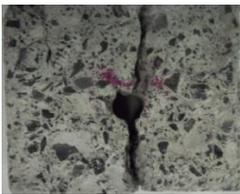
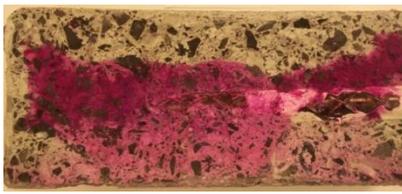
Identificación	Carbonatación inicial	Probetas REA	Probetas RECA	T RECA, días.
(0.65-1.0)-(40-CT)				75
(0.65-2.0)-(40-CT)				75
(0.65-2.0)-(20-CT)				45
(0.65-1.0)-(20-CT)B				100

Tabla 13-b. Inspección visual en probetas con condición inicial CT (carbonatadas totalmente) y relación a/c de 0.8.

Identificación	Carbonatación inicial	Probetas REA	Probetas RECA	T RECA, días.
(0.80-1.0)-(20-CT)				45

En las Tablas 13-a y b se muestran las probetas en su condición de carbonatación inicial, después de aplicar la técnica de realcalinización y al final del periodo de recarbonatación.

En la condición inicial de carbonatación se observó que en todos los grupos la fenolftaleína no presentó coloración en el concreto, por lo que se estima que su pH es inferior a 9.5, esto se observó en la zona A (zona al nivel de la varilla), así como también en la zona B (zona exterior que posteriormente fue realcalinizada). Después la aplicación de la técnica de realcalinización, en todos los grupos se observa una coloración rosa en la zona del concreto tratado.

Al final de la etapa de recarbonatación se observó que la fenolftaleína brindaba al concreto una coloración rosa. Cabe resaltar que en las probetas con recubrimiento de 40 mm y cuando se utilizó una densidad de corriente de 1 A/m<sup>2</sup> durante la realcalinización esta coloración rosa tenue no alcanzó a cubrir toda la zona tratada. Con respecto al estado de corrosión del acero, se observaron procesos de corrosión aislados, principalmente en las nervaduras. También es importante mencionar que el grupo de probetas (0.65-1.0)-(20-CT)B fue una serie de prueba y que tuvo una exposición de 100 días de recarbonatación a una concentración de CO<sub>2</sub> de 3, 4 y 5%.

De manera general, al final de la recarbonatación, se realizó la inspección visual utilizando el indicador fenolftaleína y se puede resumir lo siguiente:

- a) En el concreto :
- Con carbonatación inicial NC, el concreto presenta una coloración similar que en un concreto no realcalinizado. Es decir, se presenta un viraje de color (frente de carbonatación) hacia un rosa intenso.
  - Con carbonatación inicial CP, el concreto pinta rosa tenue en la zona B (zona exterior carbonatada y realcalinizada) y permanece incoloro en la zona A (zona no carbonatada al nivel del acero)
  - Con carbonatación inicial CT, el concreto pinta rosa tenue en toda el área realcalinizada.
- b) Con respecto al estado de corrosión del acero:
- En el acero se presentan productos de corrosión principalmente en los grupos en donde se utilizó una relación a/c de 0.8.

Contrastando las observaciones realizadas a partir de la inspección visual con los resultados obtenidos de las medidas de pH se tiene, por un lado, que el color rosa tenue evidenciado con la fenolftaleína generalmente fue encontrado en los concretos con un pH que osciló entre 10 y 10.5 (véanse Figuras 35a, b, c y f). Esta coloración rosa tenue, que fue característica de las probetas con carbonatación inicial CT, se mantuvo durante todo el tiempo de exposición de las probetas en recarbonatación. Esto infiere que las condiciones generadas al aplicar la realcalinización en estos concretos provocarían una mayor resistencia del concreto a ser carbonatado nuevamente.

Por otro lado, las medidas de  $i_{corr}$  realizadas sobre el acero parecen corresponder con la inspección visual, encontrando velocidades moderadas y bajas en probetas con carbonatación inicial NC y CT, excepto en las probetas con condición inicial NC y relación a/c de 0.8 en donde se observaron los procesos de corrosión de forma generalizada.

La evidencia recabada permite inferir que la aplicación de la realcalinización en concretos con una condición inicial de carbonatación CT genera las condiciones que aportan una mayor estabilidad al acero.

## 4. 8 Discusión de resultados

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el comportamiento que aporta la realcalinización de estructuras de concreto reforzado cuando esta técnica es utilizada como método preventivo. Dicha evaluación se centró en el análisis de diversos parámetros en la etapa de postratamiento del sistema acero-concreto. Para esto, se realizó un diseño de experimentos que consideró el efecto de la influencia de la corriente aplicada, del recubrimiento del concreto, del tipo de concreto y del estado de carbonatación inicial antes de aplicar la técnica. A continuación en primer lugar se discutirá lo observado con el seguimiento electroquímico del estado de corrosión del acero y posteriormente se discutirán los parámetros que posiblemente influyen en la efectividad de la aplicación de la realcalinización.

### 4.8.1 Seguimiento electroquímico del estado de corrosión del acero.

El estado de corrosión del acero se monitoreó por medio de la medida de potenciales del acero. Se encontró que posterior a un periodo de despolarización, después de aplicar la técnica de realcalinización, los potenciales mostraron una cierta estabilidad situándose en valores cercanos a los -200 mV vs SCE, lo cual corresponde a lo encontrado por Mietz (Mietz, 1998) Este valor concuerda con el potencial del acero en estado pasivo cuando éste se encuentra en un medio húmedo. Posterior a este equilibrio y debido a la continua exposición a la alta concentración de CO<sub>2</sub> de las probetas que provocó una disminución del pH del concreto, el acero presentó una tendencia a tener un potencial más negativo en las series con condición inicial de carbonatación NC y CP. Sin embargo, después de este periodo todas las series de probetas tienden a regresar al estado de equilibrio de -200 mV como se mostró en las Figuras 41-a y b., lo cual no es congruente con los criterios de interpretación (indicados

en ASTM C-876-91). A continuación se presenta lo descrito anteriormente por medio de la relación entre pH del concreto en la zona A (al nivel del acero) y el potencial del acero que se muestra en la Figura 44.

