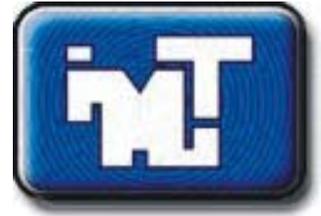




ISSN 0188-7297



Certificado en ISO 9001:2000
Laboratorios acreditados por EMA

MEMORIAS DEL PRIMER CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT-MÉXICO 2004

Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Instituto Mexicano del Transporte



Editores
Andrés A. Torres Acosta
Francisco Lee Orantes

Sanfandila, Qro, 2006

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Memorias del Primer Congreso
Nacional de
ALCONPAT-México 2004**

Sanfandila, Qro, 2006

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por el M C Francisco Lee Orantes, y el Dr Andrés A Torres Acosta, asistente e investigador, respectivamente, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, del Instituto Mexicano del Transporte.

Los autores agradecen al proyecto CONACYT U42362-K “Facillitating Collaborative Research in the Americas: the materials science of portland cement-based materiales,” y al Instituto Mexicano del Transporte las facilidades otorgadas para la realización de este documento.

Comité Científico y Organizador

Comité Científico

- Dr Eric I Moreno – Profesor Investigador – Universidad Autónoma de Yucatán
- Dr Ing Angélica del Valle Moreno – Investigador - IMT
- MC José Trinidad Pérez Quiroz – Investigador - IMT
- MC Wilfredo Martínez Molina – Profesor Investigador – Universidad Michoacana
- Dr Ing Elia Alonso de Martínez – Profesor Investigador – Universidad Michoacana

Comité Organizador

Presidente: Dr Ing Andrés A Torres Acosta – Investigador IMT

Vicepresidente: Dr Ing Pedro Castro Borges – Investigador – CINVESTAV Mérida

Hospedaje y Transporte: C Carlos Blake Cervantes - IMT

Alimentación: C Enrique Lira Cortés - IMT

Expositores

Sika Mexicana, S A de C V

Grupo Peñoles, S A de C V

Asociación Mexicana de Galvanizadores.

Índice

	Página
Comité Científico y Organizador	iii
Resumen	vii
Abstract	ix
Publicaciones:	
Efecto ambiental sobre el desarrollo de fauna y flora en materiales de construcción en Morelia, Michoacán, México G Alonso-Guzmán, et al,	1
Determinación no-destructiva de la distribución de cloruro de sodio en mortero de cemento Pórtland P Felipe de Jesús Cano-Barita et al,	9
Incremento de trabajabilidad de concreto hidráulico adicionando cenizas volcánicas en substitución a los finos, sin Modificación de la relación a/c W Martínez Molina et al,.....	19
Durabilidad de estructuras expuestas a un ambiente agresivo sujetas a movimientos sísmicos- Un caso de estudio en la costa de Oaxaca, México P Montes-García ..	31
Barras de acero galvanizado: Una opción contra la carbonatación E I Moreno et al,.....	39
Durabilidad del concreto en edificios universitarios: Carbonatación en clima cálido semihúmedo R G Solís Carcaño, E I Moreno.	49
Análisis electroquímico de la corrosión en concretos con puzolanas y escoria de alto horno Rosa E Núñez Jaquez, et al,.....	59
Estudio del Comportamiento del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto Protegidas Catódicamente en un Medio Marino M R Sosa, et al,.....	71
Caracterización de barras de acero inoxidable en concretos contaminados por cloruros A A Torres-Acosta, et al, ..	81

Durabilidad del sistema acero-concreto y su relación con la acción del medio ambiente en una zona urbano-industrial	
Rodríguez-Ramírez M, et al, ..	91
Propuesta para determinar concretos durables ante el medio ambiente de la ciudad de Oaxaca, y su impacto en la vivienda de interés social a base de concreto	
E López, et al..	105

Resumen

Este documento presenta las memorias de las publicaciones realizadas en el Primer Congreso Nacional Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de las Construcciones, Sección México, 2004 (ALCONPAT-México 2004). La sede de este evento fue el Instituto Mexicano del Transporte en el marco del VII Curso Internacional de Corrosión, que se realizó en sus instalaciones en Sanfandila, Querétaro, México.

El Primer Congreso Nacional ALCONPAT-México 2004 presentó tres temas fundamentales: el control de calidad; la patología; y la recuperación de las construcciones. La versión final de estas memorias incluyen 11 trabajos con temas como: Materiales, Obras, Elementos estructurales, y Acción del medio ambiente, entre otros.

Abstract

This document presents the memories of publications made in the First National Congress ALCONPAT Mexico 2004, held in the Mexican Transport Institute in Sanfandila, Queretaro, Mexico, as part of the 7^o International Corrosion Course.

The First National Congress ALCONPAT-Mexico 2004 presented three main subjects: Quality Control, Pathology and Recovery of Constructions. The final version includes a total of eleven publications with subjects as: Structural Materials, Structural Elements, Constructions, Weather Effect, among others.



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

EFECTO AMBIENTAL SOBRE EL DESARROLLO DE FAUNA Y FLORA EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO

**G Alonso-Guzmán¹; F Hernández-Valencia¹; M Zendejas-Arana¹;
P Guevara Féfer¹; E López-Barbosa¹**

Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Morelia, Michoacán, México, CP 58070

E Alonso² y W Martínez²

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Morelia, Michoacán, México, CP 58070

RESUMEN

Los datos ambientales dan una idea del comportamiento de la fauna y flora de Morelia, Mich, México, sobre las rocas con que están contruidos los monumentos del Centro Histórico; las rocas se conocen coloquialmente como canteras; inclusive la capital se conoce como La Ciudad de la Cantera Rosa. Morelia es la capital de Michoacán, y se encuentra en la intersección del Eje Volcánico, o Cinturón Mexicano Neovolcánico, la Sierra Madre Occidental y las placas de Cocos, y Rivera. Lo anterior da una idea del vulcanismo en la zona, siendo uno de los principales productos de la actividad volcánica las rocas ígneas extrusivas. Las rocas que nos ocupan son rocas ígneas, conocidas como ignimbritas o tobas riolíticas, y son las rocas con las que se construyeron aproximadamente 1,130 monumentos del Centro Histórico de la ciudad. Estas rocas no son densas, y por los poros que tiene su matriz, son excelentes agentes precursores de crecimiento de flora y fauna.

Palabras clave: Biótico, ignimbritas, daño ambiental, daño antropogénico.

ABSTRACT

The environmental Morelia data, give us an idea about the behaviour of the biotic resources rising on the stones in the ancient monuments in the Historic Centre, the city is known as The Pink Stone City. Morelia is the principal city in Michoacan State, and it is located in the crossing of the Mexican Volcanic Belt, the Sierra Madre Occidental Mountains and the Coco's and Rivera's plaques. Because of that the volcanic activity in the zone is very important and it results on the igneous extrusive stones known as ignimbrites or rhyolitic tuffs, and there are 1,130 monuments in the historic downtown, built with these stones. These stones are light, and the matrix has many pores where the biotic resources grew.

Key words: Biotic, ignimbrites, environmental damage, anthropogenic damage.

INTRODUCCIÓN

Las características que influyen en la calidad y alterabilidad de la piedra dependen de las propiedades y naturaleza de los minerales que componen la roca, y de la proporción que presentan los elementos químicos en el material pétreo. En general, se sabe que las rocas con texturas homogéneas son más estables; mientras que las texturas heterogéneas son más alterables porque presentan zonas de propiedades diferenciales.

Ciertas características físicas de las rocas como la textura; estructura; densidad; y porosidad, que incluye la cantidad, forma, tamaño y distribución de los poros, son determinantes del comportamiento de la piedra ante los agentes de deterioro; lo mismo que el coeficiente de capilaridad, la resistencia mecánica y propiedades hídricas como la permeabilidad al agua líquida y al vapor de agua, y el coeficiente de saturación con agua. La densidad (relación entre la masa y el volumen) es una propiedad característica de los diferentes tipos de roca, que varía de manera significativa en función de la porosidad y composición mineralógica y elemental.

La porosidad –relación porcentual entre los espacios vacíos y el volumen total- es una propiedad muy importante que determina la alterabilidad de los materiales, puesto que la relación de los espacios vacíos, y la comunicación que poseen entre sí, condiciona la circulación del agua a través de su interior, siendo esta una de las principales causas de deterioro. La porosidad también se relaciona con propiedades como la capilaridad, la permeabilidad al agua y al vapor de agua y el coeficiente de saturación de agua; por ello, es importante conocerlos para evaluar la calidad de la piedra.

El agua es la principal causa de deterioro no sólo de la piedra, sino de todos los materiales de construcción de bienes culturales. Si se excluye el agua del monumento, la mayor parte de su degradación estará controlada. El agua pura no es tan dañina para la piedra, como la de lluvia y la freática que incorporan dióxido de carbono de la atmósfera o de la respiración de los microorganismos terrestres; éste, con el agua produce ácido carbónico según reacción: Nota¹

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se realizó un levantamiento sobre las especies bióticas en los monumentos por la Biol E Santillán Ferreira, dando por resultado que en el 95% de los edificios se registraron las especies *Cymbalaria mularis* y *Nicotiana glauca*, las cuales permanecen durante todo el año y se localizan en diferentes partes estructurales de los monumentos, preferentemente en lugares húmedos y no se encuentran asociados a otras especies, siendo *Nicotiana glauca* la que presentó mayor agresividad, y al provocar fracturas, además de que se adapta a cualquier espacio y condiciones ambientales, encontrándose tanto en forma herbácea como arbustiva.

Nota¹: Los autores no presentaron la ecuación indicada en el texto

La abundancia observada, no necesariamente está relacionada con la superficie de cada uno de los edificios, sino de otros factores como los vientos dominantes, los cuales provienen del S-SW, mismo que favorece la dispersión de las semillas, coincidiendo que en este sentido se encuentran los edificios con deterioro más evidente.

Se muestrearon ignimbritas de los monumentos de la Catedral; Templo de Capuchinas; Templo del Carmen; Primitivo y Nacional Colegio de San Nicolás de Hidalgo. Todas las esquirlas se sometieron a las pruebas estandarizadas de la American Society for Testing and Materials. Los resultados mostrados en la tabla 4, son el promedio de tres cuantificaciones. En las rocas sanas extraídas de los bancos de cantera de Arindeo o Jamaica, de Cointzio y El Tejocote, se hicieron pruebas destructivas; mientras que en las rocas deterioradas provenientes de los sitios y monumentos histórico- arquitectónicos, no se realizó la misma cantidad de pruebas destructivas, puesto que no se justifica el hecho de destruir un monumento a fin de estudiarlo.

Para obtener los valores de porcentaje de absorción; densidad aparente; gravedad específica; esfuerzo de ruptura a la compresión; y módulo de ruptura a la flexión, se labraron especímenes de las canteras.

En los casos de los análisis de fluorescencia (FR_x) y difracción de rayos X (DR_x), así como el análisis elemental de trazas, las secciones delgadas para la petrografía y la microscopía electrónica de barrido (MEB), se emplearon esquirlas de las fachadas exteriores expuestas al medio ambiente.

Para los análisis de FR_x , DR_x , análisis elemental se redujo el tamaño de la muestra a < Malla No. 400 ASTM, para el análisis morfológico, las muestras sólo fueron adheridas con tintura de plata, pero no recubiertas, pues también se realizó análisis EDS.

RESULTADOS

Los valores de los porcentajes de absorción encontrados tanto en rocas sanas como en deterioradas, al ser superiores a lo recomendado por los reglamentos de construcción vigentes (4%), (tabla 4), permiten la retención de la humedad ambiental y capilar, así como la posibilidad de crecimientos dentro de los poros (aislados e interconectados), dando lugar a la aparición de líquenes, musgo, hongos, plantas vasculares; y de ellos, como elementos bióticos secundarios, la aparición de fauna como artrópodos e insectos. La abundancia de plantas está directamente relacionada con el grado de deterioro de los edificios.

DISCUSIÓN

Dado que por las características específicas de las ignimbritas predominantes en esta zona geológica, no había ninguna que tuviera mayor grado de soldamiento para redundar en una disminución de la porosidad, absorción y un incremento sustancial

de la densidad aparente, la mayoría de los monumentos están contruidos con ignimbritas que presentan una gran porosidad será precursora de crecimientos bióticos, sin dejar de lado que el agua (fig 2, 3 y 4), que sube por los elementos verticales expuestos de las fachadas, al evaporarse dejará en los poros cristales que con cada estación crecerán, llegando al extremo de no ser capaces de estar confinados por las paredes de los poros, y provocar microgrietas que se propagarán por los planos de falla de las ignimbritas conllevando a la exfoliación.

Tampoco puede dejarse sin mencionar que las partículas antropogénicas producto de la quema de los combustibles fósiles son trasladadas por los vientos dominantes (fig. 1 y tabla 1) que proceden del sur-suroeste y que se depositan en las fachadas, (fig. 5) expuestas, formando pátinas difíciles de remover con los métodos tradicionales de limpieza, y donde también funcionan como catalizadores en el inicio de crecimientos bióticos.

