

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



**TÍTULO:**

**EFFECTO DEL USO DE CENIZA VOLANTE EN EL PROCESO DE  
AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO POR CORROSIÓN DEL ACERO DE  
REFUERZO.**

**POR:**

**ING. ARMANDO ESCOBAR ROJAS**

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS con orientación en  
Materiales de Construcción

**Director de tesis:** Dr. Pedro Leobardo Tamez Valdez.

**Co-director de tesis:** Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel.

**Marzo de 2012**



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Oficio SDEPI-077-2012**

**ING. LÁZARO VARGAS GUERRA**

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

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el **Ing. Armando Escobar Rojas**, 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 14 de marzo del 2012.

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



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION

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)



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Oficio SDEPI-077-2012**

**ING. LÁZARO VARGAS GUERRA**

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

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el **Ing. Armando Escobar Rojas**, 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 14 de marzo del 2012.

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



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION

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)



Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.  
Departamento de Diseño e Integridad Materiales  
Compuestos  
Grupo Corrosión  
Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua  
Chihuahua, Chihuahua. México.

---

Chihuahua, Chih. a 29 de Febrero del 2012

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

En relación a su oficio SDEPI-056-2012 en el que me informa que fui designado Evaluador de la Tesis: *"Efecto del uso de Ceniza Volante en el Proceso de Agrietamiento del concreto por corrosión del Acero de Refuerzo"* que presenta Ing. Armando Escobar Rojas, 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.

Sin otro particular por el momento, les envié un cordial saludo.

**ATENTAMENTE,**

---

**DR. FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN**  
Investigador Titular "C"  
Cedula Profesional: 4904287  
Tel. (52) 614-439 1135  
[facundo.almeraya@cimav.edu.mx](mailto:facundo.almeraya@cimav.edu.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 “**Efecto del uso de ceniza volante en el proceso de agrietamiento del concreto por corrosión del acero de refuerzo**”, que presenta el **Ing. Armando Escobar Rojas**, 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 14 de marzo de 2012

**Dr. Pedro L. Valdez Tamez**

**Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación**

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)



# 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**  
**PRESENTE**

Estimado Dr. Valdez,

En relación a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la Tesis: "EFECTO DEL USO DE CENIZA VOLANTE EN EL PROCESO DE AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO POR CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO", que presenta el **Ing. Armando Escobar Rojas**, 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, 15 de marzo de 2012.

**DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL**  
**EVALUADOR**



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)

---

## Dedicatoria

*A Dios.*

*Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor*

521 4

---

## Agradecimientos

### **A mis padres, Armando y Leonor**

Por su comprensión en todas mis decisiones, por la confianza en mi depositada, quiero que sientan que el objetivo alcanzado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudó a conseguirlos fue su gran apoyo.

### **A mis hermanos, Álvaro y Vladimir**

Por el cariño y apoyo que siempre he recibido de ustedes y con el cual he logrado alcanzar este objetivo.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, por permitirme estar en sus aulas y otorgarme las herramientas necesarias para superarme profesionalmente.

A mis compañeros M.C. Omar Díaz, M.C. Luis Ángel Wong, M.C. Bonifacio Manríquez, M.C. Alejandro Herrera, M.C. Héctor Campos, M.C. Aldo Campos, M.C. Cristian Fernández, Ing. Eduardo Garza, Ing. Ricardo de León, Ing. Octavio Rivera, Ing. Jonathan del Real, Ing. Ana Yanci Campos, por su apoyo en la elaboración de esta tesis, pero sobre todo por su amistad.

A mis asesores Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez y Dr. Gerardo Fajardo San Miguel por su apoyo, enseñanzas, sus comentarios, sugerencias y correcciones que me permitieron llegar al término de este proyecto.

Al Laboratorio de Investigación de Materiales de construcción del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL por su ayuda y apoyo, así como al personal de dicho departamento.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los apoyos brindados para la elaboración de este proyecto.

Al PAICYT y SEP por los apoyos financieros otorgados a los proyectos GIT006-09 Y PROMEP/103.5/09/1306 y PROMEP/103.5/10/6851.

## CONTENIDO

Contenido.....	<i>viii</i>
Índice de tablas .....	<i>xi</i>
Índice de figuras .....	<i>xiii</i>
Resumen.....	<i>xiv</i>

### CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

	<b>Página</b>
1.1 El concreto como material de construcción.....	1
1.2 La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado .....	2
1.3 El proceso de deterioro de las estructuras de concreto reforzado .....	3
1.4 Impacto económico.....	5
1.5 El impacto ambiental del concreto .....	7
1.6 El concreto como protector del acero .....	8
1.6.1 Naturaleza alcalina del concreto.....	9
1.7 La corrosión del acero .....	11
1.8 La corrosión en presencia de cloruros .....	12
1.9 El agrietamiento del concreto por efecto de los productos de corrosión del acero de refuerzo.....	14
1.10 Naturaleza porosa del concreto .....	16
1.11 Medidas de protección contra la corrosión del acero de refuerzo .....	17
1.11.1 Uso de la ceniza volante en el concreto .....	22
1.11.2 Beneficios del uso de la ceniza en el concreto.....	25
1.12 Vida útil de las estructuras de concreto reforzado.....	26

### CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

	<b>Página</b>
Antecedentes .....	31
Justificación.....	37

Objetivos .....	39
General.....	39
Particulares .....	39
Hipótesis.....	40

### **CAPÍTULO 3**

#### **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

---

	<b>Página</b>
3.1 Descripción de los materiales empleados.....	41
3.1.1 Materiales cementantes .....	41
3.1.2 Agregados.....	42
3.1.3 Aditivo .....	45
3.1.4 Acero .....	45
3.2 Proporcionamiento de las mezclas .....	45
3.3 Fabricación de especímenes .....	48
3.3.1 Especímenes para corrosión acelerada .....	49
3.3.2 Especímenes para caracterización física y mecánica del concreto.....	51
3.4 Caracterización física y mecánica.....	51
3.4.1 Resistencia a la compresión .....	51
3.4.2 Módulo de elasticidad.....	51
3.4.3 Porosidad abierta al agua.....	52
3.4.4 Resistencia a la penetración del ion cloro .....	54
3.5 Inducción de la corrosión .....	55
3.6 Pruebas semidestructivas.....	57
3.6.1 Potencial de media celda .....	59
3.6.2 Resistencia a la polarización lineal, RPL.....	61
3.6.3 Resistividad eléctrica del concreto.....	63
3.7 Inspección visual.....	67
3.8 Pérdida de masa del acero por el método gravimétrico.....	67
3.9 Ley de Faraday para calcular la pérdida masa del acero .....	69

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

	<b>Página</b>
4.1 Características físicas y químicas de los materiales cementantes.....	70
4.2 Elaboración de mezclas .....	72
4.3 Propiedades mecánicas y físicas .....	73
4.3.1 Resistencia a la compresión .....	73
4.3.2 Módulo de Elasticidad.....	75
4.3.3 Porosidad abierta al agua.....	76
4.3.4 Resistencia a la penetración del ion cloro .....	78
4.4 Caracterización electroquímica.....	80
4.4.1 Potencial de media celda .....	80
4.4.2 Velocidad de corrosión, $i_{corr}$ , determinada mediante RPL .....	86
4.4.3 Resistividad eléctrica del concreto, $\rho$ , obtenida mediante EIE .....	90
4.5 Inspección visual.....	94
4.6 Pérdida de masa .....	94
4.6.1 Relación de la pérdida de masa con la resistencia a la compresión.....	97
4.6.2 Relación de la pérdida de masa con la porosidad abierta al agua.....	98
4.6.3 Relación de la pérdida de masa con la resistividad eléctrica.....	100
4.6.4 Análisis estadístico .....	101
4.6.5 Análisis de varianza .....	103
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>106</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>109</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>110</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Procesos y mecanismos que producen la pérdida de durabilidad del concreto y el acero. [Sánchez de Guzmán, 2006].....	4
2 Diagrama de pH-Potencial a) simplificado del hierro en contacto con agua y b) mostrando regiones termodinámicamente estables del diagrama [Pourbaix, 1987]. .....	10
3 Mecanismo de corrosión por picaduras debido a los cloruros [Castro, et al. 2001]	13
4 Proceso de agrietamiento del recubrimiento por corrosión del acero de refuerzo...	14
5 Volumen relativo del acero y sus productos de corrosión [Shahzma et al., 2009]....	15
6 Conformación de la estructura porosa del concreto .....	16
7 Clasificación de los materiales puzolánicos.....	20
8 Producción y empleo de cenizas volantes [ECOBA, 2004; ACAA, 2007; CIRCA, 2004] .....	24
9 Modelo de vida útil para estructuras de concreto relacionada con la corrosión del acero de refuerzo [Zhou et al., 2005].....	27
10 Aporte en el periodo de iniciación producto del uso de materiales cementantes complementarios .....	29
11 Resistividad eléctrica $\rho$ de morteros por composición [Pacheco et al., 2009] .....	36
12 Distribución granulométrica de los agregados, a) Arena caliza y b) Grava caliza 10 mm .....	42
13 Distribución granulométrica, arena caliza 4B .....	43
14 Distribución granulométrica de los agregados combinados, a) Arena combinada, b) Grava combinada .....	44
15 Características de las mezclas elaboradas .....	47
16 Configuración esquemática de los especímenes para someterlas al proceso de corrosión acelerada .....	48
17 Proceso de acondicionamiento de las varillas, a) Equipo empleado para cortar la varilla, b) Aplicación de primario epóxico, c) Delimitación del área de exposición y d) Varillas preparadas para el proceso de corrosión acelerada ...	50
18 Moldes empleados para la fabricación de los especímenes para corrosión acelerada .....	50

19	Dispositivo empleado para obtener el módulo de elasticidad del concreto .....	52
20	Preparación de muestras para obtener la porosidad abierta al agua, a) corte para obtención de muestras, b) determinación del peso seco, c) aplicación de vacío y d) determinación del peso sumergido .....	53
21	Preparación y montaje de las muestras para la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro .....	55
22	Arreglo empleado para el proceso de corrosión acelerada.....	56
23	Circuito empleado para controlar la densidad de corriente aplicada .....	57
24	Espécimen montado en equipo VoltaLab PGZ-301 para la medición de parámetros electroquímicos .....	59
25	Medición del potencial a de media celda .....	60
26	Curva representativa de impedancia para el acero embebido en concreto .....	65
27	Procedimiento de limpieza del acero expuesto. a) Detección primer agrietamiento visible, b) Extracción de varilla, c) , d) Recuperación de zona anódica, e) limpieza con solución según la norma ASTM G1 03, f) Cepillado de las varillas para la remoción de óxidos y g) Acero expuesto después del proceso de remoción de óxidos.....	68
28	Distribución de tamaño de partícula de los materiales cementantes .....	70
29	Desarrollo de la resistencia a la compresión de los diferentes concretos en estudio .....	74
30	Desarrollo de la porosidad abierta al agua para los concretos en estudio .....	76
31	Evolución del potencial de media celda de los especímenes con 23 mm de recubrimiento durante el proceso de corrosión acelerada .....	82
32	Evolución del potencial de media celda de los especímenes con 35 mm de recubrimiento durante el proceso de corrosión acelerada .....	83
33	Comportamiento del $i_{corr}$ para los especímenes elaborados con 23 mm de recubrimiento .....	87
34	Comportamiento del $i_{corr}$ para los especímenes elaborados con 35 mm de recubrimiento .....	88
35	Seguimiento de la resistividad eléctrica de los distintos tipos de concreto en los especímenes de 23 mm de recubrimiento .....	91
36	Seguimiento de la resistividad eléctrica de los distintos tipos de concreto en los especímenes de 35 mm de recubrimiento .....	92
37	Relación de la pérdida de masa con la resistencia a la compresión del concreto, para el recubrimiento de a) 23 mm y b) 35m .....	97

38	Relación de la pérdida de masa con el porcentaje de porosidad abierta al agua del concreto, para el recubrimiento de a) 23 mm y b) 35mm .....	99
39	Relación de la pérdida de masa con la resistividad eléctrica del concreto, medida antes del iniciar el proceso de corrosión acelerada .....	100
40	Comportamiento de la pérdida de masa necesaria para agrietar el recubrimiento de concreto con respecto a: a) Uso de la CV, b) Relación a/mc y c) Tiempo de curado .....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla		Página
1	Propiedades físicas de los ingredientes utilizados en la elaboración de las mezclas	45
2	Proporcionamiento de las mezclas de concreto .....	48
3	Distribución de especímenes por tipo de prueba .....	49
4	Criterio de valoración de potenciales de acero embebido en concreto para diferentes electrodos [Broomfield, 1997] .....	61
5	Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión en campo y laboratorio [C.Andrade, 1996] .....	63
6	Composición química de los materiales cementantes.....	71
7	Composición química especificada de la ceniza volante de acuerdo con ASTM C 618 08 .....	72
8	Proporcionamiento de mezclas .....	73
9	Desarrollo de la resistencia a compresión de los concretos e índice de actividad de la resistencia .....	73
10	Evolución del módulo de elasticidad para los diferentes concretos elaborados.....	75
11	Evolución de la permeabilidad a los iones cloro de los concretos elaborados.....	78
12	Pérdida de masa, obtenida mediante el método gravimétrico .....	95
13	Pérdida promedio de sección necesaria para generar el agrietamiento del recubrimiento, $X_{crit}$ .....	95
14	Análisis de varianza, para los tres factores involucrados en la densificación de la matriz cementante, para un recubrimiento de a) 23 mm y b) 35 mm.....	104

## RESUMEN

En esta investigación se presenta el estudio del efecto de la densificación de la matriz cementante en el proceso de agrietamiento del recubrimiento de concreto por efecto de la corrosión del acero de refuerzo. La densificación de la matriz se logró mediante el empleo de dos relaciones agua-material cementante 0.45 y 0.60, el tiempo de curado 1, 7, 28 y 56 días y el remplazo en masa de cemento (CPO) por ceniza volante (CV) en 0, 10 y 20%. Para analizar las propiedades físicas y mecánicas del concreto se elaboraron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. El proceso de corrosión se aceleró por medio de una corriente galvánica (densidad de corriente de  $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), para lo cual se emplearon especímenes de concreto reforzado, mismos que permanecieron sumergidos durante la aplicación de la corriente, en una solución de 30g/L de NaCl. Durante el proceso, el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo se monitoreó mediante las técnicas: potencial de media celda y resistencia a la polarización lineal. Se determinó la resistividad eléctrica del concreto mediante la espectroscopía de impedancia electroquímica, con el objetivo de identificar el momento en el que se presenta el agrietamiento del recubrimiento. Una vez agrietados los especímenes, se recuperó el acero y se determinó la pérdida de masa que generó el agrietamiento superficial visible del recubrimiento.

Para agrietar el recubrimiento de concreto de 23 mm de espesor se requirió una pérdida de sección crítica ( $x_{\text{crit}}$ ) que varía de 0.022 a 0.107 mm, mientras que para el espesor de 35 mm se requirió de 0.050 - 0.100 mm. Los resultados obtenidos muestran la tendencia de  $\Delta m$  a disminuir conforme se densifica la matriz cementante. Mediante el análisis de varianza se determinó que el uso de la ceniza volante es el factor que provoca una variación estadísticamente significativa en el porcentaje de pérdida de masa requerida para agrietar el recubrimiento.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 El concreto como material de construcción.

Hoy en día, los dos materiales más empleados en la construcción de las estructuras son el acero y concreto. En ocasiones se complementan para producir estructuras de concreto reforzado o concreto presforzado y otras veces compiten entre sí.

El concreto consiste en una mezcla de agregados pétreos graduados unidos con una pasta de cemento y agua. Los agregados se clasifican por su tamaño en dos tipos: finos y gruesos. Los agregados finos están constituidos por arenas, arcillas y limos que pueden ser naturales o productos de trituración cuyas partículas tienen menos de 5 mm ( $\frac{1}{4}$  de pulgada). La pasta se compone de cemento, agua y a veces de aire incluido. Generalmente esta pasta constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto [PCA, 2004].

Este material ha alcanzado gran importancia como material estructural, ya que puede adaptarse a una gran variedad de moldes adquiriendo formas complejas y de varios tamaños debido a su consistencia plástica en estado fresco. Por su parte, en el estado endurecido presenta buena resistencia mecánica, poca variación volumétrica, baja conductividad térmica y resistencia a la penetración del agua, a los ataques químicos y al desgaste, requiere poco mantenimiento cuando se fabrica apropiadamente, etc. Sin embargo, el desconocimiento o la comprensión inadecuada

de sus características propician acciones que causan su degradación prematura [Rasheeduzzafar, et al., 1984].

La resistencia mecánica del concreto se debe a las reacciones de hidratación del cemento. En este proceso los componentes del cemento se cristalizan progresivamente para formar gel o pasta el cual rodea los agregados, uniéndolos para producir un conglomerado. Tanto la resistencia mecánica como la permeabilidad del concreto están regidos por la relación  $a/mc$  (agua – material cementante), así cuanto más baja sea esa relación, más alta es la resistencia y menor su permeabilidad.

Debido a sus excelentes propiedades físicas y económicas el concreto es sin duda el material de construcción más difundido y de mayor uso, está implícito en toda actividad de desarrollo de cualquier país y lo seguirá estando hasta que se desarrolle otro material más versátil y económico [Neville, 1998]. Por otro lado, el acero tiene excelentes propiedades mecánicas como son: elasticidad, ductilidad, maleabilidad, resistencia, tenacidad, etc. El acero se emplea en el concreto como refuerzo, lo que da por resultado un material compuesto que reúne las propiedades de ambos componentes: el costo relativamente bajo, la buena resistencia al clima y al fuego, la buena resistencia a la compresión, buen comportamiento a tensión, versatilidad, simplicidad en su fabricación y diseño, durabilidad, bajo costo de mantenimiento y mínimo consumo de energía [Rasheeduzzafar, et al., 1984]. Dichas cualidades le permiten adecuarse a las exigencias particulares de cada obra y por lo tanto ser empleado en todo tipo de aplicaciones, dándole gran popularidad a este material de construcción.

## **1.2 La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.**

El concreto elaborado con cemento pórtland es un material con una historia relativamente reciente. Debido a su consistencia rígida, anteriormente se creía que tenía una larga vida útil; sin embargo, los problemas que presentan un gran número de estructuras han demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de

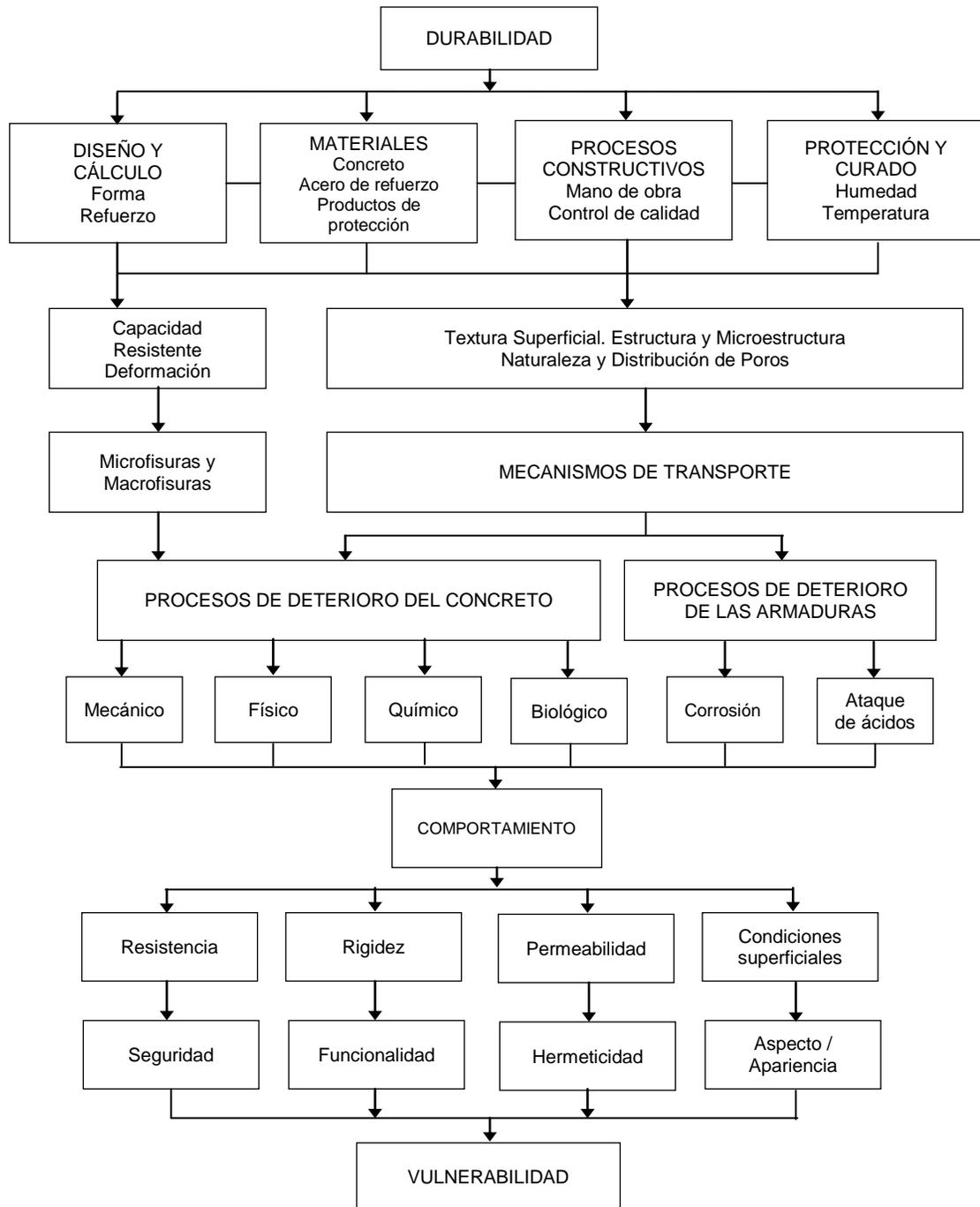
estructuras de concreto con problemas, ante sus condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza, estos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes puntos con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que en ella intervienen.

La durabilidad es una propiedad importante del concreto ya que es indispensable que tenga la calidad y capacidad para resistir las condiciones de servicio. El ACI-201 la define como: *“la habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente”*. Se evalúa *“en función de su capacidad para resistir las acciones de deterioro derivadas de las condiciones de exposición y servicio a que está sometida”* (ACI, sección Centro y sur de México). De la definición anterior queda claro que la durabilidad no es un concepto que depende sólo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente de exposición y de las condiciones de servicio a las cuales estará sometida la estructura.

### **1.3 El proceso de deterioro de las estructuras de concreto reforzado.**

Considerando el modelo de la figura 1, como factores determinantes de la durabilidad de una estructura de concreto reforzado están: el diseño y el cálculo de la estructura, los materiales empleados, las prácticas constructivas (colocación, compactación, curado, etc.) y los procedimientos de protección.

Lo anterior, genera en la estructura la capacidad de resistir cargas de servicio y deformaciones máximas permisibles; desarrolla una textura superficial para el intercambio con el exterior (micro-clima); y también, permite obtener una estructura y una microestructura del concreto, que a su vez definen la naturaleza y distribución de poros al interior de la masa.



**Figura 1.** Procesos y mecanismos que producen la pérdida de durabilidad del concreto y el acero. [Sánchez de Guzmán, 2006].

Si la capacidad estructural es rebasada, existirán deformaciones impuestas u otro tipo de acciones mecánicas, invariablemente aparecerán microfisuras y/o macrofisuras, consideradas como deterioro mecánico. Pero también, dependiendo del tipo, tamaño y distribución de los poros y fisuras (microfisuras y macrofisuras), se presenta una

determinada permeabilidad a través de la cual operan los mecanismos de transporte de fluidos (agentes externos). Que ayudados a su vez por el efecto de la temperatura, humedad y presión, permiten iniciar y propagar el deterioro del concreto por acciones físicas, químicas, o biológicas, o del refuerzo por el fenómeno de corrosión.

Por lo tanto, el tipo, cantidad y magnitud de los procesos de degradación (mecánico, físico, químico y/o biológico) del concreto y la configuración de las armaduras de refuerzo, determinan a través del tiempo la resistencia, la rigidez y la permeabilidad de los diferentes elementos que conforman la estructura. También, otros factores como las condiciones superficiales de la estructura influyen en la seguridad, funcionalidad, hermeticidad, aspecto y apariencia de la estructura. En resumen, determina el comportamiento de la estructura y su vulnerabilidad.

#### **1.4 Impacto económico.**

A nivel mundial el concreto es el material más utilizado en la construcción, y a menos que haya una revolución en los materiales de construcción, seguirá siéndolo por algunas décadas más. Gran parte de la infraestructura de los países está elaborada con este material, por lo que su conocimiento y tecnología son básicos para el ingeniero civil encargado de alguna etapa del proceso constructivo [Hernández et. al, 2006]. En los últimos años, los problemas relativos a la durabilidad en las estructuras de concreto han tomado mayor importancia, lo anterior, en razón de la pérdida de inversión por el deterioro, muchas de las veces prematuro [Rostam, 2005].

Los problemas de durabilidad han afectado diversos tipos de estructuras, las cuales una vez que los presentan ya no son funcionales ni eficientes y están destinadas a no cumplir con su vida de servicio estimada. Estos problemas no se limitan a su diseño inicial y construcción, tienen una fuerte intervención en la operación, ocasionando costos y pérdidas económicas para el propietario o inversionista, ya sea por reparación de las zonas afectadas, por la sustitución de elementos que se han deteriorado, por costos operativos imputables a remodelación o mantenimientos

periódicos. Tan sólo en Estados Unidos los problemas de durabilidad que afectaban las estructuras de transporte intermodal tuvieron un costo de 20 billones de dólares en 1986 [Buffenbarger, 1998]. De acuerdo con un reporte de la OCDE el 40 % de los puentes de concreto reforzado, se encontraban en 1976 [OECD, 1976] 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 fue el problema más frecuentemente encontrado.

El proceso de 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. El parámetro utilizado para evaluar este fenómeno es la pérdida económica expresada como porcentaje del PIB (Producto Interno Bruto). En 1990 se realizó un estudio del impacto que producen los costos económicos originados por la corrosión, el resultado fue que entre el 2 y el 5% del PNB (Producto Nacional Bruto) de cada país se destina a subsanar los problemas de corrosión [Baboian, 1990]. Según [Castro et al., 1995], entre un 15 y 25% se pudo haber evitado si se hubiese aplicado la tecnología existente para contrarrestarla. En el Reino Unido, un país desarrollado, el 40% de la inversión en construcción se destina a la reparación y/o al mantenimiento, lo que representa aproximadamente un 4% de su Producto Interno Bruto [Neville 2001]. Los últimos estudios llevados a cabo sobre el impacto económico de la corrosión muestran resultados alarmantes. De 1999 a 2001, Estados Unidos tuvo un total anual de costos directos de aproximadamente 276 mil millones de dólares, algo así como 3.1% del PIB de ese país. El ahorro que pueda lograr un país en 30 años por investigar y construir ahora estructuras durables puede ser detonante fundamental en el futuro, dada la escasez de materiales y recursos [Hernández et. Al, 2006].

En México se han realizado pocos estudios para estimar los gastos que representan las pérdidas por corrosión. De acuerdo con [Ávila et al., 1986], se ha detectado que más del 90% de las industrias presentan deterioros por corrosión; en

Yucatán se realizó un estudio que indica que los costos por corrosión rebasan el 8% del PIB estatal [Orozco, 1998].

### **1.5 El impacto ambiental del concreto.**

El calentamiento global provocado principalmente por los gases de efecto invernadero es uno de los temas de sustentabilidad más importantes hoy en día. En una serie de informes publicados en el año 2007, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change), declaró que el calentamiento global ya está ocurriendo a un ritmo que podría tener consecuencias devastadoras e irreversibles si no se toman medidas inmediatas. La concentración promedio de CO<sub>2</sub> en la atmósfera mundial en la actualidad es de 390 ppm, la más alta concentración registrada históricamente y crece de forma exponencial [IPCC, 2007]. En consecuencia, el IPCC recomienda que la tasa anual de emisiones de CO<sub>2</sub> debe ser reducida al nivel de 1990 o menos en los próximos 20 años. Como resultado, los gobiernos y los líderes de las principales industrias productoras de CO<sub>2</sub>, tales como la generación de energía, transporte, refinación de petróleo, y la fabricación de acero y concreto, están contemplando medidas decisivas para su aplicación a partir del 2010 para lograr una reducción drástica en la tasa de emisiones globales de CO<sub>2</sub> para el año 2030 [Mehta, 2009].

Es importante mencionar que la industria del cemento y del concreto, pilares fundamentales de la industria de la construcción, se encuentran clasificadas dentro de las categorías de energía y procesos industriales. El cemento pórtland no sólo es uno de los materiales más usados en la construcción, es el responsable de una gran cantidad de gases de efecto invernadero. El impacto más importante de la industria del cemento en el medio ambiente son las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la calcinación de las materias primas y los combustibles fósiles utilizados en la producción del clinker [Uzal et al., 2007]. De acuerdo con un informe completo [Metha et al., 2008], los cementos modernos contienen en promedio 84% de clinker de cemento pórtland; y por cada

tonelada de clinker se liberan 0.9 toneladas de CO<sub>2</sub>. Tan solo en el 2007 [CEMBUREAU, 2008] la industria concretera a nivel mundial consumió cerca de 3.05 billones de toneladas de cemento (2.77 billones de toneladas de clinker) por lo que la huella de carbono de esta industria es de proporciones considerables. Esto hace responsable a la industria cementera del 7% de emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo [Uzal et al., 2007].

La reducción del consumo de cemento ha sido una alternativa viable para reducir el impacto ambiental generado por su fabricación y consecuente consumo. Dentro de los esfuerzos realizados para combatir esta problemática, resalta el uso de materiales cementantes complementarios tales como la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, la puzolana natural o calcinada, el humo de sílice, y la ceniza de cáscara de arroz. Esto ha resultado, no sólo en un producto amigable con el medio ambiente sino que, también proporciona beneficios a las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, tales como la mejora de la trabajabilidad, la reducción del calor de hidratación, baja permeabilidad, alta resistencia final, y estabilidad volumétrica [Papadakis, 2000]. En base a lo anterior, y gracias a los avances de la tecnología del concreto, se ha demostrado que la adición de ceniza volante (CV) en mezclas de concreto incrementa la resistencia a la corrosión del concreto reforzado [Saraswathy et al., 2006; Saraswathy et al., 2003]. El mejor rendimiento de estas mezclas en comparación con aquellas elaboradas sin CV se atribuye a la densificación de la matriz cementante debido a la acción puzolánica entre las partículas de ceniza volante y el hidróxido de calcio liberado como resultado de la hidratación del cemento.

### **1.6 El concreto como protector del acero.**

Las condiciones de servicio a las cuales está expuesto el concreto, en algunos casos, pueden llevar al debilitamiento de la estructura y al deterioro potencial por corrosión de las varillas de acero de refuerzo, causando agrietamientos y fallas en el concreto circundante. Las condiciones de exposición que generan los daños más comunes que afectan al concreto en su durabilidad están expresadas principalmente

por ataque de sulfatos, exposición al agua de mar, ataque ácido, carbonatación, abrasión y reacciones químicas.

Un material refinado como el acero tiene una tendencia natural a corroerse y así regresar al estado estable como mineral de hierro (generalmente óxido de hierro  $Fe_2O_3$ ) como se encuentra en la naturaleza. La rapidez con la que se lleva a cabo el proceso de corrosión del acero depende de su composición, la estructura de grano y la presencia de esfuerzo producto de la fabricación. Sin embargo, la naturaleza del entorno, como la disponibilidad de agua, oxígeno, especies iónicas agresivas, el pH y la temperatura se han presentado como los factores de mayor influencia en el proceso.

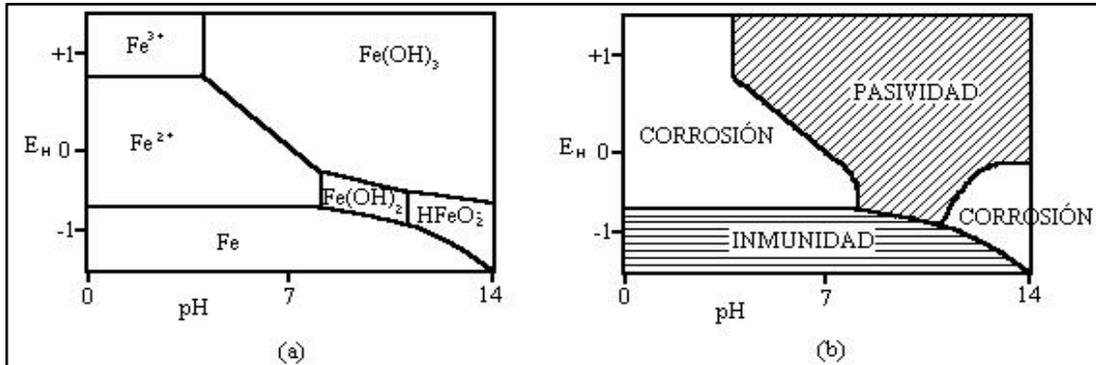
No obstante, el concreto le confiere al acero de refuerzo una doble protección: por un lado, el recubrimiento es una barrera física que separa la armadura del medio que lo rodea, y por otro lado, en la interface acero-concreto se crea una pequeña capa pasivante (30 Å o menos de espesor) de óxido que se forma y mantiene en la superficie del acero como producto de la alta alcalinidad de la matriz cementante que lo rodea ( $12.5 < \text{pH} < 13.5$ ) [Montemor, 2000]. Por consiguiente, el acero permanecerá en estado pasivo mientras las condiciones que rodean y preservan esta capa no sean modificadas.

### **1.6.1 Naturaleza alcalina del concreto.**

El ambiente altamente alcalino del concreto es generado principalmente por el hidróxido de calcio  $[Ca(OH)_2]$  que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y los álcalis ( $Na_2O$  y  $K_2O$ ) propios de la composición química del cemento. Esto genera un pH en el concreto recién mezclado de entre 12 y 13, en estas condiciones y con la presencia de oxígeno, el acero se encuentra en un estado conocido como pasivo [Garcés et al. ,2008]. Esta alta alcalinidad significa una abundancia de iones hidroxilo  $OH^-$  los cuales por tener una alta adsorbabilidad en la superficie metálica modifican el proceso de oxidación, en los sitios anódicos, de manera tal que la liberación de iones ferrosos,  $Fe^{2+}$ , a la solución se ve impedida por la formación de una capa de óxidos y

oxihidróxidos, es decir el metal no se transforma a una especie soluble, sino a un producto de corrosión sólido no soluble y además de carácter protector [Pérez, 2005].