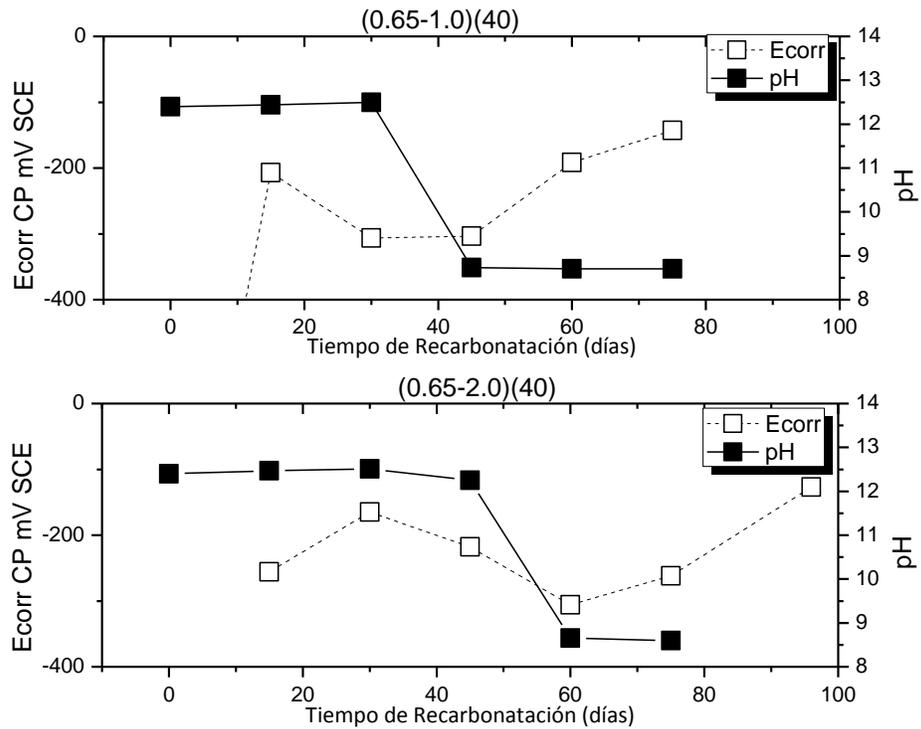


Figura 44. Comportamiento del potencial de corrosión durante el proceso de recarbonatación.

Como se observa, después de 30 días de recarbonatación existe un descenso en el pH del concreto que corresponde con un descenso en el potencial del acero. Sin embargo, aun y cuando existen las condiciones para que el potencial se mantenga en valores más negativos, éstos tienden a regresar a potenciales que indican una nueva pasivación o repasivación del acero. Sin embargo, como ya ha sido mencionado, estos resultados contrastan con el estado físico del acero observado al final de la recarbonatación. Al respecto, se infiere que la aplicación de los criterios establecidos en ASTM C-876-91 no debe ser de manera directa, ya que existe una alteración del potencial de equilibrio del acero por efecto de la corriente utilizada en la aplicación de la técnica de realcalinización. Por otro lado, el incremento de los valores del potencial del acero

hacia el final del periodo de recarbonatación, corresponde con el incremento en la resistividad eléctrica del concreto en este mismo periodo (véanse Figuras 43a a la 43c). Cabe resaltar que se observó una mayor estabilidad en los potenciales del grupo de probetas con carbonatación inicial CT, lo cual puede ser un indicio de una mayor estabilidad de las condiciones alcalinas logradas alrededor del acero producto de la realcalinización.

También se realizó el seguimiento de la velocidad de corrosión del acero, donde se encontró que las probetas con condición inicial de carbonatación NC y CT presentaron una mayor estabilidad encontrando velocidades de corrosión moderadas y bajas (véanse Figuras 42-a y c), esto fue reafirmado al realizar la inspección visual (véanse Tablas 11-a, 13-a y b). Estos resultados permiten suponer que posterior a la alteración del potencial de reposo del acero, producto de la aplicación de una corriente directa durante el proceso de realcalinización, existe una mayor relación del estado de corrosión del acero con la medida de la velocidad de corrosión que con la medida de los potenciales del acero.

#### 4.8.2 Influencia de la corriente aplicada

Cabe recordar que para la evaluación del efecto de este parámetro se decidió aplicar dos densidades de corriente sobre las series de probetas de concreto, se fijaron densidades de 1 y 2 A/m<sup>2</sup> con respecto al acero descubierto.

En las Figuras 40-a y b se presenta el efecto de la recarbonatación sobre el pH del concreto. En las series con carbonatación parcial en la zona A (al nivel de la varilla) inicialmente se presentó un pH superior a 12, disminuyendo en ambas series a valores inferiores a 9 al final de la recarbonatación, independientemente de la densidad de corriente aplicada. Sin embargo, puede observarse que cuando se utiliza 1 A/ m<sup>2</sup> esta transición se presenta en un tiempo de entre 30 y 45 días de recarbonatación, mientras

que cuando se utilizó una densidad de corriente de  $2 \text{ A/m}^2$  esta transición sucedió en el periodo comprendido entre los días 45 y 60 de recarbonatación. En términos generales, este comportamiento podría relacionarse con una mayor resistencia a la recarbonatación cuando se utilizan  $2 \text{ A/cm}^2$ . También, durante la inspección visual se observó (véase Tabla13-a) que después de 75 días de recarbonatación en las series de probetas (0.65-1.0)-(40-CT) (véase Tabla 7) el color rosa tenue que presentó el concreto, después de aplicar la realcalinización, prácticamente ha desaparecido en la zona A (al nivel de la varilla), mientras que en la serie de probetas (0.65-2.0)-(40-CT), aún se encuentra esta coloración. Esto corresponde con las medidas electroquímicas de velocidad de corrosión mostradas en la Figura 42-c, en donde se observa que las velocidades de corrosión son menores cuando se aplica una densidad de corriente de  $2 \text{ A/m}^2$  que cuando es aplicada una densidad de corriente de  $1 \text{ A/m}^2$ .

#### 4.8.3 Influencia del espesor de recubrimiento

Se utilizaron dos espesores de recubrimientos de concreto diferentes, de 20 y 40 mm para observar su influencia en la efectividad de la realcalinización.

Después de aplicar la realcalinización al concreto se observó un efecto con respecto al espesor del recubrimiento. En la Figura 40-b y 40c se observa que la aplicación de la misma densidad de corriente se puede alcanzar un pH mayor cuando esta es aplicada en un recubrimiento menor, lo cual concuerda con lo encontrado por Mietz (Mietz, 1995). Se puede constatar que un recubrimiento mayor representa mayor exigencia para la aplicación de la técnica de realcalinización, es decir necesita una mayor carga total aplicada para lograr un incremento de alcalinidad similar a la de un concreto con espesor de concreto menor.