Las rocas sanas son de calidad inferior en lo que respecta a resistencia mecánica y cuantificaciones físicas (tabla 4); entonces, no se justifica la sustitución de rocas de los monumentos por rocas extraídas de las canteras actualmente en explotación, (tablas 2 y 3) donde por el contenido de sílice, estas roca ígneas extrusivas se clasifican como ignimbritas.

Una de las mejores propuestas para conservación de sitios y monumentos históricos es el recubrimiento de los mismos con morteros de cal, adicionados con materiales orgánicos como lana de cordero, manteca de cerdo, leche, mucílago de nopal, fibras de algodón, clara de huevo, yema de huevo, sangre del sacrificio de ganado bovino, y no recubrirlos con morteros elaborados con cemento Portland hidráulico, que es rígido y no permite la “respiración” de las ignimbritas

Anexo de resultados.

Tabla 1. Informe de los estudios de calidad del aire realizados en el centro histórico de Morelia, en PST (Partículas Suspendidas Totales) [Empresa Eréndira, Valdés Vázquez, J, 2001]

Período	PST	SO ₂	O ₃ Inst	O ₃ Prom	NO ₂ Inst	NO ₂ Prom
Feb-Mar 1995	31	3	20	8	11	7
May-Jun 1995	13	1	16	7	9	5
Oct-Nov 1995	21	1	21	6	20	9
19-21 Nov 1998	62	7	46	--	16	--
4-7 May 2000	60	--	64	--	2	--
23-29 Mar 2001	23	6	20	--	5	--
Jul 2001	65	3	14	--	12	--

Tabla 2. Resultados del análisis de fluorescencia de rayos X

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	P x C	Suma
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
CC	75.29	0.14	12.28	1.18	0.024	0.283	1.17	2.20	4.87	0.024	3.05	100.51
CC	69.03	0.16	12.96	1.62	0.027	0.218	2.87	2.43	4.81	0.125	5.74	99.99
CC	63.36	0.58	18.73	4.70	0.024	0.447	1.72	2.07	2.12	0.082	6.69	100.52
CC	74.03	0.17	12.84	1.65	0.025	0.231	1.44	3.15	4.64	0.028	1.33	99.53
CC	72.05	0.24	13.56	2.14	0.027	0.286	1.72	3.04	4.22	0.150	3.04	100.47
CC	63.65	0.13	12.18	1.51	0.019	-0.241	5.83	2.04	4.38	0.034	10.9	100.51
CAP	73.14	0.16	12.64	1.58	0.013	0.129	1.83	3.07	4.56	0.028	3.10	100.25
CAP	71.47	0.16	12.45	1.69	0.017	0.171	1.95	2.75	4.77	0.021	4.39	99.84
CAP	75.36	0.17	13.12	1.51	0.007	0.202	1.07	3.00	4.77	0.024	1.15	100.38
CAP	72.96	0.16	12.92	1.71	0.028	0.208	1.32	3.08	4.77	0.017	2.80	99.97
CAP	71.81	0.15	12.68	1.67	0.022	0.160	2.17	3.26	4.51	0.031	3.72	100.18
SAN	75.05	0.16	12.62	1.64	0.014	0.222	0.99	2.57	4.59	0.024	2.55	100.43
SAN	74.82	0.16	12.77	1.53	0.010	0.331	1.05	2.65	4.52	0.020	2.31	100.17
SAN	75.30	0.15	12.79	1.61	0.016	0.313	0.81	2.64	4.55	0.022	2.02	100.22
SAN	75.93	0.15	12.78	1.56	0.008	0.249	0.88	2.73	4.59	0.023	1.63	100.53
SAN	74.95	0.16	12.76	1.67	0.021	0.300	0.85	2.45	4.55	0.027	2.17	99.91
CAT	69.47	0.37	13.31	3.01	0.021	0.522	1.62	2.68	3.14	0.092	5.69	99.92
CAT	67.02	0.40	13.49	3.23	0.098	1.327	2.99	2.98	3.29	0.104	5.10	100.03
CAT	68.74	0.38	13.96	2.89	0.027	0.826	1.19	3.14	3.42	0.079	4.96	100.62
CAT	69.24	0.40	13.97	3.01	0.031	0.751	2.06	3.18	3.40	0.081	4.64	100.77
Coin	72.08	0.41	14.12	3.10	0.048	0.224	1.44	3.88	4.36	0.098	0.64	100.41
Jam	76.47	0.20	12.24	1.67	0.034	0.147	0.89	3.44	4.30	0.056	0.54	100.00
Tej	76.68	0.15	12.73	1.22	0.018	0.350	0.71	2.91	4.56	0.030	1.42	100.77

Tabla 3. Análisis elemental de trazas presentes en las ignimbritas

	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
CC	126	105	736	26	126	7	20	<2	10	2	9	28	15	24
CC	147	185	796	29	139	7	25	<2	9	4	12	29	15	28
CC	50	216	443	14	131	5	64	19	7	4	17	70	<3	21
CC	149	108	924	30	166	11	40	<2	16	3	6	37	17	15
CC	140	109	809	35	215	11	18	3	14	6	63	83	14	93
CC	128	158	639	25	113	6	31	<2	5	3	12	36	16	18
CAP	143	127	881	29	158	14	29	<2	26	2	7	22	17	18
CAP	137	146	838	27	140	9	20	<2	11	2	10	27	16	21
CAP	151	94	897	31	165	8	34	<2	15	4	8	36	18	16
CAP	148	163	1050	30	159	13	31	<2	21	4	8	32	16	22
CAP	142	168	1001	29	155	14	27	<2	23	2	9	26	19	20
SAN	146	92	880	31	172	11	31	<2	24	3	9	86	15	32
SAN	146	205	887	30	151	9	26	<2	11	3	11	32	17	18
SAN	148	100	975	29	170	10	22	<2	23	3	7	34	18	18
SAN	148	99	892	31	162	10	24	<2	15	2	9	34	19	21
SAN	148	86	859	30	170	10	30	<2	13	3	7	85	17	30
CAT	152	220	2465	36	233	8	46	7	7	7	29	79	4	81
CAT	126	249	936	49	251	7	42	5	25	10	23	65	5	45
CAT	133	209	858	25	249	7	36	12	9	197	17	69	21	21
CAT	135	232	898	25	310	8	38	6	11	28	34	291	20	17
Coin	147	170	963	21	254	6	36	9	7	3	15	70	19	13
Jam	157	106	963	16	167	6	17	6	14	11	28	61	16	13
Tej	168	105	1059	15	147	6	28	<2	9	6	15	33	18	16

Tabla 4. Resultados de las propiedades físicas y mecánicas de ignimbritas de tres bancos de roca sana aledaños a la ciudad de Morelia, contra los valores sugeridos por el reglamento de construcciones para el estado de Michoacán

Solicitud	*	Co	Ja	Tej	Cul **	Cap **	SN **	Cat **
Densidad aparente, T/m ³ o g/cm ³ ASTM C99-52 (76)	1.50 mín	1.56	1.49	1.63	1.921	1.957	1.854	1.78
Porcentaje de absorción de agua ASTM C 97-47 (77)	4% máx	25.55	22.25	16.63	12.7	9.505	15.468	14.55
Gravedad específica ASTM C97-52(56)	2.3 mín	1.44	1.44	1.60	1.74	1.854	1.638	1.65
Módulo de ruptura a la flexión, kg/cm ² ASTM C97-52(76)	--	25.04	42.15	51.63	---	---	---	---
Esfuerzo de ruptura a la compresión, Estado seco, kg/cm ² ASTM C170-50(76)	100 mín	47.03	61.51	73.86	300	320	350	280
Desgaste mecánico, prueba Los Ángeles %, ASTM C241-51(76)	30% máx	41.00	43.00	18.00	---	---	---	---
Intemperismo acelerado, %	10% máx	30.00	35.00	13.00	---	---	---	---

Co: Cointzio; Ja: Jamaica; Tej: Tejocote; Cul: Cultura; Cap: Capuchinas; SN: San Nicolás; Cat: Catedral.

**Valores obtenidos con el esclerómetro o martillo de Schmidt, en el caso de resistencia mecánica.

- - - Cuantificaciones no realizadas por falta de material para labrado de especímenes en realizar pruebas destructivas; en el caso de monumentos, sólo se realizaron pruebas no destructivas in situ, con el martillo de Schmidt o esclerómetro