Esta protección química tiene su fundamento en los estados termodinámicos del hierro en agua que han sido estudiados ampliamente [Pourbaix, 1987], y son presentados en el diagrama de pH-potencial de la figura 2.



**Figura 2.** Diagrama de pH-Potencial a) simplificado del hierro en contacto con agua y b) mostrando regiones termodinámicamente estables del diagrama [Pourbaix, 1987].

En el diagrama de la figura 2 se puede observar 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 (por la inadecuada selección o por la utilización de materiales contaminados) puede activar inmediatamente el proceso de corrosión del acero de refuerzo.

Existen factores desencadenantes que pueden generar la pérdida de la pasividad de las armaduras los cuales pueden clasificarse en dos grandes mecanismos:

**a) La carbonatación**, genera una disminución del pH del concreto debido a la reacción del  $CO_2$  atmosférico con las sustancias alcalinas de la solución de poro y los productos de hidratación de la pasta cementante. Cuando la penetración de la carbonatación en el concreto resulta similar al recubrimiento con  $pH < 9.5$  (aunque no existe acuerdo respecto de este umbral), el acero de refuerzo tienden a perder su capa pasivante.

b) **La presencia de iones despasivantes**, fundamentalmente cloruros, que superan el umbral crítico necesario para romper localmente la capa pasiva.

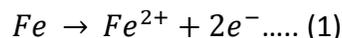
Una vez que la capa pasiva de la interface acero-concreto se ve afectada, se dice que están dadas las condiciones para que se produzca la corrosión [Castro, 2001].

La corrosión del acero de refuerzo, ya sea por carbonatación o por el ingreso de cloruros, es reconocido como el mayor problema en el mantenimiento de la integridad estructural de los elementos de concreto reforzado [Montemor et al., 2002; Basheer et al., 1996].

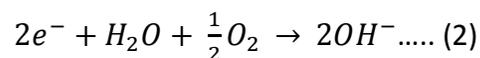
### 1.7 La corrosión del acero.

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto es un proceso electroquímico que causa su disolución para formar una amplia gama de productos sólidos. Los productos de corrosión son una mezcla compleja de óxidos e hidróxidos que evolucionan de acuerdo a las condiciones del medio ambiente local [Bentur et al, 1997; David et al., 2007].

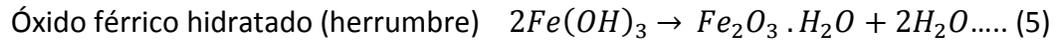
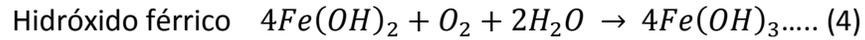
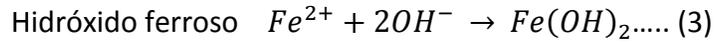
La reacción de oxidación del hierro en la región anódica, se da de acuerdo con la ecuación (1):



Al ocurrir la reacción de oxidación el *Fe* libera dos electrones ( $2e^{-}$ ) que son consumidos en otra parte de la superficie del acero para mantener la neutralidad eléctrica, la reacción catódica, en la cual se consume agua y oxígeno, esta se indica en la ecuación (2):



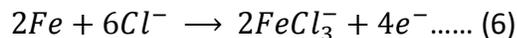
La reacción anódica y catódica son solo los primeros pasos en la formación de la herrumbre, varias etapas más deben ocurrir para formarla:



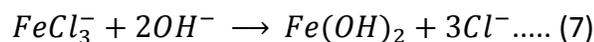
El óxido férrico no hidratado,  $Fe_2O_3$  tiene un volumen de aproximadamente el doble del acero, cuando se hidrata su volumen aumenta y se vuelve poroso. Esto significa que el aumento de volumen en la interface acero-concreto, dependiendo del grado de oxidación puede ser de hasta 6.5 veces el volumen inicial del acero [Mehta et al., 1997]. Esto lleva a la formación de manchas en la superficie del concreto, grietas y desprendimiento como consecuencia de la corrosión del acero de refuerzo.

### 1.8 La corrosión en presencia de cloruros.

Una vez que han llegado a la barra de refuerzo en cantidad suficiente, los cloruros destruyen la pasividad natural del refuerzo provocando su corrosión. Todavía se discute el mecanismo por el cual estos iones destruyen la pasividad, se han propuesto varias teorías, entre ellas, la de la "formación del compuesto". Esta teoría plantea que los cloruros libres forman un compuesto soluble con los iones de hierro, de acuerdo con la ecuación (6):



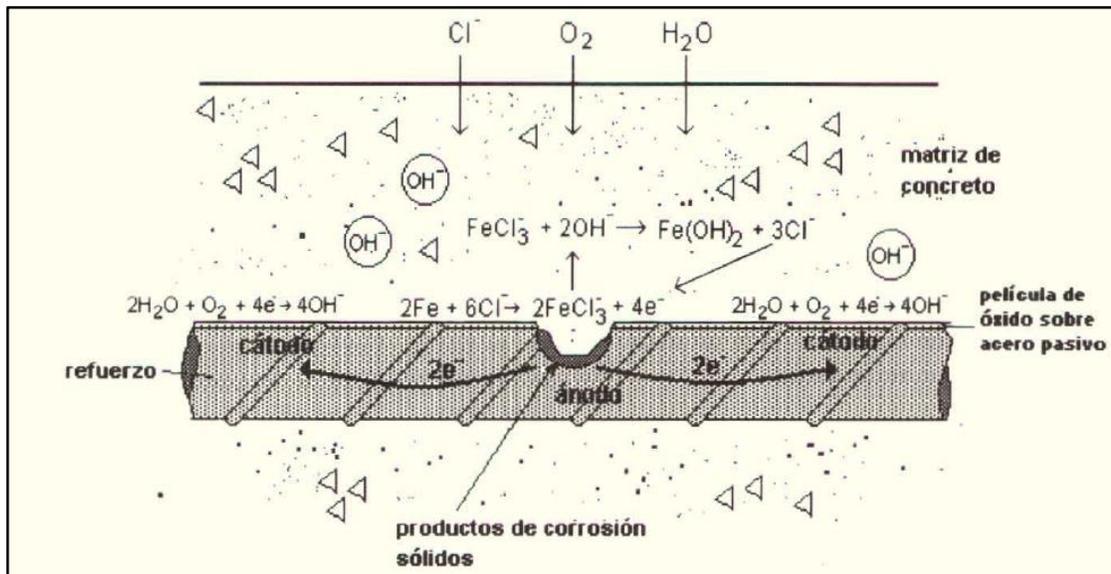
y que éstos a su vez, difunden hacia otra zona alejada del ánodo, donde el pH y la concentración de oxígeno disuelto son altos. En consecuencia, el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de hierro y liberando los iones cloruro:



Debido a que los cloruros no se agotan en este proceso y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro en la vecindad del acero, el proceso puede

continuar por sí mismo, emigrando los iones de hierro desde el acero y reaccionando con el oxígeno para formar óxidos o hidróxidos. Por lo tanto, en vez de que la corrosión se propague a lo largo del acero de refuerzo, continúa en las zonas anódicas, desarrollándose picaduras profundas en el acero [Castro, et al. 2001].

En la figura 3 se muestra un esquema del mecanismo de corrosión del acero de refuerzo en el concreto debido al rompimiento de la capa pasivante por efecto de los iones cloruro.



**Figura 3.** Mecanismo de corrosión por picaduras debido a los cloruros [Castro, et al. 2001].

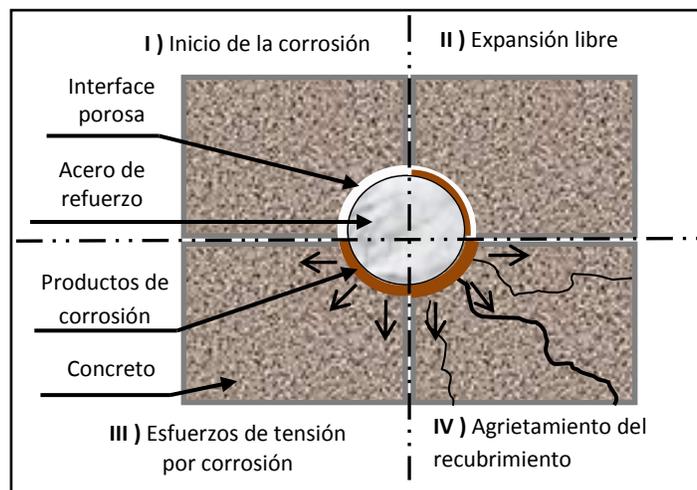
La relación elevada de las superficies catódica/anódica genera densidades de corriente de corrosión localmente muy elevadas. En las áreas catódicas la producción de iones  $\text{OH}^-$  aumenta el pH lo que reduce las posibilidades de ataques posteriores sobre estas superficies. Ahora bien, la formación de productos de reacción intermedios que contienen cloruros, disminuye temporalmente la concentración de esta especie y la aportación de iones  $\text{OH}^-$  tiende a repasar las zonas atacadas. La reserva en alcalinidad de la disolución intersticial repasa estas zonas y limita la propagación de la corrosión. Si la aportación en cloruros se mantiene, esta concentración aumenta en las áreas anódicas puesto que se distribuye gracias a las corrientes de corrosión sobre toda la armadura. Las variaciones en humedad y los gradientes de concentración en cloruros

crean nuevos ánodos que terminan por generar grandes zonas corroídas. Es cierto, por tanto, que la corrosión será más elevada cuando la cantidad de cloruros disponibles a nivel de la armadura sea de una concentración relativamente alta.

### 1.9 El agrietamiento del concreto por efecto de los productos de corrosión del acero de refuerzo.

Una vez que la capa pasivante es dañada el proceso de corrosión ha comenzado. En las áreas sin protección el acero comienza a disolverse, las áreas despasivadas crecen y la cantidad de productos de corrosión incrementa. Conforme este proceso avanza, el radio del acero disminuye (penetración de la corrosión) y los productos de corrosión tienden a acumularse en la interface acero-concreto. Solo una pequeña cantidad de corrosión es necesaria para generar grietas visibles en la superficie del concreto [Wong et al., 2010].

En la figura 4 se muestra un diagrama esquemático de las cuatro etapas del proceso de agrietamiento del recubrimiento de concreto por corrosión del acero de refuerzo.



**Figura 4.** Proceso de agrietamiento del recubrimiento por corrosión del acero de refuerzo.

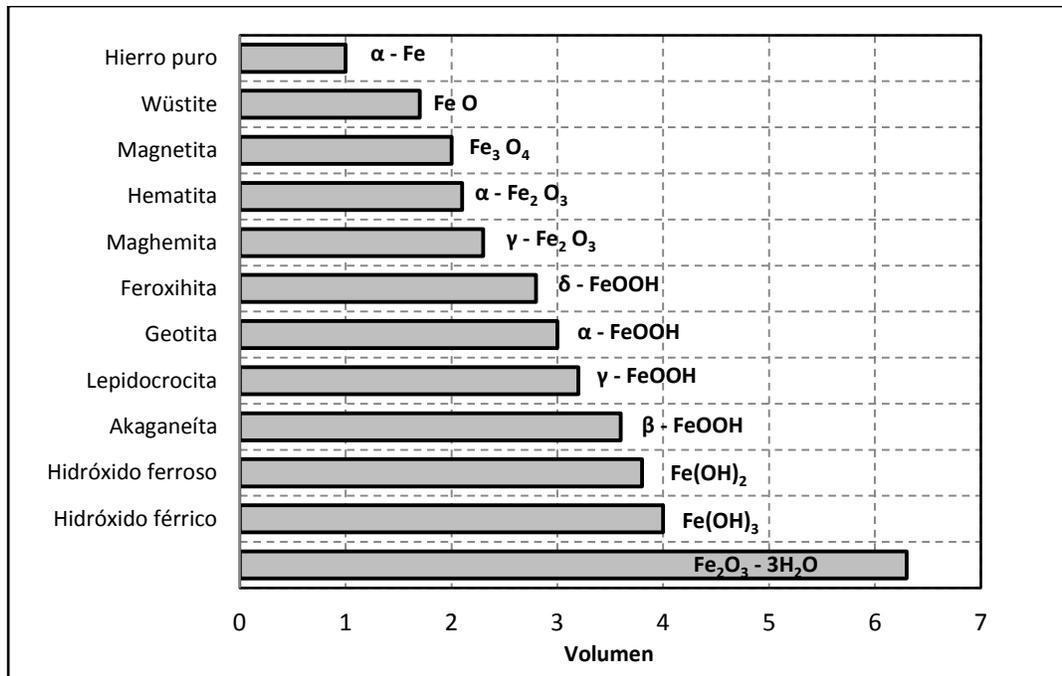


Figura 5. Volumen relativo del acero y sus productos de corrosión [Shahzma et al., 2009].

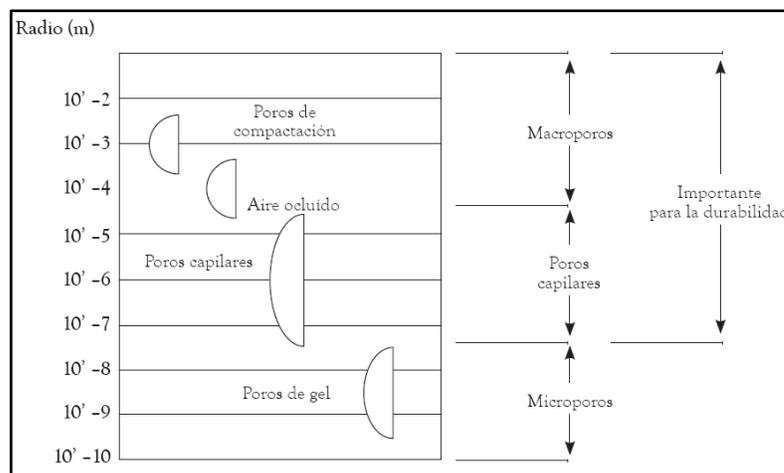
La primera etapa, **I**) comprende el inicio de la corrosión ya sea por carbonatación o por ataque de cloruros. Una vez que se ha roto la capa pasiva comienza la corrosión del acero; dependiendo de su nivel de oxidación y de las condiciones como el pH de la solución, la disponibilidad de oxígeno y el contenido de humedad, los diferentes productos de corrosión tienen diferentes densidades y volúmenes que van desde 2 hasta 7 veces mayor que el del metal original, como se muestra en la figura 5 [ACI Committee 222; Broomfield, 2007]. Sin embargo, no todos los productos de corrosión generan presión en el concreto circundante debido a que algunos de ellos llenan los vacíos de la interface acero-concreto o pueden migrar fuera de dicha interface a través del sistema de poros [Liu et al., 1998; Andrade et al., 1993]. Debido a ello, a la etapa **II** se le denomina “expansión libre”. El volumen del espacio libre está directamente relacionado con el área del acero de refuerzo, la relación  $a/mc$ , el grado de hidratación del cemento y el grado de consolidación del concreto. Una vez que estos poros se saturan, da inicio la etapa **III** con la formación de estos productos que comienzan a generar presión expansiva, la cual aumenta al incrementarse la acumulación de dichos productos. Una vez que el esfuerzo interno generado supera el esfuerzo de tensión del

concreto, posibilita el agrietamiento, desprendimiento o delaminación del recubrimiento, característicos de la etapa **IV**) [Liu et al., 1998; González et. al, 1996].

### 1.10 Naturaleza porosa del concreto.

El concreto endurecido está constituido por los agregados, considerados como el esqueleto, y la pasta de cemento, que representa el aglutinante que los mantiene unidos. De estas dos fases la que tiene mayor importancia desde el punto de vista electroquímico es la pasta de cemento ya que es la que posee la naturaleza porosa. Los agregados se consideran hasta cierto punto impermeables y con una resistividad infinita (no conductores), por lo tanto, los procesos de transporte de carga y de masa en el concreto se llevan a cabo en la pasta de cemento primordialmente, y no a través de los agregados [Monfore, 1968; Whittington et al., 1981].

La pasta de cemento posee poros de diferentes tamaños, tal como lo muestra la figura 6, que se pueden clasificar como poros de gel (0.2 nm), propios del crecimiento del gel C-S-H (Silicato de Calcio Hidratado), poros capilares con un tamaño que varía desde 50 nm hasta 1  $\mu\text{m}$  [Kitowski et al., 1997] y huecos ( $> 10 \mu\text{m}$ ) debidos a la mala compactación del concreto. La mayoría de estos poros son importantes, sin embargo desde el punto de vista de la corrosión, los poros capilares es donde se llevan a cabo los principales fenómenos de transferencia.



**Figura 6.** Conformación de la estructura porosa del concreto.

La cantidad de estos poros está relacionada con la relación a/mc. El máximo de agua que se combina químicamente con el cemento en las reacciones de hidratación no es mayor que 0.24 veces su peso, [Maruya, 2003] pero usualmente se usa más agua en la dosificación de concretos para alcanzar la trabajabilidad deseada en la mezcla. Al final de la hidratación del cemento los precipitados o fases sólidas producidas no son suficientes para rellenar los espacios que ocupaba el agua extra cuando ésta se evapora, quedando por lo tanto una red de huecos o estructura porosa.

La inherente porosidad del concreto es un factor crítico en la corrosión del acero de refuerzo, pero en realidad no es la porosidad sino el contenido de humedad dentro de los poros el factor desencadenante de la degradación del acero, ya que representa el electrolito necesario para el proceso de corrosión, y en muchos casos el medio a través del cual se transportan las sustancias agresivas como los iones  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{CO}_2$ .

### **1.11 Medidas de protección contra la corrosión del acero de refuerzo.**

Básicamente los métodos que existen para controlar la corrosión intentan interferir con el mecanismo de la corrosión, de tal manera que se pueda hacer que éste sea lo más ineficiente posible. Dado que para que exista el proceso de corrosión, debe formarse una pila o celda de corrosión y, por tanto, un ánodo (donde ocurre la reacción de oxidación), un cátodo (donde ocurre la reducción), un conductor eléctrico (une al cátodo y al ánodo) y un conductor iónico (medio conductor que los pone en contacto electrolítico), además de una diferencia de potencial entre los electrodos o zonas anódicas y catódicas, la eliminación de alguno de los componentes esenciales de la mencionada pila, podría llegar a detener el proceso.

Diversos métodos se han utilizado para proteger al concreto reforzado de la corrosión. Es posible englobar los métodos utilizados para prevenir la corrosión dentro de dos grupos: protección indirecta (a través del concreto) y la protección directa (sobre el acero). El primero consiste en controlar la calidad de los materiales constituyentes de la mezcla y el segundo consiste en minimizar la corrosión con

pinturas, revestimiento del acero y recubrimientos sobre el concreto, con protección catódica, agregando inhibidores de corrosión, removiendo los iones cloros y realcalinizando el concreto [DURAR, 1998; González et al., 2001].

En estructuras nuevas, el uso de un buen concreto sería la mejor solución, ya que no existe mejor protección del acero de refuerzo que la película pasivante formada por la hidratación del cemento.

La humedad juega un papel significativo en la mayoría de las reacciones químicas en el concreto y en partes de los procesos físicos y químicos en varios fenómenos de deterioro. Las diferencias en las condiciones de humedad entre el sistema de poros y el microclima circundante causarán un flujo de humedad hacia dentro y fuera del concreto. Sin embargo, la velocidad de corrosión, y su consecuente tasa de deterioro, estará fuertemente influenciada por la disponibilidad de oxígeno y humedad.

Como se mencionó anteriormente, el concreto es un material poroso, pero con la selección de los materiales adecuados, su correcto proporcionamiento y curado, la red capilar de poros puede ser reducida, volviendo a los poros discontinuos y como consecuencia, se reduce la tasa de ingreso de agentes agresivos [Hooton, 2010]. Varias de las formas de deterioro de las estructuras de concreto reforzado resultan del ingreso de agua o iones disueltos en agua, así que la reducción de la tasa de movimiento de estos fluidos a través del sistema de poros capilares es de suma importancia. El índice de absorción, permeabilidad y difusión será reducido si el volumen de poros capilares es reducido.

Una baja permeabilidad limitará los mecanismos de transporte de agentes nocivos. Para lograr esto, existen ciertos parámetros que pueden ser modificados en el diseño de la mezcla:

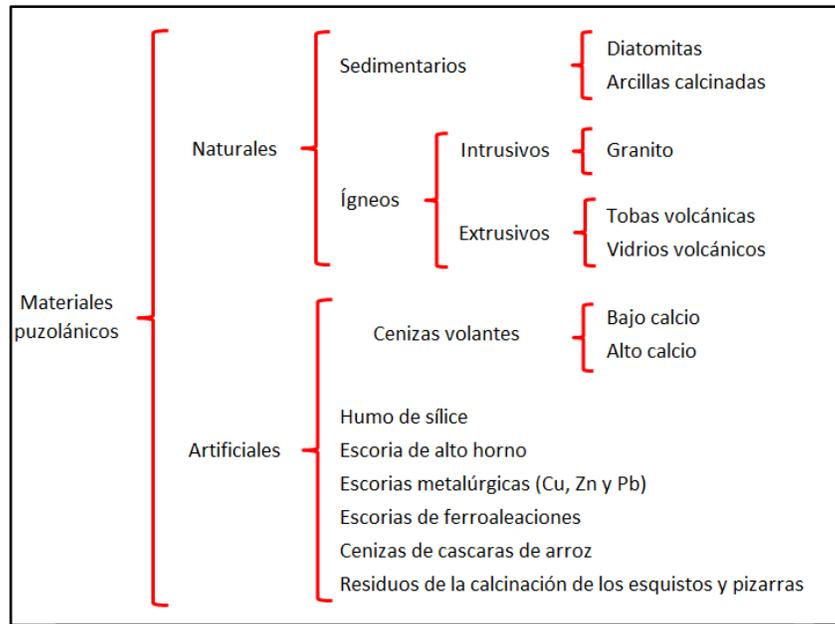
- Disminución de la relación agua/cemento,
- Tipo de cemento,

- Contenido de cemento,
- Uso de materiales cementantes complementarios y
- Granulometría del agregado.

A través de varias investigaciones relacionadas con el uso de materiales cementantes complementarios, se ha encontrado que tienen una influencia mayor en todos los aspectos de durabilidad relacionada con el transporte de agentes agresivos en el concreto. El empleo de estos materiales ha demostrado la prolongación del periodo de iniciación de la corrosión, y por ende, de la durabilidad de las estructuras de concreto, además de reducir los costos de producción [Montemor et al., 2002; Pacheco et al., 2009]. Una de las razones de este comportamiento es que éstos materiales suelen ser más finos que el cemento y disminuyen la permeabilidad del concreto al ocupar espacios donde originalmente quedaban vacíos.

La razón inicial del uso de los materiales cementantes complementarios fue su influencia en la rapidez de desarrollo de calor y de la resistencia mecánica, además de la resistencia al ataque químico, debido a la naturaleza química de la pasta de cemento hidratado y de su estructura. Estos materiales son empleados en el concreto para el mejoramiento de su desempeño en estado fresco y endurecido, mejoran la trabajabilidad, la durabilidad, estabilidad volumétrica y la resistencia [Papadakis, 2000].

La American Society for Testing and Materials (ASTM C 618-89) define a una puzolana como un material silíceo o silíceo-aluminoso que por sí solo posee poco o nulo valor cementante, pero que en presencia de humedad reacciona químicamente con el hidróxido de calcio  $[Ca(OH)_2]$ , generado durante la hidratación del cemento, para formar compuestos con propiedades cementicias. En la figura 7 se muestra la clasificación de las puzolanas.



**Figura 7.** Clasificación de los materiales puzolánicos.

La ceniza volante está constituida de pequeñas partículas atrapadas por los sistemas colectores de polvos de las plantas productoras de energía eléctrica que queman carbón como materia prima. Dichas cenizas pueden tener diferentes fases minerales y composiciones químicas, porque están íntimamente relacionadas con el tipo y la cantidad de impurezas contenidas en el carbón utilizado en las plantas productoras de energía. El carbón de la misma fuente y usado en la misma planta, producirá en teoría el mismo tipo de ceniza volante, pero debido al proceso industrial empleado, la ceniza volante de una misma planta puede variar en su composición química.

Las cenizas volantes pueden tener formas muy diferentes entre ellas. Pueden aparecer como partículas esféricas sencillas, con una distribución de tamaños similar a la del cemento pórtland, o pueden contener algunas cenoesferas, esferas con agujeros o plenosferas. En algunos casos pueden contener partículas de forma angular.

Desde el punto de vista químico, las diferentes cenizas volantes disponibles pueden ser clasificadas en familias; por ejemplo, ASTM reconoce dos tipos de ceniza volante, en su norma C 618: la ceniza volante clase F y la clase C. La clase F es

usualmente producida en plantas de energía donde se quema antracita o extracto de carbón sub-bituminoso, por ejemplo en la parte Este de los Estados Unidos. Por otro lado, la ceniza volante clase C es la que se produce en la quema de lignita o carbón de forma bituminosa, por ejemplo en el Sur y Oeste de los Estados Unidos. Las cenizas clase C se caracterizan por contener un alto contenido de calcio (>10%).

En el noreste de México existen diversas puzolanas artificiales como: la escoria granulada de alto horno, la ceniza volante y subproductos calcáreos de la industria química que contienen anhídrita y cales de baja pureza. Pero solo la ceniza volante, es la que se encuentra con mayor disponibilidad y accesibilidad económica, la cual se genera en las centrales carboeléctricas José López Portillo “Carbón I” y la “Carbón II” ubicadas en Nava, Coahuila. La primera de ellas, tiene una producción anual de 3 millones de toneladas y cuenta con 30 millones de toneladas que se encuentran almacenadas en bancos. De esta manera, si se contabiliza la ceniza producida por las dos centrales, se puede imaginar la cantidad potencialmente disponible de este subproducto. El costo de utilización de esta puzolana se debe principalmente al transporte, ya que se considera un subproducto industrial, por lo que su precio por tonelada es aproximadamente 30% menor en comparación al del cemento pórtland.

El uso de ceniza volante como remplazo del material cementante se ha vuelto una práctica común en los últimos años. La ceniza volante se ha usado en el concreto por razones económicas y ambientales. Además, la sílice amorfa contenida en la ceniza reaccionan con el hidróxido de calcio, formando productos de hidratación (C-S-H silicato de calcio hidratado, de sus siglas en inglés) [Neville, 1998] los cuales decrecen la porosidad del concreto [Choi et al, 2006; Montemor 2002, Khunthongkeaw 2006]. Conjuntamente la capacidad de la ceniza de llenar parcialmente los vacíos y poros presentes en la matriz cementante; permite crear sitios de nucleación y una vez que ésta reacciona, el tamaño de poro se reduce, disminuyendo así la permeabilidad y la difusión de agentes externos [Mangata, 1987; Hooton, 2010].

### **1.11.1 Uso de la ceniza volante en el concreto.**

La ceniza volante generada durante la combustión de carbón para la producción de energía, es un subproducto industrial que se reconoce como un contaminante ambiental. Debido a los problemas ambientales generados por la disposición de este sub-producto, se han realizado alrededor del mundo numerosas investigaciones sobre su utilización.

Desde que en la década de 1920 se incrementara la quema de carbón para la generación de energía, se han generado millones de toneladas de ceniza. La producción anual de subproductos generados de la quema de carbón a nivel mundial se estima alrededor de 600 millones de toneladas, de las cuales del 75 – 80% son constituidos por ceniza volante (aproximadamente 500 millones de toneladas) [Joshi, 1997]. Así, la cantidad de residuos de carbón (ceniza volante), generada por fábricas y centrales térmicas se ha incrementado a lo largo del mundo, por lo que la disposición de estas grandes cantidades de cenizas se ha vuelto un grave problema ambiental.

La utilización actual de la ceniza en el mundo varía mucho, de un mínimo de 3% a un máximo del 57%, sin embargo, en promedio mundialmente sólo el 16% del total de cenizas se emplea dentro de otra industria [Joshi et al., 1997].

En la India, donde 565 minas son operadas por Coal India y otras filiales, el carbón es el combustible dominante. En el 2003 la producción de hulla en este país fue de 358.4 millones de toneladas, mientras que se consumieron 407.33 millones de toneladas. La India es el sexto consumidor y generador de energía a nivel mundial. La ceniza volante se puede considerar como la quinta materia prima más abundante a nivel mundial [Mukherjee et al., 2008]. En este país se estima que el 25% de la ceniza se usa en la producción de cemento, construcción de carreteras y la fabricación de ladrillos [Bhattacharjee et al., 2002]. Para el periodo del 2009–2010 se estimó que el uso de ceniza en este sector crecería a 32 millones de toneladas [Burke, 2007].

A nivel mundial se han realizado numerosas investigaciones encaminadas al uso de este sub-producto; algunas de ellas enfocadas al empleo como materia prima en la fabricación de nuevos productos, siendo una alternativa económicamente viable para la disposición de este material. La no utilización de este sub-producto representa un desperdicio de recursos, ya que puede formar parte de la materia prima de otras industrias y causar problemas medio-ambientales.

Existen múltiples usos de estos materiales como: relleno de pavimentos, puzolana para la estabilización del suelo, rellenos de tierras, acondicionador para la agricultura, auxiliar para la fabricación de lodos industriales por vacío, conglomerantes para el tratamiento de aguas industriales, entre los más importantes. Con un gran éxito en el campo de los cementantes hidráulicos y en general en los de materiales de construcción (cementos, ladrillos comunes, agregados ligeros, prefabricados de concreto, etc.) [García, 2003]. El aprovechamiento de sus propiedades puzolánicas, incorporándolos como componentes del concreto, ya sea a través del cemento pórtland con adiciones, o bien, directamente como adición mineral en el concreto, representa una aplicación de gran valor.

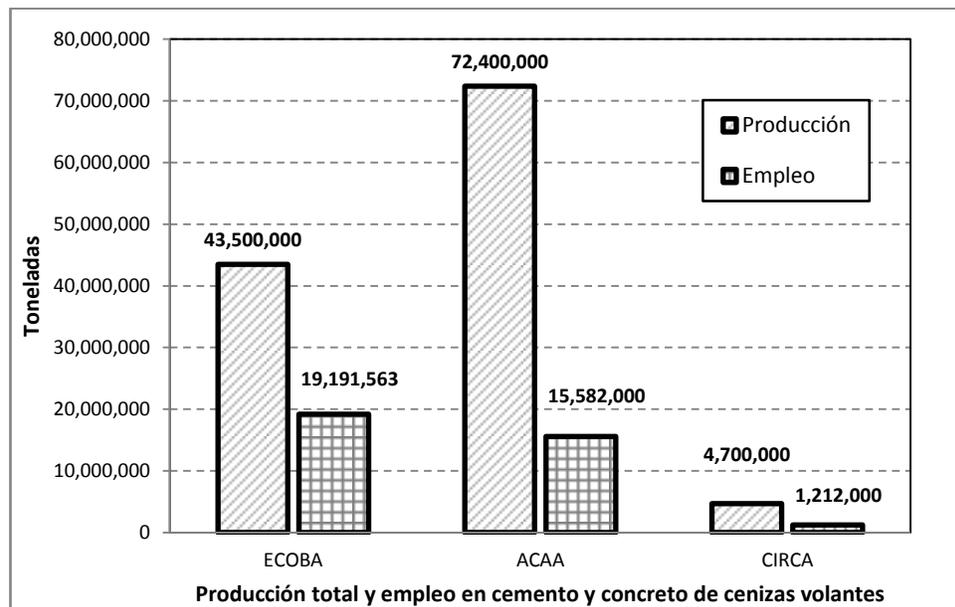
La Asociación Europea para el Uso de Subproductos procedentes de Centrales Térmicas (ECOBA, European Coal Combustion Products Association, de sus siglas en inglés), estimó para el año 2004 los productos procedentes de la combustión de carbón (CCPs, Coal Combustion Products), que incluyen cenizas volantes, ceniza de fondo, escoria de la caldera, y otros, se tuvo una generación de 63.8 millones de toneladas, de las cuales las cenizas volantes corresponden al 68% equivalente a 43.5 millones de toneladas, de estas solo un 51% fue utilizada.

La American Coal Ash Association (ACAA) estimó en el 2006 que en los EE.UU. la generación de CCP fue de 124.8 millones de toneladas anuales. De las cuales, 72.4 millones fueron cenizas volantes, lo que representa un 58% de la producción total y 18.6 millones de toneladas corresponden a cenizas de fondo equivalente a un 15% del

total. De la cantidad total de cenizas volantes generadas solo un 44.8% equivalente a 32.4 millones de toneladas fue usada y un 45% de cenizas de fondo producidas fueron utilizadas equivalente a 8.3 millones de toneladas (ACAA, 2007).

En Canadá, la Association of Canadian Industries Recycling Coal Ash (CIRCA, Canadian Industries Recycling Coal Ash, de sus siglas en ingles), registró una producción de 6.8 millones de toneladas de CCPs en el año 2004, dentro de las cuales las cenizas volantes ocupan un 69% del volumen total, equivalente a 4.7 millones de toneladas. Las cenizas de fondo ocupan un 23.3% equivalente a 1.6 millones de toneladas anuales. (CIRCA, 2004).

En la figura 8 se muestra la producción total de cenizas volantes y la reutilización de estas en cemento y concreto producidas en Europa y Norteamérica.



**Figura 8.** Producción y empleo de cenizas volantes [ECOBA, 2004; ACAA, 2007; CIRCA, 2004].

Del total de cenizas volantes producidas en Europa solo un 44% es empleado en cemento y concreto, de igual forma en Estados Unidos las cenizas volantes empleadas en cemento y concreto corresponden al 21.5% y finalmente en Canadá solo se reutiliza un 26%.

Ya que las puzolanas naturales y los subproductos industriales tienen, en general, costos más bajos que el cemento pórtland, la utilización de mezclas minerales puzolánicas y cementantes para remplazar parcialmente al clinker, puede originar beneficios económicos considerables debido al ahorro energético que supone sustituir un material (clinker) que requiere un alto consumo de energía (3000 kJ/kg clinker) por un subproducto.

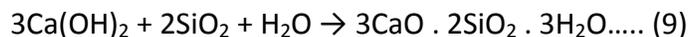
### **1.11.2 Beneficios del uso de la ceniza en el concreto.**

La necesidad de extender la durabilidad del concreto, ha propiciado el uso de aditivos y modificaciones a la composición del concreto. La adición de CV como aditivo se ha vuelto una práctica común en los últimos años [Montemor et al., 2002].

La mejora en las características de permeabilidad en concretos adicionados con ceniza volante se debe a la reacción de hidratación principal, la cual en sistemas a base de cemento pórtland ordinario suele ser:



Pero en sistemas con CV se presenta una reacción de hidratación secundaria:



En concretos con CV, el contenido de hidróxido de calcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  tiende a disminuir debido a la reacción secundaria de hidratación. Durante la hidratación en concretos con CPO se produce cal, pero en concretos con CV se consume cal. Esta es la principal ventaja del uso de CV [Ha et al., 2005].