En lo que respecta a los resultados obtenidos durante la recarbonatación, se infiere que no existe influencia del espesor de recubrimiento al menos hasta el periodo de

prueba analizado, ya que se observó que el pH del concreto en las zonas A y B tiende a permanecer estable, situándose en valores cercanos a 10.5.

#### 4.8.4 Influencia del tipo de concreto

Es importante señalar que en la mezcla con relación a/c de 0.65 se utilizó cemento CPC 30R, mientras que en la mezcla con relación a/c de 0.8 y 0.7 se utilizó CPO 40. Con respecto a la inducción de la carbonatación del concreto se encontró un comportamiento típico similar al reportado en la bibliografía. Es decir, las probetas con relación a/c de 0.8 se carbonataron más rápido que las probetas con relación a/c de 0.7.

En contraste, el comportamiento similar que presentaron las mezclas 0.8 y 0.65 en recarbonatación puede ser explicada en términos del tipo de cemento utilizado. En efecto, mientras el análisis químico no muestra una diferencia significativa en cuanto al contenido de los óxidos alcalinos de estos dos cementos, si se apreció una considerable mayor pérdida por ignición en el cemento CPC 30R (véase Tabla 8). Como se dijo anteriormente, esto nos indica una posible mayor presencia de materiales suplementarios (estos materiales principalmente actúan como filler debido a que no reaccionan dentro del concreto) y por tanto posiblemente la matriz cementante formada es menos densa que la formada con un cemento CPO 40 cuando se utiliza una misma relación a/c. El efecto de la relación a/c fue compensado con el efecto del tipo de cemento lo que generó unas matrices que tuvieron un comportamiento similar en las series de concreto con relación 0.65 y 0.8.

#### 4.8.5 Influencia la condición de carbonatación inicial.

Se decidió utilizar tres condiciones de carbonatación inicial en el concreto antes de aplicar la técnica de realcalinización: NC (no carbonatado), CP (carbonatado

parcialmente) y CT (carbonatado totalmente) como fue descrito en el diseño experimental (véase sección 3.1.1).

En los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la neutralización ácida (véase Apartado 4.4), se encontró que las probetas con carbonatación inicial NC y CP que fueron realcalinizadas presentaron una mejor capacidad buffer que las probetas realcalinizadas con carbonatación inicial CT (véase Figura 39). Por tanto, en base a esta prueba se esperaba que estos grupos de probetas tuvieran una mayor resistencia a una posterior recarbonatación. Sin embargo, como se muestra en la Figura 45, después haber realizado el proceso de re-exposición acelerada a CO<sub>2</sub> (recarbonatación) se encontró que las probetas con condición inicial de carbonatación CT mantuvieron un pH estable al final del tratamiento que osciló entre 10 y 10.5 a diferencia de las probetas con condición NC y CP, las cuales experimentaron una drástica disminución de pH para el mismo periodo de exposición.

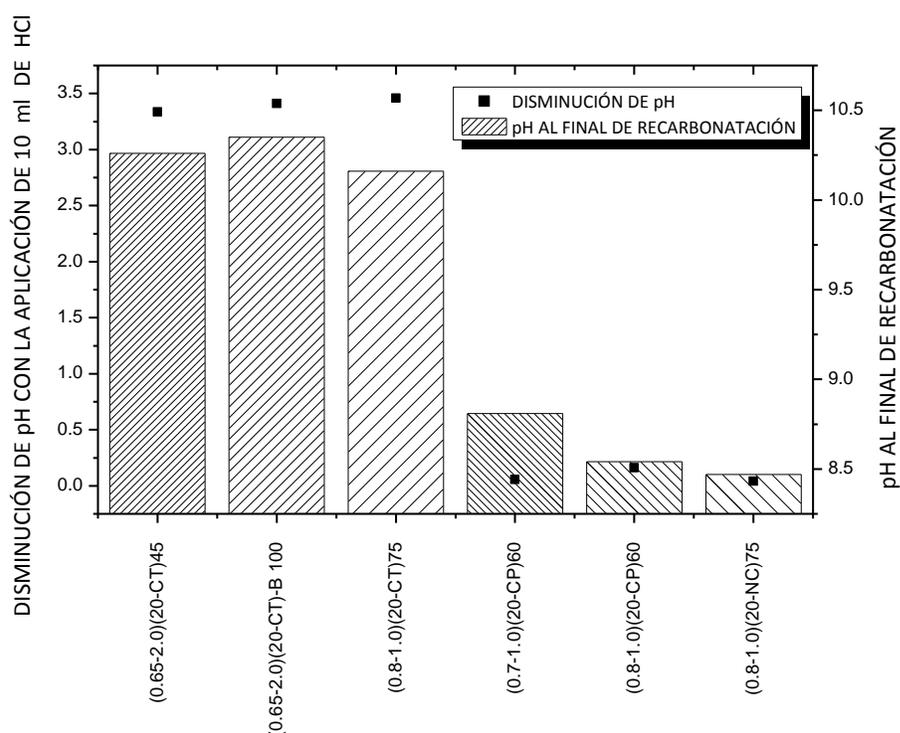


Figura 45. Relación entre el pH después del proceso de recarbonatación y la disminución de pH en la prueba de resistencia a la neutralización.

Dado que en los concretos con condición inicial de carbonatación NC la recarbonatación avanza de igual forma que en la carbonatación inicial del concreto (antes de aplicar la realcalinización), puede esperarse que la realcalinización en concretos con condición inicial de carbonatación CT aporte una mayor estabilidad al acero. Esto puede ser observado con más claridad en la Figura 46.