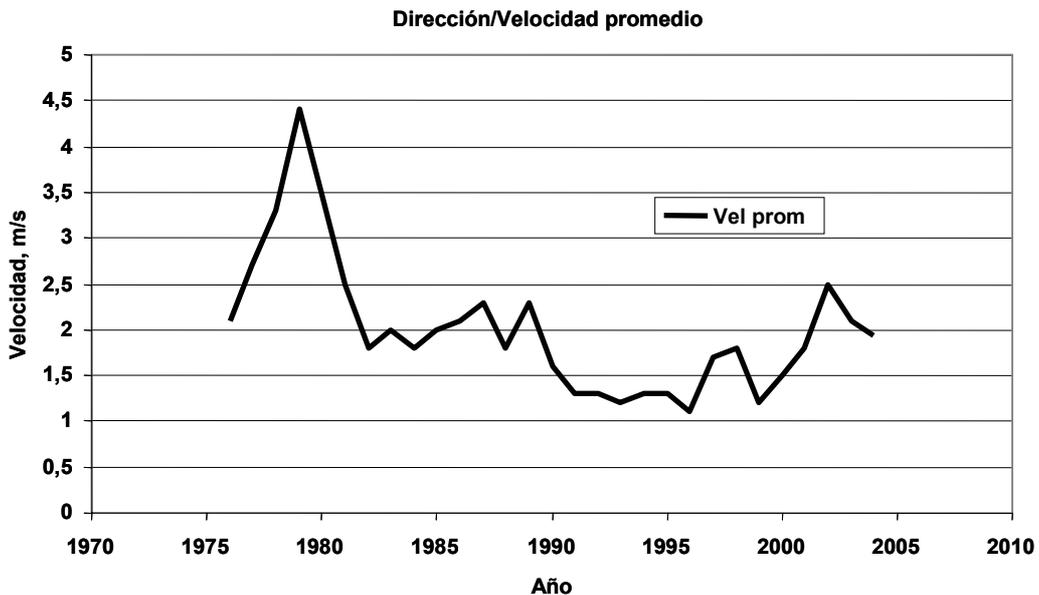


Fig 1. Vientos dominantes en la ciudad de Morelia, Michoacán, México

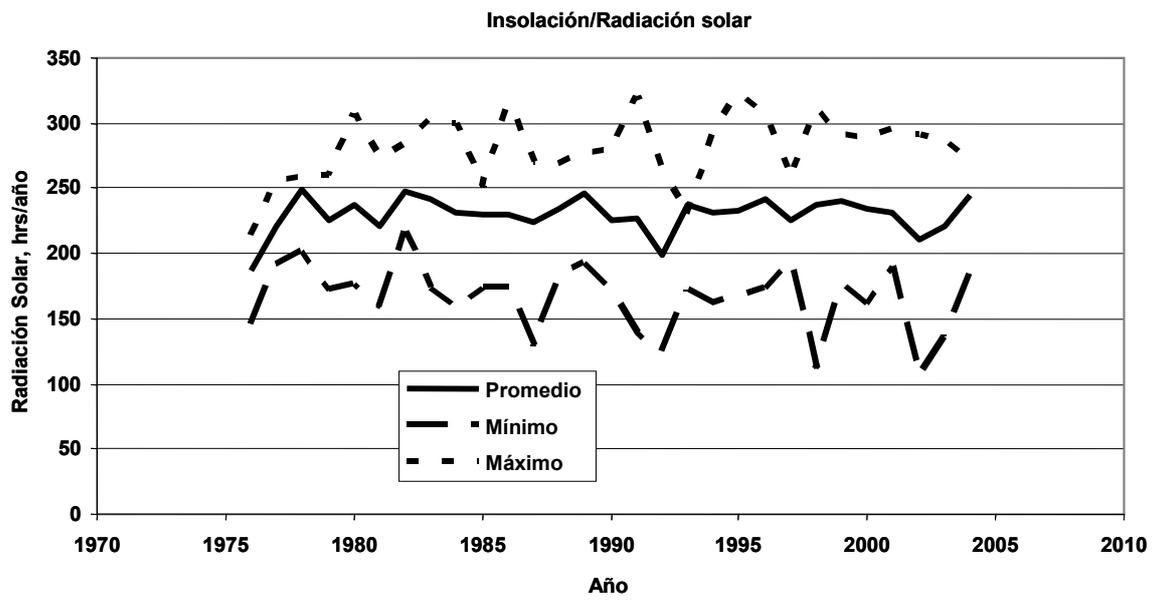


Fig 2. Radiación solar en la ciudad de Morelia, Michoacán, México

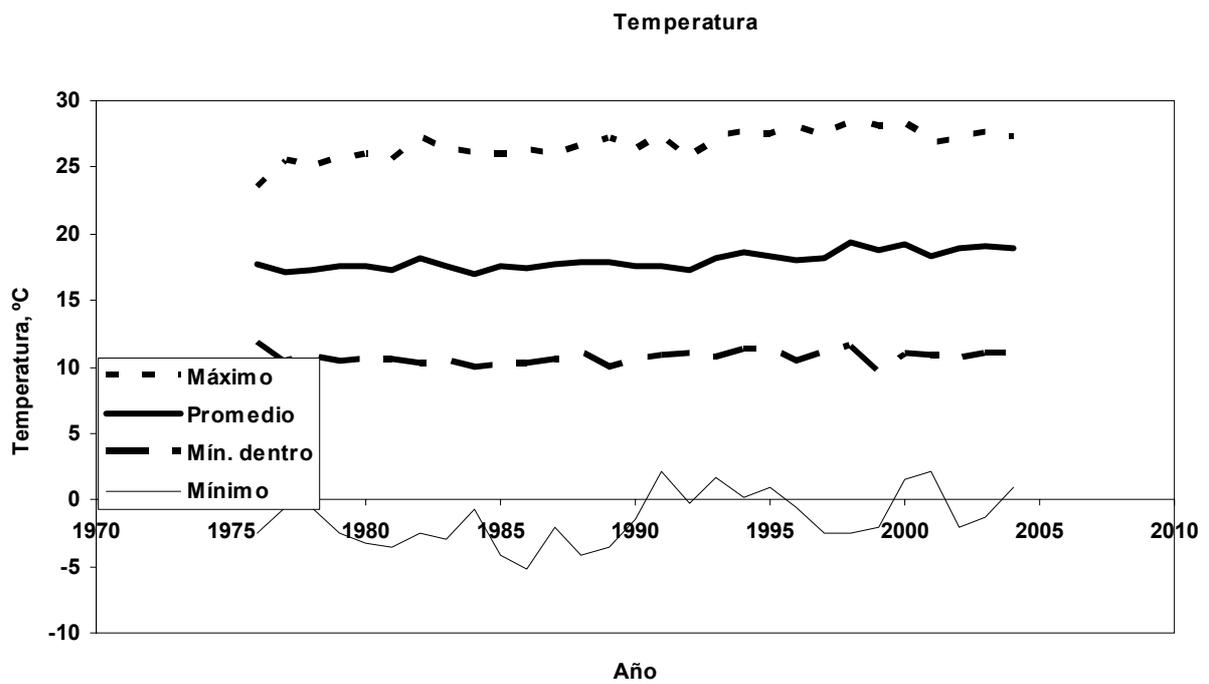


Fig 3. Humedad relativa en la ciudad de Morelia, Michoacán, México

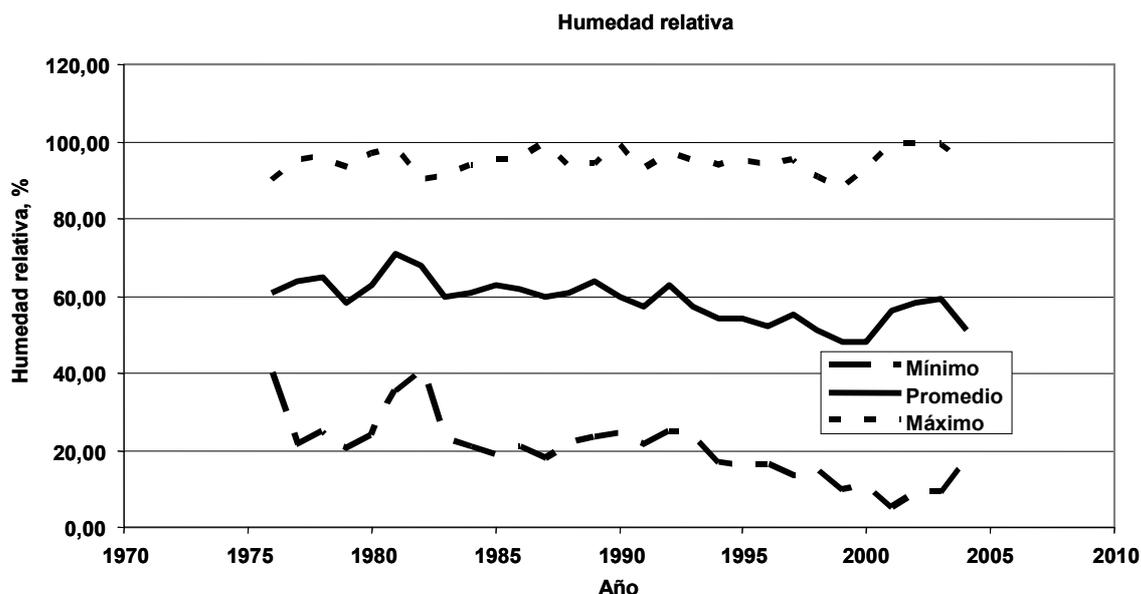


Fig 4. Temperatura en la ciudad de Morelia, Michoacán, México

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el respaldo financiero de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con los proyectos 12.4 y 12.5 de la Coordinación de la Investigación Científica, así como el soporte técnico en el MEB del Ing I Gradilla, del CCMC, UNAM, Campus Ensenada, B C, Méx, así como el apoyo en las cuantificaciones físicas y mecánicas de los ingenieros Noé Carmona Leal, Hugo Méndez Chávez, y Miguel Arturo Varelas Silva, del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. E Alonso y L Martínez, "The Role of the Environmental Sulfur on Degradation of Ignimbrites of the Cathedral in Morelia, Mexico", Building and Environment, Elsevier Science, Vol 38, (2003)
2. Torres Montes, L A, "El deterioro de la piedra", Conservación y restauración de bienes culturales de piedra, utilizando técnicas convencionales y láser, Museo Nacional de Antropología, México, D F, (1997)
3. Santillán, E. "Deterioro por la vegetación, en las construcciones de la zona de monumentos históricos de la ciudad de Morelia, Michoacán, México" Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, (1995)



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

DETERMINACIÓN NO-DESTRUCTIVA DE LA DISTRIBUCIÓN DE CLORURO Y SODIO EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

P Felipe de Jesús Cano-Barrita¹,

CIIDIR-Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional de México, Oaxaca, México

B J Balcom²

MRI Centre, Physics Department, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada

T W Bremner³

Civil Engineering Department, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada

RESUMEN

La corrosión del acero de refuerzo es una de las causas principales del deterioro de estructuras de concreto. La penetración de cloruros a través del recubrimiento de concreto mediante difusión o absorción capilar, o una combinación de ambos mecanismos contribuye de manera importante en la corrosión del acero de refuerzo. En naciones con clima frío, las sales que se emplean durante el invierno son un factor determinante en el deterioro de estructuras; y en muchos países, los cloruros del agua de mar exacerbaban el proceso de afectación. Para evaluar la distribución o concentración de cloruros en materiales basados en cemento, se utilizan métodos destructivos cuya resolución espacial es baja. Una alternativa es el uso de técnicas tradicionales de resonancia magnética, las cuales han mostrado ser útiles para la determinación de cloruros en ladrillos de silicato de calcio. Sin embargo, éstas técnicas no resultan adecuadas para el caso del concreto o mortero, debido al corto tiempo de vida de la señal comparada con la vida de la señal en materiales como el ladrillo de silicato. La técnica de resonancia magnética SPRITE ha demostrado ser conveniente para determinar la distribución de diferentes especies en materiales basados en cemento Portland. En este artículo se demostrará la habilidad de la técnica SPRITE para determinar la distribución de cloruros y sodio en mortero durante absorción capilar y difusión. Además, los experimentos preliminares indican que la técnica puede emplearse para determinar la distribución de cloruros en mortero y concreto conteniendo cemento ordinario. Esto abre la posibilidad de estudiar la distribución de cloruros en corazones de concreto extraídos de estructuras reales.

INTRODUCCIÓN

La determinación de la profundidad de penetración y distribución de cloruros en materiales basados en cemento Portland es importante desde el punto de vista de durabilidad de estructuras de concreto reforzado. El ingreso de cloruros a través de procesos de difusión y absorción capilar puede despasivar la capa protectora sobre el acero de refuerzo y causar corrosión del mismo.

La manera usual de determinar la profundidad de penetración o la distribución de cloruros en mortero y concreto requiere destruir el espécimen. Las técnicas comunes requieren obtener muestras de polvo a diferentes profundidades y mediante procedimientos químicos se determina la concentración de cloruros. Otra prueba sólo requiere aplicar una solución (por ejemplo, nitrato de plata) sobre un espécimen recién fracturado para determinar la profundidad de penetración de cloruro [1]. El primer procedimiento proporciona un perfil con resolución espacial baja y es inherentemente destructivo. Sin embargo, con dispositivos adecuados es posible aumentar la resolución al obtener muestras de polvo a distancias de unos cuantos milímetros, aunque el problema de destruir el espécimen persiste. El segundo procedimiento, únicamente sólo proporciona la profundidad de penetración de los cloruros y el perfil de concentración, se desconoce.

La resonancia magnética se ha empleado con éxito para determinar en forma no destructiva la distribución de agua, cloruros y sodio en materiales de construcción. Pel, *et al*, realizaron un estudio de la penetración de solución de NaCl en ladrillo de silicato de calcio [2]. Sin embargo, la técnica tradicional de resonancia magnética utilizada tiene limitaciones en cuanto a la vida de la señal, T_2^* , y solo pudo obtenerse perfiles de sodio y agua. Cano, *et al*, obtuvieron los primeros perfiles de cloruros, sodio y agua en mortero de cemento Portland blanco durante absorción capilar de una solución de NaCl [3]. En esta investigación se utilizó cemento Portland blanco debido a su bajo contenido de hierro, lo cual era necesario para determinar la distribución de agua. No obstante, el concreto normalmente empleado en la práctica contiene cemento Portland ordinario y adiciones minerales (ceniza volante, humo de sílice, escoria de alto horno, etc) que incrementan sustancialmente la cantidad de impurezas paramagnéticas en la muestra.

Este artículo presentará los resultados del uso de la técnica de resonancia magnética, SPRITE, para determinar la distribución de cloruros y sodio en mortero que contiene cemento Portland ordinario durante absorción capilar de una solución de NaCl. También se determinó la distribución de cloruro y sodio durante difusión. Es importante mencionar que el uso de materiales con bajo contenido de hierro no es necesario en el caso de ^{35}Cl y ^{23}Na , como en la determinación de la distribución de ^1H del agua. Esto significa que concreto fabricado con varios tipos de cemento Portland, y la mayoría de los tipos de agregados, pueden ser utilizados.

TÉCNICA SPRITE (SINGLE POINT RAMPED IMAGING WITH T₁ ENHANCEMENT)

Pueden encontrarse detalles de la técnica SPRITE en [4]. La intensidad de la señal, S, en cualquier punto de una imagen unidimensional (perfil), se relaciona con la densidad de núcleos local, por medio de la ec 1.

$$S = \rho \cdot e^{-\frac{t_p}{T_2^*}} \left(\frac{1 - e^{-\frac{TR}{T_1}}}{1 - \cos \alpha \cdot e^{-\frac{TR}{T_1}}} \right) \sin \alpha \quad (1)$$

Donde

t_p, tiempo de codificación de la fase

T₂^{*}, tiempo de relajación “spin-spin”

TR, tiempo de la repetición de los pulsos de radio-frecuencia

α, ángulo de rotación de la magnetización

T₁, tiempo de relajación “spin-lattice”

En la ec 1, el término entre paréntesis representa el estado constante de la magnetización longitudinal establecido después de varios pulsos de radio frecuencia y es válido sólo para el hidrógeno del agua que tiene “spin” I=1/2. Este término tendrá una representación más compleja para el sodio, y núcleos del cloro que tienen “spin” I=3/2 [5]. Esta técnica se representa esquemáticamente en la fig 1.

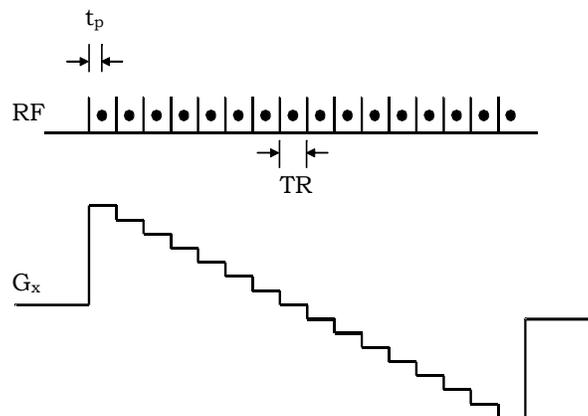


Fig 1. Técnica SPRITE uni/dimensional. El gradiente del campo magnético es cambiado en 64 pasos. Sólo un punto es adquirido en cada cambio del gradiente a un tiempo t_p después de la aplicación de cada pulso de radio-frecuencia de radio, con ángulo α. El tiempo de repetición, TR, es el tiempo entre la aplicación de pulsos de radio-frecuencia en cada cambio de gradiente

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Agregado fino de cuarzo, cemento Portland blanco y ordinario tipo I, fueron usados para preparar mortero con relación a/c=0.60. En la tabla 1 se proporcionan las propiedades físicas y químicas de los cementos empleados.