Las principales fases producidas a temperatura ambiente durante la reacción puzolánica son: CSH,  $\text{C}_2\text{ASH}$  (silico-aluminato de calcio hidratado) y  $\text{C}_4\text{AH}$  (aluminato tetra cálcico hidratado). Estos productos secundarios llenan los vacíos capilares, lo que disminuye la porosidad del concreto. Este efecto permite un incremento en la

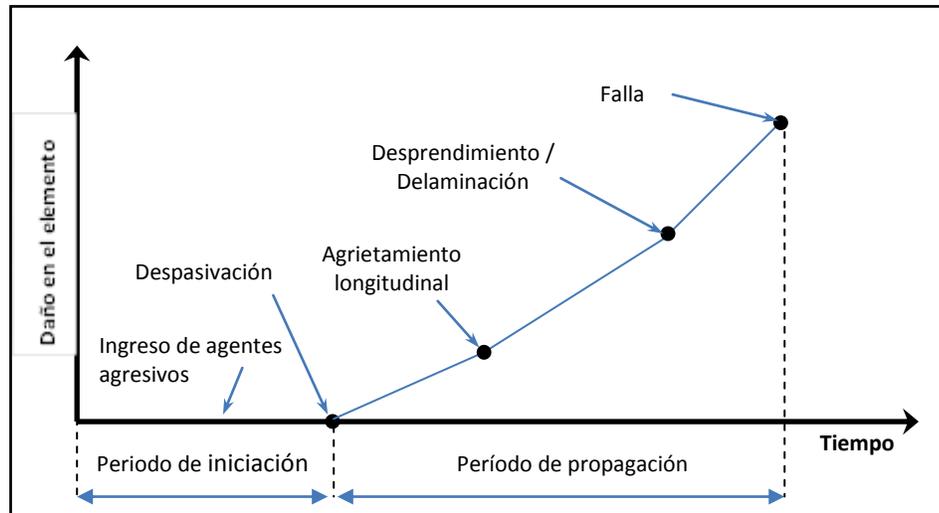
resistividad del concreto y una consecuente disminución de los coeficientes de difusión de algunas especies como el oxígeno y los iones cloro [Montemor et al., 2002].

### **1.12 Vida útil de las estructuras de concreto reforzado.**

El desempeño del concreto generalmente es juzgado por su resistencia mecánica y sus propiedades de durabilidad. Como se mencionó anteriormente, el problema más importante de durabilidad del concreto armado es el deterioro debido a la corrosión del acero de refuerzo.

En el entorno alcalino de la pasta cementante se forma sobre la superficie del acero una película de óxido estable que lo protege de la corrosión. Sin embargo, la corrosión puede iniciar debido a la carbonatación del concreto dando lugar a la reducción de la alcalinidad o por la presencia de iones cloro que causan daños por picadura en esta película protectora. Conforme los productos de corrosión incrementan su volumen se generan presiones internas que inducen grietas, desprendimientos o delaminaciones del recubrimiento. Este daño provoca la reducción o pérdida de las características de funcionalidad, seguridad y vida de servicio de las estructuras [Weyers, 1998].

Siguiendo el enfoque propuesto por Tuutti [Tuutti, 1982], el proceso de corrosión del acero de refuerzo puede ser dividido en dos etapas: el periodo de iniciación (despasivación), durante el cual los agentes externos, iones cloro o dióxido de carbono, penetran el recubrimiento, pero su concentración alrededor del acero aún no es suficiente para causar la corrosión de éste. El final de este período y principio del período de propagación es el momento en el que se alcanza el umbral de concentración de las especies agresivas y se produce la despasivación, dando inicio a la corrosión. Durante el periodo de propagación el deterioro de las estructuras aparece como resultado de la pérdida de sección del acero de refuerzo. Esta segunda etapa termina cuando se presenta un grado inaceptable de deterioro. La figura 9 muestra una representación de este enfoque.



**Figura 9.** Modelo de vida útil para estructuras de concreto relacionada con la corrosión del acero de refuerzo [Zhou et al., 2005].

El manual DURAR [DURAR, 1997] propone una definición clara para el concepto de vida útil de una estructura: “periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento”. Es decir, si la estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades (seguridad, funcionalidad y estética), ésta ya sobrepasó el período de su vida útil.

Así mismo, el comité ACI 365 define la vida útil de las estructuras como: “el periodo de tiempo después de la instalación, en el cual, el desempeño de la estructura cumple con los valores mínimos de mantenimiento”.

Una de las definiciones de vida útil más aceptada es la establecida por la ASTM E 632, menciona que la vida útil es "el período de tiempo después de la construcción durante el cual todas las propiedades esenciales alcanzan o superan el valor mínimo aceptable con un mantenimiento rutinario".

La condición que define el fin de la vida útil puede ser una reducción de la capacidad estructural, la seguridad estructural o algún otro parámetro como la estética. Consecuentemente el fin de la vida útil depende del tipo de estructura. Por ejemplo, la reducción del 20% de la capacidad estructural puede ser aceptable para un

elemento dado, porque aún con esta reducción es capaz de proporcionar un nivel aceptable de servicio, mientras que, para otro elemento un 5% de reducción de la capacidad estructural puede definir el fin de su vida de útil. En ambos casos la condición que gobierna es la capacidad o seguridad estructural. Por lo tanto la magnitud del daño provocado por la corrosión define el fin de la vida útil [Weyers, 1998].

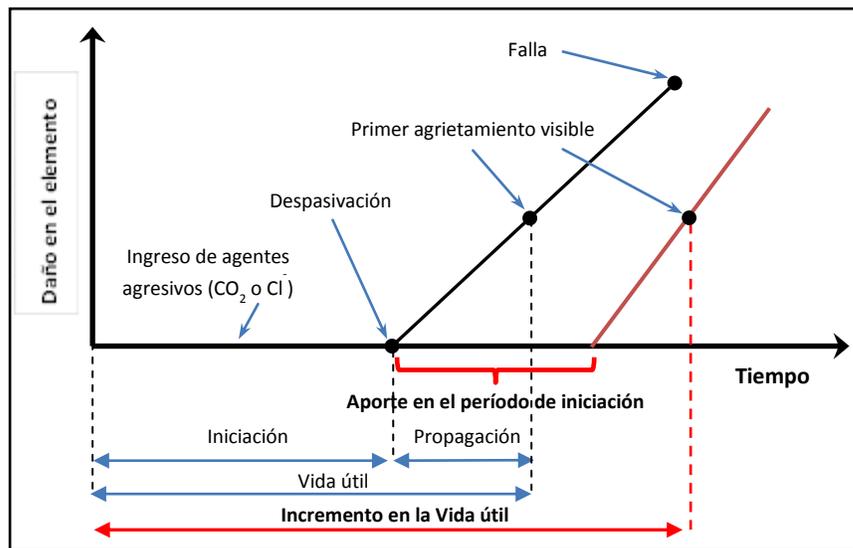
Algunos autores [Funhashi, 1990] definen el fin de la vida útil como el momento en que el acero se ha despasivado, es decir, cuando el recubrimiento se ha carbonatado o cuando suficientes cloruros han alcanzado el acero de refuerzo. Haciendo esta equivalencia calculan el periodo de iniciación y lo identifican como la vida útil. Sin embargo, esta consideración en muchos casos es muy conservadora, especialmente si el periodo de iniciación es muy corto.

Otros autores [Sygula et al., 1984] prefieren identificar la vida útil como el momento en que ocurre el agrietamiento del recubrimiento. Los productos de corrosión son expansivos, lo que genera fuerzas de tensión en el concreto y posteriormente el agrietamiento y desprendimiento del recubrimiento de concreto. El agrietamiento del recubrimiento puede resultar en una rápida difusión de agentes agresivos, lo que deriva en una mayor reducción del diámetro del acero y consecuentemente la reducción de la capacidad estructural.

En base a lo expuesto anteriormente, se puede definir razonablemente a la vida útil como el tiempo de iniciación de la corrosión más el tiempo para que se genere el primer agrietamiento. Alrededor de este tema se han realizado investigaciones que buscan incrementar la vida útil de las estructuras. Cuestiones relacionadas con el tipo de refuerzo han sido ampliamente discutidas en la literatura [Haynes G, 1992; McCuen, et al., 1992], se ha investigado el uso de acero galvanizado, acero inoxidable, recubrimientos sobre el acero de refuerzo para prevenir la corrosión [Rasheeduzzafar et al., 1992; Roper, 1982]. Algunos investigadores consideran el espesor de

recubrimiento de vital importancia, mientras otros piensan que el tipo y calidad del concreto es más importante [Gu et al., 2000]. Cementos compuestos o puzolánicos se han utilizado alrededor del mundo para producir concretos densos o impermeables. Estos contienen una mezcla de clinker de cemento pórtland y una variedad de puzolanas naturales y/o materiales cementantes complementarios como la escoria de alto horno, cenizas volantes y humo de sílice.

El uso de materiales puzolánicos en el concreto reduce considerablemente la permeabilidad que a su vez reduce la velocidad de difusión de la humedad y de las especies agresivas ( $\text{CO}_2$  o  $\text{Cl}^-$ ) hacia la interface acero-concreto. Esto permite un incremento en el período de iniciación al reducir la velocidad de transporte de sustancias agresivas. En la figura 10 se muestra el aporte en el período de iniciación por efecto de la densificación de la matriz cementante.



**Figura 10.** Aporte en el periodo de iniciación producto del uso de materiales cementantes complementarios.

Como se mencionó anteriormente, la presión generada por los productos de corrosión comienza cuando la interface porosa se satura de productos de corrosión. En una matriz densificada con materiales cementantes complementarios, el volumen de poros disponibles para dar cabida a dichos productos disminuye, por lo que aún no queda claro lo que ocurre durante el periodo de propagación, debido a dicha

reducción, el periodo de expansión libre puede acortarse, permitiendo la generación temprana de esfuerzos de tensión.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

Con la creciente preocupación por la durabilidad de las estructuras de concreto asociada a los temas ambientales, se ha incrementado el número de investigaciones dirigidas a estudiar el comportamiento del concreto con la incorporación de cenizas volantes como material complementario de cementación. A continuación se hace una breve descripción de trabajos de experimentación científica relacionadas con esta línea de investigación.

Leng y colaboradores estudiaron el coeficiente de difusión del ion cloro en concretos de alto desempeño elaborados con ceniza volante y escoria de alto horno, el experimento se diseñó para observar como varía el coeficiente de difusión respecto a la relación a/mc (0.26, 0.30 y 0.34), al tipo de adición y a la cantidad de adición (0, 10 y 20% de sustitución en peso de cemento). Encontró que el coeficiente de difusión incrementa con el aumento en la relación a/mc y disminuye con el incremento en la cantidad adicionada de ceniza volante o escoria de alto horno [Leng et al., 2000]. Las razones por las que las adiciones minerales redujeron el coeficiente de difusión fueron:

- En los concretos con adiciones se forma mayor cantidad de gel C-S-H debido a la actividad puzolánica, permitiendo que este gel bloquee la difusión de los iones y adsorbiera mayor cantidad de iones  $\text{Cl}^-$ .
- La cantidad total de iones de  $\text{Ca}_2^+$ ,  $\text{Al}_3^+$ ,  $\text{AlOH}_2^+$  y  $\text{Si}_4^+$  en los concretos con adiciones minerales es mayor que en el concreto con CPO. Estos iones

tienen menor capacidad de difusión y pueden restringir el movimiento de los iones  $\text{Cl}^-$  [Feng, 1996].

- La ceniza y la escoria tienen un contenido mayor de  $\text{C}_3\text{A}$  por lo que pueden enlazar mayor cantidad de iones  $\text{Cl}^-$  para formar sal de Friedel ( $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

En una investigación realizada por Choi et al. estudiaron el comportamiento del acero de refuerzo en concretos con y sin la adición de ceniza volante, los especímenes de concreto reforzado fueron expuestos a un ambiente rico en cloruros. Monitoreó el estado del acero mediante técnicas electroquímicas: el potencial a circuito abierto, la resistencia a la polarización y la espectroscopía de impedancia electroquímica. Para estimar la resistencia a la penetración del ion  $\text{Cl}^-$  empleó el método descrito en ASTM 1202. De los resultados obtenidos se observó que el remplazo parcial de cemento (20% en peso) por ceniza aumentó la resistencia a la corrosión y presentó una reducción de la velocidad de corrosión debido a la disminución de la permeabilidad a los iones cloruro [Choi et al, 2006].

El deterioro de la infraestructura debido a la corrosión ha llevado a renovar el interés entre corrosión y resistencia última. En estos estudios es necesario el uso de métodos acelerados para inducir la corrosión lo que permite obtener resultados en un tiempo mucho menor. Esto se puede lograr mediante la aplicación de un potencial constante [Cabrera, 1996] o una corriente eléctrica de magnitud constante [Fang et al., 2004; Andrade et al., 1998] en el acero embebido. Los resultados obtenidos de esta manera tienen diversas aplicaciones: ya sea para entender el efecto de la corrosión en la adherencia del acero con el concreto [Cabrera, 1996; Fang et al., 2004], o para comprender el mecanismo de agrietamiento del recubrimiento por corrosión del acero de refuerzo [Andrade et al., 1998]. Pero este método, posiblemente, modifica el proceso de corrosión y el tipo de productos de corrosión debido a la migración de hierro en los poros del concreto.

En un estudio realizado por Alonso y colaboradores, encontraron que para obtener un ancho de grieta específico se necesita una mayor profundidad de ataque cuando se aplica una densidad de corriente de  $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  que cuando se usa una densidad de  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , lo cual se puede atribuir al grado de hidratación de los óxidos de hierro y su volumen relativo. Sin embargo, la influencia de la velocidad de corrosión es menos significativa en la aparición de la primera grieta [Alonso et al., 1998].

Torres-Acosta comparó la eficiencia de la corrosión acelerada mediante una densidad de corriente constante ( $80\text{--}200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) contra pruebas de corrosión natural; encontrando que no hay diferencia entre los parámetros de corrosión (pérdida de masa, apertura y extensión de grieta y profundidad de picadura) en las pruebas aceleradas y naturales; lo que da soporte al uso de estas técnicas para determinar la vida residual de las estructuras [Torres-Acosta, 2010].

En un estudio realizado por Sabine Caré y André Raharinaivo, compararon el proceso de corrosión y el agrietamiento del recubrimiento bajo pruebas aceleradas contra el proceso bajo condiciones naturales, para lo cual fueron elaborados especímenes cilíndricos de mortero con acero de refuerzo embebido, en el proceso, los especímenes fueron sometidos a dos densidades de corriente anódica  $100$  y  $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Los resultados obtenidos mediante las pruebas aceleradas muestran que la corrosión del acero obedece la ley de Faraday únicamente cuando los especímenes están inmersos en solución con cloruros. Lo que significa que el proceso principal es la disolución del acero. Al contrario, cuando se usa agua pura, un proceso más complejo ocurre durante la prueba de corrosión acelerada. Por medio del análisis de difracción de rayos X se constató que se forman los mismos productos de corrosión en las pruebas de corrosión acelerada y corrosión natural. Por lo tanto, se confirma que la prueba de corrosión acelerada por corriente impresa, es un método válido para estudiar el proceso de corrosión del acero en el concreto, y sus efectos sobre el daño del recubrimiento [Caré et al., 2007].

Las estructuras de concreto a menudo son consideradas como estructuras permanentes con muy bajo costo de mantenimiento. Lo cual es cierto en ambientes templados con materiales bien seleccionados y métodos de construcción cuidadosamente ejecutados. Sin embargo, durante las últimas décadas, el agrietamiento y desprendimiento de concreto por la corrosión del acero de refuerzo se han desarrollado como los problemas más importantes alrededor del mundo, porque puede comprometer seriamente la vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado.

Diversas investigaciones teóricas, experimentales y observaciones de campo del agrietamiento del concreto debido a la expansión de productos de corrosión se han documentado en la literatura. Como se mencionó anteriormente, la corrosión del acero de refuerzo induce el desarrollo de tensiones internas que pueden inducir el agrietamiento del recubrimiento de concreto. La relación entre la apertura de grietas y la cantidad de óxido generado por la corrosión, expresado como la penetración de la corrosión o la pérdida de diámetro de las barras de acero, ha sido objeto de diversos trabajos a través de diferentes ensayos acelerados y no acelerados.

En otra investigación realizada por Carmen Andrade y colaboradores, elaboraron pequeñas vigas reforzadas en las cuales indujeron la corrosión artificialmente (10 y 100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) mediante una corriente eléctrica. Se monitoreó la carga necesaria y la pérdida de la sección de refuerzo para inducir el agrietamiento superficial y la evolución del espesor de la grieta, con el uso de galgas extensométricas (strain gauges) colocados en la superficie de los especímenes. Los resultados indicaron que una pérdida de la sección transversal de sólo unos micrómetros fue necesaria para inducir grietas visibles en la superficie de los especímenes, una disminución del radio de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  genera una grieta 0.1 mm de ancho, con 3 cm de recubrimiento de concreto y una relación recubrimiento/diámetro del acero  $< 2$  [Andrade et al., 1993].

En 1998 Alonso y colaboradores, estudiaron la relación entre la cantidad de corrosión y el agrietamiento del recubrimiento de concreto. Las variables que estudiaron fueron: relación recubrimiento/diámetro ( $C/\emptyset$ ), proporción de cemento, relación agua/cemento ( $a/c$ ), posición de colado del acero, refuerzo transversal (estribos) y velocidad de corrosión. El proceso de corrosión se aceleró mediante la aplicación de una corriente constante ( $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Encontrando que la relación  $C/\emptyset$ , la porosidad del concreto (periodo de generación de la primer grieta) y la velocidad de corrosión (periodo de propagación) son las variables que controlan el fenómeno. Los resultados mostraron que para valores de  $C/\emptyset$  entre 2 y 3, que son normales en estructuras de concreto, se necesita una penetración de ataque de 15–35  $\mu\text{m}$  para agrietar superficialmente el concreto (0.1 mm ancho de grieta). Variando la relación  $a/c$  se observó que un incremento en la porosidad (aumento en la relación  $a/c$ ) supone un retraso en la generación del agrietamiento. Este comportamiento fue asociado a la disposición de los poros que permitió la migración de los óxidos, evitando de esta manera la presión en el concreto que rodea al acero [Alonso et al., 1998].

Torres-Acosta y Sagüés determinaron la cantidad de productos de corrosión necesarios para agrietar superficialmente el recubrimiento de concreto en especímenes con corrosión uniforme y localizada (corrosión uniforme valores pequeños de  $C/L$ , corrosión localizada valores grandes de  $C/L$ ;  $C$  recubrimiento de concreto;  $L$  longitud anódica), encontrando que la cantidad de corrosión necesaria en especímenes con corrosión localizada fue 49  $\mu\text{m}$  - 137  $\mu\text{m}$  y para especímenes con corrosión uniforme 15  $\mu\text{m}$  – 75  $\mu\text{m}$ . Propusieron una ecuación para determinar la cantidad de productos necesarios para agrietar el recubrimiento de concreto ( $x_{\text{crit}}$ ) en función de las dimensiones del espécimen (recubrimiento de concreto,  $C$ ; diámetro del acero de refuerzo,  $\emptyset$ ; y la longitud anódica,  $L$ ). Determinaron el esfuerzo de agrietamiento generado por los productos de corrosión, encontrando que éste rebasa la resistencia a tensión del concreto y a veces la resistencia a compresión ( $f'c$ ) [Torres-Acosta, 2000].

En el 2009 José Pacheco y colaboradores, estudiaron la cinética de la corrosión, empleando una puzolana natural mexicana, se obtuvo un incremento de la etapa de iniciación mediante la modificación de la matriz cementante. Pero se observó que los valores de resistividad eléctrica después de 160 días de exposición en un ambiente rico en cloruros (35 g/L de NaCl), en las muestras que se adicionó la puzolana natural se presentó una caída drástica en dichos valores. Lo anterior podría sugerir que si bien la puzolana natural incrementa la resistividad de manera importante debido a la reducción de la porosidad, las presiones generadas por los productos de oxidación podrían conducir a un agrietamiento prematuro comparado con las composiciones sin puzolana natural [Pacheco et al., 2009].

En la figura 11 se muestra el seguimiento de la resistividad de los morteros elaborados en dicha investigación.

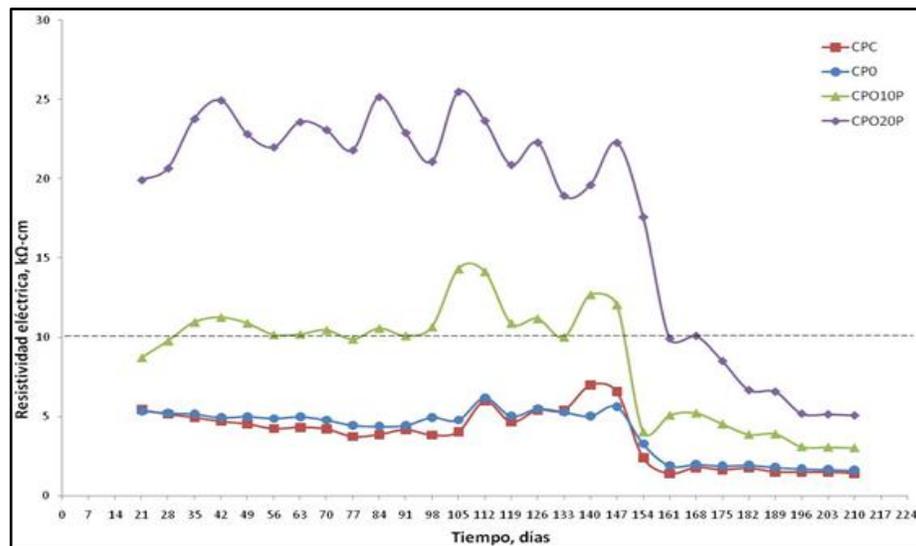


Figura 11. Resistividad eléctrica  $\rho$  de morteros por composición [Pacheco et al., 2009].

En la figura 11 se observa el aumento de la resistividad de las mezclas con PN (puzolana natural), siendo para CPO20P (20% de sustitución de cemento p $\acute{o}$ rtland ordinario por la puzolana natural) hasta dos veces superior que aquellas con CPO10P y hasta 5 veces mayor que las CPO y CPC (mezclas de referencia).

La caída en los valores de resistividad ( $\rho$ ) se atribuyó a agrietamientos no observados a simple vista, pero que posteriormente, hacia el final del periodo de exposición, fueron detectados en las probetas con la puzolana. En contraste la disminución de la  $\rho$  fue menor para las mezclas de referencia (CPO y CPC), en las cuales no se encontraron agrietamientos, esto, ocasionado por la alta permeabilidad y porosidad de estos especímenes. Por lo que se infirió, que los poros capilares en este caso, son de un tamaño mayor en comparación con los especímenes con PN.

Por lo descrito en el párrafo anterior, se presume que los productos de corrosión pudieron permear hacia el exterior a través la red de poros, disminuyendo así las presiones internas provocadas por su generación. Efecto evidenciado por las manchas encontradas en la superficie de dichas probetas. Lo anterior, podría sugerir que si bien la PN incrementa la resistividad de manera importante debido a la reducción de la porosidad, las presiones generadas por los productos de oxidación podrían conducir a un agrietamiento prematuro comparado con las composiciones sin PN.

A pesar de que se ha observado que mediante el uso de la CV se obtienen concretos con buenas características físicas y mecánicas, es necesario estudiar el comportamiento de estos concretos una vez que el acero ha sido despasivado. Así mismo, es necesario investigar el efecto del uso de este tipo de subproductos a mayores porcentajes de sustitución.

### **JUSTIFICACIÓN**

La corrosión en el acero de refuerzo es un problema que disminuye la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, además de comprometer su integridad estructural [Mehta, et al, 2001]. Los productos generados durante la corrosión del acero, disminuyen su sección transversal y causan la pérdida de adherencia en la interface acero-concreto, así mismo, producen esfuerzos de tensión en el concreto circundante, los cuales generan el agrietamiento del recubrimiento de concreto. Sin embargo no todos los productos de corrosión contribuyen a la acumulación de

tensiones [Wong et al., 2010], lo anterior debido a que algunos de ellos llenan los vacíos circundantes a la interface acero-concreto o pueden migrar fuera de dicha interface a través del sistema de poros una vez que se alcanza la saturación [Liu et al., 1998; Andrade et al., 1993].

El uso de materiales cementantes complementarios, como la ceniza volante, además de apoyar los procesos de sustentabilidad, trae consigo beneficios a las propiedades del concreto. De acuerdo a diversos estudios, se ha encontrado que las partículas de la ceniza reaccionan con el hidróxido de calcio, formado durante la hidratación del cemento, generando productos de hidratación similares a los producidos por el cemento pórtland (C-S-H silicato de calcio hidratado, de sus siglas en inglés) [Neville, 1998] que disminuyen la porosidad del concreto [Choi et al., 2006]. Adicionalmente, la ceniza finamente granulada tiene la capacidad de llenar parcialmente los vacíos y poros presentes en la matriz cementante; lo cual permite disminuir el tamaño de poro, la permeabilidad y la difusión de agentes externos y por consecuencia se incrementa el periodo de iniciación de la corrosión [Mangata et al., 1987; Hoon, 2010 y Malhotra, 2002].

Los poros de la interface acero-concreto sirven como depósitos para los productos de corrosión; una vez que dicha interface se satura, los productos generan esfuerzos internos de tensión sobre el concreto. Se ha observado que el incremento en la porosidad, por medio de la relación agua/material cementante, produce un retraso en el agrietamiento del recubrimiento, atribuido a la mayor cantidad de poros disponibles para acomodar los productos de corrosión, lo cual no genera esfuerzos internos [Alonso et al. 1998].

La capacidad de la red de poros para acomodar dichos productos y retrasar la generación de esfuerzos, se puede ver reducida al emplear ceniza volante, debido a que densifica la matriz cementante, y como consecuencia se acorta el tiempo en que se produce el agrietamiento del recubrimiento. Por lo anterior, se asume que se requiere

menor cantidad de productos de corrosión para agrietar una matriz adicionada con material cementante suplementario en comparación con una matriz elaborada con sólo cemento pórtland.

Los estudios acerca del empleo de la ceniza volante se centran en la etapa de iniciación de la corrosión, sin embargo, el concepto de durabilidad abarca tanto la etapa de iniciación como la etapa de propagación. Por lo que es necesario estudiar el comportamiento de los concretos fabricados con ceniza volante una vez que el acero se ha despasivado. El propósito que tiene esta investigación es estudiar el efecto de la densificación de la matriz cementante al utilizar ceniza volante, lo anterior en el periodo de propagación de la corrosión, determinando parámetros como la pérdida de masa de acero necesaria para agrietar el recubrimiento y su relación con las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

### **OBJETIVOS**

#### **General.**

Evaluar el efecto de la densificación de la matriz cementante mediante el empleo de una ceniza volante en el proceso de agrietamiento del recubrimiento de concreto por efecto de la corrosión del acero de refuerzo.

#### **Particulares.**

- Caracterizar los materiales empleados en la producción de los concretos en estudio.
- Diseñar la metodología experimental que permita determinar el efecto de la ceniza volante en la pérdida de masa necesaria para agrietar el recubrimiento de concreto.
- Evaluar el efecto de la ceniza volante en la densificación de la matriz cementante mediante la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los concretos elaborados.

- Inducir la corrosión del acero en las probetas de concreto reforzado mediante un proceso acelerado de aplicación de corriente.
- Caracterizar electroquímicamente el sistema acero-concreto, mediante la medición del potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto, medidas a través de las técnicas potencial de media celda, Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE).
- Determinar la pérdida de masa necesaria para generar el primer agrietamiento superficial visible en las probetas de concreto reforzado.

### **HIPÓTESIS**

La cantidad de productos de corrosión que pueden ser transportados a la interface acero-concreto, depende del volumen y la conectividad de la estructura de los poros del concreto, por lo que, para igual estado de degradación del acero en diferentes matrices cementantes, la posibilidad de agrietamientos de la matriz es mayor cuando el volumen de poros disminuye.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Descripción de los materiales empleados.

##### 3.1.1 Materiales cementantes.

##### Cemento pórtland.

La composición del Cemento Pórtland Ordinario (CPO), según NMX C 414, se caracteriza por contener hasta un 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza, motivo por el cual se propuso el uso de CPO para estudiar el efecto de la ceniza volante.

Dado que la fabricación del CPO requiere de un contenido mayor de clinker, es necesario mayor consumo de energía y por lo tanto mayor emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por lo anterior la industria cementera ha optado por la producción de cementos compuestos, limitando la fabricación de CPO a proyectos especiales, dificultando la adquisición de este tipo de cemento.

Para esta investigación se empleó cemento pórtland ordinario clase resistente 40 de resistencia rápida (CPO 40R). Este cemento es recomendado para la construcción de elementos y estructuras de concreto que requieren de alta resistencia inicial y final. Se utiliza en elementos estructurales de edificios de gran altura (columnas, trabes, cimentaciones), elementos presforzados (trabes, columnas, viguetas), elementos

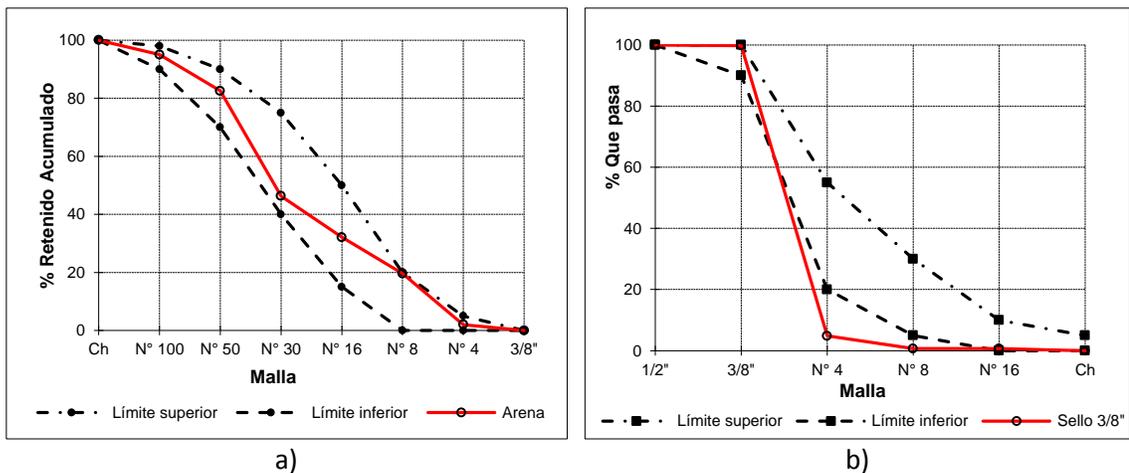
postensados, aeropistas, etc. Dicho cemento cumple con la norma NMX C 414-2004 y ASTM C 150-05.

**Ceniza volante.**

La ceniza volante empleada en la investigación se obtuvo de la empresa Triturados de Piedras Negras (TPN) ubicada en libramiento Manuel Pérez Treviño No. 400, Piedras Negras, Coahuila, misma que fue adquirida en la central carboeléctrica José López Portillo ubicada en Nava, Coahuila; esta ceniza es denominada localmente como integral, ya que tiene una granulometría compuesta, formulada con tres diferentes distribuciones de tamaños de partículas, lo anterior, resultante del sistema de recolección de las plantas.

**3.1.2 Agregados.**

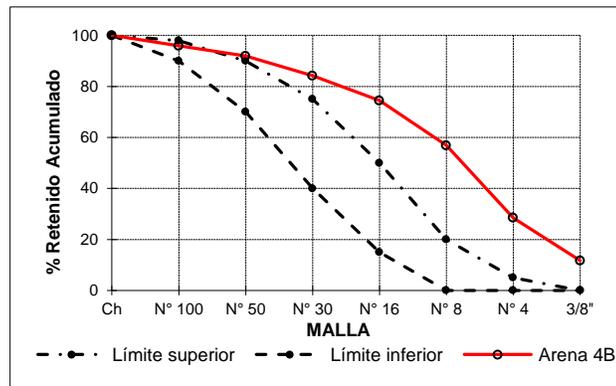
Como se verá más adelante, el recubrimiento empleado en los especímenes para corrosión acelerada fue de 23 y 35 mm por lo que en base al código ACI 318 un tamaño máximo de agregado (TMA) de 10mm (3/8”) fue requerido. Inicialmente se propuso emplear dos agregados calizos triturados: arena No. 4 y grava 10mm (3/8”), pero fue difícil encontrar agregados bien graduados, especialmente la grava, su granulometría se muestra en la figura 12.



**Figura 12.** Distribución granulométrica de los agregados, a) Arena caliza y b) Grava caliza 10 mm.

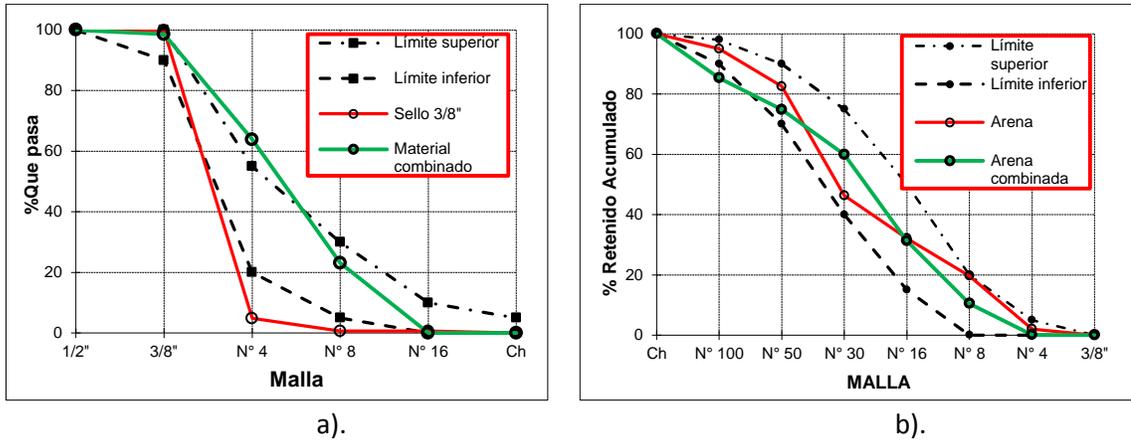
En la figura 12b se observa que el 95% del material queda retenido en la malla No. 4, dando como resultado una granulometría discontinua, por lo que fue necesario emplear tres agregados: arena caliza No. 4, arena caliza 4B, usada para la fabricación de bloques de concreto y grava de 10 mm de tamaño máximo (3/8”).

La distribución de tamaños de la arena 4B se muestra en la figura 13. Como se puede observar este material contiene mayor cantidad de partículas gruesas; las cuales fueron empleadas para compensar a los otros dos agregados.