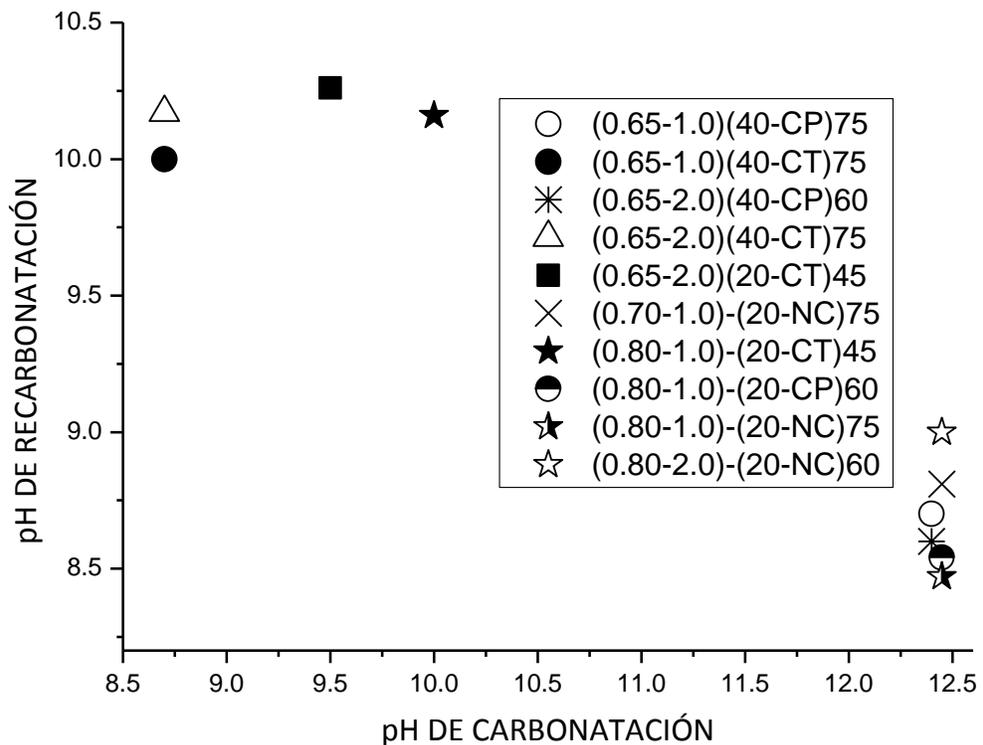


Figura 46. Relación entre el pH inicial de carbonatación y el pH después de recarbonatación.

En las Figuras 45 y 46 los datos fueron tomados de la zona A de concretos con una exposición a recarbonatación de 45 a 75 días, los cuales se presentan al final de la nomenclatura. Puede observarse que el pH de un concreto que inicialmente fue carbonatado tiende a desarrollar una mayor estabilidad que los concretos que inicialmente no fueron carbonatados. Por tanto se constata que la realcalinización en concretos con condición inicial de carbonatación CT presentan una mayor resistencia a

una posterior recarbonatación, estabilizándose en valores de pH que se encuentran entre 10 y 10.5.

Aun y cuando el pH del concreto parece presentar una mayor estabilidad cuando se aplica la técnica de realcalinización con una condición inicial de carbonatación CT, es importante tener presente que investigaciones anteriores (Schiessl, 1998; ACI Committee 222, 1990) han reportado que el valor mínimo de pH para que la capa pasiva se mantenga estable es de 11.5. Esto concuerda con lo observado en el seguimiento de las velocidades de corrosión durante la recarbonatación, en donde se constató que independientemente del pH alcanzado existen procesos de corrosión que ya han iniciado. Sin embargo, las velocidades de corrosión fueron de moderadas a bajas, por lo que la aplicación de la técnica de realcalinización bajo estas condiciones permitiría garantizar un incremento considerable de la vida residual. Cabe resaltar que el proceso de recarbonatación fue un proceso acelerado, si bien no fue objetivo de esta investigación encontrar una relación de la carbonatación acelerada con la carbonatación natural, se puede considerar que el incremento en la cinética del proceso que fue realizado con respecto a la ambiental resultó ser 26 veces más rápida (Sisomphon K. et al., 2007).

## CONCLUSIONES

Es sabido que una de las principales causas de deterioro de las estructuras de concreto reforzado es la corrosión del acero de refuerzo, y dado que el fenómeno de carbonatación es de primordial importancia en zonas urbano-industriales, se decidió realizar un estudio sobre la evaluación de la técnica de realcalinización, el cual se enfocó primordialmente en describir el efecto postratamiento que provoca esta técnica. Las principales conclusiones obtenidas son:

- Las resistencias a la compresión mostraron un comportamiento de un concreto considerado como convencional.
- El análisis químico del cemento mostró que no existe una diferencia notoria en el contenido de óxidos alcalinos en los dos tipos de cemento utilizados (CPO 30R y CPC 40) que pueda alterar los resultados en las medidas de pH y carbonatación del concreto. Sin embargo, el comportamiento similar encontrado en concretos con relación a/c de 0.65 (CPC 30R) y de 0.8 (CPO 40), se atribuye a la mayor pérdida por ignición obtenida en el cemento CPC 30R.
- Con respecto a la inducción de carbonatación del concreto se encontró el comportamiento típico mencionado en la bibliografía, es decir, las probetas con relación a/c de 0.8 se carbonataron más rápido que las probetas con relación a/c de 0.7.
- La resistencia a la recarbonatación fue mayor cuando fue aplicada una densidad de corriente de  $2 \text{ A/m}^2$ , esto correspondió con la inspección visual y las medidas de velocidad de corrosión.
- El aumento de potasio en la zona A (al nivel del acero) resultó ser significativo con respecto a un concreto no tratado. De acuerdo a las pruebas de TGA/DTA se puede deducir que el potasio introducido en el

concreto formó inicialmente hidróxidos de potasio y que al igual que el hidróxido de calcio (portlandita) fue consumido durante la recarbonatación, como se puede observar en la difracción de Rayos X, para formar carbonatos de potasio y calcio. Sin embargo, el comportamiento de los compuestos presentes durante la recarbonatación depende de la carbonatación inicial del concreto antes de aplicar la técnica de realcalinización.