Se fabricaron cilindros de 30 mm de diámetro y se curaron en húmedo durante tres días a 38°C. Después, los especímenes se cortaron a una longitud de 30 mm y se secaron en horno a 105°C hasta masa constante. Finalmente, en la superficie cilíndrica se aplicó resina epóxica para hacer la penetración de la solución de NaCl uniaxial (fig 2).

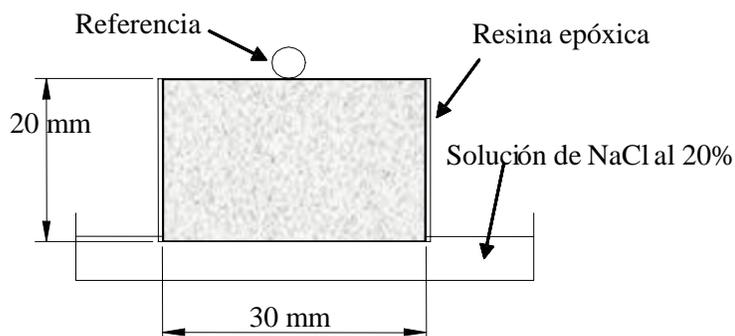


Fig 2. Arreglo utilizado para la prueba de absorción uniaxial de solución de NaCl y difusión en especímenes de mortero. Los experimentos de absorción capilar se llevaron a cabo a la temperatura ambiente; y los especímenes usados para difusión se mantuvieron en una cámara ambiental, a 38°C

Se realizaron experimentos para determinar los tiempos de relajación T_2^* y T_1 de ^1H , ^{23}Na y ^{35}Cl en los especímenes estudiados. Los perfiles de distribución se obtuvieron con la técnica SPRITE utilizando un magneto superconductor Nalorac (Martínez, CA) de 2.4 Tesla, 32 cm de diámetro interior, con un microgradiente de 8 cm de diámetro interior enfriado con agua. Se empleó un emisor/receptor de radio-frecuencia tipo jaula (Morris Instruments, Ottawa) para la determinación de ^1H , así como un nuevo diseño para el caso de ^{23}Na y ^{35}Cl . La consola del espectrómetro fue una Tecmag (Houston, TX) Apolo. El amplificador de radio-frecuencia fue el modelo 3445 (Brea, CA) de 2 kw de potencia.

Los especímenes para la absorción capilar de solución de NaCl se colocaron en un recipiente poco profundo, y se permitió absorber la solución en un extremo. La concentración de NaCl en el recipiente fue de 200 g/L, la cual es aproximadamente seis veces la de NaCl en agua de mar. Se realizaron mediciones con la técnica SPRITE para observar la penetración de ^{23}Na (Na^+), y ^{35}Cl (Cl^-). Debe mencionarse que ^{37}Cl no contribuye a la señal, porque su frecuencia de resonancia es diferente de la de ^{35}Cl . La abundancia natural de cada uno es 24.47 y 75.53%, respectivamente.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del cemento ordinario y blanco

	Cemento ordinario tipo I	Cemento blanco tipo I
Propiedades físicas		
Gravedad específica	3.15	3.15
Superficie epecffica, Blaine (m ² /kg)	388	404
Análisis químico (% en masa)		
SiO ₂	20.6	22.45
Al ₂ O ₃	4.0	4.37
Fe ₂ O ₃	3.1	0.24
CaO	62.8	66.52
MgO	2.6	0.76
SO ₃	3.1	2.87
L.O.I.	1.8	2.27
C ₃ S	59.3	62
C ₂ S	14.4	17
C ₃ A	5.3	11
C ₄ AF	9.3	-

Un arreglo similar al mostrado en la fig 2 fue usado para los experimentos de difusión de Na⁺ y Cl⁻ en especímenes de mortero de cemento Portland blanco. Dos especímenes idénticos saturados con agua fueron puestos en contacto con una solución de NaCl al 20%. Las medidas de SPRITE unidimensionales se realizaron semanalmente por un periodo de seis semanas.

En cada experimento, una referencia conteniendo solución de NaCl se colocó sobre el espécimen para permitir escalar los perfiles y compensar por variaciones pequeñas en la sensibilidad del instrumento (fig 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TIEMPOS DE RELAJACIÓN

Los tiempos de relajación T_1 y T_2^* para ¹H, ²³Na y ³⁵Cl en mortero a 72 h de iniciado el experimento se muestran en la tabla 2. Ambos tiempos son menores de 5 ms, lo que hacen a SPRITE una técnica requerida para obtener imágenes de estas especies. Los tiempos de relajación T_1 y T_2^* son exponencial simple, salvo los T_2^* para el sodio y cloruro que tienen dos componentes. Note que los tiempos de relajación en mortero con cemento ordinario son del mismo orden de magnitud, comparado con los especímenes que contienen cemento blanco. Esto indica que los mecanismos de relajación dominantes en ²³Na y ³⁵Cl son diferentes a los que se tienen en la relajación de ¹H del agua, cuya relajación es rápida y no puede observarse fácilmente con el equipo disponible en el laboratorio.

Tabla 2. Tiempos de relajación T_1 y T_2^* para ^1H , ^{23}Na , y ^{35}Cl en especímenes de mortero fabricado con cemento Portland blanco y ordinario

Núcleo	Mortero de cemento Portland blanco		Mortero de cemento Portland ordinario	
	T_1 (ms) ¹	T_2^* (μs) ¹	T_1 (ms) ¹	T_2^* (μs) ¹
^1H	4.8	309	ND	ND
^{23}Na	3.5	147 ² 755 ³	1.5	132
^{35}Cl	2.2	184 ² 917 ³	1.4	270

- 1 Valores a 72 h de absorción. Todos los tiempos de relajación ajustados tuvieron incertidumbres bajo 10%, y en algunos casos mucho menos
- 2 La componente corta de los tiempos de relajación contribuye 31 y 29% de la magnitud total en ^{35}Cl y ^{23}Na , respectivamente
- 3 La componente larga del tiempo de relajación contribuye 69 y 71% de la magnitud total en ^{35}Cl y ^{23}Na , respectivamente

DIFUSIÓN DE ^{23}Na Y ^{35}Cl EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND BLANCO

Las fig 3 y 4 muestran la distribución de Cl^- y Na^+ obtenida en dos especímenes idénticos preparados con cemento Portland blanco. Nótese que los resultados en ambas figuras son muy similares, como es de esperarse. En estas figuras puede observarse que la concentración en la cara en contacto con la solución de NaCl aumenta durante la primera semana de exposición. Después de este periodo, la concentración en la cara permanece casi constante, y sólo la profundidad de penetración aumenta con el tiempo.

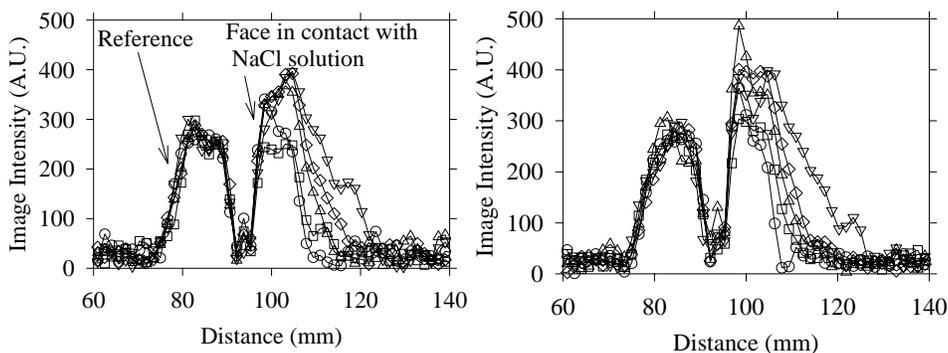


Fig 3. Distribución de ^{35}Cl en dos especímenes idénticos de mortero blanco $w/c=0.60$ a 1 semana (\circ), 2 semanas (\square), 3 semanas (\triangle), 4 semanas (\diamond), y 6 semanas (∇). Los parámetros usados para la técnica SPRITE fueron: FOV = 200 mm; resolución nominal = 1.6 mm; $G_{\text{máx}}$ = 25.6 G/cm; TR=2 ms; el t_p = 150 s; ángulo α = 44°; scans = 8192; y tiempo de adquisición = 20.7 min.

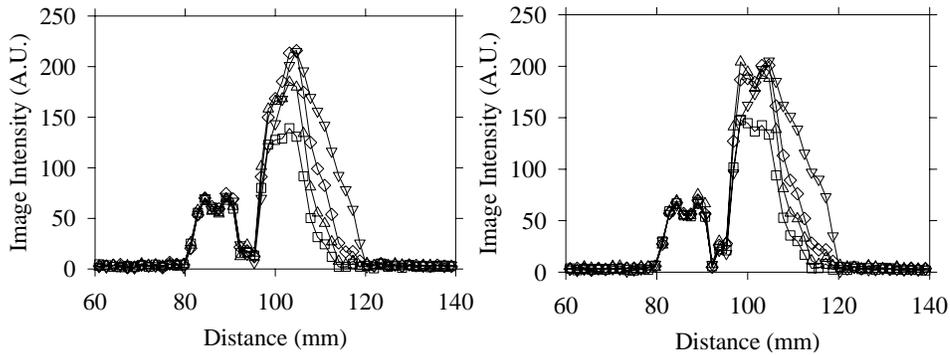


Fig 4. Distribución de ^{23}Na en dos especímenes de mortero blanco $w/c=0.60$ a 1 semana (\circ), 2 semanas (\square), 3 semanas (\triangle), 4 semanas (\diamond), y 6 semanas (∇). Los parámetros usados para la técnica SPRITE fueron: FOV = 200 mm; resolución nominal = 1.6 mm; $G_{\text{máx}} = 9.5 \text{ G/cm}$; $\text{TR}=2 \text{ ms}$; el $t_p = 150 \text{ s}$; ángulo $\alpha = 49^\circ$; scans = 2048; y tiempo de adquisición = 7.4 min

Los coeficientes de difusión efectivos se estimaron ajustando los datos que corresponden a los perfiles obtenidos después de tres semanas, mostrados en fig 3 y 4 en la ec 2, que es la solución a la segunda ley de difusión de Fick [6]. Normalmente se ajustan perfiles de concentración de cloruros a esta ecuación para encontrar los C_0 y los D_{eff} [7,8].

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_{\text{eff}} t}} \right) \quad (2)$$

El resultado fue $D_{\text{eff}} = 1.7 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para ambos especímenes. El coeficiente de difusión correspondiente para sodio fue $D_{\text{eff}} = 1.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. De la literatura, el coeficiente de difusión de cloruro para concreto con relación $a/c=0.60$ y curado en húmedo durante 28 días, es aproximadamente $1.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ [9]; y para concreto con relación $a/c=0.58$ y curado en húmedo durante 28 días es aproximadamente $5.2 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ [10]. Estos valores de la literatura sirven para ilustrar el orden de magnitud porque los especímenes usados para resonancia magnética se hicieron de mortero, y las condiciones curando también fueron diferentes.

ABSORCIÓN CAPILAR DE UNA SOLUCIÓN DE NaCl EN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND ORDINARIO.

Las Fig 5 y 6 muestran los perfiles obtenidos en especímenes de mortero elaborado con cemento ordinario durante absorción capilar de solución de NaCl. Este es un resultado muy importante de los experimentos, ya que es posible obtener perfiles del cloruro libre y distribución de sodio en mortero que contiene cemento ordinario.