**Figura 13.** Distribución granulométrica, arena caliza 4B.

Los tres agregados fueron combinados para obtener una granulometría compuesta, la cual fue obtenida mediante una hoja de cálculo donde se propusieron porcentajes de cada material para hacer que la mezcla de los tres arrojara como resultado la mejor graduación posible. Después de obtener dichos porcentajes fueron realizadas mezclas de prueba para evaluar la trabajabilidad (revenimiento  $14 \pm 2$  cm), de esta manera se realizaron ajustes a los porcentajes dando como resultado los agregados fino y grueso mostrados en la figura 14. Los porcentajes usados de cada material fueron: 10% sello, 38% arena 4B y 52% arena. Estos agregados son los que se emplearon en la elaboración de las mezclas.



**Figura 14.** Distribución granulométrica de los agregados combinados, a) Arena combinada, b) Grava combinada.

### Características físicas de los agregados.

Los agregados fueron caracterizados físicamente mediante la determinación de las siguientes propiedades:

- *Peso volumétrico seco suelto (PVSS) y peso volumétrico varillado seco (PVVS).*- Determinado mediante el procedimiento descrito en la norma NMX C 073-04.
- *Masa específica y porcentaje de absorción de la arena.*- Determinado mediante el procedimiento de la norma NMX C 165-04.
- *Masa específica y porcentaje de absorción del agregado grueso.*- Determinado mediante el procedimiento de la norma NMX C 164-02.
- *Análisis granulométrico.*- Antes de realizar este análisis se llevó a cabo el muestreo de los agregados de acuerdo a la norma NMX C-30-04, la reducción de la muestra conforme a lo indicado en NMX C-170-97 y la granulometría se realizó de acuerdo a NMX C-077-06.

En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas de los ingredientes que fueron utilizados en el diseño de mezcla.

**Tabla 1.** Propiedades físicas de los ingredientes utilizados en la elaboración de las mezclas.

<b>Material</b>	<b>Masa específica g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Absorción, %</b>	<b>PVSS, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>PVVS, kg/m<sup>3</sup></b>
Grava 3/8"	2.70	1.55	1 494	1 627
Arena 4B	2.64	1.28	1 572	1 795
Arena	2.67	0.84	1 629	1 920
Cemento	3.15	-	-	-
Ceniza	2.08	-	-	-

### 3.1.3 Aditivo.

Únicamente cuando fue requerido, se empleó aditivo superplastificante base policarboxilatos para alcanzar un revenimiento de  $14 \pm 2$  cm. El aditivo empleado cumple con la especificación ASTM C 494 para aditivos reductores de agua tipo A y aditivos reductor de agua de alto rango, Tipo F.

Para las mezclas con relación agua/material cementante (a/mc) de 0.45 en promedio se dosificó 14 mL/kg de cemento, partiendo de un revenimiento 0 cm para llegar a un revenimiento de 14 cm. Para las mezclas de relación 0.60 se dosificó en promedio de 4.6 mL/kg de cemento, partiendo de un revenimiento de 5 cm, para llegar a un revenimiento de 16 cm.

### 3.1.4 Acero.

Se empleó acero grado 42 en forma de varilla corrugada, teniendo una resistencia a la fluencia nominal de 4 200 kg/cm<sup>2</sup> y un diámetro nominal de 0.95 cm (3/8 de pulgada). La varilla fue sometida a un proceso de preparación con el propósito de controlar el área expuesta (o de estudio) y estimar la velocidad de corrosión de la misma. El proceso de preparación se describe en 3.3.1.

## 3.2 Proporcionamiento de las mezclas.

La capacidad de la estructura de poros de la matriz de concreto para dar cabida a los productos de corrosión puede tener efecto en el tiempo en el que el recubrimiento

se agrieta por acumulación de los productos de corrosión. Por lo anterior esta parte del desarrollo experimental se basa en la disminución de la porosidad y permeabilidad de la matriz cementante, para limitar el espacio disponible para el acomodo de los productos de corrosión, lo anterior mediante la variación de la relación agua/material cementante, la sustitución de cemento por ceniza volante y el tiempo de curado.

#### **Relación agua - material cementante (a/mc).**

La porosidad del concreto depende de la relación agua-material cementante, debido a que al evaporarse el agua que no reacciona químicamente con el cemento aumenta red de huecos o estructura porosa. Para propiciar el incremento en el espacio disponible donde los productos de corrosión puedan acomodarse antes de generar esfuerzos de tensión sobre el concreto, se emplearon dos relaciones agua-material cementante 0.45 y 0.60, para evaluar esta condición.

#### **Sustitución de cemento por ceniza volante.**

La ceniza volante, es el principal subproducto de las plantas carboeléctricas, es ampliamente aceptado como material puzolánico por lo que es usado como adición mineral en las mezclas de concreto. En la práctica comercial de la producción de concreto, la dosis de la CV es de 15 a un 20% en masa del material cementicio total. Razón por la cual se emplearon dos porcentajes de sustitución de cemento en masa 10 y 20.

#### **Curado de los especímenes.**

Debido al ahorro de energía, a la protección del medio ambiente y al mejoramiento de las propiedades del concreto, la ceniza volante es una adición mineral comúnmente usada en la elaboración de concreto. La reacción del hidróxido de calcio con la ceniza volante forma un gel de Silicatos de Calcio Hidratado (CSH, por sus siglas en inglés) que se traduce en un aumento de la resistencia a la compresión y disminución en la porosidad del concreto. Debido a que la reacción puzolánica no

puede ocurrir hasta que el hidróxido de calcio  $[Ca(OH)_2]$  es generado en la hidratación del cemento, el proceso de reacción de la ceniza volante se rezaga por lo que necesita un mayor tiempo de curado inicial.

Con el objetivo de densificar la matriz cementante por efecto de la hidratación del cemento y la reacción de la ceniza, los especímenes elaborados fueron sometidos a un proceso de curado estándar ( $23^{\circ}C \pm 1.7^{\circ}C$  y una humedad relativa mayor a 95%) a cuatro edades: 1, 7, 28 y 56 días.

Por lo anterior, fueron elaboradas seis mezclas de concreto con una dosificación de  $350 \text{ kg/m}^3$  de material cementante como consumo base, empleando dos relaciones agua-material cementante (0.45 y 0.60), las primeras dos mezclas son de referencia, es decir sin CV. Las cuatro mezclas restantes resultan de la sustitución en masa de cemento por ceniza volante en dos porcentajes 10 y 20%. La figura 15 muestra las características de las mezclas.

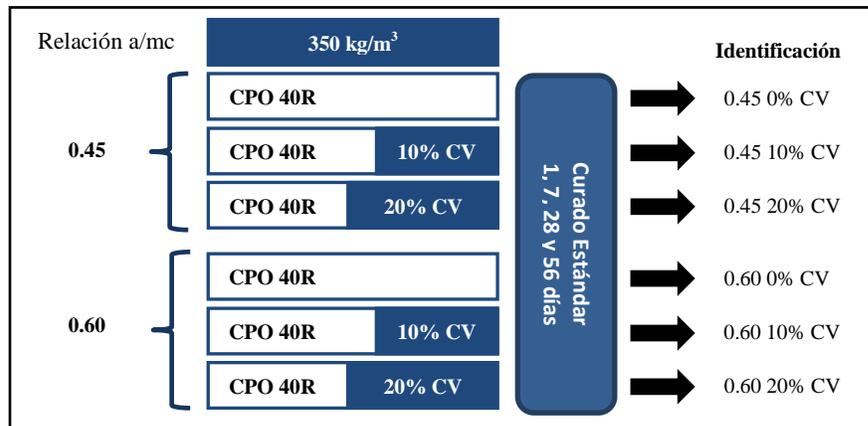


Figura 15. Características de las mezclas elaboradas.

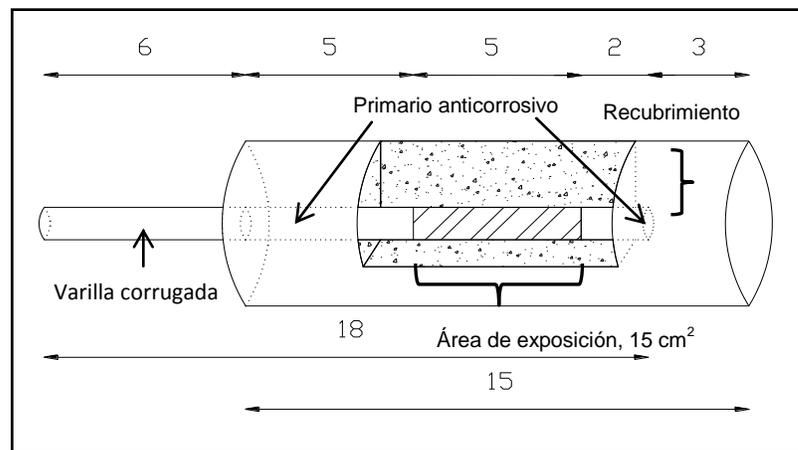
Las mezclas fueron elaboradas de acuerdo a ASTM C 192/C192M, buscando la misma consistencia en todos los casos, revenimiento igual a  $14 \pm 2 \text{ cm}$ , mismo que se realizó de acuerdo a ASTM C 143/C 143M. En la tabla 2 se muestra el proporcionamiento de las mezclas elaboradas.

**Tabla 2.** Proporcionamiento de las mezclas de concreto.

Materiales	Peso saturado y superficialmente seco, kg/m <sup>3</sup>					
	a/mc	0.45			0.60	
Cemento	350	315	280	350	315	280
Ceniza, %	0	10	20	0	10	20
Ceniza	0	35	70	0	35	70
Agua	157.5	157.5	157.5	210.0	210.0	210.0
Aditivo, mL/kg de material cementante	9	14	20	3.5	4.9	5.5
Revenimiento, cm	15	16	16	14	13	14
Agregado grueso	660.1	660.1	660.1	660.1	660.1	660.1
Agregado fino	1236.0	1220.6	1205.3	1095.1	1079.8	1064.4
Identificación	0.45 0%CV	0.45 10%CV	0.45 20%CV	0.60 0%CV	0.60 10%CV	0.60 20%CV

### 3.3 Fabricación de especímenes.

Por cada mezcla fueron elaborados 48 especímenes para someterlos al proceso de corrosión acelerada, la figura 16 muestra la configuración de los especímenes. También fueron fabricados 20 cilindros (10 cm de diámetro por 20 cm de altura), de acuerdo con ASTM C 192, para caracterizar física y mecánicamente el concreto. En la tabla 3 se muestra la cantidad de especímenes usados para cada prueba.



**Figura 16.** Configuración esquemática de los especímenes para someterlas al proceso de corrosión acelerada.

**Tabla 3.** Distribución de especímenes por tipo de prueba.

Prueba	Tipo de espécimen	Edad de curado, días				Total de especímenes
		1	7	28	56	
Resistencia a compresión ASTM C 39	cilindro 10x 20 cm	2	2	2	2	20 cilindros
Módulo de elasticidad ASTM C 469	cilindro 10x 20 cm	1	1	1	1	
Resistencia a la penetración del ion cloruro ASTM C 1202	cilindro 10x 20 cm	1	1	1	1	
Porosidad abierta	cilindro 10x 20 cm	1	1	1	1	
Caracterización electroquímica	Recubrimiento 1 2.3 cm	6	6	6	6	48 cilindros
	Recubrimiento 2 3.5 cm	6	6	6	6	

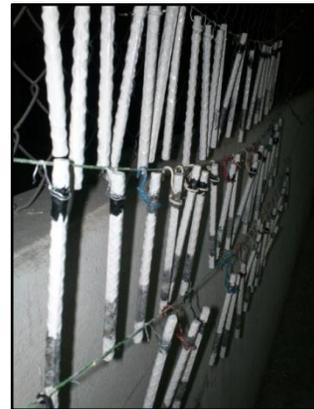
### 3.3.1 Especímenes para corrosión acelerada.

#### Acondicionamiento de las varillas.

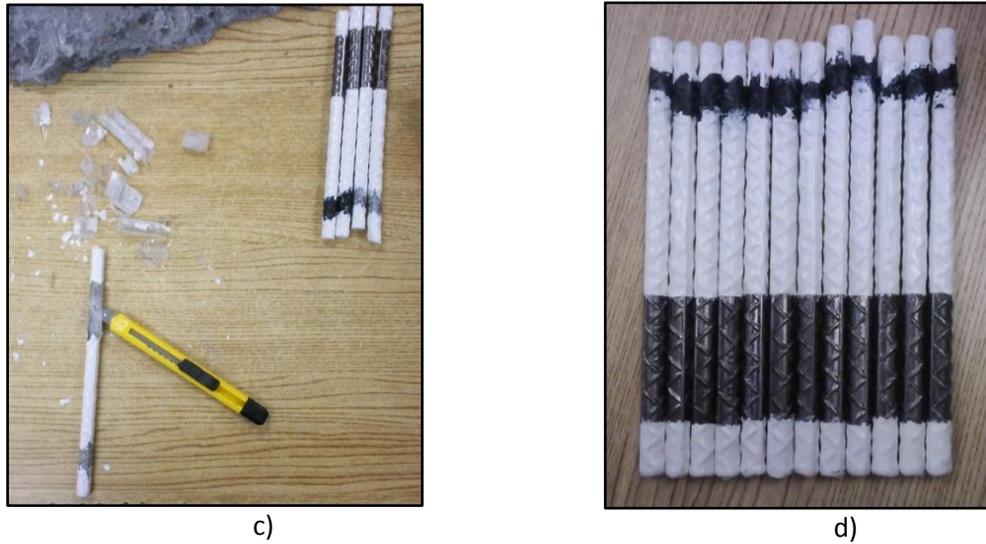
Fueron cortados tramos de varillas corrugadas de 18 cm, mismas que fueron limpiadas para retirar los óxidos mediante pulido con un esmeril, después el polvo producto del pulido fue removido, y posteriormente, se aplicó un primario epóxico anticorrosivo dejando sin pintar 5 cm de longitud en la sección media de cada tramo de acero, que representan la región de exposición. En la figura 17 se muestra el proceso de preparación de las varillas.



a)



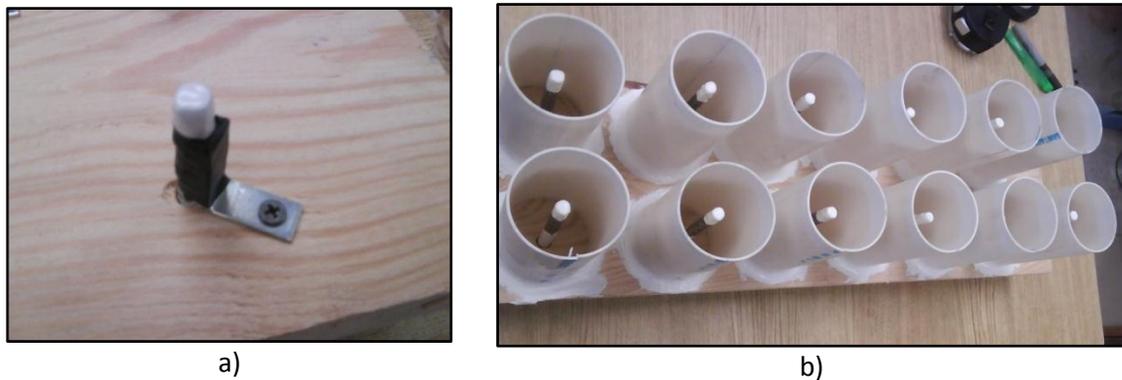
b)



**Figura 17.** Proceso de acondicionamiento de las varillas, a) Equipo empleado para cortar la varilla, b) Aplicación de primario epóxico, c) Delimitación del área de exposición y d) Varillas preparadas para el proceso de corrosión acelerada.

**Geometría de los especímenes empleados para el proceso de corrosión acelerada.**

Fue seleccionada una geometría cilíndrica para los especímenes, con el objetivo de tener un ataque radial sobre el acero de refuerzo. Los moldes fueron fabricados con tubería de PVC de 150 mm de largo y dos diámetros 51 mm (2 pulgadas) y 76 mm (3 pulgadas), esto con el objetivo de estudiar el efecto del espesor de recubrimiento en el proceso de agrietamiento por corrosión del acero. La varilla, previamente acondicionada, fue colocada al centro de los moldes. En la figura 18 se muestran los moldes empleados. Una vez armado el molde se colaron los especímenes.



**Figura 18.** Moldes empleados para la fabricación de los especímenes para corrosión acelerada.

### **3.3.2 Especímenes para caracterización física y mecánica del concreto.**

Por cada mezcla se elaboraron 20 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. Los cilindros permanecieron 24 horas en los moldes antes de ser desmoldados, después se sometieron a un proceso de curado estándar a 1, 7, 28 y 56 días. Los especímenes se elaboraron y curaron de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM C 31.

### **3.4 Caracterización física y mecánica.**

#### **3.4.1 Resistencia a la compresión.**

Después del curado los cilindros fueron ensayados a compresión usando una máquina marca ELE modelo AUTO TEST 2000 de 200 toneladas de capacidad.

El ensaye se realizó de acuerdo a ASTM C 39. Para determinar la resistencia a la compresión se ensayaron tres cilindros, a dos de ellos previamente se les determinó el módulo de elasticidad.

#### **3.4.2 Módulo de elasticidad.**

El módulo de elasticidad (E) fue determinado siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 469. Fue obtenido calculando la pendiente de la curva esfuerzo deformación dentro del rango elástico, esta pendiente se calcula entre los puntos donde la ordenada corresponde a la deformación de 50  $\mu\text{m}$  y el punto donde el valor de la abscisa corresponde al 40 % de la resistencia última del espécimen. Para obtener las deformaciones se usó el dispositivo que se muestra en la figura 19.



**Figura 19.** Dispositivo empleado para obtener el módulo de elasticidad del concreto.

### 3.4.3 Porosidad abierta al agua.

La porosidad abierta al agua ( $P_a$ ) se conoce también como porosidad accesible o comunicada y se define como la relación entre el volumen de poros comunicados al exterior y su volumen total, se expresa en por ciento del volumen total. Esta característica fue determinada conforme lo indicado en UNE 61-033-75. La prueba consiste en introducir un fluido en los poros y cuantificar su volumen. El procedimiento utilizado se describe a continuación.

De un espécimen cilindro (10 cm de diámetro por 20 cm de altura) fueron cortadas dos muestras de 5 cm de espesor, se lavaron para remover polvo producto del corte, posterior a esto fueron secadas, se dejaron enfriar y se pesaron hasta masa constante (peso seco). Las muestras se colocaron dentro de un desecador, como se muestra en la figura 20, y se aplicó vacío durante 3 horas, al término de las cuales se adicionó agua hasta que quedan totalmente cubiertas y se aplicó vacío por una hora más, al cabo de este periodo las muestras fueron retiradas. Se determinó el peso saturado de las muestras, retirándolas del contenedor se limpió el exceso de agua con un trapo húmedo y se pesaron (peso saturado). Posterior a esto la muestra fue

suspendida dentro de un contenedor con agua (peso sumergido). El porcentaje de porosidad abierta se determinó como:

$$P_a = \frac{\text{peso saturado} - \text{peso seco}}{\text{peso saturado} - \text{peso sumergido}} * 100 \dots\dots\dots (10)$$



a)



b)



c)



d)

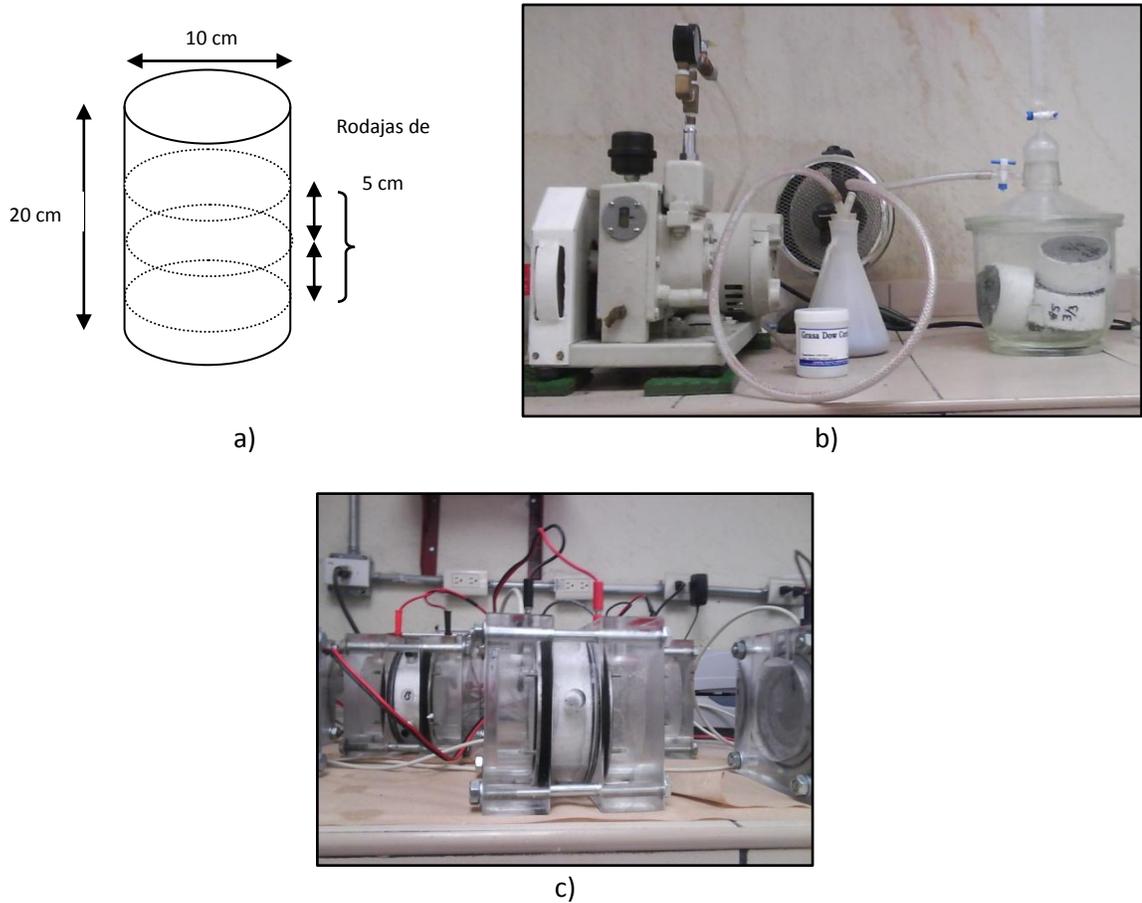
**Figura 20.** Preparación de muestras para obtener la porosidad abierta al agua, a) corte para obtención de muestras, b) determinación del peso seco, c) aplicación de vacío y d) determinación del peso sumergido.

#### **3.4.4 Resistencia a la penetración del ion cloro.**

El mecanismo principal de transporte de los iones cloro a través del concreto (libre de grietas) es por difusión. Como la velocidad de penetración debido a la difusión es lenta [Stanish et al., 2004], el proceso se acelera mediante la aplicación de un campo eléctrico [Dhir et al., 1993]. Esta prueba se realizó de acuerdo con el método ASTM C 1202, utilizando el equipo y software de PROOVE it Germann Instruments, Inc.

De un cilindro de concreto de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura fueron cortadas dos muestras de 10 cm de diámetro por 5 cm de espesor figura 21 a, después de esto se limpian para retirar polvo producto del corte para pintarlos con un impermeabilizante y de esta manera evitar que durante la prueba la solución se fugue por la superficie lateral. Una vez seco el recubrimiento, la muestra fue colocada dentro de un desecador, donde se realizó vacío por tres horas figura 21 b, al término, se agregó agua y se hizo vacío durante una hora más. Una vez saturada la muestra, se dejó sumergida en agua durante un día, después fue montada en la celda mostrada en la figura 21 c. Uno de los lados de la celda se llena con solución de cloruro de sodio al 3% (NaCl) y otro con hidróxido de sodio al 0,3 N (NaOH). El compartimiento que contiene NaCl se conecta a la terminal negativa mientras que el compartimiento con NaOH se conecta a la terminal positiva de una fuente de poder. El proceso de difusión se acelera mediante la aplicación de una corriente de 60 V. Cuando un campo eléctrico es aplicado, el movimiento de los iones se debe a la difusión y la migración

Después de 6 horas de aplicación de corriente, la permeabilidad del concreto a los iones cloro se calcula a partir de los resultados de corriente y tiempo, expresando el resultado en términos de Coulombs.



**Figura 21.** Preparación y montaje de las muestras para la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro.

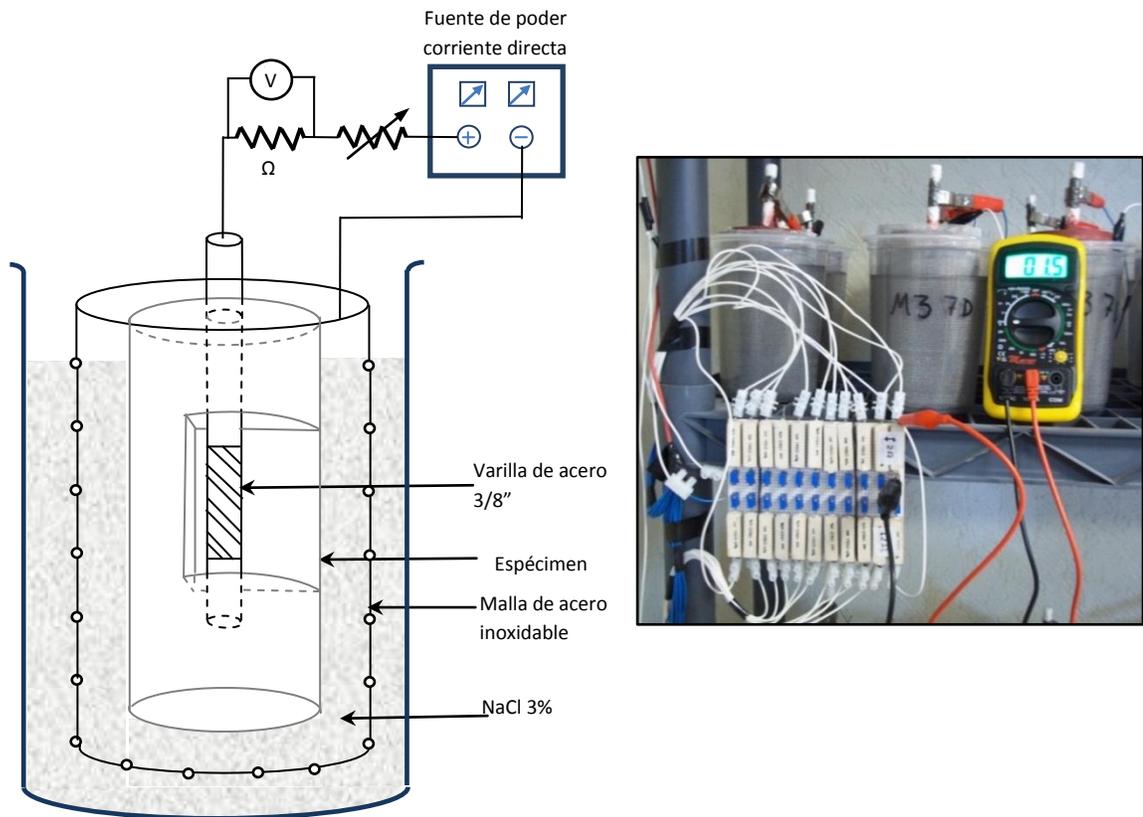
### 3.5 Inducción de la corrosión.

Bajo condiciones naturales el proceso de corrosión del acero de refuerzo en matrices cementantes es un proceso lento. Por lo general la aparición de la primera grieta en la superficie del concreto se da después de muchos años. Así, los estudios de laboratorio necesitan una aceleración del proceso de corrosión para lograr un período de prueba corto. Por tal motivo para estudiar la tendencia al agrietamiento del recubrimiento de concreto por efecto de la acumulación de productos de corrosión el proceso se acelera por medio de una corriente, manteniendo una densidad de corriente constante.

Es importante indicar que si el acero se encuentra pasivado en un concreto no contaminado por cloruros o dióxido de carbono, la corriente no producirá la corrosión

del refuerzo [Pourbaix, 1987], ya que lo podría mantener pasivo o llevar a la zona de inmunidad. Por el contrario si el concreto contiene cloruros, la corrosión del refuerzo se verá acelerada drásticamente por el efecto de la corriente.

El proceso de corrosión fue acelerado aplicando una corriente directa constante entre el acero de refuerzo (electrodo de trabajo) y el contraelectrodo (malla de acero inoxidable), mediante una fuente de poder. La varilla fue conectada a la terminal positiva de la fuente de poder, mientras que la terminal negativa a la malla de acero inoxidable, que rodea al espécimen dentro de una solución de cloruro de sodio al 3% en masa, el arreglo se muestra en la figura 22. De esta manera se establece un circuito eléctrico en el cual la varilla de acero es el ánodo, la malla es el cátodo y la solución de cloruro de sodio es el electrolito.



**Figura 22.** Arreglo empleado para el proceso de corrosión acelerada.

Para llevar a cabo el control y la verificación de la magnitud de la corriente en el sistema, fue colocada en la parte externa del circuito un resistor en serie con un potenciómetro, la figura 23 muestra el arreglo usado. La densidad de corriente aplicada fue  $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$  de acero expuesto.



**Figura 23.** Circuito empleado para controlar la densidad de corriente aplicada.

Es necesario despasivar el acero para poder corroerlo. En el arreglo propuesto, para acelerar la corrosión, véase la figura 22, el ingreso de los iones  $\text{Cl}^-$  hacia el acero se logra mediante el campo eléctrico creado entre la varilla de acero (terminal positiva) y la malla de acero inoxidable (terminal negativa) el cual repele los iones provocando su migración hacia el acero. Cuando la concentración de cloruros a nivel del acero excede un valor crítico (umbral), la capa protectora que se forma sobre la superficie del acero se rompe y comienza la corrosión del acero.

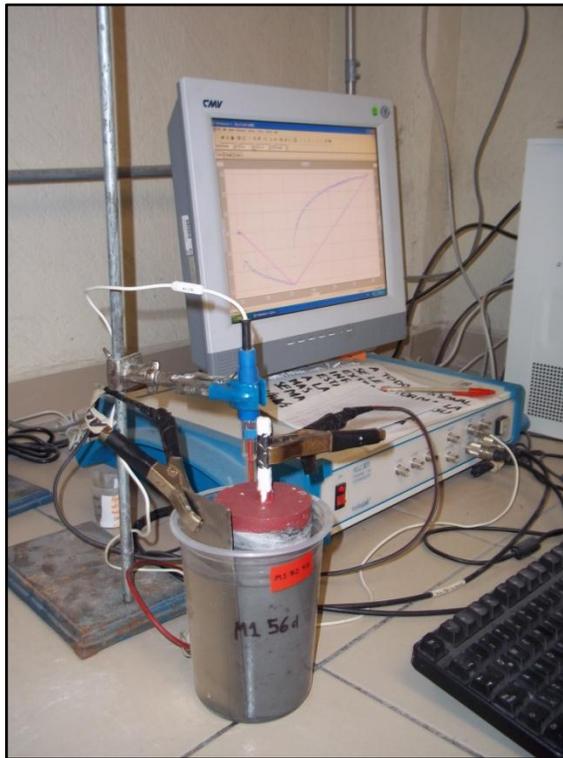
### 3.6 Pruebas semidestructivas.

Para la inspección y evaluación del grado de deterioro de estructuras de concreto reforzado, es fundamental utilizar técnicas no destructivas, a fin de evitar daños físicos de la estructura. Esto ha dado la pauta para proponer el uso de técnicas electroquímicas en la evaluación y seguimiento del estado de corrosión del acero de refuerzo de una estructura.

Las técnicas electroquímicas, consisten en la aplicación de pequeñas señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien la aplicación de señales de corriente y el registro de la respuesta en potencial. De las dos maneras, se polariza la interface, y su respuesta es característica de cada sistema bajo estudio. La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de estas técnicas, además de ser pruebas semidestructivas.

Las técnicas electroquímicas que se realizaron fueron: potencial de media celda ( $E_{corr}$ ), resistencia a la polarización lineal (**RPL**) y espectroscopía de impedancia electroquímica (**EIE**). Como electrodo de referencia para las mediciones se usó un electrodo saturado de calomel (ESC). Para su medición se empleó el sistema VoltaLab PGZ-301, que consiste de un Potenciostato/Galvanostato con analizador de frecuencias integrado, programa de cómputo VoltaMaster 4.0 y una computadora personal. La figura 24 muestra el equipo y arreglo usado para la medición de los parámetros.

La medición de los parámetros electroquímicos fue realizada en intervalos de 1 semana, durante la cual los especímenes permanecen conectados durante 5 días, al segundo día sin corriente (séptimo día), se realizan las mediciones, las cuales se llevan a cabo con los especímenes dentro de la solución, en la figura 24 se muestra la forma en que se realizaron las mediciones. Para todas las pruebas fueron medidos 2 especímenes por mezcla.



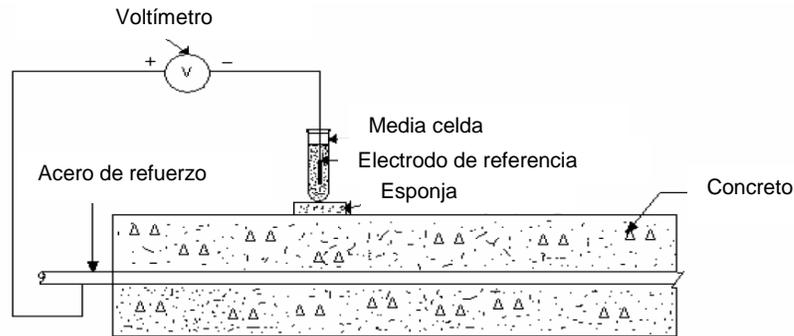
**Figura 24.** Espécimen montado en equipo VoltaLab PGZ-301 para la medición de parámetros electroquímicos.

### 3.6.1 Potencial de media celda.

La tendencia de cualquier metal a reaccionar con el medio ambiente es indicada mediante el potencial que este desarrolla cuando está en contacto con el medio ambiente. En las estructuras de concreto reforzado, el concreto actúa como electrolito y el potencial que el acero desarrolla estará en función del microclima en el concreto, el cual puede variar de lugar a lugar.

El potencial de corrosión corresponde a un potencial mixto en el que las dos reacciones: anódica (oxidación) y catódica (reducción) ocurren a la misma velocidad, por lo cual la corriente neta es cero. Sin embargo, esto no significa que el sistema se encuentre en una condición de equilibrio, pues el sistema está cambiando, el metal se va disolviendo y pierde masa.

El potencial de corrosión se puede medir experimentalmente utilizando un electrodo de referencia estándar (que mantiene un potencial constante) y un voltímetro (de alta resistencia interna). La figura 25 indica la forma en la que se mide el  $E_{corr}$  del acero de refuerzo.