- El mecanismo de recarbonatación se presentó en el concreto de dos formas diferentes las cuales dependieron del estado inicial de carbonatación. En un concreto que inicialmente fue carbonatado la disminución del pH se estabilizó en un valor aproximado de entre 10 y 10.5, estos valores nos permiten suponer la formación de bicarbonato de potasio, el cual es considerado como un compuesto resistente a la carbonatación. Cuando el concreto no está carbonatado (lo cual se puede encontrar al nivel de la varilla en un concreto parcialmente carbonatado) el proceso de recarbonatación es similar que una carbonatación inicial, por lo que se presenta un frente de carbonatación y la disminución del pH se estabiliza en un valor inferior a 9.
- De manera general, al final de la realcalinización, la coloración rosa tenue del concreto fue encontrado sistemáticamente en zonas en donde el pH se encontraba en valores entre 10 y 10.5.
- Con respecto al estado de corrosión del acero se observó que después de 20 días de despolarización, se encontró un equilibrio del potencial del acero de aproximadamente -200 mV que corresponde con lo encontrado en el trabajo de Mietz, este valor concuerda con el potencial del acero en estado pasivo cuando se encuentra en un medio húmedo.
- Las velocidades de corrosión del acero al final de la recarbonatación fueron moderadas para los grupos con carbonatación inicial NC y CT, para los grupos CP moderadas y altas para los grupos CP y CT., Por tanto, se concluye que la condición óptima de carbonatación antes de ser aplicada la

realcalinización es aquella en donde el concreto se encuentra totalmente carbonatado (llamado CT). Es importante señalar que dicha condición presupone que las velocidades de corrosión son de moderadas a bajas, ya que se ha demostrado que cuando el acero presenta un estado avanzado de corrosión, la técnica de realcalinización es poco efectiva.

## RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Es conveniente evaluar la efectividad de la técnica de realcalinización en diferentes grados de corrosión del acero refuerzo.

Es recomendable observar a largo plazo el comportamiento postratamiento del acero hasta encontrar una corrosión severa para corroborar los resultados obtenidos. De esta forma contar con mayores argumentos para clarificar el efecto de la densidad de corriente aplicada y la condición de carbonatación inicial.

Se considera importante realizar estudios sobre la efectividad de la técnica de realcalinización en estructuras existentes, esto con el fin de comparar los trabajos de laboratorio con trabajos que sean realizados en estructuras reales.

## REFERENCIAS

ASTM C-876-91

A. A. Rahman, F.P. Glasser, Comparative studies of the carbonation of hydrated cements, *Adv. Cem. Res.* 2 (6) (1989) 49–54.

ACI Committee 222. Corrosion of metals in concrete; ACI 222r-89. In: American Concrete Institute. *Manual of concrete practice*. Detroit, 1990. v.1.

Aïtcin Pierre Claude, *Ingeniería de los Cementantes Hidráulicos*, Editado por “Cuerpo Académico de Tecnología del Concreto”, FIC-UANL, Monterrey N.L., México, Noviembre del 2005.

Andrade C, Helene P.; *Rehabilitar*, Red temática XV.F, CYTED; 2003.

Andrade Carmen; González J.A.  $\text{NaNO}_2$  – Un inhibidor de corrosión de armaduras. *Revista Techne* nº 16. São Paulo: Editora Pini, p.16-25. 1995.

Andrade, C., Alonso, C., y González, J.A. An initial effort to use the corrosion rate measurement for estimating rebar durability. *Corrosion rates of steel in concrete*, ASTM STP 1065, N.S. Berke, V. Chaker, and Whiting, Eds., American Society for testing and materials, pp. 29-37 Philadelphia, 1990.

Andrade Carmen, *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosión de armaduras*. Carmona, Antônio e Helene, Paulo R.L. São Paulo: Editora Pini , 1992. 104P.

Ávila Javier / Genescá Joan, *Más Allá De La Herrumbre*, Fondo de cultura económica, segunda edición, México, 1996.

Baron J.; Ollivier, J-P. (eds.) *La Durabilité des bétons*. Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1992. 453.

Broomfield J. P.; *Electrochemical Realkalisation of Steel Reinforced Concrete; Corrosion Prevention Association; USA 2004*.

Broomfield J. P.; Carbonation and its effects in reinforced concrete, *Materials Performance; ProQuest Science Journals*; pg. 64, 2000.

Broomfield P. John ,Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, investigation and repair, British Library Library of Congress, Routledge London, 1997.

Castro Borges P.; “Influencia de la acción del medio ambiente en las patologías (corrosión) y durabilidad del concreto”, Propuesta de Investigación- Proyecto de Grupo de Investigación Básica, SEP –CONASYT 2004.

Castro B.P. y Castillo R.; Corrosión en estructuras de concreto reforzado; Construcción y tecnología; México, 1995.

Castellote M., Llorente I.; In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction: Electroosmotic flux and portlandite formation; Institute of Construction Sciences “Eduardo Torroja”; España, 2005.

CEB Bulletin 238. New approach to durability design. An example for carbonation induced corrosion. Lausanne; 1997.

C. Hanin, Corrosion resistant design guidelines for Portland cement concrete, materials performance, 42, April 1984.

Cheng-Feng Chang, Jing-Wen Chen; The experimental investigation of concrete carbonation depth; Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University; Taiwan,2004.

Comité Européen du Béton.- Design Guide to Durable Concrete Structures.- Thomas Therford Publishers.- G.9.- 1992.

CUR, Carbonatatie lichtbeton: literatuurstudie, CUR Rapport 73, Betonvereniging, Zoetermeer, The Netherlands, 1975.

Eggers M.; Oliveira P.S.F., Realcalinización y desalinización – Nuevas técnicas electroquímicas de recuperación de estructuras de concreto. Revista Techne nº 30. São Paulo: Editora Pini, p.41-45. 1997.

Fajardo G., Escadeillas G., Arliguie G., Electrochemical chloride extraction from steel reinforced concrete specimens contaminated from artificial sea–water, Corrosion Science, 48 (2006) 110 – 125, ISSN: 0010-938X.

Feliú S., González J.A., Feliú S. Jr Y Andrade C., Relationship between conductivity of concrete and corrosion of reinforcing bars. British Corrosion Journal. Vol 24, Nº 3, 1989

FIB Bulletin 34. Model code for service life design. Lausanne; 2006.

Garcés Terradillos Pedro, Climent Llorca Miguel Ángel, Zornoza Gómez Emilio, "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado", Editorial Club Universitario, España, 2008.

Gentil Vicente, Corrosión. 4ªed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 341p.

Glass G. K., Reddy B., Buenfeld N. R.; Corrosion inhibition in concrete arising from its acid neutralisation capacity, department of civil and environmental engineering; imperial college of science; technology and medicine; UK, 1999.

G. Villain, M. Thiery; Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry; Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; France 2007.

Gonçalves A.; Andrade, C.; Castellote, M. Procedimientos de reparación y protección de armaduras. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. São Paulo: Editores Paulo Helene e Fernanda Pereira , 2003.p. 341-376 HELENE.