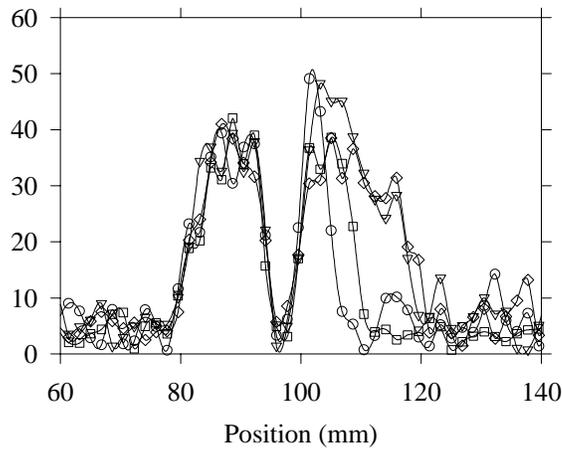


Fig 5. Distribución de ^{35}Cl en mortero elaborado con cemento ordinario $a/c=0.60$ a 3h (○), 9h (□), 2 días (▽), y 5 días (◇). Los parámetros usados para la técnica SPRITE fueron: FOV = 100 mm; resolución nominal = 1.6 mm; $G_{\text{max}} = 25.6 \text{ G/cm}$; TR=2 ms; el $t_p = 300 \text{ s}$; ángulo $\alpha=44^\circ$; scans = 8192; y tiempo de adquisición = 20.7 min

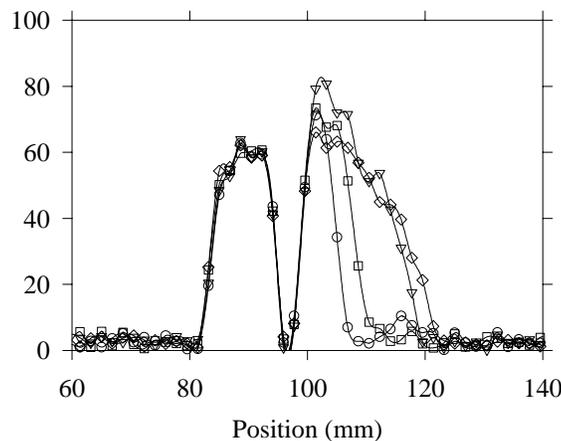


Fig 6. Distribución de ^{23}Na en mortero elaborado con cemento ordinario $a/c=0.60$ a 2.5h (○), 8h (□), 2 días (▽), y 5 días (◇). Los parámetros usados para la técnica SPRITE fueron: FOV = 100 mm; resolución nominal = 1.6 mm; $G_{\text{máx}} = 9.5 \text{ G/cm}$; TR=2 ms; el $t_p = 300 \text{ s}$; ángulo $\alpha = 49^\circ$; scans = 2048; y tiempo de adquisición = 7.4 min

Esto hace de la resonancia magnética una poderosa herramienta para determinar la distribución de cloruros, y la profundidad de penetración en concreto ordinario en laboratorio y en corazones extraídos de estructuras en campo. Además, su naturaleza no destructiva permite monitorear el mismo espécimen sin perturbar los procesos que ocurren dentro del mismo. Otra área importante de aplicación de esta técnica podrá ser la validación de modelos matemáticos que predicen el ingreso de cloruros en concreto [11]. Aunque no se probaron especímenes de concreto que contienen aditivos minerales, no representará esto un problema, dado que el volumen de hierro no es tan importante cuando los cloruros son los núcleos de interés.

CONCLUSIONES

La técnica SPRITE desarrollada en el Centro de Resonancia Magnética de la Universidad de New Brunswick, UNB, puede utilizarse para determinar la distribución de cloruros, sodio, y otros núcleos de interés en investigación relacionada con materiales basados en cemento. La determinación no-destructiva de la distribución del cloruro libre en mortero que contenga no sólo cemento blanco, sino también cemento ordinario es posible. Los resultados con cemento del Portland ordinario indican que el contenido de hierro no es un factor limitante para determinar perfiles de cloruros; por tanto, pueden utilizarse también especímenes de concreto extraído en campo.

Mejoras en el equipo y en las técnicas tienen lugar en el Centro de Resonancia Magnética de la Universidad de New Brunswick permitirá aumentar la sensibilidad de las mediciones y probablemente se podrán emplear concentraciones de las soluciones de NaCl similares a las del agua de mar (aproximadamente 3.5%).

Debe mencionarse que aun cuando la determinación de la distribución de cloruros es no-destructiva, existe la necesidad de extraer una muestra de la estructura.

Será necesario a futuro, establecer una correlación de las medidas realizada usando resonancia magnética y la cantidad de cloruros determinadas por métodos estándar de la ASTM.

AGRADECIMIENTOS

B J Balcom agradece los apoyos de NSERC para operación y equipo, así como de la NSERC Steacie Fellowship 2000-2002. B J B también agradece el programa Canadá Chairal.

F de J Cano Barrita reconoce el apoyo financiero recibido del Instituto Politécnico Nacional de México y el CONACyT de México.

REFERENCIAS

1. Otsuki, N, Nagataki, Shigeyoshi, and Nakashita Kenji, 'Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials', *ACI Materials*, 89 (3) (1992)
2. Pel, L, Kopinga, K, and Kaasschieter, E F, 'Saline Absorption in Calcium-Silicate Brick observed by NMR Scanning', *Journal of Physics D; Applied Physics*, 33 (2000)
3. F de J Cano, T W Bremner, R P McGregor, and B J Balcom, 'Magnetic Resonance Imaging of ¹H, ²³Na, and ³⁵Cl Penetration in Portland Cement Mortar', *Cement and Concrete Research*, 32 (7) (2002)
4. Balcom, B J, MacGregor, R P, Beyea, S D, Green, D P, Armstrong, R L, and Bremner, T W, 'Single Point Ramped Imaging with T₁ Enhancement (SPRITE)', *Journal of Magnetic Resonance, Series A* 123 (1996)

5. Mitrovic, V F, Sigmund, E E, and Halperin, W P, 'Progressive Saturation NMR Relaxation', Physical Review B, 64 (2001)
6. Marchand, J, 'Modeling the Behavior of Unsaturated Cement Systems Exposed to Aggressive Chemical Environments', Materials and Structures, 34 (2001)
7. Crank, J, 'The Mathematics of Diffusion', 2nd Ed, Clarendon, Oxford, (1975)
8. Andrade, C, Sagrera J L, and Sanjuan M A, 'Several Years study on Chloride Ion Penetration into Concrete Exposed to Atlantic', Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete, Paris, France, (2000)
9. Nilsson, L, Andersen, A, Luping T, and Utgenannt, P, 'Chlorides Ingress Data from Field Exposure in a Swedish Road Environment', Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete, Paris, France, (2000)
10. Bamforth, P, Concrete Classification for RC Structures Exposed to Marine and Other Salt-Laden Environments, Structural Faults and Repair-93, Edinburg, (1993)
11. Mangat, P S, and Molloy, B T, Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete, Materials and Structures, 27 (1994)



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

INCREMENTO DE TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO HIDRÁULICO ADICIONANDO CENIZAS VOLCÁNICAS EN SUBSTITUCIÓN A LOS FINOS, SIN MODIFICACIÓN DE LA RELACIÓN A/C

**W Martínez Molina¹, H L Chávez García¹, F Velasco¹, C Rubio¹,
L E Chávez Valencia¹, E Alonso¹**

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Michoacán, México, CP 58070.

Morelia,

M. Ostroumov²

Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Morelia, Michoacán, México, CP 58070.

L Martínez³

Centro de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Cuernavaca,
Morelos, México, CP 62210.

V Castaño⁴.

Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus
Querétaro, Querétaro, México, CP 76000.

RESUMEN

La trabajabilidad del concreto hidráulico es un problema a resolver en los casos de dimensiones pequeñas de elementos a colar, porcentajes altos de acero de refuerzo, niveles superiores por colar, etc. Existen diversas formas de incrementar la trabajabilidad, como es el empleo de aditivos químicos para aumentar la reología, pero en algunos casos, los aditivos están prohibidos por su futuro ataque al acero de refuerzo embebido en el concreto hidráulico; un segundo método es el incremento de la cantidad de lechada, lo que redundaría en elevar el costo de producción del concreto; una tercera opción es el aumento de la relación A/C, que provocará la disminución de la resistencia mecánica a la compresión; un cuarto procedimiento consiste en la adición de materiales pétreos "inertes" que fluidifiquen al concreto, que no provoquen corrosión en el acero ni reacción álcali-agregado. Este trabajo arroja resultados sobre el incremento de la trabajabilidad con adición de cenizas volantes, pero éstas no presentaron actividad puzolánica por el tamaño de sus partículas.

Palabras clave: trabajabilidad, cenizas volcánicas, agregados pétreos

INTRODUCCIÓN

El diseño de mezclas de concreto hidráulico, uno de los materiales más empleados en la construcción de obra de tipo civil [1] se apoya entre otras variables en la cuantificación y calificación del revenimiento. En los casos de obras de tipo civil en los que la cimbra y el armado lo permiten, como pavimentos, losas, techumbres; el problema no está centrado en la trabajabilidad del concreto, sin embargo en los casos en que el concreto es premezclado y debe ser bombeado a niveles superiores o en elementos cuyo espesor es pequeño, se requiere una alta trabajabilidad del concreto hidráulico pero sin menoscabo de sus propiedades mecánicas.

Está demostrado que la resistencia mecánica de ruptura a la compresión del concreto [2, 3, 4], que es su valor índice, está en función directa de la relación a/c en peso, ya que el incremento de la cantidad de agua de mezclado redundaría de manera automática en un aumento en la cantidad de cemento por unidad volumétrica a fin de conservar como una constante la relación A/C.

Existen algunas alternativas para incrementar la trabajabilidad del concreto hidráulico; puede optarse por elegir aditivos químicos que incrementen la fluidez del concreto, o bien adicionar cenizas volcánicas [5] que produzcan el mismo resultado pero sin el efecto colateral de sales que migran a través de la matriz permeable del concreto hasta depositarse en la superficie del acero de refuerzo del concreto, y provocar reacciones de oxidación del mismo.

OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo es el de modificar la trabajabilidad del concreto hidráulico mediante aumentar de la fluidez; se realizó también una caracterización geológica, mineralógica, geoquímica; y para la caracterización se emplearon técnicas como DRx, FRx, MO, y MEB. Con estas técnicas se pueden realizar análisis como: el estudio de la composición química, propiedades físicas, particularidades cristalógicas, defectos y otras heterogeneidades necesarias para resolver diferentes problemas teóricos, genéticos y aplicados; únicamente se estudiaron los aspectos de interés para esta investigación [6].

Conjuntamente a la caracterización de los agregados pétreos, los cuales provienen de los bancos de materiales denominados “Joyitas” y Tribasa, hemos realizado las pruebas de calidad señaladas por la American Society for Testing and Materials [7], ASTM, necesarias para conocer las características físicas y mecánicas de los agregados pétreos, y con estos materiales se elaboraron los especímenes de concreto hidráulico para posteriormente ser sometidos a las pruebas mecánicas de compresión y tensión [8].

Descripción del área de estudio

Como se mencionó, los bancos de materiales empleados en la fabricación de concreto son el banco de “Joyitas” y el de “Tribasa”; la primera de estas zonas se localiza aproximadamente a 15 km al noroeste de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, en las márgenes siguientes: 101° 23' 55" de longitud y 19° 44' 15" latitud (banco Joyitas).

Banco Joyitas. Banco productor de arena y grava volcánica natural; ubicado sobre la carretera Morelia – Quiroga, llegando sobre la carretera hasta una distancia de 15 + 450 km de la ciudad de Morelia; ahí se encuentra un camino secundario que tiene una longitud aproximada de 10 km.

Banco Tribasa. Banco productor de grava triturada; ubicado sobre la carretera Morelia Salamanca sobre el km 4 + 500 y a una distancia de 8 + 000 del centro de la ciudad de Morelia, se localiza en la región norte de Morelia bajo, los márgenes: 101° 10' 16" de longitud y 19° 46' 07" de latitud. La descripción geológica corresponde a depósitos de lavas y de tobas de composición andesítica, de origen volcánico. Las lavas presentan color gris claro, y están lajeadas.

Cenizas volcánicas. Las cenizas provienen del banco de Acámbaro, en el estado de Guanajuato. Coloquialmente se conocen como “tierra de Acámbaro”, y según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS [10], se trata de un limo inorgánico de baja plasticidad llamado “tepetate”, voz deformada del náhuatl, tepetátl o limo.

En las regiones en estudio, se tienen zonas de diferentes unidades geológicas presentadas por conos de lavas y pequeños volcanes escudos con las formaciones de cenizas volcánicas, conos de escorias, y varios flujos piroclásticos (Pleistoceno medio-Holoceno 1.3-0.55 Ma). Los bancos de los materiales pétreos estudiados se localizan principalmente en estos últimos tipos de rocas volcánicas [9].

METODOLOGÍA

El concreto hidráulico se diseñó según el método ACI [11, 12, 13], relación a/c= 0.57, condición de laboratorio. Se realizaron diversas mezclas de prueba variando la composición en porcentaje de los finos (arenas) mezclados con la ceniza volcánica, y se eligieron las mezclas indicadas a continuación, que fueron las que presentaron mejores comportamiento mecánicos a compresión. Se realizó una mezcla testigo sin sustitución de arena por ceniza, para comparar con los valores vigentes [14].

Se elaboraron mezclas de concreto hidráulico con cinco diferentes proporciones arena-ceniza en peso, las cuales fueron 100%-0%; 80%-20%; 70%-30%; 60%-40%, y 50%-50%. En el segundo caso tenemos concreto hidráulico elaborado con agregados pétreos triturados (grava de Tribasa); en este caso se empleó arena de Joyitas mezclada con la ceniza volcánica únicamente en una proporción, la cual fue 50%-50%, además de la grava triturada, el cemento y el agua. Para elaborar el concreto, en todos los casos se empleó cemento CPP 30R, según ONNCCE 1999 [15], y se curó en pila de agua [16].