**Figura 25.** Medición del potencial de media celda.

En base a esta medida se valora la probabilidad de que el acero se encuentre en estado pasivo (que no se está efectuando degradación en el acero) o activo (cuando el acero se está degradando). Esta es la técnica más utilizada para detectar la probabilidad de corrosión en el acero [Elsener et al.,1990; Elsener et al., 1993 y Broomfield et al.,1990].

De acuerdo a los valores del potencial de corrosión se han definido intervalos que indican la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo, en la tabla 4 se muestran algunos de ellos para los distintos tipos de electrodos usados.

**Tabla 4.** Criterio de valoración de potenciales de acero embebido en concreto para diferentes electrodos [Broomfield, 1997].

Cu/CuSO <sub>4</sub>	Plata/AgCl/4M KCl	Electrodo Estándar de Hidrógeno	Calomel Saturado (ESC)	Condición de corrosión
>-200 mV	> -106 mV	> +116 mV	> -126 mV	<i>Baja (10% probabilidad)</i>
-200 a -350 mV	-106 a -256 mV	+116 a -34 mV	-126 a -276 mV	<i>Riesgo Moderado</i>
< -350 mV	< -256 mV	< -34 mV	< -276 mV	<i>Alta (&lt;90% probabilidad)</i>
< -500 mV	< -406 mV	< -184 mV	< -426 mV	<i>Corrosión Severa</i>

La medida del  $E_{corr}$  es la técnica electroquímica más aplicada para diagnosticar el riesgo de corrosión en estructuras de concreto reforzado [Flis et al., 1998, Videm, 1998]. Sin embargo, sólo da información sobre la probabilidad de corrosión y no sobre la velocidad a la que se desarrolla el proceso [Yeih et al., 1998], por lo que esta técnica debe ser complementada con otros métodos [Videm, 1998].

El potencial de corrosión se define como el potencial de electrodo de una superficie en proceso de corrosión dentro de un electrolito, medido en relación a un electrodo de referencia y en condiciones de circuito abierto, cuando no fluye corriente desde o hacia el electrodo [Verink, 1994]. Dada la definición de potencial de corrosión y debido a que el sistema (acero-concreto) ha sido afectado por la corriente aplicada para acelerar el proceso, a las medidas realizadas se les nombrará como potencial de media celda.

### 3.6.2 Resistencia a la polarización lineal, RPL.

Esta técnica se ha convertido en un método bien establecido para determinar la medición instantánea de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

La técnica consiste en perturbar en una pequeña cantidad el potencial de equilibrio del acero. Mediante un potencióstato se logra cambiando el potencial del acero en una cantidad fija  $\Delta E$  y monitoreando después de un tiempo fijo el cambio en la corriente,  $\Delta I$ , o mediante el uso de un galvanostato aplicando una corriente fija pequeña,  $\Delta I$  al acero y monitoreando después de un periodo de tiempo el cambio en el

potencial,  $\Delta E$ . En cada caso las condiciones se seleccionan de manera que el cambio en el potencial,  $\Delta E$ , caiga dentro del rango lineal de Stern-Geary de 10 – 30mV [Stern and Geary, 1957]. La curva generada a partir de estos resultados representa una relación casi lineal entre la densidad de corriente y el potencial. A la razón de cambio de esta curva se le conoce como resistencia a la polarización,  $R_p$ .

$$R_p = \Delta E / \Delta I \dots\dots\dots (11)$$

La aplicación de esta técnica se deriva de las curvas anódicas y catódicas propuestas por Stern – Geary [Feliu et al., 1996] que a su vez dieron paso a la polarización lineal y de las cuales se estudia el comportamiento de la  $i_{corr}$ . La ecuación de Stern – Geary se define como:

$$i_{corr} = \frac{\beta_a * \beta_c}{2.3 * (\beta_a * \beta_c)} * \frac{1}{R_p} \dots\dots\dots (12)$$

Donde  $i_{corr}$  es la intensidad de corriente,  $\beta_a$  es la pendiente anódica y  $\beta_c$  es la pendiente catódica de la curva de  $R_p$ . Esta ecuación indica la densidad de corrosión instantánea que ocurre en el acero al momento en el que se aplica el sobrepotencial. Dado que  $\beta_a$  y  $\beta_c$  son constantes la ecuación se puede redefinir como:

$$i_{corr} = B / R_p \dots\dots\dots (13)$$

Al valor B se le relaciona con las pendientes anódicas y catódicas ( $\beta_a$  y  $\beta_c$ ) que por lo general se encuentra en el rango de 12 a 52 mV. Para el caso del concreto reforzado se considera un valor de 52 mV cuando el acero se encuentra en estado pasivo y 26 mV para el estado activo (el proceso de corrosión ha comenzado) [Andrade et al., 1996]

La técnica es rápida y semidestructiva, únicamente requiere un pequeño orificio en el concreto para permitir el contacto eléctrico con el refuerzo. Los datos obtenidos proporcionan una valiosa información sobre la velocidad de corrosión instantánea del acero permitiendo una evaluación más detallada de las condiciones estructurales en

comparación con un estudio basado sólo en los potenciales de corrosión. La tabla 5 muestra los criterios establecidos para la interpretación de los valores de  $i_{corr}$ .

**Tabla 5.** Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión en campo y laboratorio [C. Andrade, 1996].

Velocidad de corrosión ( $i_{corr}$ )	Condición del acero
$i_{corr} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Pasivo
$i_{corr} 0.1 - 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Corrosión Baja
$i_{corr} 0.5 - 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Corrosión Moderada
$i_{corr} > 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Corrosión Alta

La intensidad de corrosión,  $i_{corr}$ , representa un valor instantáneo, el cuál hace referencia al momento en que se realiza la medición, independientemente del método utilizado para obtenerla. La  $i_{corr}$  es convertida a velocidad de corrosión cuando se registra periódicamente y se refiere a un período de tiempo determinado con el fin de dar seguimiento a la evolución del proceso de corrosión. La conversión de la densidad de corriente a velocidad de corrosión involucra además ciertas constantes que dependen de la naturaleza del electrodo de trabajo (i.e. tipo de metal en estudio), por lo que para un seguimiento periódico sobre un mismo metal dichas constantes permanecen sin cambio. Debido a lo anterior y a pesar de que la intensidad de corrosión y la velocidad de corrosión son formalmente diferentes, para propósitos prácticos el término se emplea indistintamente.

La resistencia a la polarización fue obtenida utilizando una velocidad de barrido de 12 mV/min, disminuyendo a 6 mV/min para un estado pasivo del acero. La polarización aplicada fue de  $\pm 20$  mV a partir del potencial de media celda.

### 3.6.3 Resistividad eléctrica del concreto.

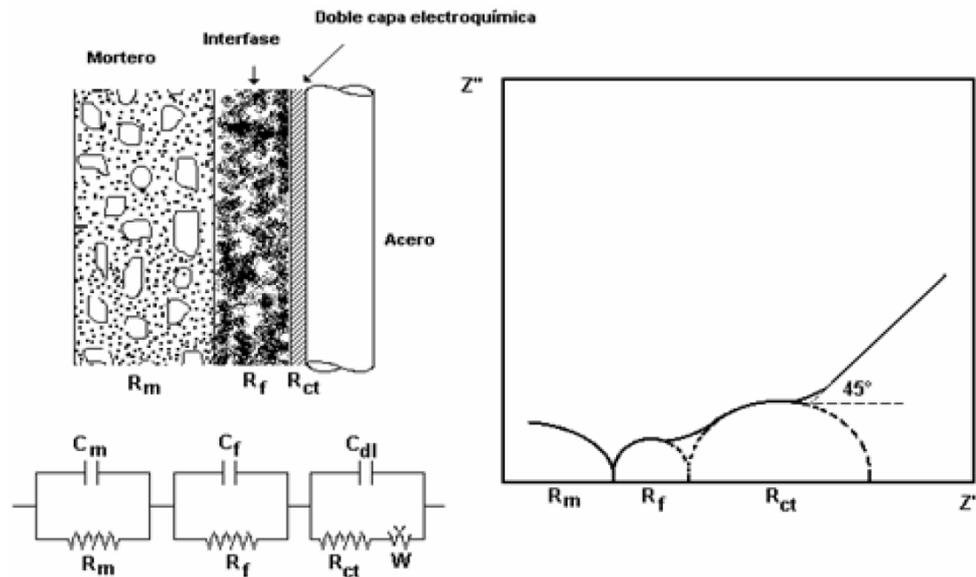
La resistividad eléctrica del concreto puede ser definida como la resistencia que ofrece el concreto a que un flujo de corriente eléctrica pase a través de él. El concreto, el cual puede ser clasificado como un semiconductor, tiene una resistividad que varía

sustancialmente dependiendo de diversos factores [Everett et al., 1982]. La corriente eléctrica es conducida en el concreto por medio de los iones disueltos en la solución de poro. Por lo tanto, todos los factores como, la relación agua/material cementante ( $a/mc$ ), tipo de cemento, adiciones pozoalánicas, grado de hidratación de los materiales cementantes afectan la estructura y composición de la solución de poro, lo que a su vez afecta la resistividad eléctrica del concreto [Lio et al., 1996]. Factores ambientales como temperatura y humedad tienen un gran impacto en esta propiedad [Polder, 1996]. La resistividad eléctrica puede ser obtenida a partir de la prueba de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE).

#### **Determinación de la resistividad eléctrica del concreto ( $\rho$ ) a partir de la EIE.**

La técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica ha sido usada ampliamente para evaluar el estado de corrosión del sistema acero-concreto. Esta técnica es atractiva por que usa un rango de frecuencias amplio, por lo que se puede obtener información detallada acerca del mecanismo y cinética de las reacciones electroquímicas. Además es posible obtener información de las propiedades eléctricas de la interface acero-concreto y del mismo concreto. La mayor ventaja de esta técnica es la posibilidad de una interpretación física del proceso.

Al igual que otros procesos electroquímicos, la corrosión del acero en el concreto se puede describir en términos de un circuito equivalente, compuesto de una combinación de resistencias y capacitores. La identificación de varios elementos en el circuito facilita el estudio del proceso de corrosión y su relación con las características físicas del concreto [Andrade et al., 1995]. Algunos investigadores [Wenger et al., 1987; Sagoe-Crentsil et al., 1992; Hachini et al., 1994 y Dhouibi-Hachini et al., 1996] plantean una representación como la esquematizada en la figura 26 donde se definen tres regiones: la matriz de concreto, la capa porosa (que es una película de  $\text{Ca(OH)}_2$ ) depositada sobre la superficie metálica y la interface acero-capa porosa.



**Figura 26.** Curva representativa de impedancia para el acero embebido en concreto [Hachini et al., 1994].

Para el sistema mostrado en la figura 26, la factibilidad de suministrar señales de tipo senoidal dentro de un intervalo de frecuencias de varios órdenes de magnitud, hace posible identificar las diferentes zonas en regiones de frecuencia características. En altas frecuencias, mayores de 10kHz, la respuesta del sistema se atribuye a propiedades dieléctricas del concreto [Sagoe-Crentsil et al., 1992; Ávila-Mendoza et al., 1994 y Andrade et al., 1995]. La lectura de la resistencia del concreto,  $R_m$ , se determina en el cambio de pendiente que se presenta cercano a 10 kHz de los diagramas de Nyquist [Sagoe-Crentsil et al., 1992; Ávila-Mendoza et al., 1994 y Andrade et al., 1995]. Para frecuencias intermedias, el análisis del sistema corresponde a la película porosa,  $R_f$  [Wenger et al., 1987], señalan como frecuencias intermedias de 10 kHz a 10 Hz, mientras que [Gu et al., 1994] anotan de 10kHz a 100Hz y [Andrade et al., 1995] no precisan valores, solo menciona de kHz a unas decenas de Hz. La zona de bajas frecuencias atañe a los procesos de transferencia de carga y de difusión de la interface acero-productos de corrosión,  $R_{ct}$ , aquí es donde se llevan a cabo las reacciones de corrosión del acero. De acuerdo a los autores mencionados [Wenger et al., 1987, Gu et al., 1994] el intervalo de bajas frecuencias va del orden de 10 Hz hasta 1 mHz.

Los parámetros empleados en la técnica EIE fueron: barrido de frecuencia de 100 kHz a 10 mHz, amplitud de 10 mV a partir del potencial de corrosión y 10 puntos por década. Esta técnica fue realizada con los especímenes dentro de la solución de cloruro de sodio al 3%, condición que resulta más desfavorable para la estimación de este valor. El seguimiento fue realizado con el propósito de detectar la caída de los valores de  $\rho$  [Caré et al., 2007], ya que cuando se agrieta el recubrimiento de concreto, la solución que rodea al espécimen llena la grieta, resultando en una caída de la resistividad del concreto [Fang et al., 2004]. De esta manera, el seguimiento de este parámetro podría conducir a la detección del primer agrietamiento del recubrimiento de concreto, aún antes de ser observado a simple vista.

**Cálculo de la resistividad eléctrica del concreto.**

La resistividad eléctrica se determinó a partir de la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots (14)$$

Donde  $R$  es la resistencia eléctrica medida aplicando un voltaje  $V$  y midiendo el paso de corriente  $I$ . Esta relación es igual a la resistividad  $\rho$  por el factor geométrico  $l/A$ , es decir por la  $l$  = distancia entre electrodos y  $A$  = área transversal de paso de la corriente.

Considerando la geometría de los especímenes empleados, la ecuación (14) es modificada a la ecuación (15), la cual fue empleada para el cálculo de la resistividad eléctrica del concreto.

$$\rho = \frac{2\pi LR_e}{\ln \left( \frac{r_m}{r_s} \right)} \dots\dots\dots (15)$$

Donde:  $L$  es la longitud de exposición del acero,  $r_s$  es el radio de la varilla de acero,  $r_m$  es el radio del espécimen,  $R_e$  es la resistencia eléctrica determinada en la interface acero-concreto.

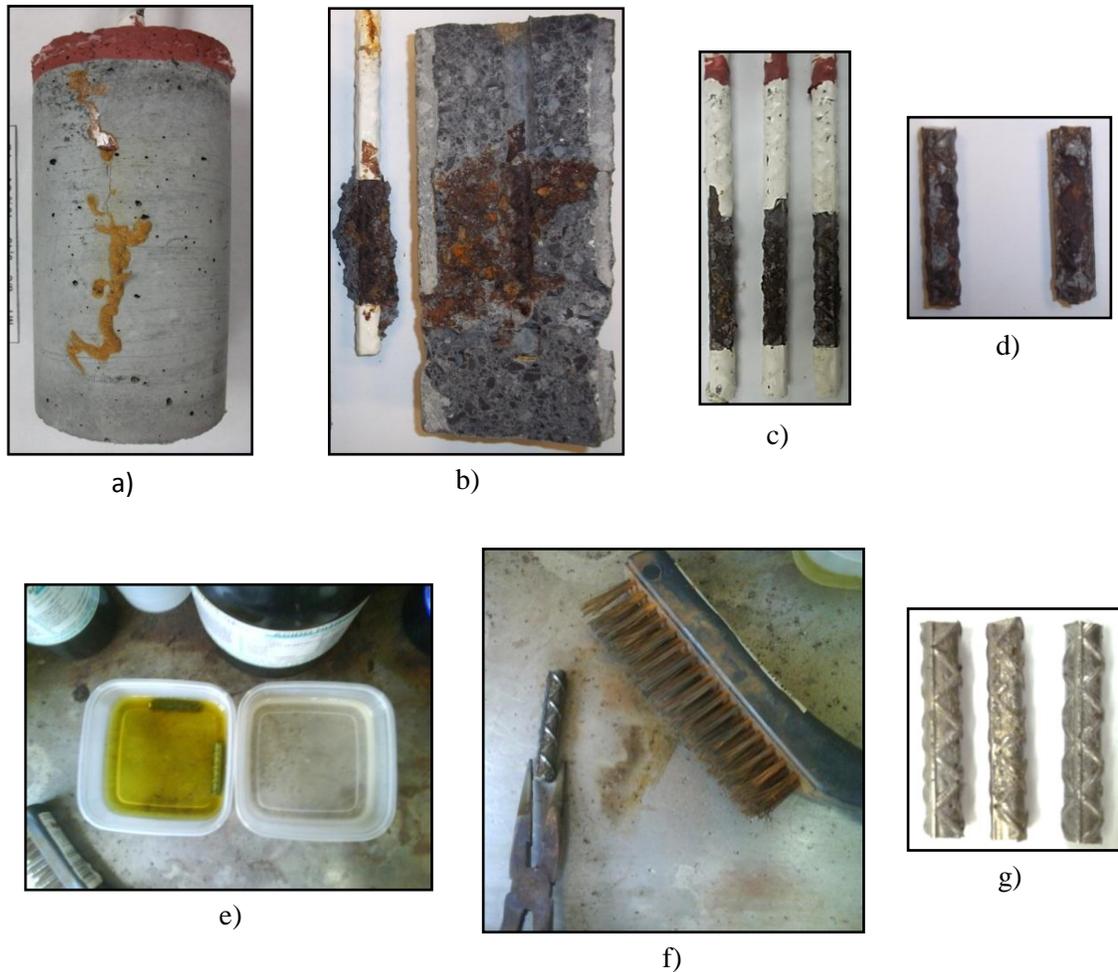
### **3.7 Inspección visual.**

Se realizó una inspección visual de los especímenes después de observarse el primer agrietamiento superficial, del cual se midió su espesor utilizando un microscopio óptico de alta definición.

Esta inspección abarcó la superficie de acero expuesta, donde se observó el área dañada por la corrosión.

### **3.8 Pérdida de masa del acero por el método gravimétrico.**

Una vez que se ha presentado el primer agrietamiento superficial visible, fueron retirados del proceso 4 de los 6 especímenes, lo anterior con el fin de extraer el acero de refuerzo y recuperar la zona anódica, previamente definida (véase la figura 16). Los dos especímenes restantes continúan el proceso de corrosión acelerada para seguir monitoreando su comportamiento; los especímenes retirados se parten por la mitad y se recupera cuidadosamente el acero corroído. Los productos de corrosión se remueven según la norma ASTM G1 03 mediante inmersión repetida en una solución formada de 500mL ácido clorhídrico + 3.5g de hexametileno tetramina + agua destilada para completar 1L. Se realizan tres inmersiones, en la primera la varilla permanece tres minutos dentro de la solución, la segunda dos minutos y la tercera 1 minuto, después de cada inmersión se cepilla la varilla con un cepillo de cerdas metálicas, al finalizar el proceso, se enjuaga y se seca, después se pesan las varillas, lo que se registra como la masa final. El procedimiento se representa en la figura 27.



**Figura 27.** Procedimiento de limpieza del acero expuesto. a) Detección primer agrietamiento visible, b) Extracción de varilla, c) , d) Recuperación de zona anódica, e) limpieza con solución según la norma ASTM G1, f) Cepillado de las varillas para la remoción de óxidos y g) Acero expuesto después del proceso de remoción de óxidos.

La pérdida promedio de sección necesaria para generar el agrietamiento del recubrimiento ( $x_{crit}$ ), se obtiene a partir de la pérdida de masa ( $\Delta m$ ) usando la ecuación (16) [Torres-Acosta et al., 2000].

$$x_{crit} = \frac{\Delta m * 10^3}{\pi \phi \rho_{Fe}} \dots\dots\dots (16)$$

Donde:  $x_{crit}$ , en mm;  $\Delta m$ , pérdida de masa ( $m_i - m_f$ ) en gramos;  $\phi$  diámetro de la varilla de acero (95 mm); L, longitud anódica en mm y  $\rho_{Fe}$ , densidad del acero (7,86 g/cm<sup>3</sup>).

**3.9 Ley de Faraday para calcular la pérdida masa del acero.**

Cuando se usan técnicas electroquímicas, la conversión de los parámetros electroquímicos a parámetros gravimétricos se realiza mediante la ley de Faraday:

$$\frac{I \cdot t}{F} = \frac{\Delta W}{\frac{W_m}{Z}} \quad \text{ó} \quad \Delta W_m = \frac{I_{corr} \cdot A \cdot t \cdot W_m}{n \cdot F} \dots\dots\dots (17)$$

Donde: *I* = corriente eléctrica, A; *t* = tiempo, s; *F* = Constante de Faraday, 96 500 coulomb;  $\Delta W$  = pérdida de masa debido a la corrosión, g; *W<sub>m</sub>* = peso molecular del hierro y *Z* = valencia (electrones transferidos, 2).

Mediante la ley de Faraday se calcula la pérdida de masa con la corriente aplicada (50µA/cm<sup>2</sup>). Las pérdidas calculadas de esta manera se denominarán “pérdida teórica de masa”. Al aplicar esta ley las consideraciones siguientes fueron tomadas en cuenta [Andrade et al, 1996]:

- ✓ Se asume que toda la corriente se ocupa en la disolución del hierro,
- ✓ No hay pérdida de corriente debido al calor generado por el paso de la corriente,
- ✓ La disolución del acero se produce sólo por la corriente aplicada, esto es, ningún otro tipo de proceso de corrosión espontánea se desarrolla durante la prueba

En resumen, se considera que hay una eficiencia del 100% de la corriente, junto con la hipótesis de que el acero se disuelve únicamente por la corriente aplicada.

Los valores obtenidos de esta manera deben de estar en concordancia con los valores de pérdida de masa obtenidos a partir del método gravimétrico para la misma varilla de acero. De esta forma se pueden validar los resultados obtenidos a partir de las técnicas electroquímicas [Andrade et al, 1996].

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Características físicas y químicas de los materiales cementantes.

La distribución de tamaño de partículas de los materiales cementantes fue determinada de acuerdo con el procedimiento indicado en ASTM B822-10 empleando el método de difracción láser y usando un equipo Trilaser Microtrac S3500, los resultados se muestran en la figura 28.

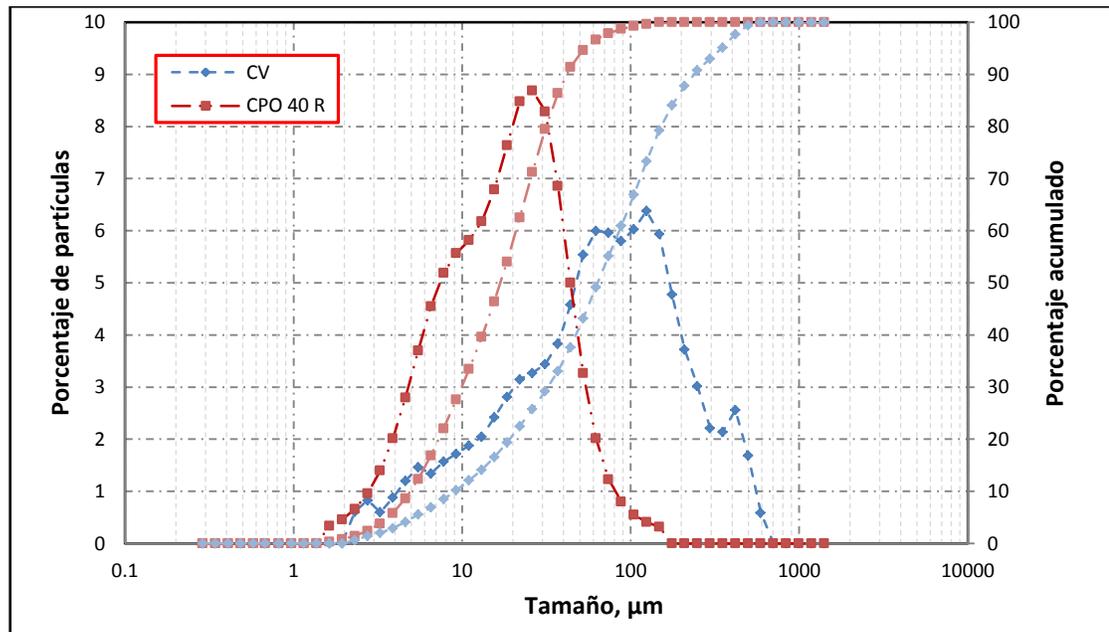


Figura 28. Distribución de tamaño de partícula de los materiales cementantes.

Con base a los resultados mostrados en la figura 28, la CV muestra un diámetro promedio 98.59  $\mu\text{m}$  tomando como base a una distribución por volumen (MV). El diámetro de la distribución por número (MN) fue 3.47  $\mu\text{m}$  el diámetro promedio de la

distribución por área (MA) fue 23.57  $\mu\text{m}$ . Para el cemento, el diámetro promedio en base a la distribución por volumen fue 21.3  $\mu\text{m}$ , en base a la distribución por número fue 3.26  $\mu\text{m}$  y por medio de la distribución por área fue 10.75  $\mu\text{m}$ .

La CV muestra un tamaño de partícula mayor al del cemento empleado, ya que el 90% de las partículas son menores a 236.5  $\mu\text{m}$ , para el caso del cemento el 90% de las partículas son menores a 41.65  $\mu\text{m}$ , adicionalmente se observa que para el caso de la CV el 56% de las partículas pasa la malla 200 (75  $\mu\text{m}$ ) y para el cemento el 98% del material pasa la malla 200.

Se determinó la finura de la ceniza a través de la malla No. 325 de acuerdo al método descrito en ASTM C 430. Se encontró que en la ceniza utilizada un 41% del material queda retenido. De acuerdo a la norma ASTM C 618 el material retenido en la malla No. 325 (45  $\mu\text{m}$ ) no debe exceder el 34% del total, por lo que la ceniza volante excede el valor especificado.

El análisis químico de los materiales cementantes se muestra en la tabla 6. La densidad de ambos materiales fue determinado utilizando el frasco de Le Chatelier con queroseno siguiendo el método descrito en la norma ASTM C 188. Se empleó este líquido, ya que es inerte con los cementantes hidráulicos.

**Tabla 6.** Composición química de los materiales cementantes.

Determinación o compuesto	Valor Obtenido		Metodología Utilizada
	Cemento Pórtland Ordinario (CPO 40 R)	Ceniza volante TPN	
Óxido de Aluminio (%P, $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	3.41	19.61	Absorción Atómica
Óxido de Calcio (%P, CaO)	62.90	1.40	Absorción Atómica
Óxido Férrico (%P, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	1.81	2.15	Absorción Atómica
Óxido de Magnesio (%P, MgO)	1.53	0.67	Absorción Atómica
Óxido de Potasio (%P, $\text{K}_2\text{O}$ )	0.71	0.66	Absorción Atómica
Óxido de sodio (%P, $\text{Na}_2\text{O}$ )	0.46	0.04	Absorción Atómica
Dióxido de Silicio (%P, $\text{SiO}_2$ )	21.20	72.70	Gravimétrico
Dióxido de Titanio (%P, $\text{TiO}_2$ )	-	0.96	Absorción Atómica
Pérdida por Ignición a 900°C (%P)	2.00	1.80	Gravimétrico
Sulfatos (%P, $\text{SO}_4$ )	5.95	Menor a 0.1	Gravimétrico
Humedad a 105°C	-	Menor a 0.1	Gravimétrico
Densidad	3.15	2.08	ASTM C 188 03

De acuerdo a su contenido de calcio la norma ASTM C 618 08 clasifica a las cenizas en dos categorías: clase C y clase F. Además de cumplir con cierta composición química, la ceniza volante clase C tiene un contenido de óxido de calcio mayor al 10% y la ceniza clase F menor al 10%. De acuerdo a esta clasificación la ceniza volante usada es clase F. En la tabla 7 se muestran los requerimientos señalados por la norma y las características de la ceniza empleada.

**Tabla 7.** Composición química especificada de la ceniza volante de acuerdo con ASTM C 618 08.

Requisitos químicos	Ceniza clase		Ceniza volante TPN
	F	C	
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> ) + Oxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + Oxido Férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), mínimo, %	70	50	94.5
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), máximo, %	5	5	Menor a 0.1
Contenido de humedad, máximo, %	3	3	Menor a 0.1
Pérdida por Ignición, máximo, %	6	6	1.8

#### 4.2 Elaboración de mezclas.

Previo a la elaboración de las mezclas fueron realizadas mezclas de prueba. Durante la elaboración de estas mezclas, se observó, que para las mezclas de relación a/mc de 0.60 la trabajabilidad mejora al incrementar el contenido de CV; para la relación a/mc de 0.45 el comportamiento fue contrario, al incrementar el contenido de CV la trabajabilidad disminuyó. Al parecer la CV absorbe agua y una vez saturadas las partículas de CV empezará el mejoramiento de la trabajabilidad de la mezcla. Por lo que es necesaria cierta cantidad de pasta en las mezclas para que la CV mejore la trabajabilidad.

Por lo observado en las mezclas de prueba se determinó que para la relación 0.45 no es factible emplear 20% de sustitución de CPO por CV, debido a que para alcanzar el revenimiento buscado ( $14 \pm 2$  cm) aumenta considerablemente la dosificación de aditivo. Por lo que se decidió modificar la relación a/mc de 0.45 a 0.49. En la tabla 8 se presentan las cantidades de los ingredientes utilizados para producir las mezclas de concreto; es conveniente aclarar que se ha considerado al agua contenida en el aditivo

empleado (líquido del aditivo = 90%). Los especímenes para la mezcla 0.49 20%CV se realizaron a pesar de la modificación de la relación a/mc y los resultados obtenidos se discutirán comparando el porcentaje de sustitución de CPO por CV.

**Tabla 8.** Proporcionamiento de mezclas.

Materiales	Peso saturado y superficialmente seco, kg/m <sup>3</sup>					
	0.45 0%CV	0.45 10%CV	0.49 20%CV	0.60 0%CV	0.60 10%CV	0.60 20%CV
a/mc*	0.46	0.46	0.49	0.60	0.60	0.60
Cemento	350	315	280	350	315	280
Ceniza, %	0	10	20	0	10	20
Ceniza	0	35	70	0	35	70
Material cementante	350	350	350	350	350	350
Agua	160.3	161.9	171.5	211.1	211.5	211.7
Aditivo, mL/kg de mc**	9	14	20	3.5	4.9	5.5
Agregado grueso	660.1	660.1	660.1	660.1	660.1	660.1
Agregado fino	1236	1220.6	1205.3	1095.1	1079.8	1064.4
Identificación	0.45 0%CV	0.45 10%CV	0.49 20%CV	0.60 0%CV	0.60 10%CV	0.60 20%CV

\* Considerando el agua aportada por el aditivo, \*\*mc.- Material cementante.

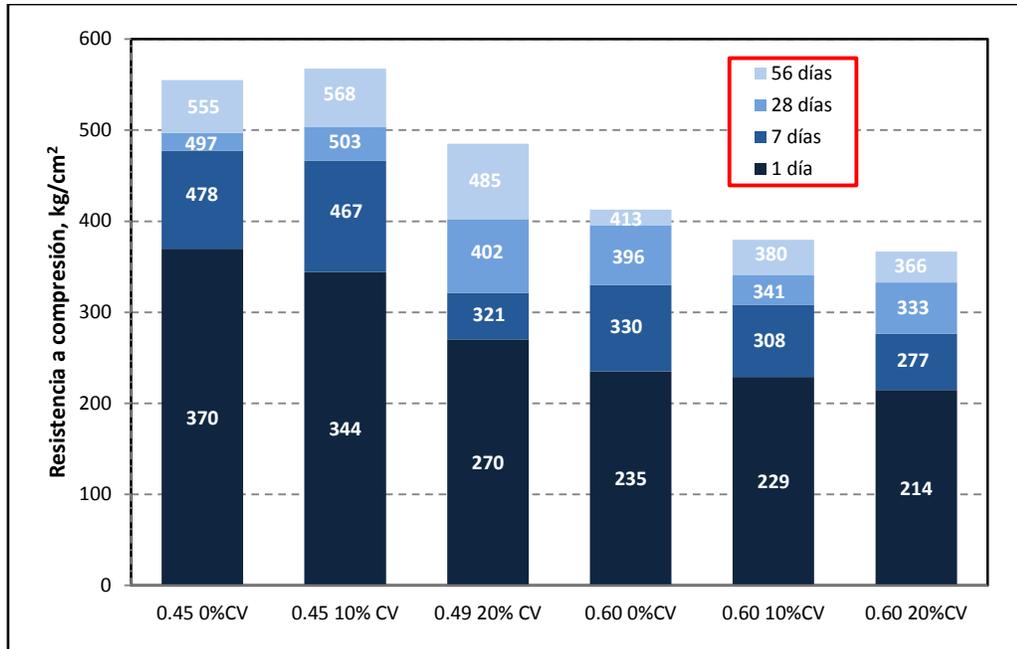
### 4.3 Propiedades mecánicas y físicas.

#### 4.3.1 Resistencia a la compresión.

Las resistencias a la compresión de los concretos elaborados y curados a las edades de 1, 7, 28 y 56 días, se muestran en la tabla 9 y figura 29. Además, en la tabla 9 se muestra el índice de actividad a la resistencia de los concretos con CV.

**Tabla 9.** Desarrollo de la resistencia a compresión de los concretos e índice de actividad de la resistencia.

Edad de curado	Identificación											
	0.45 0%CV		0.45 10% CV		0.49 20% CV		0.60 0%CV		0.60 10%CV		0.60 20%CV	
	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%
1 día	370	(100)	344	(93)	270	(73)	235	(100)	229	(98)	214	(91)
7 días	478	(100)	467	(98)	321	(67)	330	(100)	308	(93)	277	(84)
28 días	497	(100)	503	(101)	402	(81)	396	(100)	341	(86)	333	(84)
56 días	555	(100)	568	(102)	485	(87)	413	(100)	380	(92)	366	(89)



**Figura 29.** Desarrollo de la resistencia a la compresión de los diferentes concretos en estudio.

Al incrementar la relación a/mc se obtuvieron resistencias menores; al incrementar el tiempo de curado la resistencia a la compresión aumenta y mediante la sustitución de cemento por CV la resistencia disminuye.

Al revisar la resistencia a 56 días de curado y para la mezcla 0.60 0%CV, se constata una disminución del 26% de resistencia con respecto a 0.45 0%CV, de igual forma para las mezclas con 10 y 20% de CV, se observan disminuciones de hasta un 33%. Una tendencia similar fue observada para las otras edades de curado, lo anterior debido a que la CV empleada excede la cantidad de material retenido en la malla No. 325, teniendo por consiguiente menor área superficial que afecta su potencialidad puzolánica.

Con periodos de curado cortos, 1 y 7 días, el índice de actividad de los concretos es inferior a la mezcla de referencia y disminuye conforme se incrementa el porcentaje de sustitución de CV. Con el incremento en el tiempo de curado, se favorece la hidratación del cemento y de la CV; de hecho para las mezclas de relación 0.45, el índice de actividad incrementa y para las mezclas de relación a/mc 0.60, este índice se mantiene similar.