González F., Fajardo G., Arlguie G., Juárez C., Escadeillas G., Prevención de la corrosión del acero de refuerzo mediante la realcalinización electroquímica (RE), Universidad Autónoma de Nuevo León-Facultad de Ingeniería Civil, X Congreso Latinoamericano de Patología, CONPAT 2009, Valparaíso-Chile.

González J.A., Cobo A.; On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures, Materials and Corrosion; España, 2000.

G.W. Groves, A. Brough, I.G. Richardson, C.M. Dobson, Progressive changes in the structure of hardened C3S cement pastes due to carbonation, J. Am. Ceram. Soc. 74 (11) (1991) 2891–2896.

H.P. Klug, L.E. Alexander, X-ray Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials, John Wiley & Sons, New York, 1967.

Helene P. R; Service life of concrete structures, in VI congress of quality control (CONPAT 1997), University of Rio Grande del Sur, vol. 1 (1997), pp. 1-30.

Helene P. R.; Corrosión en armaduras para concreto armado. São Paulo: Editora Pini – Instituto de pesquisas Tecnológicas IPT, 1986. 47p.

Hondel A. W.M., Polder R.B.; Reinforcement Corrosion; Laboratory investigation of electrochemical realkalisation of reinforced concrete; TNO Building and Construction Research; The Netherlands.

J. Mietz, Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures, a state of the art report, European federation of Corrosion Publication, 24, IOM Communications, London 1998.

Krajčič L., Janotka I.; Measurement Techniques for Rapid Assessment of Carbonation in Concrete; ACI Materials Journal; V. 97, No. 2, March-April 2000.

LNEC E465. Concrete. Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS. Lisbon: LNEC; 2007.

LNEC E391. Concrete. Determination of the carbonation resistance. Lisbon, LNEC; 1993.

López Celis Raquel, Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México, Laboratorios acreditados por EMA, SCT, Publicación Técnica No 292 Sanfandila, Qro 2006.

Marques P.F. , Costa A. Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies, Construction and Building Materials, IST – Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, 2009.

Mehta P. K.; High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete For Sustainable Development; International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, University of California, Berkeley, USA, 2004.

Mehta, P. K., “Concrete Technology for Sustainable Development,” Concrete International, V. 21, No. 11, Nov. 1999, pp. 47-53.

M. Thiery, G. Villain; Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics; Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; France 2007.

M. Thiery, V. Baroghel; Numerical modeling of concrete carbonation based on durability indicators; Special Publication, international concrete research, marzo 22 del 2006

Mehta Kumar P., M. Monteiro Paulo J., “Concrete”, McGraw-Hill, Third Edition, Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley, 2006.

Mena Ferrer Manuel.- Durabilidad de Estructuras de Concreto en México.- IMCYC.- Primera Edición.- México.- 2005. pp. 31-32, pp. 90, pp. 34.

Mietz J. (ed.), "Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structures—A State of the Art Report," EFC Publication No. 24, 1998 (London, UK: EFC).

Miller J.B., Structural aspects of high powered electrochemical treatment of reinforced concrete, in Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, (ed. Swamy, R.N.), Sheffield Academic Press 1994, 1499-1514.

Miranda J.M., González J.A.; Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures; México, 2005.

Monteiro E. B., Rehabilitación de estructuras de concreto, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Ibracon, Cap. 36, p.1109 – 1125, V. 2, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005.

N. Kashino, Investigation in to limit of initial corrosion in existing RC structures, in: Durability Building Materials and Components, 3, pp 176-186, 1984.

Neville A., Maintenance and Durability of Concrete Structures. Concrete International. November 2001. O. E. Gjory and O. Vannesland, sea salts and alkalinity of concrete, ACI journal, title 73, 42, p. 512, 1976.

N. Rafai, H. Hornain, G. Villain, V. Baroghel-Bouny, G. Platret, T. Chaussadent, Comparison and validity of carbonation measurement methods (in French), Rev. Fr. Génie Civ. 6 (2) (2002) 251–274.

Orozco C. R., Martínez M. E.A., Galván M. R., Ramírez R.J.L., Fernández G. I.; Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico; La Ciencia y el Hombre, Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Veracruzana; Volumen XX, No. 2; México, 2007.

Orozco J.; Cálculo de las pérdidas económicas por corrosión en el Estado de Yucatán y su impacto en el PIB estatal; CINVESTAV; Documento inédito; Corrosión de Estructuras de Concreto Armado. Cap. I; 1998.

O. Vannesland, Proceedings of Nordic Concrete Congress, Odense, Seamark, 1987.

Polder RB. Test method for on-site measurement of resistivity of concrete—a RILEM TC-154 technical recommendation. Constr Build Mater 2001;15(2–3):125–31.

Polito Giulliano, Corrosión en estructuras de concreto armado: Causas, Mecanismos, prevención y recuperación; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Janeiro / 2006.

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.

Rodríguez J., Ortega L., Y García M., Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón mediante un equipo desarrollado dentro del proyecto Eureka EU-401. Hormigón y acero. 4º trimestre 1993.

Sanjuán M. A., Andrade C.; Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions; Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones; Instituto de Ciencias de la Construcción 'Eduardo Torroja; Advances in Cement Research; España 2003.

Sergi , R.J. Walker, C.L. Page, "Mechanisms and Criteria for the Realkalisation of Concrete," in Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, eds. C.L. Page, P.B. Bamforth, J.W. Figg (Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 1996), pp. 491-500.

Sisomphon K., Franke L.; Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials; Department of Building Physics and Building Materials, Technical University Hamburg-Harburg; Alemania 2007.

Sitter, W.R.; Cost for service life optimization. The "law of fives" . In CEB-RILEM. Durability of concrete structures. Proceedings of the international workshop held in copenhagen, on 18-20 May 1983. Copenhagen, 1984 (Workshop Report by Steen Rostam).

Schiessl P., Lay S., LIFECON DELIVERABLE D 3.2 Service Life Models, Technische Universität München, 2003.

T. de Rincon, O. Rincon, Electrochemical evolution of mortar based on acrylic and epoxy resins used to repair concrete extructures, 1st. Mexican Symposium and 2nd. International Workshop on Metallic Corrosion, Merida, Mexico 1994.

Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete, PhD thesis, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Stockholm, 1982.

Uller Leonardo, Trocónis de Rincon Oladis; DURAR, Red Temática XV.B, Durabilidad de la Armadura; CYTED, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en

Estructuras de Hormigon Armado; Programa Iberoamericano de la Ciencia y la Tecnología; 2da. Edición, Julio de 1998.