Microscopía óptica de luz polarizada transmitida (MOLPT)

Prácticamente, todos los métodos de la física y de la química del cuerpo sólido se utilizan actualmente en el estudio de la mineralogía. Estos métodos permiten determinar y caracterizar cuantitativamente las particularidades de la constitución y de las propiedades de los minerales. La microscopía óptica de luz polarizada transmitida permite identificar rápidamente la mayoría de las especies minerales que contienen las rocas, con la ventaja de que muestran la porosidad, grietas y la distribución de los minerales [6], en esquirlas de los pétreos descritos.

Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos x es la técnica empleada para determinar los elementos componentes de una muestra, a través de un análisis cuantitativo de sus elementos. Las muestras se clasificación en función del color para cada banco de materiales, se molieron hasta pasar el tamiz 325 ASTM. En el caso del banco llamado Tribasa, el material presentó una sola tonalidad, y se obtuvo una muestra moliendo dicho material.

La muestra se mete en la cámara de vacío del aparato, y posteriormente se somete a un bombardeo de electrones mediante un haz electrónico de alta energía; ante la influencia de este haz, aparece la radiación de rayos x secundarios cuyo espectro es característico para cada elemento y la intensidad de las rayas espectrales de los elementos es registrada y cuantificada [17].

Difracción de rayos X

El análisis de materiales naturales y artificiales por difracción de rayos x se utiliza ampliamente en diferentes campos de la ciencia. Las posibilidades de estudio de la constitución estructural, composición elemental y de fase de las sustancias naturales y sintéticas, permiten que el método de análisis por difracción de rayos x constituya uno de los métodos de investigación más importantes en las ciencias fundamentales de la tierra como: cristalografía, mineralogía, petrología, etc [6].

El difractor permite automatizar el proceso de medición de las intensidades, lo que amplía las posibilidades del análisis estructural en el estudio de sustancias complejas con muchas moléculas. La preparación de las muestras para este análisis se realizó según lo indicado para FRx.

Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica permite estudiar las particularidades superfina de morfología de partículas pequeñas (formas y tamaños reales) de minerales, la superficie de las caras, interfase y fracturas, la variación en las propiedades de diferentes muestras, así como la estructura interior de los minerales. Es factible también estudiar la estructura de los agregados minerales finamente dispersos, criptocristalinos y amorfos (minerales arcillosos, hidróxidos de hierro, etc.).

El microscopio electrónico de barrido tiene la ventaja de poder observar directamente muestras, sin requerir una preparación especial. Si el material a observarse no es eléctricamente conductor, debe metalizarse evaporando sobre él un metal como aluminio, oro, oro-paladio, platino-carbono o cobre, entre otros. La capa metálica evaporada requiere tener el menor espesor posible para evitar enmascarar los detalles finos de la superficie [5].

En nuestro caso, y en función de los resultados esperados, el material se preparó de dos formas: Se obtuvieron esquirlas de los especímenes de concreto, las cuales se metalizaron a base de carbón; posteriormente fueron montadas en una lámina de cobre para poder colocarlas en el porta|muestras del microscopio.

De los especímenes cilíndricos de concreto, se extrajeron muestras con un disco de manera que se tuviera un espesor constante; las otras dimensiones no resultaron regulares. Estas muestras fueron pulidas a espejo y posteriormente se colocaron en una solución de alcohol (50% alcohol etílico-50% agua) con la finalidad de deshidratar al concreto; después se metalizaron con carbón y se montaron en el porta|muestras para ser observadas. Esta técnica fue aplicada a concreto hidráulico ya elaborado, con la finalidad de observar la morfología de agregado así como de la pasta agua-cemento.

Pruebas físicas hechas a los agregados pétreos

Con la finalidad de conocer la calidad de los agregados pétreos a emplear, es necesario realizar algunas pruebas señaladas por las normas ASTM; y con base en los resultados obtenidos se diseñó el concreto hidráulico, según el método del ACI.

Todas las pruebas se realizaron por triplicado y su resultado es el promedio de los tres valores encontrados en la Sección de Resistencia del Laboratorio de Materiales “Ing Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las pruebas fueron muestreo; cuarteo; peso volumétrico seco suelto; peso volumétrico seco varillado; absorción; densidad; granulometría.

Pruebas mecánicas realizadas al concreto

Con los datos de diseño se elaboraron especímenes de concreto para pruebas mecánicas de compresión y tensión, a diferentes edades de prueba; todo según los estándares de la ASTM.

RESULTADOS

Microscopía óptica

De las fig 1 y 2 (Imágenes obtenidas por MOLPT), la microfotografía, (presentada en la fig 1), corresponde a la arena del banco Joyitas; en ella es posible apreciar fenocristales de plagioclasa y augita, rodeados por vidrio volcánico; presenta además una textura hialopilítica; es decir, que los microlitos aciculares de feldespato están en una matriz vítrea



Fig 1. Grava de Joyitas



Fig 2. Limo

En la microfotografía de la izquierda, (fig 2), se aprecia el material que se le adicionó a la arena en las cinco diferentes proporciones ya mencionadas, ceniza volcánica; es posible percibir que se trata de feldespatos; presenta exfoliación perfecta en una de las direcciones, y el mismo color blanco con gris característico de los feldespatos; textura pilotáxica, consistente en microlitos de feldespatos laminares o aciculares en disposición subparalela.

Tabla 1. Fluorescencia de rayos X, en porcentaje, para los agregados de los bancos indicados

Banco	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Σ (%)
Tribasa grava	57.00	0.872	18.138	6.732	0.105	3.506	7.414	3.443	1.492	0.182	1.38	100.26
Joyitas grava	60.28	0.829	17.294	5.848	0.105	3.241	6.183	3.559	1.786	0.226	0.59	99.94
Joyitas Arena	60.19	0.834	17.213	5.907	0.103	3.501	6.098	3.485	1.780	0.218	0.90	100.23
limo	70.96	0.36	13.500	2.560	0.046	0.805	1.900	2.960	4.270	0.081	2.93	100.37

En la serie de análisis se obtuvo la identificación de algunos de los elementos presentes en los agregados pétreos estudiados. Se identificaron los elementos característicos, como son sílice, elemento constituyente de los silicatos; feldespato sódico-cálcico (plagioclasa); y vidrio volcánico.

El titanio se halla como mineral de segregación magmática de alta temperatura, formando en ocasiones, acumulaciones importantes. Muchas veces se encuentra en las pegmatitas alcalinas junto con la efena, los feldespatos, la biotita y otros minerales, así como en las kimberlitas y carbonatitas. Es estable en la zona de meteorización. En general se presenta como mineral accesorio en las rocas plutónicas, como segregación a elevada temperatura. Es estable también en ambientes metamórficos de gneises y esquistos cloríticos [6].

El dióxido de titanio, TiO₂, se encuentra comúnmente en una forma negra o de color castaño conocida como rutilo. Las formas naturales que se encuentran menos en la naturaleza son la anatasita y la brooquita. Tanto el rutilo como la anatasita puros son de color blanco. El óxido básico negro, FeTiO₃, se encuentra en forma natural como el mineral llamado ilmenita; éste es la principal fuente comercial del titanio [5]. Al aluminio se le puede encontrar en los feldespatos y en la augita, así también al Fe.

El magnesio es muy abundante en la naturaleza, y se halla en cantidades importantes en diversos minerales rocosos, como la dolomita, magnesita, olivina y serpentina. Al magnesio se le puede encontrar como segregación o elemento integrante, especialmente en rocas de metamorfismo regional, y muchas veces como producto de alteración de silicatos de magnesio o transformación metasomática de calizas y dolomitas. Se encuentra como producto de alteración de la serpentina a causa del ataque del agua cargada de CO₂.

Al Mg se le encuentra solamente en peróxidos y al Ca tanto en los feldespatos como en la augita. El sodio ocupa el sexto lugar por su abundancia entre todos los elementos de la corteza terrestre, que contiene el 2.83% de sodio en sus formas combinadas. Al Na y K principalmente, los podemos encontrar en los feldespatos, además existe P en nuestros minerales, debido a una cantidad muy pequeña de apatito. Los resultados del análisis de difracción de rayos x confirmaron la presencia de piróxidos y feldespatos, dando como resultado los siguientes minerales:

Tabla 2. Difracción de rayos X, especies mineralógicas

Banco	Material	Especie Mineralógica
Joyitas	Arena	Anortita, augita
	Grava	Albita, augita, nontronita, anortita
Tribasa	Grava	Anortita, enstatita.
Acámbaro	Limo	Cristobalita, albita, ferroactinolita

Morfología acicular, cuerpos con forma de ahuja; longitud aproximada de 2 a 3 μm . Esta formación se presenta en la pasta de cemento-agua para el concreto elaborado con agregados del banco Joyitas, fue posible realizar un microanálisis, determinando la presencia de AL, Si, Ca, S y Cu.



Fig 3. La MEB mostró la morfología típica del concreto elaborado en este trabajo

Tabla 3. Resultados de las pruebas físicas a los pétreos, realizadas por triplicado, el valor de la tabla es el promedio.

Prueba	Material	ASTM	Valores	Especif
Muestreo	Grava Tribasa	D 75		
	Grava Joyitas			
	Arena			
	Ceniza volcánica			
PVSS	Grava Tribasa	C 29	1470	1.5
	Grava Joyitas		1130	
	Arena		1310	
	Ceniza volcánica		1140	
PVSV	Grava Tribasa	C 29	1530	1.6
	Grava Joyitas		1203	
	Arena		1340	
	Ceniza volcánica		1320	
Absorción	Grava Tribasa	C 128	2.59	4 %, máx
	Grava Joyitas		7.95	
	Arena		2.5177	
	Ceniza volcánica		2.5412	
Densidad	Grava Tribasa	C 127	2.70	2.0 mín
	Grava Joyitas		2.02	
	Arena		2.6048	
	Ceniza volcánica		2.5063	
MF	Arena	C 136	3.2503	2.3 a 3.2
	Ceniza volcánica		2.9640	
TM	Grava Tribasa	C 136	1"	¾" a 1 ½"
	Grava Joyitas		1"	

Resultados de las pruebas mecánicas realizadas al concreto hidráulico

Comportamiento mecánico a compresión

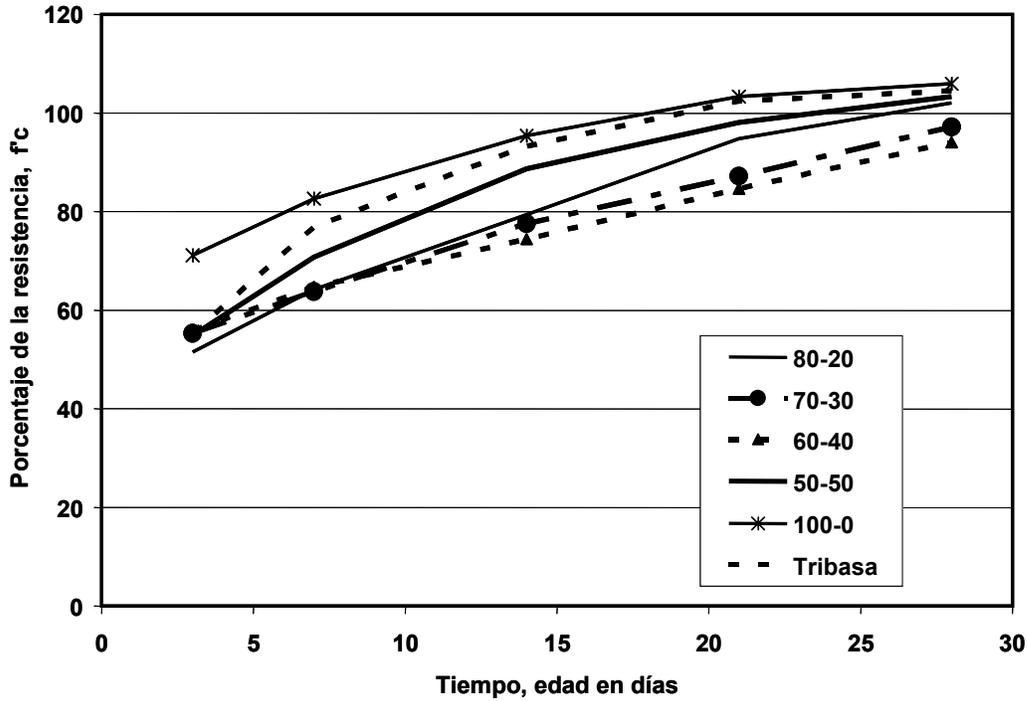


Fig 4. Comportamiento mecánico a compresión de las diferentes mezclas de prueba, testigo y adicionadas con ceniza volcánica