Si bien, es cierto que la utilización de cementantes complementarios conduce a resistencias menores a edades tempranas, la reacción puzolánica conduce a resistencias similares o mayores a las mezclas de referencia en edades de curado posteriores a los 28 días [Malhotra et al., 2005]. Con la mezcla 0.45 10%CV a edades tempranas (1 y 7 días) las resistencias obtenidas quedaron ligeramente por debajo a aquella de referencia y a edades posteriores (28 y 56 días) las resistencias fueron similares, lo cual nos indica el aporte del subproducto industrial en las mezclas puzolánicas.

En investigaciones previas desarrolladas en la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL se han obtenido índices superiores al 100% para CV provenientes de la misma carboeléctrica, sin embargo, al ser considerado como un subproducto no se tiene un control de las características de la misma (distribución de tamaño de partícula, composición química y mineralógica, densidad, absorción, área superficial, etc.), ya que no siempre se emplea el mismo tipo de materia prima (carbón) y como se mencionó anteriormente la CV no cumple con la fineza especificada.

#### 4.3.2 Módulo de Elasticidad.

Los resultados del módulo de elasticidad (E) para los concretos en estudio se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10.** Evolución del módulo de elasticidad para los diferentes concretos elaborados.

Mezcla	Módulo de Elasticidad, kg/cm <sup>2</sup>			
	Edad de curado, días			
	1	7	28	56
<b>0.45 0% CV</b>	275 484	381 287	400 760	416 841
<b>0.45 10% CV</b>	298 778	384 109	390 186	439 139
<b>0.49 20% CV</b>	291 994	319 113	359 689	362 880
<b>0.60 0% CV</b>	262 093	312 479	365 614	385 721
<b>0.60 10% CV</b>	253 625	314 413	335 558	356 702
<b>0.60 20% CV</b>	275 927	282 569	301 491	357 172

De forma general, al incrementar la relación a/mc se disminuye el E, así mismo, al incrementar el tiempo de curado el E aumenta. Por otro lado, se observa que al utilizar la CV y para 56 días de curado, la tendencia es disminuir el E del orden de un 10%.

Para la relación a/mc de 0.60 el empleo de la CV disminuye el E, aumentando el porcentaje de disminución conforme se incrementa el contenido de CV. Como puede observarse para la relación a/mc de 0.45 la mezcla con 10% de CV presentó un comportamiento similar al de la mezcla de referencia, teniendo a 1 día de curado una variación del E de 8% y 1, 3 y 5%, a los 7, 28 y 56 días de curado respectivamente. Esta mezcla alcanzó un valor inferior a la referencia a la edad de 28 días.

### 4.3.3 Porosidad abierta al agua.

Los resultados de la prueba de porosidad abierta para los distintos concretos elaborados se muestran en la figura 30.

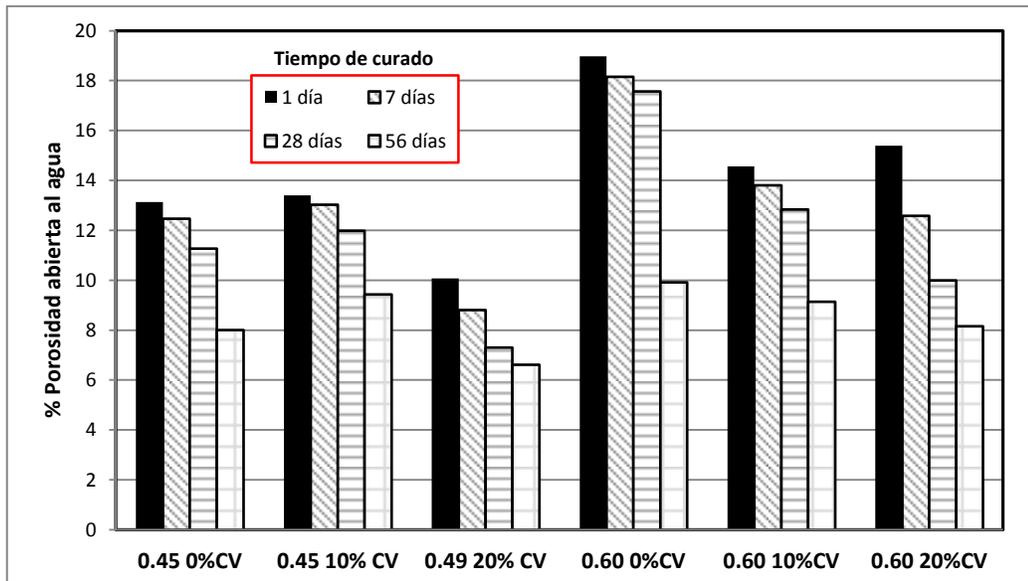


Figura 30. Desarrollo de la porosidad abierta al agua para los concretos en estudio.

Al incrementar la a/mc se incrementa la porosidad abierta y disminuye conforme se incrementa el tiempo de curado. Para la relación a/mc de 0.45 se observa que la porosidad incrementa ligeramente con el empleo de 10% de CV, sin embargo, se observa que la menor porosidad abierta se presentó para la mezcla 0.49 20%CV. Para la

relación a/mc de 0.60, se observa la reducción de la porosidad conforme incrementa el contenido de CV.

Comparando los resultados obtenidos a 56 días de curado, al aumentar la a/mc de 0.45 a 0.60 se incrementa la porosidad abierta del orden de 2%. Esto debido a que al aumentar la relación a/mc incrementa la cantidad de agua que no se combina químicamente con el cemento, y con ello incrementa la posibilidad de poros en la pasta cementante. Al final de la hidratación de los cementantes los precipitados o fases sólidas producidas no son suficientes para llenar el espacio ocupado por el agua excedente cuando ésta se evapora, quedando por lo tanto una red de huecos o estructura porosa. Por lo que, al aumentar la relación a/mc, aumenta la porosidad de la matriz.

Así mismo, con 56 días de curado, se puede observar que al sustituir el 20% de CV se reduce 1.4% la porosidad abierta para la relación a/mc de 0.45 y similarmente 1.8% para la relación a/mc de 0.60. Esto debido, a que la reacción puzolánica junto con la capacidad de llenado de la CV permite crear sitios de nucleación y una vez que ésta reacciona, provoca la discontinuidad de la red porosa, reduciendo el tamaño promedio del poro y por consiguiente la porosidad [Mangata, 1987, Khunthongkeaw et al., 2006].

Por otro lado, a partir de la distribución del tamaño de partículas de los materiales cementantes, se determinó que la CV presenta un tamaño mayor al del cemento ( $CV = 98.6 \mu\text{m}$ , cemento =  $21.3 \mu\text{m}$ ), lo cual junto con la dispersión de las partículas, producida por la relación a/mc, afectó directamente la porosidad abierta de los concretos elaborados con CV. Al incrementar la relación a/mc se produce una mayor dispersión de las partículas, esto sugiere que existe una relación a/mc donde la dispersión de las partículas junto con el tamaño de las partículas de CV generó una reducción efectiva de la porosidad abierta. Lo anterior se puede apreciar con la mezcla 0.49 20%CV la cual presentó la menor porosidad abierta en todas las edades de curado a pesar de no ser la menor relación a/mc.

**4.3.4 Resistencia a la penetración del ion cloro.**

En la tabla 11 se muestran los resultados de la prueba rápida a la penetración del ion cloro ( $\text{Cl}^-$ ). Los valores de la carga total que pasa representan la penetración de los iones agresivos en el concreto. Entre más alta sea la carga que pasa, más baja es la resistencia del concreto a la intrusión del ion  $\text{Cl}^-$ .

La resistencia a la penetración del ion  $\text{Cl}^-$  fue determinada de acuerdo el método descrito en ASTM C 1202. A pesar de que la norma especifica llevar a cabo los ensayos con 60 V y a 28 días de curado, fue necesario usar tres diferentes voltajes para las diferentes edades de curado, tanto los resultados como el voltaje se reportan en la tabla 11. En este sentido, no fue posible realizar la prueba a 60 V para la mezcla 0.60 0%CV en ninguna edad de curado, lo anterior debido a la alta permeabilidad del concreto.

**Tabla 11.** Evolución de la permeabilidad a los iones cloro de los concretos elaborados.

Mezcla	Carga que pasa, Coulombs (voltaje de prueba, V)							
	Edad de curado							
	1 día		7 días		28 días		56 días	
<b>0.45 0%CV</b>	5 124	(40)	5 994	(60)	4 690	(60)	3 115	(60)
<b>0.45 10%CV</b>	5 047	(40)	5 796	(60)	3 591	(60)	2 914	(60)
<b>0.49 20%CV</b>	2 581	(30)	2 927	(40)	2 578	(60)	1 965	(60)
<b>0.60 0%CV</b>	5 584	(30)	7 516	(40)	5 345	(40)	4 498	(40)
<b>0.60 10%CV</b>	4 500	(40)	4 219	(40)	4 218	(40)	6 856	(60)
<b>0.60 20%CV</b>	4 243	(30)	4 661	(40)	4 388	(60)	4 029	(60)

Analizando los resultados, se observa que al incrementar la relación a/mc aumenta la permeabilidad a los iones cloro y disminuye al incrementar el tiempo de curado. Para concretos con CV y la misma relación a/mc los valores de carga disminuyen notablemente en comparación con aquellos fabricados con solo CPO.

A un día de curado no fue posible ejecutar la prueba con 60 V para ninguna mezcla, por lo que el voltaje usado a esta edad fue 30 y 40 V, lo cual dificulta el análisis para determinar el efecto de la CV en esta propiedad.

Al incrementar el tiempo de curado fue posible incrementar el voltaje de prueba. A 56 días de curado, para las mezclas de relación a/mc de 0.45 se emplearon 60 V obteniendo una reducción de la carga del 6% al emplear 10% de CV en comparación con la mezcla de referencia. A esta misma edad, la mezcla 0.49 20%CV presentó la menor permeabilidad, observando una reducción del 37% con respecto a la mezcla 0.45 0%CV. Con la relación a/mc de 0.60 únicamente para la mezcla de referencia se emplearon 40 V, mientras que las mezclas con CV se corrieron a 60 V, observando una reducción del 41% entre las mezcla de 10 y 20%CV, esperándose por consiguiente que exista una reducción mayor entre la referencia y la mezcla conteniendo 20% CV.

A edades tempranas de curado, 1 y 7 días, se observaron valores de carga elevado, debido en primer instancia a que se tiene una hidratación parcial del cemento, lo cual limita la reacción puzolánica de la CV, y a su vez se cuenta con una mayor relación de vacíos, generando una estructura porosa y permeable que disminuirá al avanzar el grado de hidratación, por otro lado, a edades tempranas la solución de poro suele ser más conductora dado el aporte de iones provenientes de la CV. La carga aplicada será transferida por todos los iones disponibles en la solución, y no únicamente por los cloruros.

Es importante señalar que el transporte de iones en el concreto depende de la estructura de sus poros, mientras que la conductividad eléctrica depende tanto de la estructura de poros como de la conductividad eléctrica de la solución interna contenida en el poro, la cual es definida por su composición. Con el remplazo de CPO por CV se observa la disminución de la carga que pasa en la prueba rápida a la permeabilidad al ion  $\text{Cl}^-$ , lo que no necesariamente se debe a la reducción en la porosidad, el mayor efecto se debe al cambio en la composición química de la solución de poro [Shi et al., 1998].

El efecto de la CV en la composición de la solución de poro depende de su contenido de álcalis y la naturaleza de los mismos. El uso de la CV puede incrementar o disminuir la concentración de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y otros iones en la solución de poro, sobre todo en etapas iniciales. Usualmente, a edades avanzadas, el empleo de este material puzolánico disminuye la concentración de  $\text{Ca}_2^+$  y  $\text{OH}^-$  de la solución del poro, debido a que la puzolana reacciona con el  $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ , lo que resulta en la disminución de la conductividad eléctrica de la solución de poro.

En base a los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas y físicas de los concretos en estudio, se constata que al disminuir la relación a/mc y al utilizar la CV se densifica la matriz cementante.

#### **4.4 Caracterización electroquímica.**

La caracterización electroquímica de los especímenes de concreto reforzado se realizó con el fin de establecer el conjunto de parámetros que aportarían indicios para determinar el momento en que se presenta el primer agrietamiento superficial del recubrimiento. A continuación se mencionan los resultados obtenidos de las pruebas electroquímicas para los diferentes especímenes de concreto reforzado en estudio.

##### **4.4.1 Potencial de media celda.**

En las figuras 31 y 32, se presentan el seguimiento del potencial de media celda del acero embebido en los diferentes tipos de concretos bajo los diferentes tiempos de curado y para los recubrimientos de 23 mm y 35 mm respectivamente. Las líneas horizontales mostradas definen las diferentes zonas de probabilidad de corrosión del acero de refuerzo [Andrade et al., 1996], mismas que deben tomarse con precaución, debido a que el sistema (acero-concreto) ha sido afectado por la corriente impuesta para acelerar la degradación del acero.

El potencial de media celda del acero de refuerzo se encuentra dividido en dos zonas: una pasiva y una activa. En la primera, la presencia de la capa pasiva

(protectora) provoca que la actividad de corrosión de la varilla no se lleve a cabo y reduce las probabilidades de corrosión del acero. Esta zona se delimita por el potencial de -250 mV, valor que ha sido tomado como promedio de la zona de corrosión. A partir de potenciales inferiores a este, el acero se encuentra en una zona activa (disolución de la capa pasiva) donde existen altas probabilidades de que la corrosión esté presente.

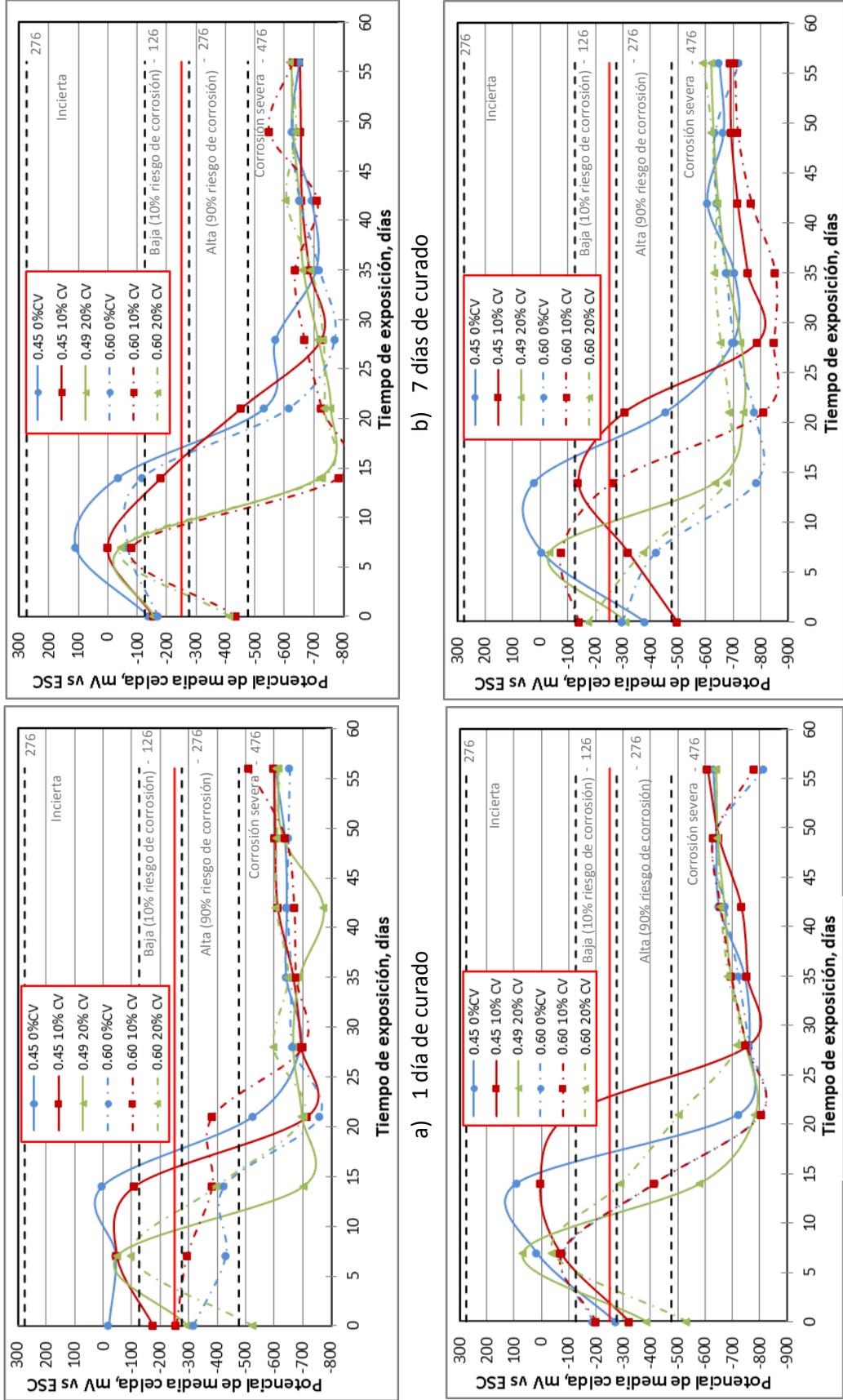


Figura 32. Evolución del potencial de media celda de los especímenes con 35 mm de recubrimiento durante el proceso de corrosión acelerada.

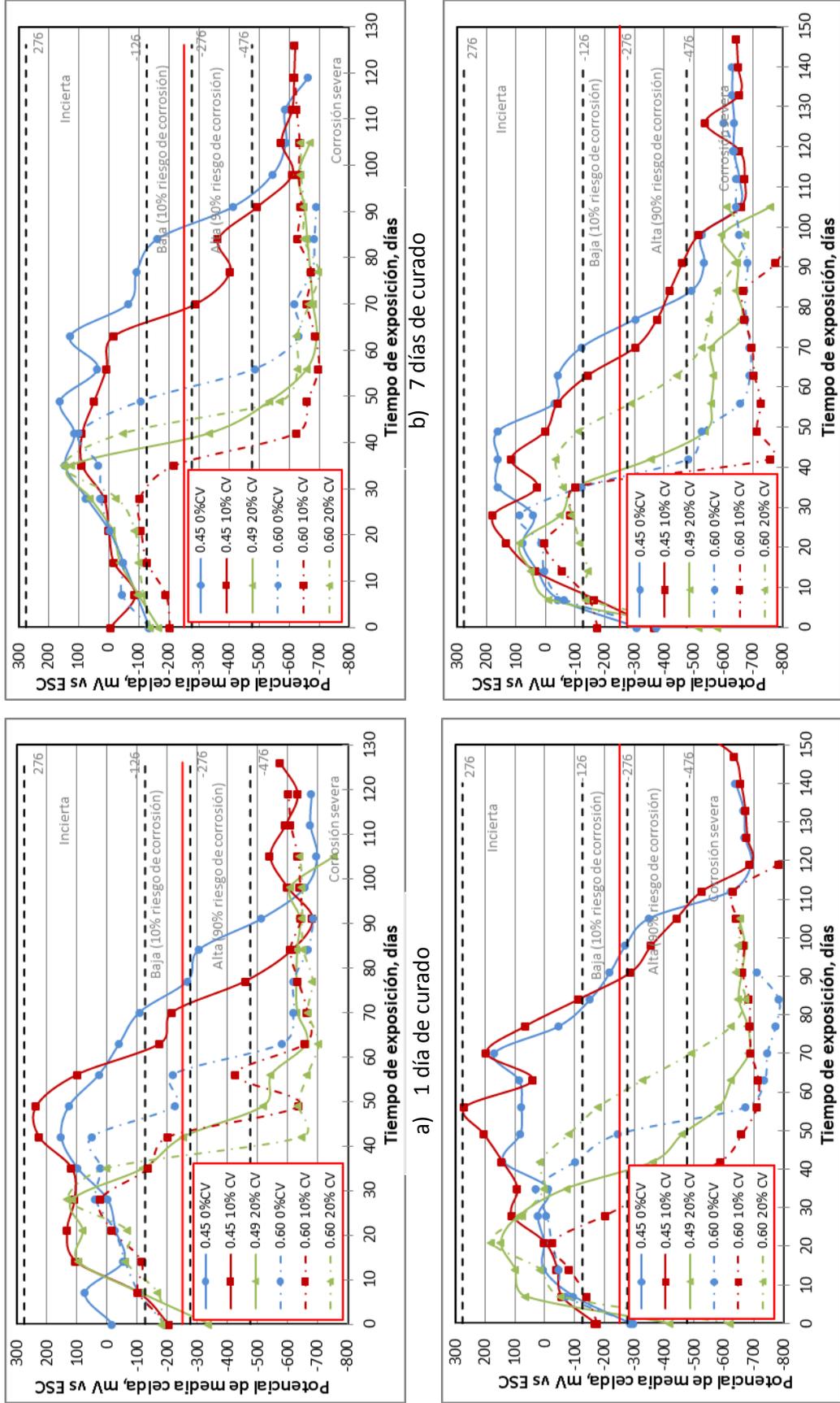


Figura 31. Evolución del potencial de media celda de los especímenes con 23 mm de recubrimiento durante el proceso de corrosión acelerada. a) 1 día de curado b) 7 días de curado c) 28 días de curado d) 56 días de curado

No importando el espesor de recubrimiento, los especímenes elaborados con concretos de relación a/mc de 0.60 fueron los primeros en despasivarse, y las mezclas que requieren más tiempo en hacerlo son las elaboradas con concretos de relación a/mc de 0.45. Al incrementar el tiempo de curado, para todos los especímenes, es necesario más tiempo para alcanzar el potencial de -250 mV. Con periodos de curado cortos, 1 y 7 días, los especímenes que contienen CV cruzan de la zona pasiva a la activa antes que los especímenes sin CV, con periodos de curado largo, 28 y 56 días, el periodo de activación de los especímenes con CV son similares a los especímenes sin CV y en algunos casos lo supera.

A pesar de la dispersión de los resultados, se encuentra que para un recubrimiento de 23 mm es posible definir tres etapas en la evolución del potencial. En la primera etapa, durante los primeros 25 días, las lecturas permanecen en el rango de -250 a 100 mV, correspondiente a un estado de pasividad de acuerdo con el diagrama de Pourbaix. En una segunda etapa, se observó una caída rápida del potencial hacia valores más negativos que -250 mV, esta caída ocurrió en el periodo de los 25 a los 39 días, indicando con esto la despasivación del acero. En la tercera etapa se puede observar que los valores de potencial fluctúan entre -850 a -600mV durante el periodo de los 39 a 49 días, correspondiente a una zona de corrosión severa. En la tercer etapa se presentó el agrietamiento del recubrimiento, después, ya agrietados los especímenes, los valores se vuelven más estables. El agrietamiento superficial del recubrimiento se presenta, en la mayoría de los casos, durante la caída del potencial, aunque no fue posible relacionarlo con el comportamiento del potencial de media celda.

Para el recubrimiento de 23 mm y relación a/mc de 0.60, con periodos cortos de curado, 1 y 7 días, los especímenes elaborados con CV se despasivan antes que los especímenes de referencia. Al incrementar el tiempo de curado se favorece la hidratación del cemento y la actividad puzolánica de la CV, así, los especímenes con CV prolongan el tiempo que tardan en despasivarse, igualando o superando el tiempo de

activación de los especímenes de referencia. Un efecto similar se observa para las mezclas de relación a/mc de 0.45. Los especímenes de 0.45 0%CV y 0.45 10%CV presentan un comportamiento similar con curados cortos (1 día y 7 días) despasivándose en tiempos similares y con curados posteriores (28 y 56 días), los especímenes con 10% de CV tiene un incremento en el tiempo de activación. Para los especímenes de relación a/mc de 0.49 se observa el incremento en el periodo de activación conforme se incrementa el tiempo de curado.

En la figura 32 a-d, se observa que el incremento del espesor del recubrimiento de concreto influye en el tiempo que tardan los especímenes en cruzar el valor umbral de -250 mV. En efecto, el aumento en el espesor de recubrimiento provocó un incremento en el tiempo de activación del sistema acero-concreto en los especímenes, lo cual ha sido reportado [Austin et al. 2004] en procesos de corrosión acelerada por medio de una corriente.

Para los especímenes de relación a/mc de 0.60, con un recubrimiento de 23 mm, independientemente del tiempo de curado, en un periodo de 15 días ya han alcanzado valores inferiores a -250 mV; mientras que al aumentar el espesor del recubrimiento a 35 mm lo hacen en un periodo de 60 días.

El tiempo de activación de los especímenes de relación a/mc de 0.49, con un recubrimiento de 23 mm fue de 13 días, al incrementar el recubrimiento a 35 mm, fue de 42 días, para los especímenes de relación a/mc de 0.45, con un recubrimiento de 23 mm, el tiempo de activación fue de 18 días, al incrementar el recubrimiento a 35 mm fue de 100 días.

De la misma manera que con el recubrimiento de 23 mm, al emplear un recubrimiento de 35 mm, las mezclas con mayor cantidad de CV prolongan el tiempo de activación del acero si se procura un curado adecuado y suficiente.

Bajo la aplicación de una densidad de corriente de  $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , con el recubrimiento de 23 mm, los especímenes de concreto reforzado se activaron en un

periodo de 13 – 15 días y con el recubrimiento de 35 mm lo hicieron en un periodo de 42 – 100 días.

El efecto de la CV se presenta principalmente con periodos de curado largos (28 y 56 días), propiciando la densificación de la matriz, lo que se ve reflejado en el incremento en el tiempo de activación del acero de refuerzo [Li et al., 2009; Bonavetti et al., 2005]. De la misma manera ocurre al incrementar el espesor del recubrimiento, debido a que aumenta el trayecto físico que los iones  $\text{Cl}^-$  deben recorrer hasta alcanzar la superficie del acero, razón por la cual, se requiere mayor tiempo para alcanzar la activación del acero de refuerzo [Balabanić et al., 1996; ACI 222, 2001 y Austin et al., 2003].

#### **4.4.2 Velocidad de corrosión, $i_{corr}$ , determinada mediante RPL.**

En las figuras 33 y 34, se presentan el seguimiento de la velocidad de corrosión,  $i_{corr}$ , de los especímenes de concreto reforzado elaborados con los diferentes tipos de concreto, para los recubrimientos de 23 mm y 35 mm respectivamente. En las figuras se muestran líneas punteadas que delimitan zonas donde la corrosión se ha clasificado de acuerdo con la  $i_{corr}$  medida, ya sea como estado pasivo, zona con velocidad de corrosión baja, moderada y alta [Andrade et al, 1996]. De la misma manera que con el potencial de media celda, es posible que las mediciones de velocidad de corrosión no puedan relacionarse de manera directa con los criterios de evaluación establecidos puesto que estas pueden estar alteradas por efecto de la corriente aplicada para corroer el acero.

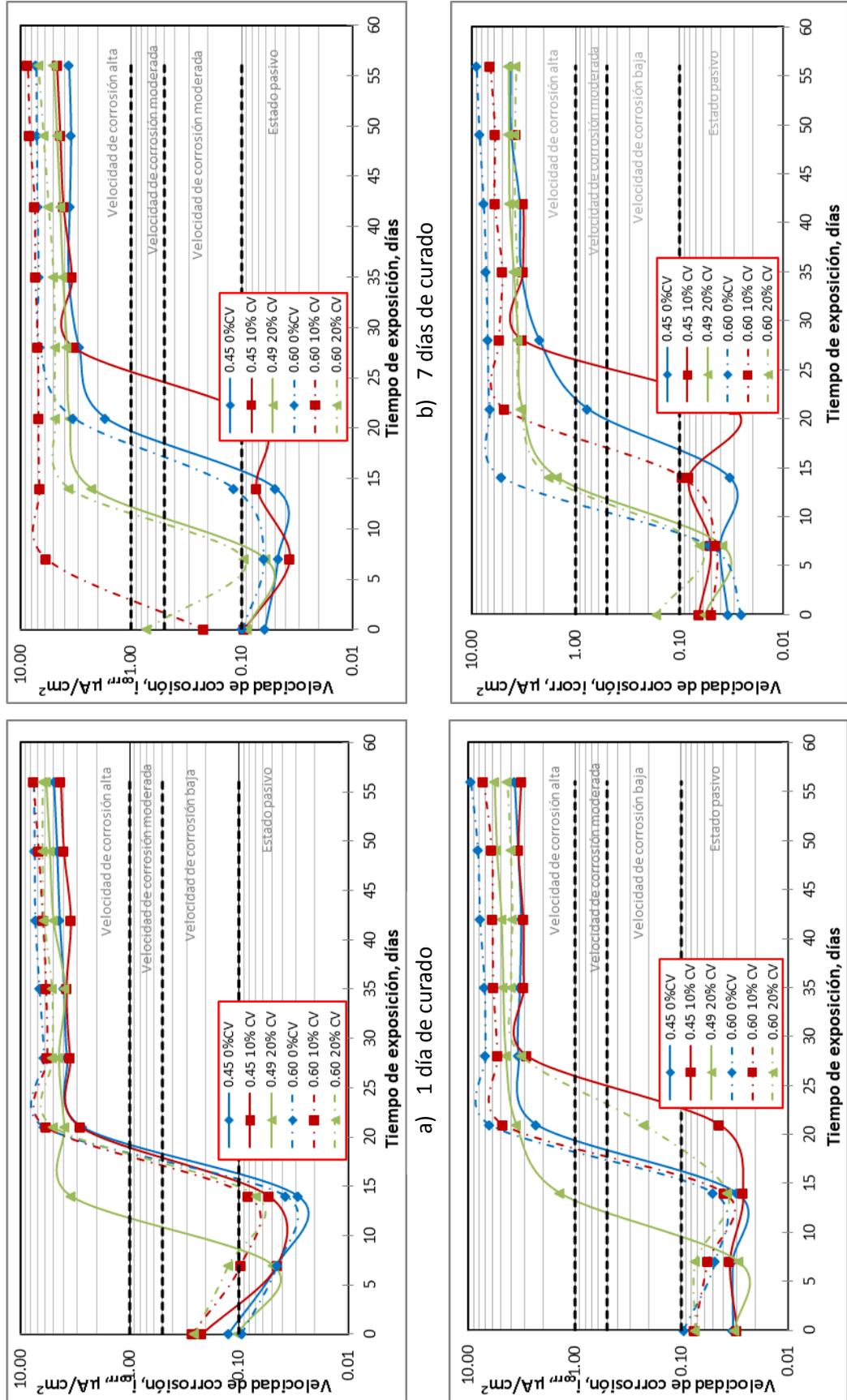


Figura 33. Comportamiento de la velocidad de corrosión para los especímenes elaborados con 23 mm de recubrimiento.

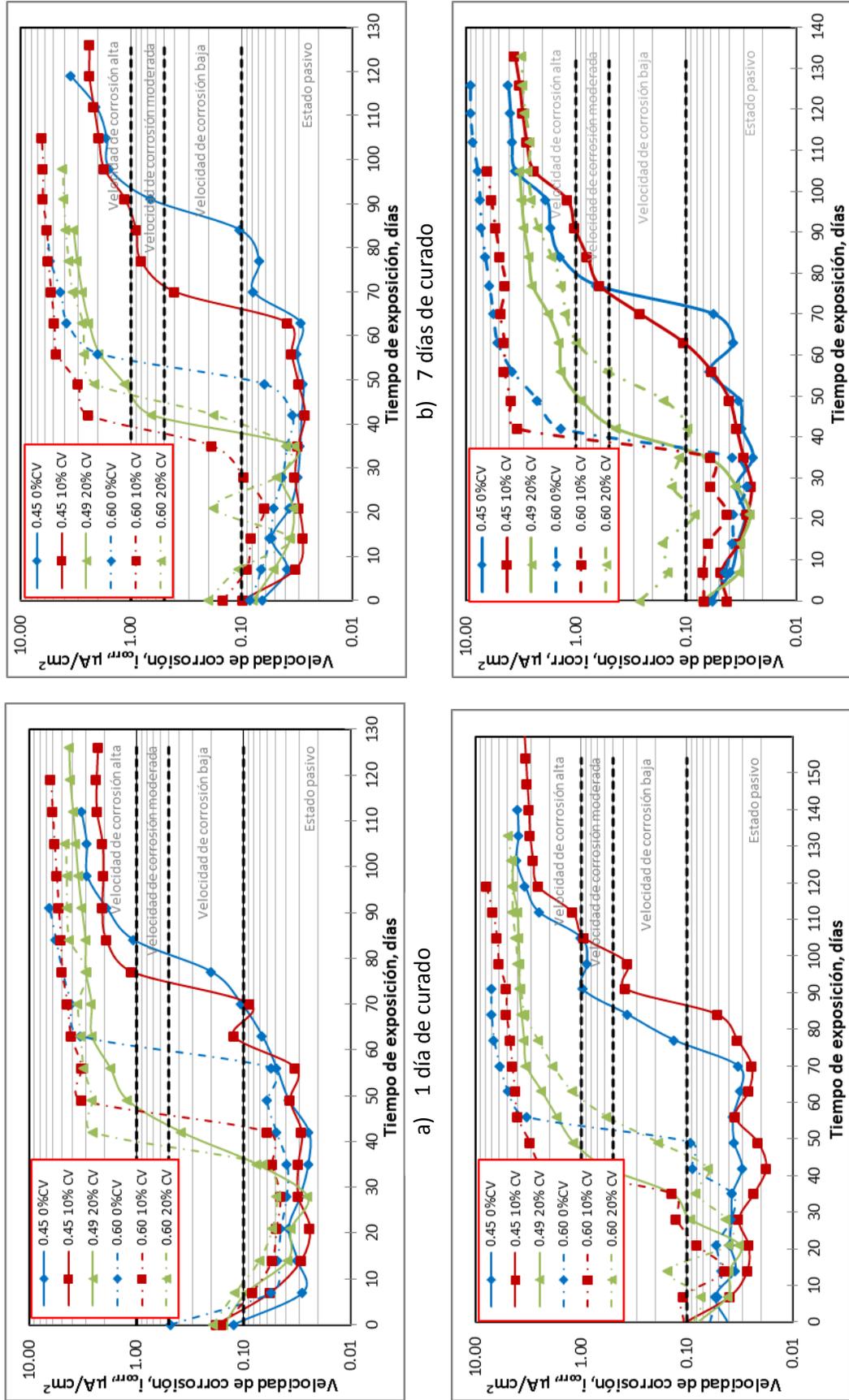


Figura 34. Comportamiento de la velocidad de corrosión para los especímenes elaborados con 35 mm de recubrimiento.