Weichung Yeih, Jiang Jhy Chang; A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete, Construction and Building Materials, Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, 2 Pei-Ning Road, Keelung 202, Taiwan ROC, 2005.

Work in Progress by CEN, "Electrochemical remediation of reinforced concrete—Part 1: Realkalisation" (Brussels, Belgium: CEN).

[http://www.engineeringtoolbox.com/bases-ph-d\\_402.html](http://www.engineeringtoolbox.com/bases-ph-d_402.html), lunes, 10 de octubre de 2011 12:57:09 a.m.

## APÉNDICE 1

✓ Diagramas TGA/DTA del grupo (0.8-1.0) (20-CP) en la zona B

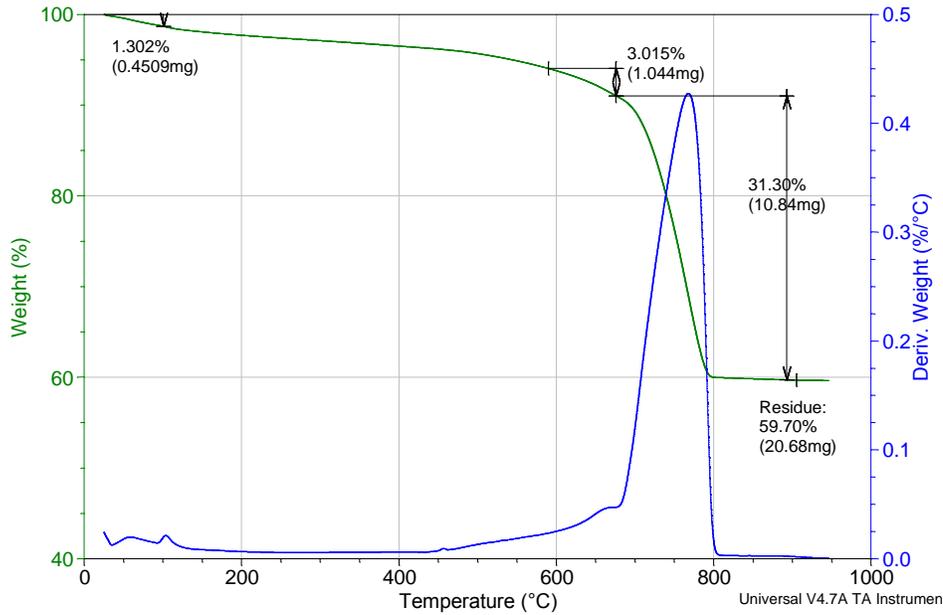


Figura 47-a. Análisis DTA/TGA de la zona B (zona exterior a realcalinizar) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 antes de ser realcalinado.

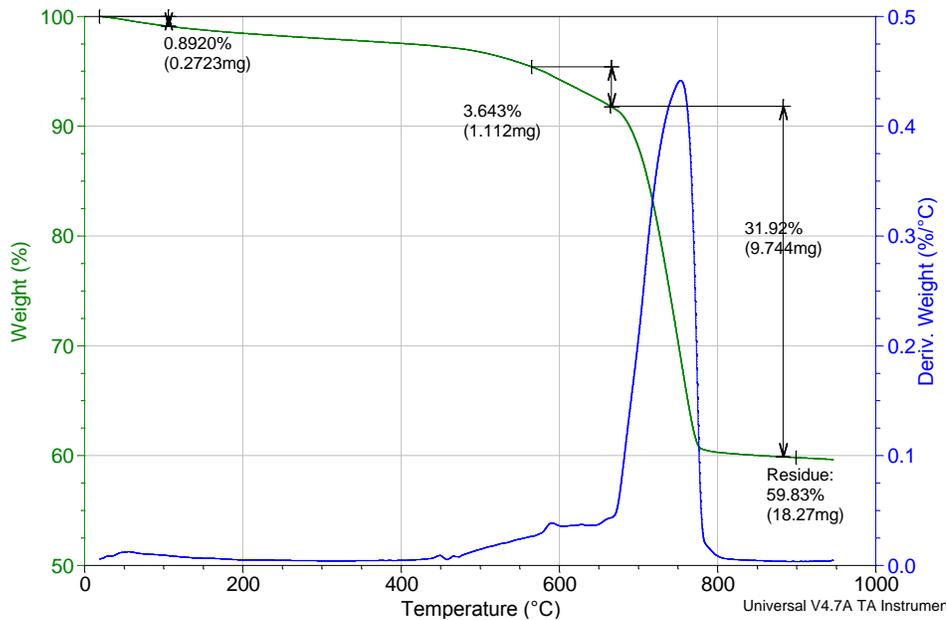


Figura 47-b. Análisis DTA/TGA de la zona B (zona exterior realcalinizada) en un concreto del grupo (0.8-1.0)(20-CP) con relación a/c de 0.8 después de ser realcalinado.

## APÉNDICE 2

✓ Registro de la observación en MEB del grupo (0.8-1.0) (20-CT).