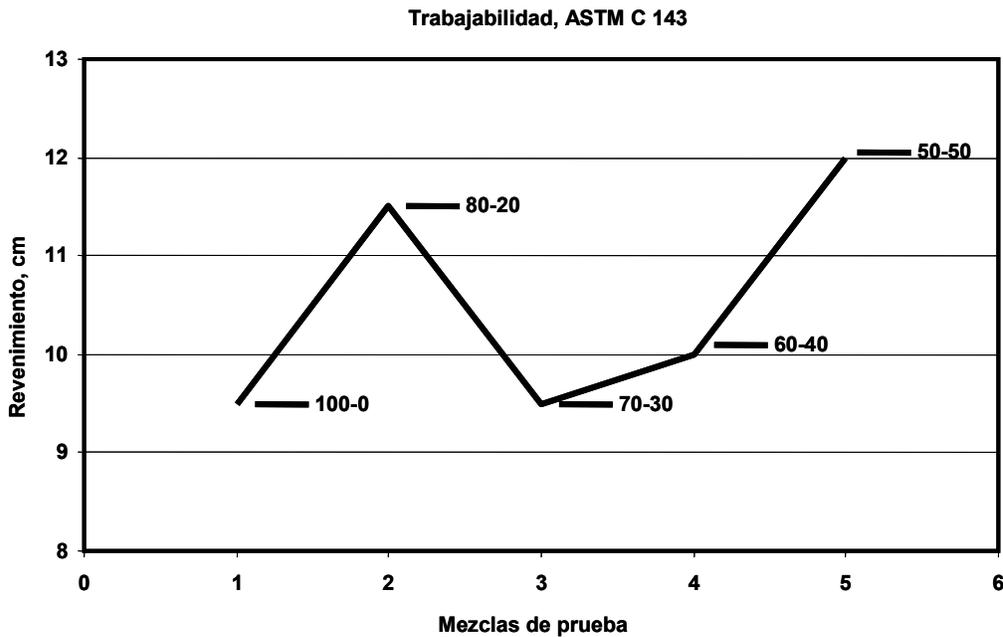


Fig 5. Resultados de la pruebas de revenimiento, trabajabilidad en las mezclas estudiadas; el testigo se identificó como 100-0, es decir, sin adición de cenizas volcánicas

DISCUSIÓN

La granulometría de la ceniza volcánica indica que no puede emplearse en casos cuyo fin sea la actividad puzolánica puesto que no reaccionarían las partículas como las que componen el material por su tamaño máximo (tabla 3), presentando poca área superficial para reaccionar con el agua de mezclado; sin embargo el material que pasa la malla 200 se analizó desde el punto de vista de SUCS; los resultados concluyentes son que no presenta expansión ni contracción, por tal motivo se considera un material "inerte". Sin embargo, tienen uso como fluidificantes sin provocar reacciones secundarias en la matriz o con el pétreo. La actividad puzolánica también se ve comprobada con los resultados de los especímenes sometidos a sollicitaciones de compresión simple a las edades incluidas en las gráficas, donde puede observarse en la fig 4, que no existe aumento importante en la resistencia mecánica a la compresión en los casos de sustitución de áridos por cenizas volcánicas. Los álcalis encontrados y cuantificados en la FRx, resultan en la posibilidad negativa de reacción álcali agregado entre los pétreos y la pasta de cemento.

La morfología observada en las secciones delgadas y en las esquirlas de pétreos, muestran materiales porosos, heterogéneos, y compuestos de matrices vítreas con fenocristales embebidos en ellas.

La trabajabilidad cuantificada como revenimiento en cm, (fig 5), se logró incrementar en aproximadamente 25 %; equivalente a 2.5 cm, que era el caso de estudio específico, se incrementó sin modificaciones de la relación A/C de diseño, demostrándose así la utilidad de la ceniza volcánica en casos de sollicitación de incremento en la trabajabilidad del concreto hidráulico, cuando no se aprueba el empleo de fluidificantes químicos adicionados al concreto.

REFERENCIAS

1. Hansson, C M, "Concrete, the Advanced Industrial Material of the 21st Century", Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 26, (1995)
2. E Alonso, L Martinez-Gomez, W Martinez, L Villaseñor, and V Castaño, "Mechanical properties of an Igneous Aggregates Modified Hydraulic Concrete", Advanced Composite Letters, United Kingdom, Volume 10, May (2001)
3. E Alonso, L Martinez, W Martinez and L Villaseñor, "Mechanical Properties of Concrete Elaborated with Igneous Aggregates", Cement and Concrete Research, Elsevier Science, Volume 32, Number 2, (Feb, 2002)
4. W Martínez, E Alonso, L Villaseñor y L Martínez-Gómez, "Efecto del agregado fino en la elaboración de concreto hidráulico", Ciencia Nicolaíta, de la Coordinación de la Investigación Científica, Vol 26, Abril 2001, ISSN 0188-9176, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

5. Chávez García, Hugo Luis, "Incremento de la trabajabilidad del concreto hidráulico elaborado con agregados pétreos del banco Joyitas y adicionados con ceniza volcánica", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, (Ene, 2003)
6. Ostroumov, M "Técnicas analíticas en la investigación de minerales", IIM, UMSNH, (1999)
7. American Society for Testing and Materials, ASTM Section Four, Construction Volume 02, Concrete and Aggregates, West Conshohocken, PA, USA, (2000)
8. Rocco, C, Guinea, G V, Plans, J and Elices, M. "Mechanisms of Rupture in Splitting tests", ACI Materials Journal, Vol 96, (1999)
9. V H Garduño-Monroy, P Corona-Chávez, I Isadre-Alcántara, L Menélla, E Arreygue, B Bigioggero, S y Chiesa, "Carta geológica de Michoacán escala 1: 250 000", P Corona-Chávez, e I Isadre-Alcántara, Editores UMSNH. México (1999)
10. Juárez-Badillo, E y Rico-Rodríguez, A Mecánica de Suelos, Tomo II, Editorial Limusa, Cuarta reimpresión de la Segunda Edición, (1983), Cap I
11. ACI Committee 318, American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-95, Farmington Hills, Mich, (1995)
12. Everard, N J and Tanner III, J L, Reinforced Concrete Design. Schaum Publishing Co. Chapter 1, (1966)
13. Winter, G, Urquhart, L C, O'Rourke, C E and Nilson, A H Design of Concrete Structures. International Student Edition, McGraw-Hill Book Company, (1958)
14. Reglamento de Construcciones para el Estado de Michoacán, Gobierno del Estado y Colegio de Ingenieros Civiles, Artículo 308, (1999)
15. Organismo Nacional de Normalización y certificación de la Construcción y Edificación, S. C. Norma Mexicana NMX C-414- ONNCCE-1999
16. Balayssac, J P, Détriché, Ch H et Diafac, N "Influence de la durée d'une cure humide sur les caractéristiques mécaniques de bétons d'usage courant", London, E. & F. N. Spon, Matériaun et constructions, Vol 30, (1997)
17. Goldstein, S J, Slemmons, A K and Canavan, H E "Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Methods for Environmental Characterization of Soils", Environmental Science and Technology, Volume 30, No 7, (1996)



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS EXPUESTAS A UN AMBIENTE AGRESIVO Y SUJETAS A MOVIMIENTOS SÍSMICOS, UN CASO DE ESTUDIO EN LA COSTA DE OAXACA, MÉXICO

P Montes-García

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, CIIDIR-IPN-Unidad Oaxaca, Calle Hornos, No1003, Sta Cruz Xoxocotlán, CP 71230, Oaxaca, México

RESUMEN

La corrosión en estructuras de concreto reforzado causada por cloruros, es sin duda un problema serio principalmente por las inmensas pérdidas económicas que representa. En México, esto es particularmente dramático en estructuras localizadas en la costa de Oaxaca, México. El riesgo de corrosión en dichas estructuras aumenta debido al agrietamiento causado por los frecuentes movimientos telúricos. Una detallada inspección visual de estructuras con corrosión indica, que una de las causas de la ocurrencia de este fenómeno son los deficientes procedimientos constructivos usados. Los resultados señalan también que se requiere mayor divulgación del problema de la corrosión en la zona; la implementación de un método para su prevención; y su inclusión en los reglamentos de construcción existentes, una zonificación con base en la agresividad del medio ambiente.

Palabras clave: corrosión, cloruros, ductilidad, zonificación

ABSTRACT

Corrosion in reinforced concrete structures caused by chlorides is a very serious problem mainly for the enormous economic losses. In Mexico, the problem of corrosion is evident, particularly in structures localized on the Cost of Oaxaca. The risk of corrosion on such structures is increased due to cracking of the structural elements caused by frequent earthquakes. Detailed visual inspection of structures at that zone indicates that one of the causes of the occurrence of the corrosion phenomenon is inappropriate construction practices. The results also indicate that the corrosion problem needs more diffusion between people, the use of a corrosion prevention method and a zoning based on the aggressiveness of the surrounding environment should be considered in the existent construction codes.

Keywords: Corrosion, Chlorides, Ductility, Corrosion Zoning

INTRODUCCIÓN

Cada año, los gobiernos de muchos países gastan miles de millones de dólares para reparar o demoler estructuras, cuya causa de deterioro es mayoritariamente la corrosión del acero de refuerzo (Koch, et al, 2001). Así mismo, se ha hecho énfasis en el estudio de métodos para prevenir la corrosión sin que se tengan avances importantes en este rubro (Montes, 2003). La falta de efectividad de estos métodos es atribuida a la complejidad del fenómeno.

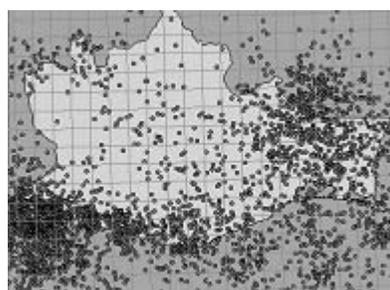
En México, el estudio de corrosión en estructuras de concreto reforzado en áreas costeras cobra importancia si se toma en cuenta que está prácticamente rodeado por agua de mar; y aunque se tienen avances importantes sobre el tema en la zona del Golfo de México (Castro 2001), en la zona del Pacífico no se cuenta con estudios suficientes a la fecha. Aunado a esto, diversas regiones, principalmente la zona del Pacífico, experimentan una gran actividad sísmica (fig 1). De hecho, la tercera parte de la actividad sísmica más importante ocurrida en esta zona, se ha registrado en las costas del estado de Oaxaca (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

Algunos estudios sobre el tema indican que la corrosión del acero de refuerzo afecta la integridad de las estructuras. Rodríguez, et al (1996), encontraron que la corrosión del refuerzo principal y secundario de elementos de concreto disminuye su resistencia a carga cíclica, debido a la aparición de excentricidades en las estructuras. Otro problema encontrado en este estudio fue la pérdida de confinamiento del concreto, la cual es ocasionada por corrosión de los estribos en columnas. Lo anterior cobra importancia ya que la práctica moderna del diseño sísmico considera la disipación de energía mediante daño en las estructuras; el colapso debe evitarse, y los daños deben ser fáciles de reparar.

El objetivo del presente trabajo fue elaborar un diagnóstico sobre el incremento de la vulnerabilidad de estructuras de concreto reforzado, localizadas en la costa de Oaxaca debido a la corrosión del acero de refuerzo, y a la ocurrencia de movimientos sísmicos.



a) Actividad sísmica en México
(1974-1996, Servicio Sismológico Nal)



b) Mapa de epicentros para Oaxaca
(1974-1999, Servicio Sismológico Nal)

Fig 1. La zona del Pacífico experimenta una gran actividad sísmica; más del 30 % de actividad en esta zona se ha registrado en las costas de Oaxaca (Kostoglodov y Pacheco,1999)

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La costa oaxaqueña es una región que va a lo largo del Océano Pacífico, desde los límites con el estado de Guerrero hasta la región del Istmo, con una extensión de aproximadamente 10 700 km². En esta región se eligió la localidad de Puerto Escondido para evaluar la posible interacción entre el daño sísmico y la corrosión de estructuras de concreto reforzado, por las siguientes razones:

- 1.- La localidad seleccionada se encuentra en la zona donde está ocurriendo un proceso de subducción, debido a que, la placa de Cocos penetra por debajo de la placa Continental; por este motivo, en esa zona se genera el 30% de la actividad sísmica que ocurre en el país.
- 2.- Se cuenta con registros de un gran daño en infraestructura causado por el sismo más importante en los últimos cuatro años en el estado de Oaxaca (30 de septiembre de 1999, 7.4 Richter).
- 3.- Es una zona altamente turística que cuenta con un gran número de construcciones de concreto reforzado, de mediana y alta importancia en relación con otras comunidades de la misma zona (hoteles, bancos, infraestructura turística, complejos vacacionales, y comercios).
- 4.- El apoyo brindado por la Unidad Estatal de Protección Civil de la región de la costa.

Inspecciones visuales

El estudio consistió en una serie de inspecciones visuales a 10 estructuras de concreto reforzado localizadas en la costa de Oaxaca. El lugar seleccionado pertenece al municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca, México.