De la misma manera que con el potencial de media celda, es posible distinguir tres etapas en el desarrollo de la velocidad de corrosión. En la primera, el acero se encuentra en estado pasivo, el  $i_{corr}$  registra valores por debajo de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , en donde la velocidad de corrosión se considera despreciable, esta etapa coincide con el comportamiento del potencial de media celda. Para el recubrimiento de 23 mm los valores registrados varían entre -250 a 100 mV y -250 a 300 mV para el recubrimiento de 35mm, indicando de una incipiente a baja probabilidad de corrosión. El fin de esta etapa e inicio de la segunda, se da cuando el  $i_{corr}$  se incrementa por encima de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , pasando de un estado pasivo a un estado activo. La segunda etapa se observa con el rápido incremento del  $i_{corr}$  pasando de un estado pasivo a una zona de velocidad de corrosión baja, esta etapa coincide con la caída del potencial de media celda, a valores más negativos, indicando con este cambio la activación del acero. En la tercera etapa los valores de  $i_{corr}$  registrados son mayores de  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , indicando con esto velocidades de corrosión altas, en esta etapa se presentó el agrietamiento de los especímenes.

Los especímenes que cruzan primero el valor de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , no importando el tiempo de curado, ni el espesor de recubrimiento, son los elaborados con concretos de relación a/mc de 0.60, como era de esperarse. Las mezclas con relación a/mc de 0.45 son las que tardan más tiempo en cruzar este valor; al incrementar el tiempo de curado aumenta el tiempo de activación de los especímenes. Al incorporar la CV en los concretos y con tiempos de curado cortos, 1 y 7 días, el acero se activa antes que en los especímenes de referencia, pero al incrementar el tiempo de curado, el tiempo de activación para los especímenes con CV es similar al de los especímenes sin CV. En la tercera etapa, las velocidades de corrosión que presentaron los especímenes con CV y con curados a 28 y 56 días, fueron menores que las obtenidas con los especímenes sin CV.

Al aumentar el espesor de recubrimiento, se observó que se requiere mayor tiempo para alcanzar la activación del acero de refuerzo. Para los especímenes de

relación a/mc de 0.60 con recubrimiento de 23 mm, independientemente del tiempo de curado, el acero se activó en un periodo de 16 días de exposición, mientras que al incrementar el recubrimiento a 35 mm el acero se activó en un periodo de 55 días. Analizando de la misma manera los especímenes de relación a/mc de 0.49, el acero se activó en un periodo de 10 y 35 días con el recubrimiento de 23 mm y 35 mm respectivamente. En los especímenes de relación a/mc de 0.45, con el recubrimiento de 23 mm, el acero se activa en un periodo de 23 días, mientras que con el recubrimiento de 35 mm se activa en un periodo de 85 días de exposición al proceso de corrosión acelerada.

Para ambos espesores de recubrimiento y con periodos de curado cortos (1 y 7 días), las velocidades de corrosión que se observan en la tercera etapa, son mayores en los especímenes elaborados con CV que los especímenes sin CV. Con el incremento del periodo de curado, las velocidades que se observan en esta etapa para los especímenes con CV, son menores a las observadas en los especímenes sin CV.

Al igual que en el potencial de media celda, el efecto de la CV en relación a la velocidad de corrosión se observa que con periodos de curado largos, se prolonga el tiempo en que los especímenes cruzan el valor de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , asimismo, en la tercera etapa se observó una reducción de la velocidad de corrosión de los especímenes elaboradas con CV. De esta manera podemos inferir, que mediante el empleo de la CV se retrasa el ingreso de agentes agresivo debido a la densificación de la matriz cementante [Leng et al., 2000; Choi et al., 2006].

#### **4.4.3 Resistividad eléctrica del concreto, $\rho$ , obtenida mediante EIE.**

En las figuras 35 y 36 se muestra el seguimiento de la resistividad eléctrica,  $\rho$ , de los especímenes elaborados con los distintos tipos de concretos bajo los diferentes tiempos de curado, para los recubrimientos de 23 mm y 35 mm respectivamente. En ellas mediante un círculo negro se indica el momento en que se detectó el agrietamiento superficial del recubrimiento.

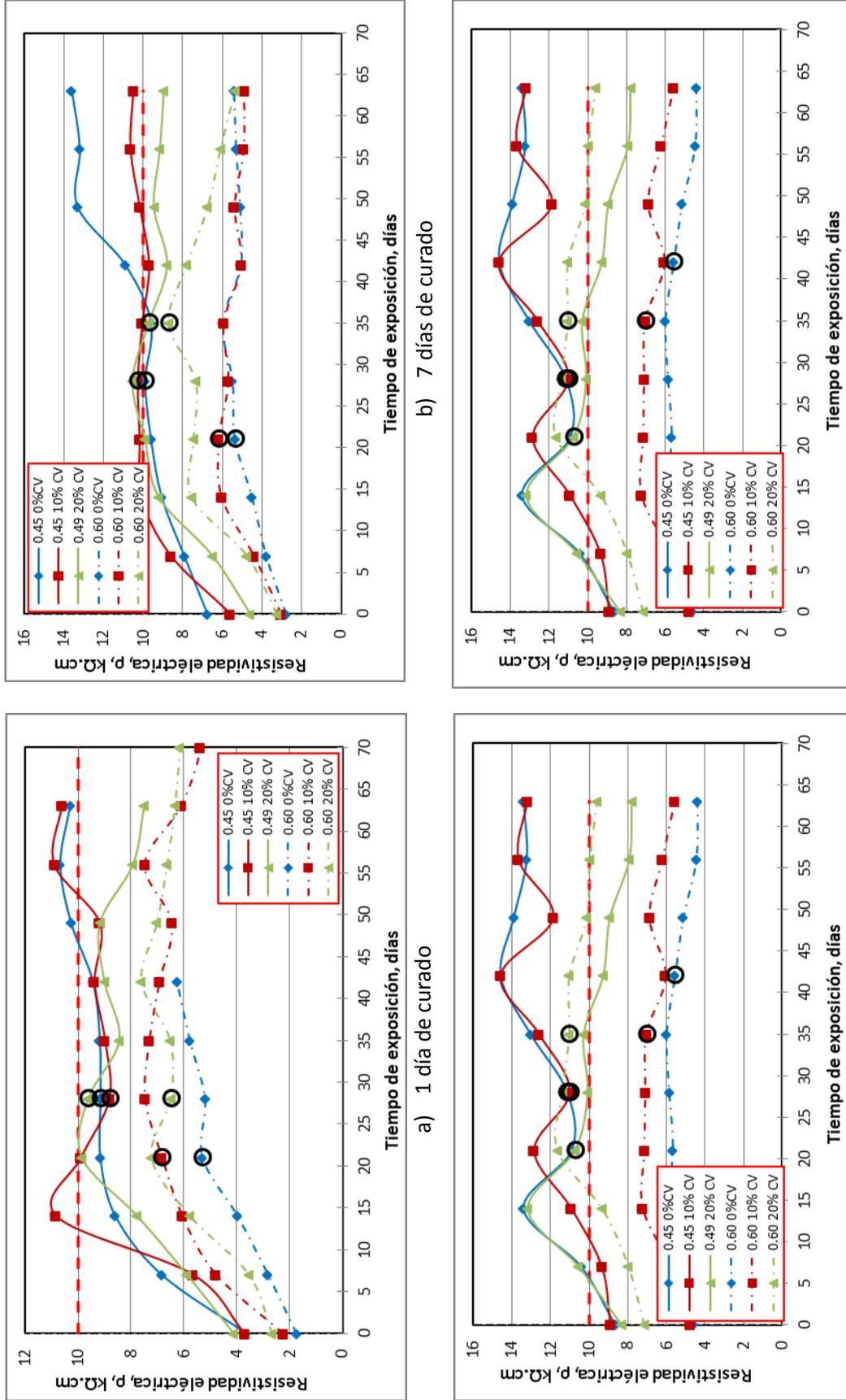


Figura 35. Seguimiento de la resistividad eléctrica de los distintos tipos de concreto en los especímenes de 23 mm de recubrimiento.

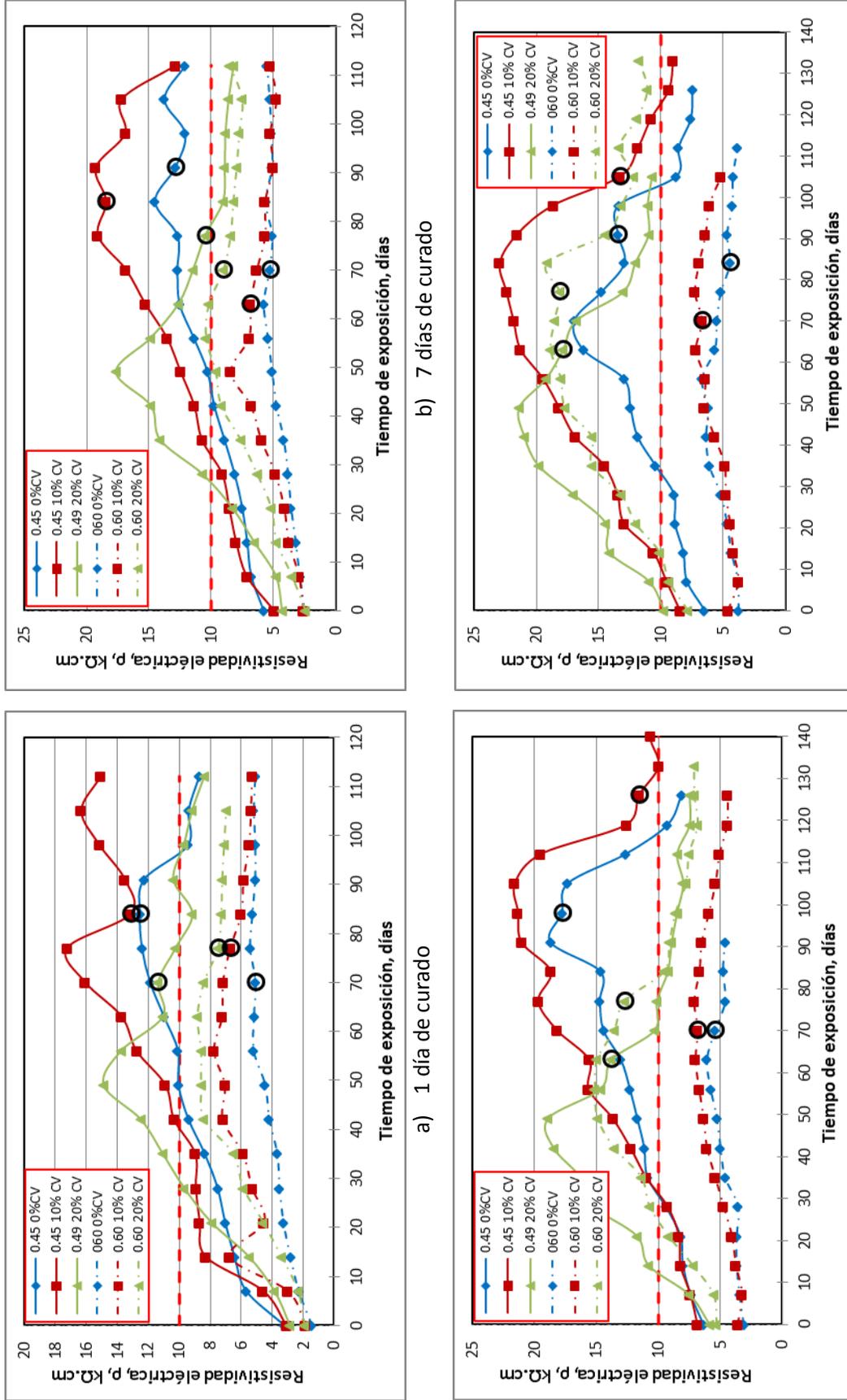


Figura 36. Seguimiento de la resistividad eléctrica de los distintos tipos de concreto en los especímenes de 35 mm de recubrimiento.

Se observa que los especímenes que presentan menor resistividad son los fabricados con relación a/mc de 0.60, seguidos de los elaborados con relación a/mc de 0.49 y los de mayor resistividad son los elaborados con la relación a/mc de 0.45; esto debido a que, a menor relación a/mc se forma una matriz menos porosa, permitiendo el incremento en la resistividad. La resistividad del concreto está relacionada con el grado de hidratación del cemento, así que, ésta se incrementa conforme se incrementa el periodo de curado.

Con periodos de curado cortos (1 y 7, días), las mezclas con CV presentan valores de resistividad iniciales (lectura a 0 días de inducción del proceso de corrosión acelerada) menores a las mezclas de referencia (0%CV), pero conforme se incrementa el tiempo de curado, la resistividad de estos especímenes incrementa. Esto se atribuye a que la reacción puzolánica de la CV es incipiente, y depende de la formación de hidróxido de calcio, producto de la hidratación del cemento. El efecto de la reacción puzolánica es más notoria a medida que la hidratación del cemento avanza, es decir al incrementar la presencia y concentración de hidróxido de calcio. En estas condiciones los productos de hidratación de la reacción puzolánica llenan los espacios vacíos, reduciendo la porosidad de la matriz, pero, también durante la reacción de la CV se consumen iones que modifican la composición de la solución de poro y con esto su conductividad; ambos factores favorecen el incremento de la resistividad del concreto.

Se determinaron los cambios de la resistividad del concreto, con el objetivo de detectar el momento en el que se agrieta el recubrimiento. Desde el inicio del monitoreo y con el avance en el tiempo de exposición, se observó el aumento constante de la  $\rho$ . Esto se debió a que la reacción cementante se ve beneficiada de dos formas: la primera se dio ya que los especímenes permanecen dentro de un contenedor con solución de NaCl al 3% posterior al proceso de curado especificado, lo cual propicia la hidratación subsecuente de los cementantes y la segunda debido a la presencia de iones cloruro que actúan como catalizadores en las reacciones de

hidratación del aluminato del cemento, propiciando el incremento de resistencia mecánica.

Tiempo después, se observó sobre la superficie de los especímenes, manchas de corrosión, efecto de la migración de los productos de corrosión a través de micro agrietamientos. Al incrementar el contenido de cloruros en el espécimen por efecto de la saturación de las grietas con la solución que lo rodea, se incrementa la conductividad del concreto, lo que se ve reflejado en la caída de los valores de la resistividad. [Caré et al., 2007]. Resultados similares han sido obtenidos por Fang [Fang et al., 2004] durante pruebas de corrosión acelerada. Conforme aumenta la presión por efecto de la formación de productos de corrosión, el ancho de grieta se incrementa, haciéndolo visible.

Después de que se genera el agrietamiento superficial visible, los valores de resistividad, en algunos casos, aumentan nuevamente, lo anterior probablemente se deba a que los productos de corrosión se acomodan dentro de la grieta, produciendo el cierre de la misma, modificando de esta manera el comportamiento de los valores de resistividad.

#### **4.5 Inspección visual.**

Una vez que se presentó la caída de los valores de resistividad, se siguió la evolución del ancho de grieta mediante un microscopio óptico. El primer agrietamiento visible fue de un ancho promedio de 0.1 mm para todos los especímenes.

#### **4.6 Pérdida de masa determinada por el método gravimétrico.**

En la tabla 12 se muestra la pérdida de masa ( $\Delta m$ ), obtenida experimentalmente mediante el método gravimétrico, del acero expuesto embebido en los especímenes de concreto sujetos al proceso de corrosión acelerada, se expresa en porcentaje respecto a la masa inicial, así mismo, en la tabla 13 se presenta el valor de la pérdida promedio

de sección necesaria para generar el primer agrietamiento superficial visible del recubrimiento ( $x_{crit}$ ) calculada a partir de la ecuación (16).

**Tabla 12.** Pérdida de masa, obtenida mediante el método gravimétrico.

Pérdida de masa, $\Delta m$ , g*								
Mezcla	Recubrimiento 23 mm				Recubrimiento 35 mm			
	Edad de curado, días							
	1	7	28	56	1	7	28	56
0.45 0% CV	0.786	0.705	0.445	0.678	0.804	1.124	1.046	1.070
0.45 10% CV	1.018	0.511	0.821	0.799	0.623	0.925	0.988	0.856
0.49 20% CV	0.773	0.663	0.508	0.468	0.703	0.595	1.035	0.885
0.60 0% CV	0.648	0.716	1.258	1.238	1.101	0.880	1.155	0.939
0.60 10% CV	0.304	0.257	0.829	0.684	1.175	0.914	0.701	0.681
0.60 20% CV	0.409	0.987	0.794	0.722	0.962	0.750	0.722	0.867

\*Cada valor representa el promedio de 4 varillas

**Tabla 13.** Pérdida promedio de sección necesaria para generar el primer agrietamiento superficial visible del recubrimiento,  $x_{crit}$ .

Recubrimiento	Mezcla	$\Delta m$ real, %				$x_{crit}$ mm			
		1 día	7 días	28 días	56 días	1 día	7 días	28 días	56 días
23 mm	0.45 0%CV	2.92	2.54	1.63	2.51	0.067	0.060	0.038	0.058
	0.45 10%CV	3.74	1.89	3.02	2.94	0.087	0.043	0.070	0.068
	0.49 20%CV	2.88	2.46	1.90	1.74	0.066	0.056	0.043	0.040
	0.60 0%CV	2.40	2.66	4.74	4.68	0.055	0.061	0.107	0.105
	0.60 10%CV	1.14	0.97	3.07	2.56	0.026	0.022	0.071	0.058
	0.60 20%CV	1.56	3.68	2.95	2.67	0.035	0.084	0.067	0.061
35 mm	0.45 0%CV	2.97	4.17	3.90	4.02	0.068	0.096	0.089	0.091
	0.45 10%CV	2.33	3.43	3.71	3.15	0.053	0.079	0.084	0.073
	0.49 20%CV	2.61	2.26	3.92	3.34	0.060	0.051	0.088	0.075
	0.60 0%CV	4.18	3.32	4.50	3.55	0.094	0.075	0.098	0.080
	0.60 10%CV	4.32	3.40	2.63	2.53	0.100	0.078	0.053	0.050
	0.60 20%CV	3.57	2.81	2.70	3.29	0.082	0.064	0.061	0.074

De los resultados mostrados de  $\Delta m$ , se observó de forma general que al reducir la relación  $a/mc$ , disminuye la pérdida de masa necesaria para agrietar el recubrimiento de concreto. Al incrementar el tiempo de curado de 1 a 7 días,  $\Delta m$  disminuye, al incrementar el tiempo de 7 a 28 días  $\Delta m$  aumenta y vuelve a disminuir al incrementar

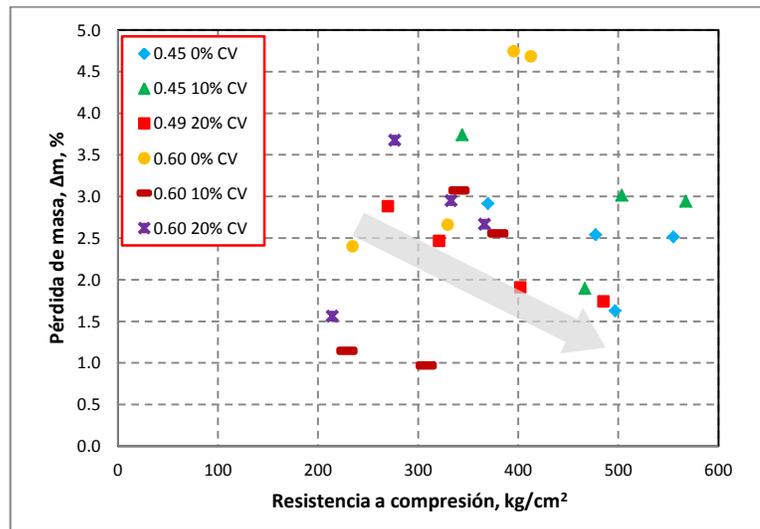
el tiempo de curado de 28 a 56 días. Mediante el empleo de la CV se observó una tendencia a la disminución de  $\Delta m$  conforme se incrementa el porcentaje de este material. Al incrementar el espesor del recubrimiento  $\Delta m$  aumenta.

Los valores de  $x_{crit}$  mostrados concuerdan con los resultados reportados por otros investigadores. Torres-Acosta [Torres-Acosta, 2000] estudio el efecto de la relación C/L (C recubrimiento de concreto; L longitud anódica), encontró que la cantidad de corrosión necesaria para agrietar superficialmente el recubrimiento fue de 49  $\mu m$  - 137  $\mu m$  en especímenes con corrosión localizada y 15  $\mu m$  - 75  $\mu m$  para especímenes con corrosión uniforme. Andrade [Andrade et al., 1993], encontró que un ataque de 20  $\mu m$  genera una grieta 0.1 mm de ancho (3 cm de recubrimiento de concreto y una relación  $C/\phi < 2$ ). Mientras que C. Alonso [C. Alonso et al., 1998] encontró que un ataque de 15-35  $\mu m$  genera una grieta superficial de 0.1 mm de espesor, para una relación  $C/\phi$  entre 2 y 3.

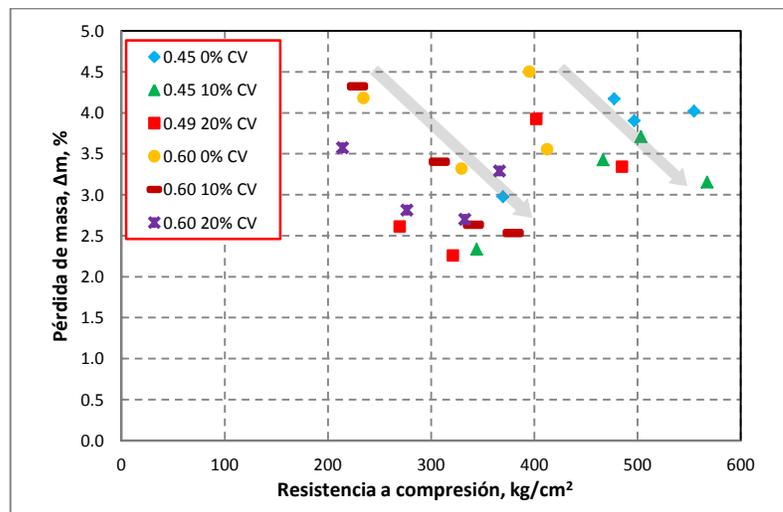
En la bibliografía existen modelos [Pantazopoulou et al., 2001 y Liu et al., 1998] que analizan el tiempo de agrietamiento del recubrimiento en función del espesor del recubrimiento, las propiedades del concreto y de los productos de corrosión. Otras investigaciones han desarrollado modelos basados en la penetración de ataque crítico para iniciar el agrietamiento relacionándolo con el radio del acero de refuerzo [Torres Acosta, 1999], la sección de acero pérdida por la corrosión [Vidal et al., 2004] y la relación  $C/\phi$  (espesor de recubrimiento/diámetro del acero de refuerzo) y las características del concreto [C. Alonso et al., 1998 y Rasheeduzzafar et al., 1992]. En estas investigaciones los modelos se comparan con observaciones experimentales. De lo anteriormente mencionado por otros autores se concluye que el inicio del agrietamiento depende principalmente de la relación  $C/\phi$ , de la calidad del concreto y de su resistencia a la tensión. Por esta razón, se decidió llevar a cabo un análisis del efecto de las propiedades físicas y mecánicas del concreto sobre la variación de la pérdida de masa.

**4.6.1 Relación de la pérdida de masa con la resistencia a la compresión.**

En la figura 37 se muestra la relación de la pérdida de masa ( $\Delta m$ ) con la resistencia a la compresión (considerando únicamente el curado especificado, sin considerar el aporte adicional de resistencia a la compresión que puede ser obtenido durante el proceso de corrosión acelerada) para todos los tipos de concretos elaborados, en la figura 37a, para un recubrimiento de 23 mm y en la figura 37b, para un recubrimiento de 35 mm.



a) Recubrimiento 23 mm



b) Recubrimiento 35 mm

La flecha indica la tendencia que siguen los resultados de  $\Delta m$

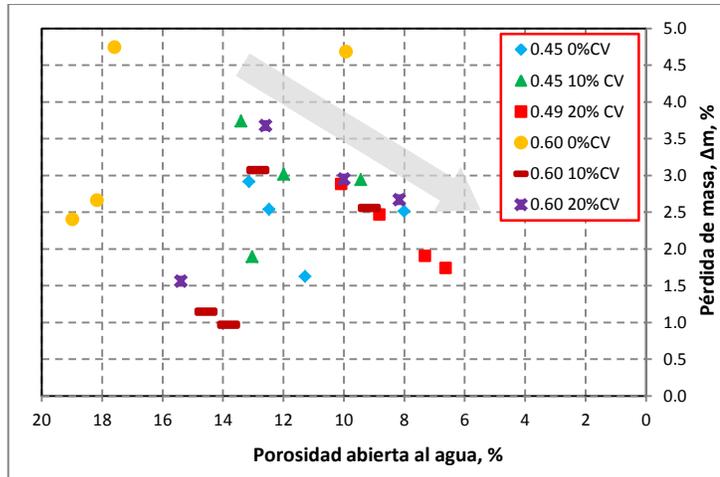
**Figura 37.** Relación de la pérdida de masa con la resistencia a la compresión del concreto, para el recubrimiento de a) 23 mm y b) 35m.

A pesar de la dispersión de los resultados, se observa la tendencia de  $\Delta m$  a disminuir con el incremento de la resistencia a compresión. Al incrementar el recubrimiento a 35 mm, aumenta la  $\Delta m$  y se observa la misma tendencia en relación a la resistencia a compresión, pero no de manera general, sino para cada mezcla, por ejemplo, para la mezcla de relación 0.49 20%CV, la  $\Delta m$  disminuye de 1 a 7 días, pero se incrementa de 7 a 28 días de curado y vuelve a disminuir con 56 días de curado.

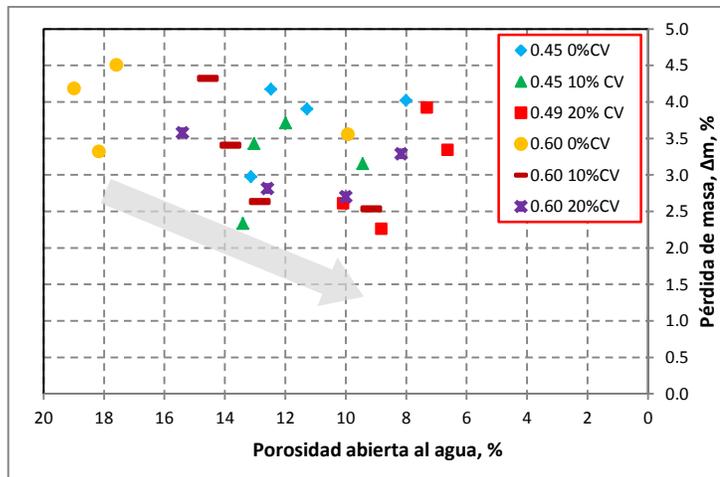
El comportamiento mostrado podría deberse a la existencia de una relación entre la  $\Delta m$ , la resistencia a la compresión del concreto y la porosidad de la matriz. En efecto, la disminución de  $\Delta m$  de 1 a 7 días podría deberse a la reducción de la porosidad de la matriz y el aumento de  $\Delta m$  a 28 días estaría relacionado con la ganancia de resistencia a la compresión, misma que indicaría un aumento en la resistencia a la tensión del concreto, por lo que se requiere un  $\Delta m$  mayor y de igual manera que con 7 días de curado, la disminución de  $\Delta m$  con 56 días de curado sería originada por la reducción de la porosidad.

#### **4.6.2 Relación de la pérdida de masa con la porosidad abierta al agua.**

En la figura 38 se muestra la relación de la pérdida de masa con el porcentaje de porosidad abierta al agua (medida antes de iniciar el proceso de corrosión acelerada) para todos los concretos elaborados. Esta relación se presenta para un recubrimiento de 23 mm figura 38a, y para el recubrimiento de 35 mm figura 38b.



a) Recubrimiento 23 mm.



b) Recubrimiento 35 mm.

La flecha indica la tendencia que siguen los resultados de  $\Delta m$

**Figura 38.** Relación de la pérdida de masa con el porcentaje de porosidad abierta al agua del concreto, para el recubrimiento de a) 23 mm y b) 35mm.

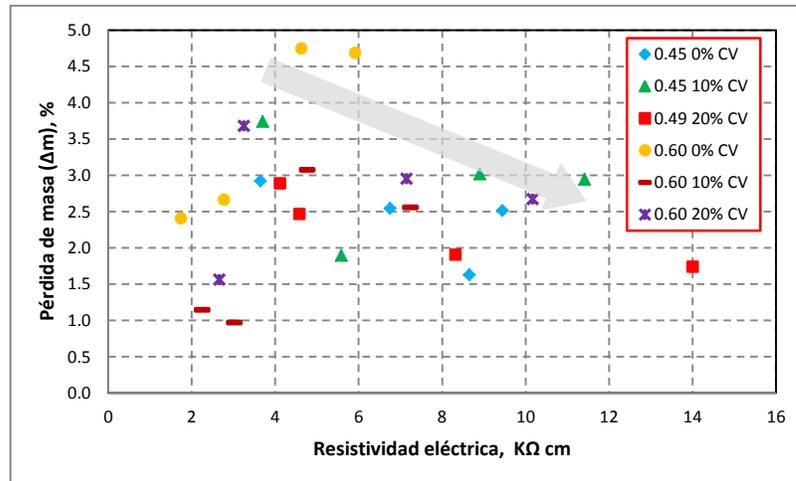
Para ambos recubrimientos se observa la tendencia de  $\Delta m$  a disminuir conforme disminuye la porosidad abierta al agua. Para el recubrimiento de 23 mm la  $\Delta m$  varía en un rango de 0.97 a 4.74% y con el recubrimiento de 35 mm,  $\Delta m$  varía, de 2.26 a 4.50%.

Al reducir la porosidad, se limita el espacio disponible para que los productos de corrosión se acomoden y se requiere menor cantidad de ellos para provocar el agrietamiento del recubrimiento, pero, al aumentar la resistencia a compresión por efecto de curado, aumenta la tensión que debe ser superada por los óxidos para

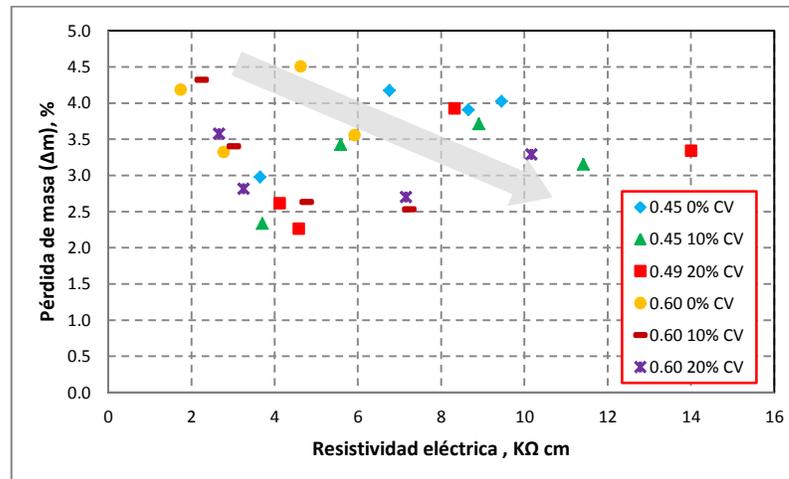
provocar el agrietamiento del recubrimiento, por tal motivo se requiere un incremento en la  $\Delta m$ .

#### 4.6.3 Relación de la pérdida de masa con la resistividad eléctrica.

Para los especímenes elaborados con los distintos tipos de concretos se muestra en la figura 39 la relación de la pérdida de masa con la resistividad eléctrica del concreto medida inmediatamente después de terminar el proceso de curado especificado. En la figura 39a, se muestra la relación para el recubrimiento de 23 mm y en la figura 39b, para el recubrimiento de 35 mm.



a) recubrimiento de 23 mm



b) recubrimiento de 35 mm

La flecha indica la tendencia que siguen los resultados de  $\Delta m$

**Figura 39.** Relación de la pérdida de masa con la resistividad eléctrica del concreto, medida antes del iniciar el proceso de corrosión acelerada.

A pesar de la dispersión de los resultados, para ambos recubrimientos, se observa la disminución de  $\Delta m$  conforme incrementa la resistividad eléctrica del concreto.

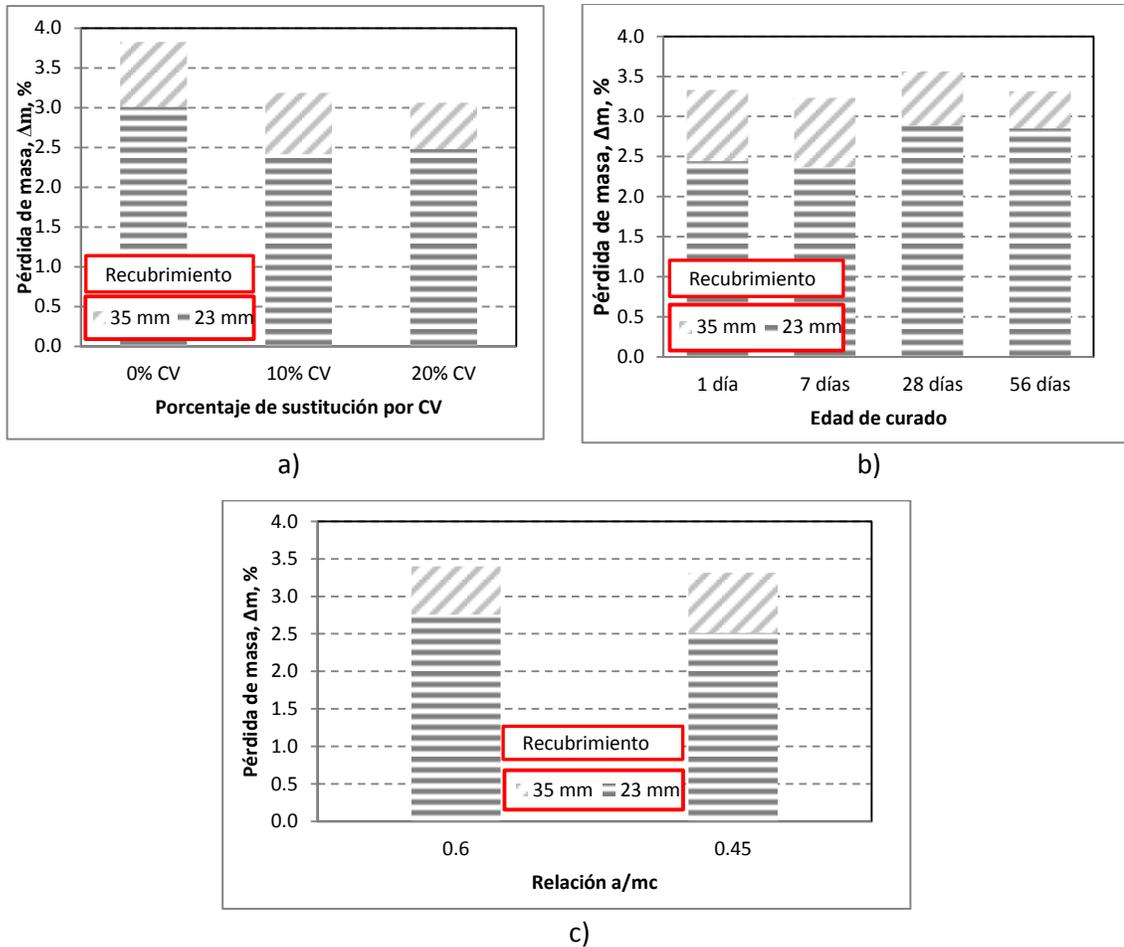
El aumento en la resistividad eléctrica del concreto está relacionado con la relación a/mc, la adición de la CV, el grado de hidratación de los materiales cementantes, la estructura y composición de la solución de poro. Por lo tanto, una estructura menos porosa provoca un aumento en la resistividad, a su vez la  $\Delta m$  disminuye, por lo que se comprueba que al reducir la porosidad, se requiere menor pérdida de masa del acero para agrietar el recubrimiento.