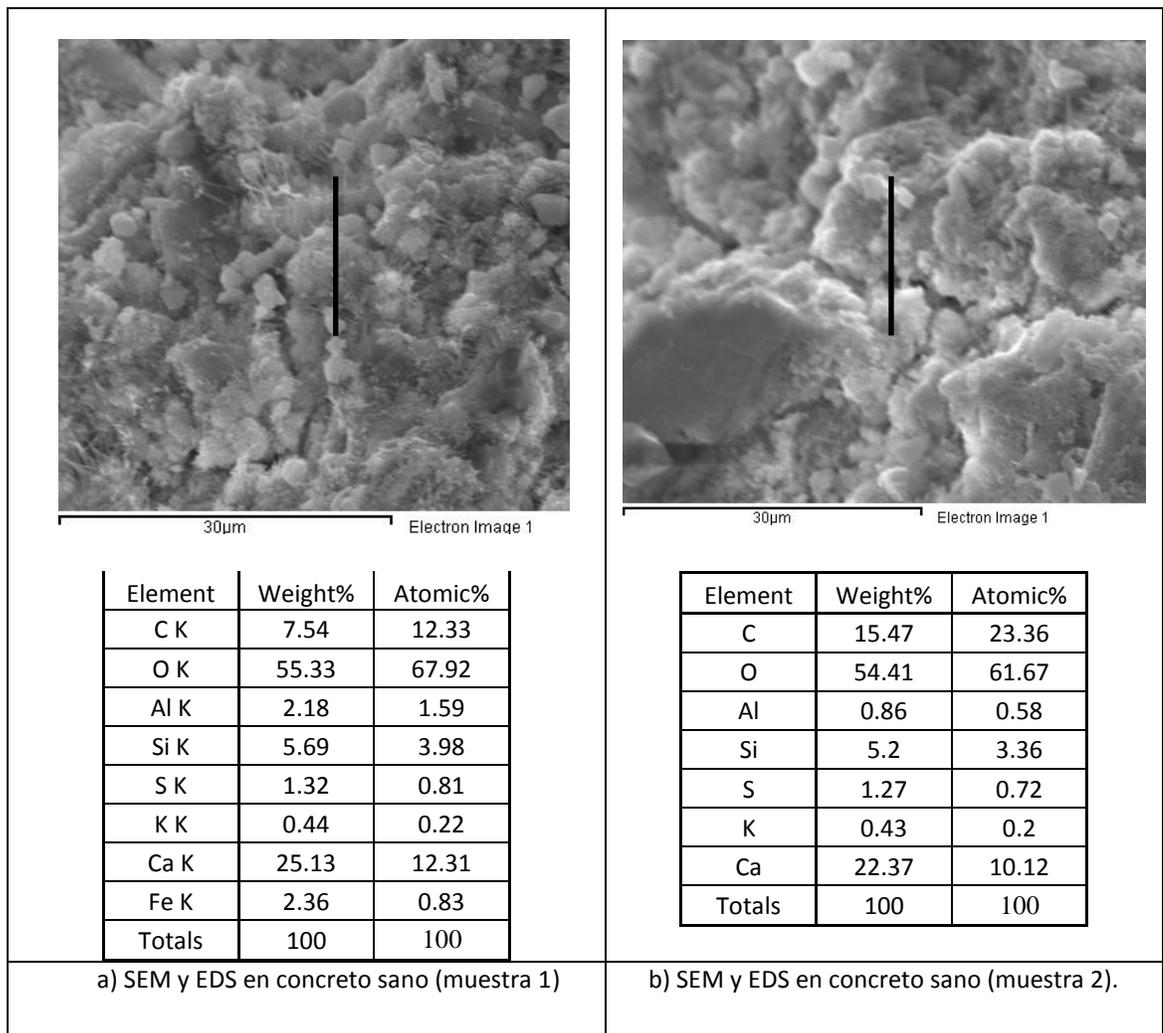


Figura 48-a. Observación en MEB de concreto sano

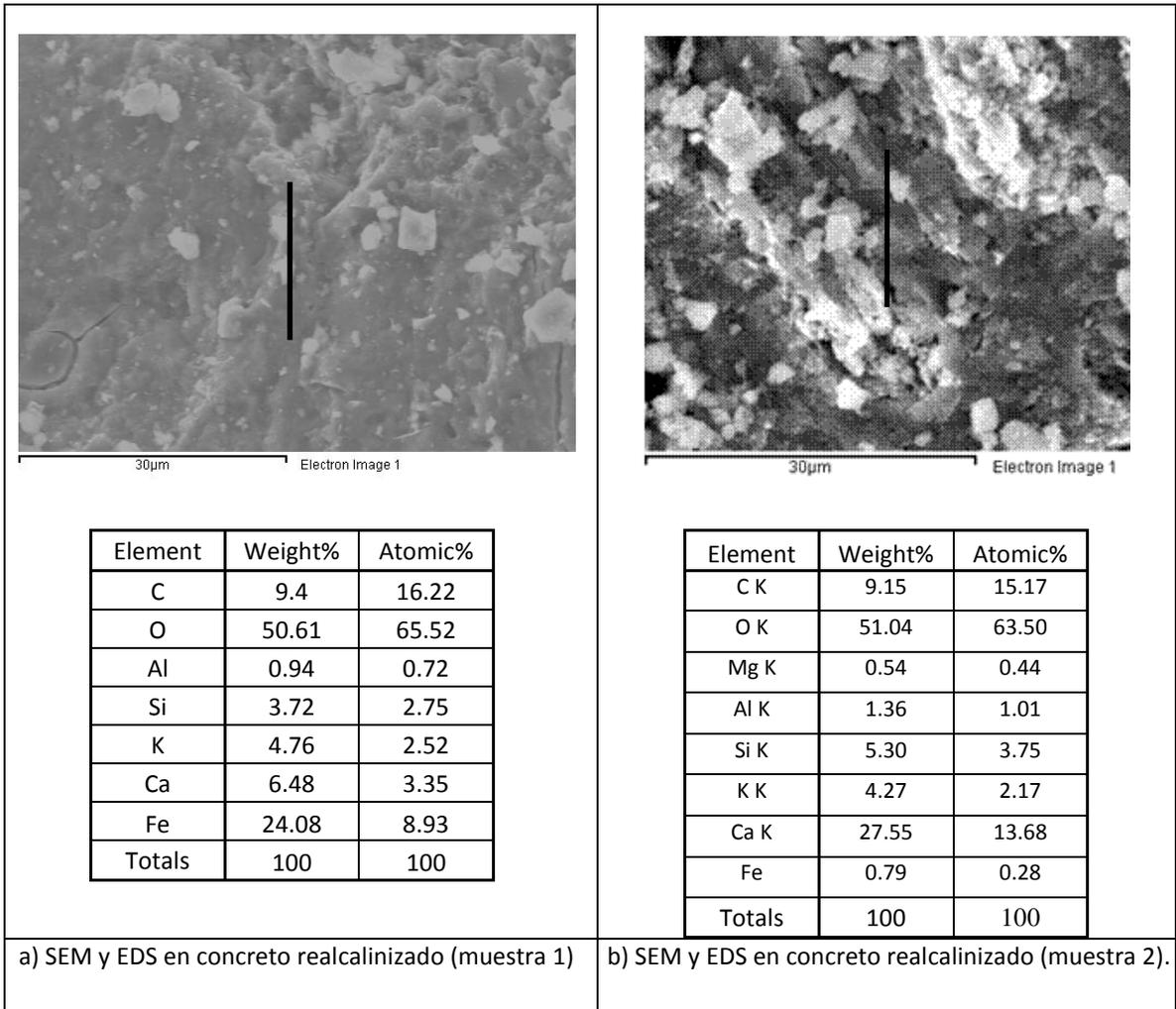


Figura 48-b. Observación en MEB de concreto realcalinizado en la zona A