Como se observó en los análisis anteriores, la pérdida de masa que se requiere para agrietar el recubrimiento de concreto depende tanto de las propiedades físicas y mecánicas del concreto como de la geometría del espécimen. La pérdida de masa disminuye con la reducción de la porosidad reflejada con un incremento de la resistividad, pero aumenta con el incremento en el espesor del recubrimiento o si aumenta la resistencia a la tensión.

#### **4.6.4 Análisis estadístico.**

Tanto el aumento en la resistencia a compresión como la disminución en la porosidad y la resistividad eléctrica están relacionados con la densificación de la matriz, misma que fue modificada mediante la variación de tres factores: la sustitución de cemento por CV, el tiempo de curado y la relación a/mc. Mediante el análisis de la relación de la  $\Delta m$  con las propiedades físicas y mecánicas de los concretos, se observó que con la densificación de la matriz, se reduce la  $\Delta m$  necesaria para agrietar el recubrimiento, pero no se alcanza a identificar cual de estos factores tiene mayor efecto. Por esta razón se decidió llevar a cabo un análisis estadístico de los resultados.

En las figuras 40a-c se muestra respectivamente la variación de la pérdida de masa con respecto al porcentaje de sustitución por CV, la edad de curado y la relación a/mc para ambos espesores de recubrimiento.



**Figura 40.** Comportamiento de la pérdida de masa necesaria para agrietar el recubrimiento de concreto con respecto a: a) Uso de la CV, b) Relación a/mc y c) Tiempo de curado.

Considerando únicamente el efecto de la CV (figura 40a), se observa que al incrementar la cantidad de CV se reduce la  $\Delta m$ , teniendo un mayor efecto al emplear un 10% de sustitución por CPO. El efecto del tiempo de curado (figura 40b) es similar a lo discutido cuando se comparó la pérdida de masa con la resistencia a la compresión; a edades de curado cortas (1 y 7 días), se observa la disminución de la pérdida de masa, a 28 días la  $\Delta m$  incrementa, como se comentó anteriormente, debido a la ganancia en la resistencia a la tensión del concreto y a 56 días la  $\Delta m$  disminuye, esto debido a que, a edades largas el incremento en la resistencia a la tensión es menor que a edades cortas, por lo que, tiene mayor impacto la reducción de la porosidad. Al disminuir la relación a/mc (figura 40c) se observó una pequeña disminución en la  $\Delta m$ , sin embargo el conjunto de datos podría no ser suficiente para inferir adecuadamente el

comportamiento, por lo que se juzga necesario ampliar el rango de variación de la  $a/mc$ .

Mediante cualquiera de los factores usados para densificar la matriz cementante: porcentaje de sustitución por CV, la edad de curado y la relación  $a/mc$ , al emplear el recubrimiento de 35 mm se observó que se requiere incrementar  $\Delta m$  para agrietar el recubrimiento, lo anterior en comparación con el recubrimiento de 23 mm. Incrementando el espesor de recubrimiento y empleando el mismo diámetro de la varilla de acero, se incrementa la relación entre el espesor de recubrimiento y el diámetro del acero de refuerzo ( $C/\phi = 2.4$ , para 23 mm de recubrimiento y  $C/\phi = 3,7$  para 35 mm de recubrimiento). De acuerdo a lo reportado en la bibliografía [C. Alonso et al., 1998], la pérdida de masa,  $\Delta m$ , necesaria para agrietar el recubrimiento, aumenta cuando incrementa este cociente, lo cual se pudo confirmar con lo presentado en las figuras 40a-c.

#### **4.6.5 Análisis de varianza.**

Debido a la relativamente baja variación producida en  $\Delta m$  por los factores anteriormente analizados (por ejemplo la relación  $a/mc$ ), se decidió realizar un análisis de varianza para definir cuál de los factor tendría un efecto significativo en la pérdida de masa. Los factores y niveles que se tomaron en cuenta en el análisis fueron: ceniza volante (CV) con tres niveles 0, 10 y 20%, relación  $a/mc$  ( $a/mc$ ) con dos niveles 0.45 y 0.60 y tiempo de curado (TC) con cuatro niveles 1, 7, 28 y 56 días.

Para el análisis, se consideró como hipótesis nula ( $H_0$ ), que cada factor (CV,  $a/mc$  o TC) no provoca un efecto estadísticamente significativo en la  $\Delta m$  media necesaria para agrietar superficialmente el recubrimiento de concreto, y como hipótesis alternativa ( $H_1$ ): el factor provoca un efecto estadísticamente significativo en la  $\Delta m$  media. La hipótesis nula se acepta o rechaza mediante la delimitación de una región de prueba con ayuda del estadístico de prueba  $F_0$  y la delimitación de la región de rechazo. Así, se rechaza  $H_0$  cuando  $F_0$  es mayor que  $P$ , este último representa el menor nivel de

significación que llevaría a rechazar la hipótesis nula. Los valores de P se obtuvieron para un nivel de confiabilidad del 90%. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14.** Análisis de varianza, para los tres factores involucrados en la densificación de la matriz cementante, para un recubrimiento de a) 23 mm y b) 35 mm.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	Valor P
CV	0.53	2	0.26		F <sub>0.10</sub> 2, 93
Error	9.02	93	0.10	<b>2.72</b>	<b>2.37</b>
Total	9.55	95			
a/mc	0.06	1	0.06		F <sub>0.10</sub> 1, 94
Error	9.49	94	0.10	<b>0.63</b>	<b>2.77</b>
Total	9.55	95			
TC	0.39	3	0.13		F <sub>0.10</sub> 3, 92
Error	9.16	92	0.10	<b>1.30</b>	<b>2.15</b>
Total	9.55	95			

a)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	Valor P
CV	0.71	2	0.35		F <sub>0.10</sub> 2, 93
Error	10.13	93	0.11	<b>3.26</b>	<b>2.37</b>
Total	10.84	95			
a/mc	0.01	1	0.01		F <sub>0.10</sub> 1, 94
Error	10.84	94	0.12	<b>0.06</b>	<b>2.77</b>
Total	10.84	95			
TC	0.08	3	0.03		F <sub>0.10</sub> 3, 92
Error	10.77	92	0.12	<b>0.22</b>	<b>2.15</b>
Total	10.84	95			

b)

Analizando el efecto de la CV para el caso de los especímenes con recubrimiento de 23 mm, se observa que el valor de F<sub>0</sub> es mayor que P (2.72 > 2.37), por lo que se rechaza H<sub>0</sub>, y se concluye que las medias de los tratamientos no son iguales; es decir, la CV afecta de manera estadísticamente significativa al proceso de agrietamiento por corrosión del acero de refuerzo. Realizando el mismo análisis para la relación a/mc y el tiempo de curado, en ambos casos se acepta H<sub>0</sub> y se concluye que las medias de los tratamientos son iguales; es decir, la a/mc y TC no afectan de manera estadísticamente significativa al proceso de agrietamiento.

Efectuando el mismo análisis para el recubrimiento de 35 mm, se concluye que el único factor que afecta de manera estadísticamente significativa al proceso de agrietamiento, fue la CV.

Cabe recordar que los métodos estadísticos no pueden demostrar que un factor tiene un efecto particular, sólo proporcionan pautas generales en cuanto a la confiabilidad y la validez de los resultados.

## CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas del análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los concretos elaborados:

- Al reducir la relación  $a/mc$ , extender el tiempo de curado estándar y emplear la ceniza volante se densifica la matriz cementante, lo cual se ve reflejado en el aumento de la resistencia a la compresión del concreto, la disminución de la porosidad abierta al agua y el aumento en la resistencia a la penetración del ion cloro.
- Al sustituir cemento portland por ceniza volante, las propiedades de los concretos disminuyen ligeramente, sin embargo, las propiedades físicas mejoran. En el caso de la porosidad abierta al agua, el uso de la ceniza volante provoca una disminución de la porosidad, así mismo se logra incrementar la resistencia a la penetración de los iones cloro. Esto debido a la formación de sitios de nucleación, que aunado a un periodo de curado con agua por más de 28 días, provocó la discontinuidad de la red porosa, por lo cual se reduce la velocidad de transporte de agentes externos.

En relación al seguimiento electroquímico de los especímenes de concreto reforzado, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Debido a la densificación de la matriz cementante se requirió más tiempo para activar el acero de refuerzo (potencial de media celda) y se disminuyó la rapidez de la degradación del acero (velocidad de corrosión), lo cual también se debe al cambio en la composición química de la solución de poro, que reduce la difusión de agentes agresivos y limita la disponibilidad de oxígeno. Destacando la importancia del curado, ya que, conforme se incrementa, se extiende el tiempo de

iniciación de la corrosión del acero. Cabe señalar que se constata un mejor comportamiento en las mezclas con ceniza volante.

- A pesar de que el proceso de corrosión se aceleró mediante una corriente, los parámetros electroquímicos, potencial de electrodo y velocidad de corrosión, muestran relación en cuanto a los tiempos de activación del acero. Sin embargo, con estos parámetros no fue posible determinar el momento en que se presenta el primer agrietamiento superficial del recubrimiento.
- Para los concretos con valores de resistividad mayores a 8 kΩ.cm y bajo las condiciones experimentales de exposición, fue posible, determinar el momento en que ocurre el agrietamiento del recubrimiento, caracterizado por la disminución de la resistividad del concreto. La resistividad eléctrica del concreto fue medida utilizando la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica.

A partir de los resultados del proceso de agrietamiento por corrosión del acero de refuerzo obtenidos en esta investigación, se tienen las siguientes conclusiones:

- La cantidad de pérdida de masa del acero que se requiere para agrietar el recubrimiento de concreto, depende tanto de las propiedades físicas y mecánicas del concreto como de la geometría del espécimen. El rango de valores de pérdida de sección crítica,  $x_{crit}$ , necesaria para generar el agrietamiento superficial visible del recubrimiento de los concretos en estudio fue: 0.022 - 0.107 mm para el espesor de 23 mm y 0.050 - 0.100 para el espesor de 35 mm.
- La pérdida de masa tiende a disminuir conforme incrementa la resistencia a compresión, aumenta la resistividad eléctrica y disminuye la porosidad del concreto; parámetros íntimamente relacionados con la densificación de la matriz, por lo que podemos decir que conforme se densifica la matriz cementante, se requiere menor cantidad de pérdida de masa para provocar el agrietamiento del recubrimiento.

- Para la misma relación  $a/mc$  y empleando materiales cementantes complementarios, se requiere menor cantidad de pérdida de masa para generar el agrietamiento del recubrimiento.
- Con ayuda del análisis estadístico, se determinó que el uso de la ceniza volante es el factor que provoca una variación estadísticamente significativa en la pérdida de masa requerida para agrietar el recubrimiento. Cabe recordar, que este factor no actúa por sí solo, depende de la relación  $a/mc$  y del tiempo de curado.
- El empleo de materiales cementantes complementarios permite la extensión del periodo de iniciación de la corrosión del acero de refuerzo. Sin embargo, para preservar la integridad del sistema acero-concreto es necesario un seguimiento periódico durante la etapa de propagación, ya que su microestructura es susceptible a agrietarse con un menor porcentaje de pérdida de masa.

## RECOMENDACIONES

Durante la ejecución de esta investigación se observaron fenómenos que resultaron de interés, por lo que se recomiendan como trabajos futuros.

- a) Acelerar el proceso de corrosión por un método que no implique el uso de corriente eléctrica, ya que los parámetros electroquímicos como el potencial de electrodo y velocidad de corrosión, son alterados debido al empleo de la corriente. Se recomienda realizar ciclos de humectación y secado.
- b) Para monitorear el comportamiento electroquímico del acero se recomienda emplear la técnica de ruido electroquímico.
- c) Se recomienda ampliar el rango de variación de la relación agua/material cementante y el contenido de material cementante para evaluar su efecto en el proceso de agrietamiento.
- d) En este estudio se observó que el uso de la ceniza volante modifica la composición de la solución de poro, lo anterior debido al consumo de iones  $\text{OH}^-$  durante la reacción puzolánica, modificando la conductividad del concreto. Se recomienda estudiar el efecto del cambio de la conductividad del concreto en el proceso de corrosión del acero de refuerzo.

**REFERENCIAS**

- ACI Committee 201, (1997), Guide to Durable Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- ACI Committee 222, (2001), Corrosion of Metals in Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- ACI Sección Centro y Sur de México, (1996), Guía para la durabilidad del concreto, Suplemento Mexicano del informe del Comité ACI 201. Guía del Consumidor de Concreto Profesional.
- ACI Committee 318, (2006), Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-02, and Commentary, ACI 318R-02, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- ACI Committee 365, (2000), Service life prediction: state-of-the art report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Alonso C., Andrade C., Rodríguez J., Díez J. M., (1998), "Factors Controlling Cracking of Concrete Affected by Reinforcement Corrosion", Materials and Structures, vol. 31, 435-441.
- Andrade C., Alonso C., (1996), "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site", Construction and Building Materials, vol. 10, No. 5, 315-328.
- Andrade C., Alonso C., (1998), Molina F.J., "Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 1 experimental test", Materials and Structure, vol. 26, 453-464.
- Andrade C., Alonso C., and Molina F.J., (1993), "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part II – Numerical model", Materials and Structures, vol. 26, 532 -548.
- Andrade C., Soler L., Alonso C., Nóvoa X. and Keddah, (1995), "The importance of geometrical considerations in the measurements of steel corrosion in concrete by means of AC impedance", Corrosion Science, vol 37, No. 12, 2013-2023.
- Andrade C., Soler L., Nóvoa X., (1995), "Advances in electrochemical impedance measurements in reinforced concrete", Materials Science Forum, Trans. Tech. Publications, Switzerland, vols. 192-194, 843-856. ASTM -AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS - Committee G-3.
- ASTM B822, (2010), "Standard Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by Light Scattering", Developed by Subcommittee: B09.02, Book of Standards Volume: 02.05

- ASTM C31/C31M, (2010), "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field", Developed by Subcommittee: C09.61, Book of Standards Volume: 04.02
- ASTM C39/C39M, (2005), "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Developed by Subcommittee: C09.61, Book of Standards Volume: 04.02.
- ASTM C143, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", Developed by Subcommittee: C09.24, Book of Standards Volume: 04.02.
- ASTM C150, (2007), "Standard Specification for Portland Cement", Developed by Subcommittee: C01.10, Book of Standards Volume: 04.01.
- ASTM C188, (2009), "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", Developed by Subcommittee: C01.25, Book of Standards Volume: 04.01.
- ASTM C192/C192M, (2008), "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", Developed by Subcommittee: C09.61, Book of Standards Volume: 04.02.
- ASTM C494/C494M (2011), "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", Developed by Subcommittee: C09.23, Book of Standards Volume: 04.02
- ASTM C618, (2008), "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", Developed by Subcommittee: C09.24, Book of Standards Volume: 04.02.
- ASTM C876, (1991), "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", Developed by Subcommittee: G01.14 |Book of Standards Volume: 03.02.
- ASTM C1202, (2010), "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", Developed by Subcommittee: C09.66, Book of Standards Volume: 04.02
- ASTM E 632, (1988), "Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials". Annual Book of ASTM Standards, vol. 14 (02), pp. 348-353.
- ASTM G1, (2003), "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens", Developed by Subcommittee: G01.05, Book of Standards Volume: 03.02

- Austin S.A., Lyons R. y Ing M.J., (2004), "Electrochemical Behavior of Steel-Reinforced Concrete During Accelerated Corrosion Testing", *Corrosion*, vol. 6, No. 2, 203-212.
- Avila J., Genescá J., (1986), "Más allá de la Herrumbre" *La ciencia desde México* No. 9 Edit. Fondo de Cultura Económica, 39-41.
- Avila-Mendoza J., Cano U., and Flores J. M., (1994), "Effect of superficial oxides on corrosion of steel reinforcement embedded in concrete", *Corrosion*, vol. 50, No. 11, 879-885.
- Baboian R., (1990), "Corrosion- A problem of international importance", *Corrosion Testing and evaluation: Silver Anniversary Volume, ASTM STP 1000*, Philadelphia, 7-13.
- Balabanić G., Bićanić N., Dureković A., (May 1996), "The influence of w/c ratio, concrete cover thickness and degree of water saturation on the corrosion rate of reinforcing steel in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 26, issue 5, 761-769.
- Ballim Y., Reid J.C., (2003), "Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams — an experimental critique of current test methods", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, 625–632
- Basheer P. A. M., Chidiac S., and Long A. E., (1996), "Predictive models for deterioration of concrete structures", *Construction & Building Materials*, vol. 10, No. 1, 27-36.
- Bentur S., Diamond N.S., Berke, (1997), "Steel Corrosion in Concrete, Fundamentals and Civil Engineering Practice", Taylor & Francis.
- Bhattacharjee U., Kandpal TC., (2002), "Potential of fly utilization in India". *Energy* vol. 27, 151–166.
- Bilodeau Alain and Malhotra V. Mohan, (January-February 2000), "High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development", *ACI Materials Journal* , vol. 97, No. 1.
- Bonavetti V., Donza H., (2005), "Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement". *Cement and Concrete Research*, vol. 30, 703-708.
- Broomfield John P., Langford P.E., Ewins A.J., (1990), "Corrosion rates of steel in concrete", *Editorial E. & FN SPON, ASTM STP 1065*, Philadelphia, USA, 157.
- Broomfield J.P., (2007), "Corrosion of steel in concrete, understanding, investigation and repair", second ed., Taylor & Francis, London.

- Buffenbarger J. K., (July 1998), "Durability of Concrete Structures. Emphasis on Corrosion and Reaching Specified Services Lives with Corrosion Inhibitors", Concrete Technology Update, Issue, No 1, Master Builders Technologies, Inc. <http://mbt-la.com/MB/static/Techarticles>.
- Burke M., (2007) "CCP experts gather in India". Ash at work, vol. 2, CO 80014, USA: American Coal Ash Association. 17–19.
- Cabrera J.G., (1996), "Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion", Cement and Concrete Composites, vol. 18, 47–59.
- Caré Sabine, Raharinaivo André, (2007), "Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel", Cement and Concrete Research, vol. 37, 1598–1612.
- Castro Borges Pedro, Castillo René M., (1995), "Corrosión en estructuras de concreto reforzado" Construcción y tecnología, México.
- Castro Borges Pedro, Castillo René M., Carpio Juan J., Genescá Juan, Helene Paulo, López Waltter, Pazini Enio J., Sanjuán Miguel A., Véleva Lucién, (2001), "Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- CEMBUREAU, Activity Report 2007, (2008), The European Cement Association, Brussels, 44.
- Choi Yoon-Seok, Kim Jung-Gu, Lee Kwang-Myong, (2006), "Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete", Corrosion Science, vol. 48, 1733-1745.
- Dhir R.K and Byars E.A, (1993), "PFA concrete: Chloride diffusion rates", Magazine of Concrete Research, vol. 45, No. 162, 1–9.
- Dhouibi-Hachini L., Triki E., Grandet J. and Raharinaivo A., (1996), "Comparing the steel-concrete interface state and its electrochemical impedance", Cement and Concrete Research, vol. 26, No. 2, 253-266.
- Elsener B., Bönhi H., (1990), "Corrosion rates of steel in concrete", Editorial E. & FN SPON, ASTM STP 1065, Philadelphia, USA, 143.
- Elsener B., Molina M. y Bonhi H., (1993), "The Electrochemical Removal of Chlorides from Reinforced. Concrete", Corrosion Science, vol. 35, 1563-1565.
- Everett L.H., Treadaway K.W.J., (1982), Corrosion Prevention Control, 5.
- Fang C., Lundgren K., Cheng L., Zhu C., (2004), "Corrosion influence in reinforced concrete", Cement and Concrete Research, vol. 34, 2159–2167.

- Feliu S., Gonzalez J.A. and Andrade C., (1996), "Multiple-electrode method for estimating the polarization resistance in large structures", *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 26, 305-309.
- Flis J., Pickering H.W. and Osseo-Asare K., (1998), "Interpretation of impedance data for reinforcing steel in alkaline solution containing chlorides and acetates" *Electrochimica Acta*, vol. 43, 1921-1929.
- Funhashi M., (Nov-Dec 1990), "Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in a chloride environment", *ACI Materials Journal*, 581.
- Garcés Terradillos Pedro, Climent Llorca Miguel Ángel, Zornoza Gómez Emilio, (2008), "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado", Editorial Club Universitario, España.
- González J.A., Ramírez E., Bautista A. y Feliu S., (1996), "The behaviour of pre-rusted steel in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 26, Issue 3, 501–511.
- González F., Fajardo G., Arliguie G., Juárez C.A., Escadeillas G., (December 2011), "Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete: an Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion", *International Journal of Electrochemical Science*, vol.6, 6332 - 6349, ISSN 1452-3981
- Gu P., Beaudoin J.J., Zhang M.H., Malhotra V.M., (2000), "Performance of reinforcing steel in concrete containing silica fume and blastfurnace slag ponded with sodium chloride solution", *ACI Materials Journal*, vol. 97, 254–262.
- Gu P., Fu Y., Xie P., and Beaudoin J., (1994), "Characterization of surface corrosion of reinforcing steel in cement paste by low frequency impedance spectroscopy", *Cement and Concrete Research*, vol. 24, No. 2, 231-242.
- Sánchez de Guzmán Diego, (2006) "Durabilidad y patología del concreto", Edit. Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Ha Tae-Hyun, Muralidharan Srinivasan, Bae Jeong-Hyo, Ha Yoon-Cheol, Lee Hyun-Goo, Park Kyung-Wha, Kim Dae-Kyeong, (2007), "Accelerated short-term techniques to evaluate the corrosion performance of steel in fly ash blended concrete", *Building and Environment*, vol. 42, 78-85.
- Hachini L., Fiaud C., Triki E., and Raharinaivo A., (1994), "Characterisation of steel-concrete interface by electrochemical impedance spectroscopy", *British Corrosion Journal*, vol. 29, No. 2 122-127.
- Haynes G., (1992), "Review of laboratory corrosion tests and standards", In: Baobian R, Dean SW, editors. *Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume*,

- ASTM STP 1000. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 281–288.
- Hernández-Castañeda O. y Mendoza-Escobedo C. J., (2006), “Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico”, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. VII, No. 1, 57-70.
- Hooton R. D., (2010), “Concrete durability and sustainability as influenced by resistance to fluid ingress and selection of cementitious materials”, *Concrete under Severe Conditions*, Castro Borges et al. Taylor and Francis Group, London, 99–114.
- IPCC, Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Equipo de redacción principal: R. K.Pachauri, y A. Reisinger (directores de la publicación), IPCC, Ginebra Suiza.
- Joshi R. C., Lothia R. P., (1997), “Fly ash in concrete: production, properties and uses”, *Advances in concrete technology*, vol. 2. Gordon and Breach Science Publishers.
- Khunthongkeaw J., Tangtermsirikul S. and Leelawat T., (2006), “A Study of carbonation depth prediction for fly ash concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 20, 744-753.
- Kitowski C.J. and Wheat H.G., (March 1997), “Effect of Chloride on Reinforcing Steel Exposed to Simulated Concrete Solutions”, *Corrosion*, vol. 53, No.3, 216-226.
- Koulombi N., Batis G., Malami C.H., (1993), “Progress in the understanding and prevention of corrosion”, Mercer AD editors, Institute of Materials, Spain, 619.
- Leng Faguang, Feng Naiqian, Lu Xinying, (2000), “An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete”, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, 989-992.
- Li Guo, Otsuki Nobuaki, Yuan Ying-shu, (2009), “Effects of the initial water curing time on the corrosion behavior of steel bar corrosion in fly ash concrete”, *Procedia Earth and Planetary Science* 1, 742–749.
- Liu Youping and Weyers Richard E., (1996), “Time to cracking for chloride-induced corrosion in reinforced concrete”, in: C.L. Page, P.B. Bamforth, J.W. Figg (Eds.), *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, The Royal Society of Chemistry, London, 88.
- Liu Youping and Weyers Richard E., (November-December 1998), “Modeling the time to corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures” *ACI Materials Journal* vol. 95, No. 6.

- Maaddawy T.A. El, Soudki K.A., (January/February 2003), "Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 41–47.
- Malhotra V. M., (Julio 2002), "High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete", *Concrete International*. vol. 24, No. 7, 30-34.
- Mangata P.S. and Gurusamy Kribanandan, (July 1987), "Chloride diffusion in steel fiber reinforced concrete containing PFA", *Cement and Concrete Research*, vol. 17, No. 4, 640-650.
- Manual DURAR, (1997), "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado", CYTED, Red Temática XV.B – Durabilidad del Hormigón, España.
- Maruya Tsuyoshi, Hsu Kailin, Takeda Hitoshi and Tangtermsirikul Somnuk, (2003), "Numerical Modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 2, 147- 160.
- McCuen R. H., Albrecht P., Cheng J. G., (1992), "New approach to power model regression of corrosion penetration data", *Corrosion forms and control for infrastructure*, ASTM STP 1137, Victor Chaker, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 46–76.
- Mehta P. Kumar, (February 2009), "Global Concrete Industry Sustainability, Tools for moving forward to cut carbon emissions", *Concrete International*.
- Mehta P.K., y Burrows R.W., (2001), "Building Durable Structures in the 21st Century." *Concrete International*, vol. 23, No. 3, 57-63.
- Mehta P.K., Monteiro P.J.M., (1997), "Concrete Microstructure", *Properties and Materials*, 1st edition, Indian Concrete Institute, Chennai.
- Mehta P. Kumar, and Walters M., (Janury 2008), "Roadmap to a Sustainable Concrete Construction Industry", *The Construction Specifier*, vol. 61, No. 1, 48-57.
- Mendoza D. N., Calderón F. A., Chavarin J. U., Villafañe A. M., Nava J C., Zamora M. B., Tiburcio C. G. and Menchaca L., (December 2008), "Evaluation of Reinforced concrete Structures by Means of a Novel Electrochemical Noise Corrosion Sensor", *NACE, Corrosion*, vol. 64, No. 12.
- Monfore G. E., (1968), "The electrical resistivity of concrete", *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 35-48.

- Montemor M.F, Simões A.M.P y Salta M.M, (2000), "Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS", *Cement and Concrete Composites*, vol. 22, Issue 3, 175–185.
- Montemor M. F., M. P. Cunha, M. G. Ferreira, A. M. Simons, (2002), "Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides", *Cement and Concrete Composites* vol. 24, 45-53.
- Moreno Pérez Emiliano, (2005), "Comportamiento electroquímico del acero embebido en concreto", Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, ESIQIE – IPN México D.F.
- Mukherjee AB, Zevenhoven R, Bhattacharya P, Sajwan KS, Kikuchi R., (2008), "Mercury flow via coal and coal utilization by-products: a global perspective", *Resour Conserv Recycl*, vol 52, 571–91.
- Nadel S.L., (December 1994), *Materials Performance*, 59.
- Neville A.M., Brooks J. J., (1998), "Tecnología del concreto". Edit. Trillas.
- Neville A.M., (November 2001), "Maintenance and Durability of Concrete Structures" Concrete International.
- NMX C 30, (2004), Industria de la Construcción-Agregados-Muestreo.
- NMX C 073, (2004), Industria de la Construcción-Agregados para concreto –Masa volumétrica-Método de prueba.
- NMX C 077 ONNCCE, (2006), Industria de la Construcción-Agregados para concreto-Análisis granulométrico-Método de prueba.
- NMX C 111 ONNCCE, Industria de la construcción – Concreto – Agregados – Especificaciones.
- NMX C 164, (2002), Industria de la construcción-agregados-determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso
- NMX C 165, (2004), Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino. Método de prueba.
- NMX C 170 ONNCCE, (1997), Industria de la construcción - agregados - reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo, al tamaño requerido para las pruebas.
- NMX C 414 ONNCCE, (2004), Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Febrero 2005.

- Orozco J., (1998), "Cálculo de las pérdidas económicas por corrosión en el estado de Yucatán y su impacto en el PIS estatal", Documento Inédito, CINVESTAV.
- Organization for Economic Co-Operation and Development OECD Road Research Group, "Bridge Inspection", Road Research, Paris, (1976).
- Pacheco F. J., Valdez T. P., Fajardo G. J., (2009), Tesis: "Uso de puzolanas naturales mexicanas para incrementar la durabilidad del concreto reforzado", Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Pantazopoulou S. J., and Papoulia K.D., (2001), "Modeling cover cracking due to reinforcement corrosion in RC structures", Journal of Engineering Mechanics.
- Papadakis V. G., (2000), "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress", Cement and Concrete Research, vol. 30, 291-299.
- Polder R.B., (1996), "Laboratory testing of five concrete types for durability in a marine environment", in: C.L. Page, P.B. Bamforth, J.W. Figg (Eds.), Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, The Royal Society of Chemistry, London, 115.
- Portland Cement Association, Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, "Diseño y control de mezclas de concreto", Ed. Limusa, México, (2004).
- Pourbaix M., (1987), "Lectures on Electrochemical Corrosion", Green, J. A. S., Trans.; Plenum: New York, 115.
- Rasheeduzzafar S. S., Dakhil F. H. y Al-Gahtani A. S., (1984), "Deterioration of concrete structures in the environment of the Middle East". ACI Journal, vol. 81, 13.
- Rasheeduzzafar S. S., Dakhil Fahd H., Bader Maher A., and Khan Mohammed Mukarram, (1992), "Performance of corrosion resisting steel in chloride-bearing concrete". ACI Materials Journal, vol. 89 (5), 439-48.
- Rasheeduzzafar S. S., Al-Saadoun and Al-Gahtani A.S., (Nov. 1992), "Corrosion cracking in relation to bar diameter, cover and concrete quality", Journal of Material in Civil Engineering, vol. 4.
- Roper H., (1982), "Reinforcement for concrete structures subject to fatigue", International Assoc. for Bridge and Structural Engineering, 239-245.
- Rostam Steen, (2005), "Service life design of concrete structures", Asian Journal of Civil Engineering (building and housing) vol. 6, no. 5, 423-445.

- Sánchez De Guzmán Diego, (2006), "Durabilidad y Patología del Concreto" Edit. Instituto del Concreto.
- Sagoe-Crentsil K. K., Glasser F. P. and Irvine J. T., (1992), "Electrochemical characteristics of reinforced concrete corrosion as determined by impedance spectroscopy", *British Corrosion Journal*, vol. 27, No. 2, 113-118.
- Saraswathy Velu, Song Ha-Won, (2006), "Electrochemical studies on the corrosion performance of steel embedded in activated fly ash blended concrete", *Electrochimica Acta*, vol. 51, 4601-4611.
- Saraswathy Velu., S. Muralidharan, K. Thangavel, S. Srinivasan, (2003), "Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, 673-680.
- Shahzma J. Jaffer, Carolyn Hansson M., (2009), "Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions", *Cement and Concrete Research*, vol. 39, 116-125.
- Stanish K., Hooton R.D., Thomas M.D.A, (2004), "A novel method for describing chloride ion transport due to an electrical gradient in concrete: Part 2. Experimental study". *Cement and Concrete Research*, vol. 34, 51-57.
- Stern M. and Geary A. L., (1957), "Electrochemical Polarization: I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves", *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 104, No. 1, 56-63.
- Sygula S. and Riz K., (1984), "Longitudinal cracking and its relation to service life of reinforced concrete bridges", In *Proceedings of ACI-RILEM International Symposium on Long-term observation of Concrete Structures*, Budapest, 182-192.
- Talbot David E. J., Talbot James D. R., (2007), "Corrosion science and technology", CRC Press.
- Torres Acosta A. A., 1999, "Cracking induced by localized corrosion of reinforcement in chloride contaminated concrete". Ph.D. Thesis, University of South Florida, Florida, USA.
- Torres-Acosta A.A., (2010), "Accelerated vs. Natural corrosion experimental results for remaining life forecasting", *Concrete Under Severe Conditions*, Castro Borges et al. (eds), 35-42.
- Torres-Acosta A.A. y Sagües A. A., (2000), "Concrete Cover Cracking with Localized Corrosion of Reinforcing Steel" *Proc. of the Fifth CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete*, SP 192, V.M Malhotra, Ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., U.S.A., 591-612.

- Tuutti K., (1982), "Corrosion of Steel in Concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 469.
- UNE 61-033, (1975), Materiales refractarios. Densidad aparente, Absorción de agua y porosidad abierta.
- Uzal Burak, Turanli Lutfullah, and Mehta P. Kumar, (September-October 2007), "High-Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications", ACI Materials Journal, 535-538.
- Verink Ellis D., (1994), "Corrosion Testing Made Easy: The basics", Nace International.
- Vidal T., Castel A. and Francois R., (2004), "Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete", Cement and Concrete Research, vol. 34 165–174.
- Videm K., (1998), "Corrosion of reinforcement in concrete", Monitoring, prevention and rehabilitation. EFC no. 25. London, 104–121.
- Wang Aiqin, Zhang Chengzhi, Sun Wei, (2004), "Fly ash effects II: The active effect of fly ash", Cement and Concrete Research, vol. 34, 2057-2060.
- Wenger F., Galland J., and Lemoine L., (1987), "Application of electrochemical impedance measurements to the monitoring of corrosion of reinforced concrete structures in marine environment", EUROCOR '87, Karlsruhe Germany.
- Weyers Richard E., (July 1998), "Service life model for concrete structures in chloride laden environments", ACI Materials Journal, vol. 95(4), 445–453.
- Whittington H. W., Mc Carter J. and Forde M. C., (1981), "The conduction of electricity through concrete", Magazine of Concrete Research, vol.33, No. 11, 48-60.
- Wong H.S., Zhao Y.X., Karimi A.R., Buenfeld N.R., Jin W.L., (2010), "On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion", Corrosion Science, vol. 52, 2469–2480.
- Yeih W., Huang R., (1998), "Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing", Cement and Concrete Research, vol. 28, 1071–1083.
- Zhou K., Martín-Pérez B. y Lounis Z., (July 2005), "Finite Element Analysis of Corrosion-Induced Cracking, Spalling and Delamination of RC Bridge Decks", 1st Canadian Conference on Effective Design of Structures McMaster University Hamilton, Ontario, Canada, 591-612.