Las estructuras inspeccionadas se muestran en la fig 2, y se enlistan a continuación:



Fig 2. Localización de zonas de inspección

- Estructura 1.- Corredor turístico (Dic- 2001 y Nov 2003)
- Estructura 2.- Puentes peatonales
- Estructura 3.- Hostal de la calle Hidalgo de la localidad
- Estructura 4.- Banco
- Estructura 5.- Edificio de cuatro niveles
- Estructura 6.- Edificación no terminada en la playa Zicatela
- Estructura 7.- Hotel del Magisterio
- Estructura 8.- Hostal vecino al Hotel del Magisterio
- Estructura 9.- Casa particular de Don Lupe Mendoza
- Estructura 10.- Hotel de siete niveles en construcción, en la calle Hidalgo

RESULTADOS

La corrosión es el deterioro de un material, debido a la interacción con el ambiente circundante, es por eso importante conocer los factores climáticos de la región en estudio, para de esta manera determinar las posibles causas de deterioro de cualquier estructura ubicada en dicha zona.

La brisa marina lleva importantes contenidos de humedad, y a su vez que contiene cloruros; de esta manera, estructuras que no están en contacto directo con el agua de mar, sufren igualmente corrosión del acero de refuerzo (Gaidis y Rosemberg, 2004). Los cloruros se vuelven así un elemento activo en el proceso de daño y degradación de las estructuras de concreto en franjas marítimas.

En Puerto Escondido, la humedad relativa varía de 70 a 80% durante la mayor parte del año; y la temperatura promedio anual de la zona es 28.5 °C. La precipitación pluvial mínima es de octubre a diciembre, y la temporada de lluvias empieza en junio y termina en septiembre, con una precipitación total anual de 1,065.6 mm. La dirección de los vientos dominantes es Sur-Suroeste por las mañanas y tardes; y Norte por las noches. Estas condiciones favorecen el transporte e ingreso de agentes agresivos, los cuales contribuyen al deterioro de las estructuras de concreto.

A pesar de la agresividad del ambiente el uso de cemento Portland ordinario, es práctica común entre las personas dedicadas a la industria de la construcción en la localidad en estudio. En lo referente a los demás constituyentes del concreto, la comunidad cuenta con diversos afluentes donde es posible obtener agua y agregados de buena calidad.

Una de los principales problemas detectados desde el inicio de la investigación, fue una clara falta de información documental acerca de las obras que se realizan en la zona. Es decir, no se cuenta con registros de edades de las estructuras, pruebas de resistencia a la compresión del concreto utilizado, etc.

La mayoría de las estructuras inspeccionadas mostraban manchas; agrietamiento en la dirección del acero de refuerzo y delaminaciones del concreto; signos de corrosión ocasionados principalmente por el ambiente marino, tan agresivo al que están expuestas.

Otro factor de deterioro es el daño causado por los sismos de gran intensidad que ocurren con gran frecuencia en la zona, y que se manifiestan como agrietamiento inclinado en muros y en extremos de elementos estructurales, como son trabes y columnas (fig 3).

Es sabido que el agrietamiento en estructuras de concreto favorece grandemente la corrosión, la cual podría alcanzar valores tan altos como 10 veces la de su condición no agrietada (Montes, et al, 2004)

Además, la corrosión disminuye la ductilidad del acero de refuerzo¹, lo cual es un gran riesgo si se toma en cuenta que la filosofía de diseño sismo-resistente moderna se basa en el hecho de que las estructuras deben liberar energía por medio de la ductilidad de los elementos estructurales. Esto quiere decir que se permite la disipación de energía mediante cierto daño, el cual se espera sea mas económico de reparar que construir una estructura muy robusta desde el principio, o demolerla cuando se ha dañado y construir una nueva.



Fig 3. Agrietamiento característico causado por movimientos sísmicos

Las principales causas del deterioro observado en las estructuras es la carencia de un reglamento en donde se considere de manera obligada considerar de la agresividad del medio ambiente al que están expuestas.

¹ Montes et al. Ductility Loss of Steel Reinforcement in Concrete due to Corrosion. Trabajo enviado a la Revista Materials and Structures, RILEM, Francia

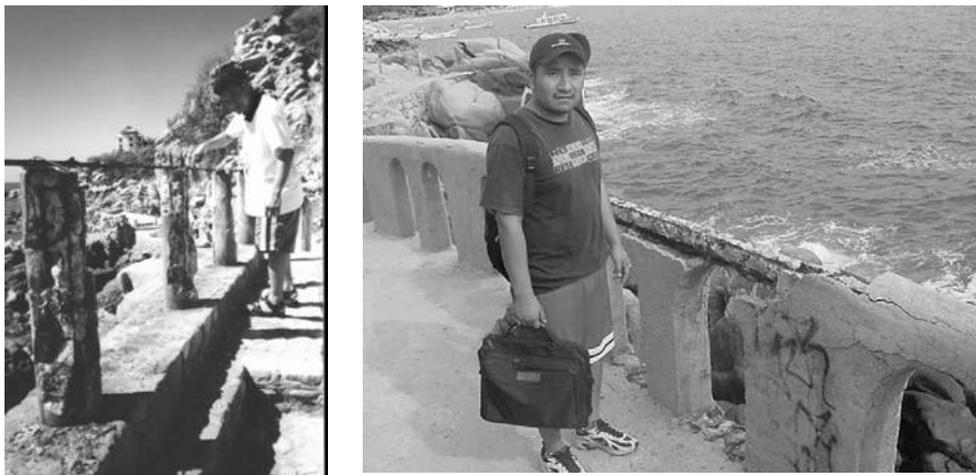


Fig 4. Estructura deteriorada después de sólo dos años en servicio

Los malos procedimientos constructivos son también la causa del precoz deterioro de las estructuras; entre los que destaca de manera preponderante el uso de un recubrimiento inadecuado, un mal vibrado, y dejar las varillas expuestas para construcciones futuras. Esto conlleva a que estructuras tan jóvenes como de dos años y que están expuestas a la brisa marina directa sufran un deterioro considerable (fig 4) o que estructuras cercanas a la playa, a tan solo 25 años de vida útil, tengan que ser abandonadas.

Debido a esto se recomienda ejercer más control y vigilancia por parte de las dependencias encargadas de otorgar los permisos de construcción, para que no se construyan obras mal diseñadas, y/o ejecutadas, y que además estarán expuestas a factores nocivos, como son los sismos y el ambiente marino.

En resumen, se concluye que existe un problema serio de corrosión de las estructuras de concreto reforzado expuestas al ambiente marino de la costa oaxaqueña. También permanecen estructuras de concreto que fueron dañadas por sismos, y que se repararon parcialmente pero que tienen problemas de corrosión del acero de refuerzo. Así mismo, se observa que la corrosión detectada en estas inspecciones es causa de malos procedimientos constructivos, que tienen que ver con la calidad de los materiales y el recubrimiento usado. Además, la intensa actividad sísmica que provoca el agrietamiento de las estructuras, lo que agrava este fenómeno.

CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los resultados, se puede concluir lo siguiente:

- Existen estructuras de concreto reforzado localizadas en la costa oaxaqueña que presentan problemas, ya que fueron construidas con procedimientos constructivos deficientes; estos problemas se incrementan debido al ambiente marino de la zona lo que ha provocado la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras y también los frecuentes movimientos sísmicos, lo que en conjunto afecta la economía de la región, del estado y en consecuencia del país.
- El riesgo de corrosión en las estructuras de concreto aumenta por el agrietamiento del recubrimiento de los elementos estructurales, pues una vez que el proceso ha empezado, el ancho de la grieta lo aumenta.
- El mejor método para prevenir la corrosión es un buen concreto; esto quiere decir que no esté agrietado y que tenga una baja permeabilidad.

RECOMENDACIONES

A continuación se enlistan algunas recomendaciones para conocer más acerca de la corrosión, y de cómo minimizar sus efectos económicos y sociales.

- Mayor divulgación del problema de la corrosión
- Conocimiento de la tecnología para la prevención de la corrosión
- Inclusión en los reglamentos existentes de construcción una zonificación con base en la agresividad del medio ambiente
- Elaboración de concretos de buena calidad
- Diseño estructural racional; dosificación de mezclas apropiada, excelente control de la elaboración del concreto, del mezclado, del colocado, del vibrado y del curado
- Implementación de al menos un método de prevención de la corrosión
- Se recomienda también la realización de más investigaciones sobre el tema y sobre la búsqueda de un concreto que sea amigable con el ambiente, en donde para su producción y utilización perturbe lo menos posible a la naturaleza

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Instituto Politécnico Nacional (Proyecto CGPI 20030348) y a la Universidad canadiense de New Brunswick, el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Castro, B P, Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones. Editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, (2001)
- Gaidis J M and Arnie, Rosenberg Using Corrosion Inhibitors to avoid Damage to Reinforced Concrete, Materials Performance, (Jan 2004)
- Koch, et al. Economics of Corrosion. Edited by the National Association of corrosion Engineers (2001)
- Kostoglodov, V y Pacheco F. Cien años de sismicidad en México, Suplemento del Instituto de Geofísica de la UNAM, México, (1999)
- Montes, P. Performance of Corrosion Inhibitors and Epoxy Coatings in Cracked Reinforced Concrete subjected to a Marine Environment. Tesis de doctorado en la Universidad de New Brunswick, Fredericton, New Brunswick Canadá, (Nov 2002)
- Montes, P. Influence of Calcium Nitrite Inhibitor and Crack width on Corrosion of Steel in High Performance Concrete Subjected to a Simulated Marine Environment. Cement and Concrete Composites, Vol. 26, England, (2004)
- Rodriguez J, Ortega L and Casal J. Load Bearing Capacity of Concrete Columns with Corroded Reinforcement. Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Ed. C LPage, P B Bamforth and J WFigg. SCI The Royal Society of Chemistry, (1996)



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

BARRAS DE ACERO GALVANIZADO: UNA OPCIÓN CONTRA LA CARBONATACIÓN

E I Moreno, E Cob Sarabia,
Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería
Mérida, Yucatán, México

D Serrano Ixtepan[†]
[†]Instituto Tecnológico de Mérida, Departamento de Ciencias de la Tierra
Mérida, Yucatán, México

RESUMEN

La carbonatación del concreto es la segunda causa de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, en ambientes tropicales no marinos, la corrosión inducida por carbonatación del concreto es el principal mecanismo de corrosión. Una vez que el concreto está carbonatado, las barras de acero empiezan a corroerse activamente. El objetivo de la investigación fue estudiar el desempeño del acero de refuerzo galvanizado como un material de refuerzo alterno bajo los ambientes mencionados. Dos tipos de especímenes se emplearon: de concreto simple para monitorizar la carbonatación; y de concreto reforzado para monitorizar la corrosión. Además de tres relaciones agua/cemento y dos tipos de barras de acero, normales y galvanizadas. Los especímenes fueron carbonatados en una cámara de carbonatación acelerada al 4% de CO₂ y 60% de humedad relativa; después, la humedad relativa se incremento por arriba del 90% con el fin de aumentar la corrosión. El desempeño de la corrosión fue monitoreado mediante polarización lineal. Los resultados de los potenciales y las densidades de corrientes de corrosión indican que el acero de refuerzo galvanizado está corroyéndose a bajas velocidades, mientras que el acero de refuerzo normal lo está haciendo activamente.

Palabras claves: acero galvanizado, carbonatación, concreto, corrosión, durabilidad

INTRODUCCIÓN

La corrosión inducida por la carbonatación es la segunda causa de degradación en las estructuras de concreto reforzado. La carbonatación del concreto se debe a la reacción del dióxido de carbono atmosférico y los compuestos hidratados del cemento. El producto de esta reacción es principalmente carbonato de calcio, que se precipita dentro de los poros del concreto.¹ Sin embargo, el pH de la solución del poro disminuye, de valores superiores a 12,5 unidades a menos de 9 unidades después de la carbonatación.² El acero se protege en las estructuras de concreto de la agresividad del medio ambiente debido al entorno altamente alcalino que provee la solución del poro. Este ambiente forma una capa pasiva sobre la superficie del acero; dicha capa se destruye como resultado de la pérdida de alcalinidad en la solución del poro que rodea al acero, desarrollándose una corrosión uniforme, la cual acelera la formación de grietas si las condiciones adecuadas de humedad y temperatura están presentes. En ambientes tropicales las condiciones atmosféricas pueden aumentar la agresividad del dióxido de carbono.^{3,4}

La profundidad de carbonatación (x) se mide usualmente con una solución indicadora de pH rociada en la superficie recién partida del concreto.¹ La carbonatación sigue una dependencia con la raíz cuadrada del tiempo igual a $k \cdot t^{1/2}$, donde k se conoce como el coeficiente de carbonatación, el cual depende de varios factores como el tipo y la cantidad de cemento; la porosidad del concreto; las adiciones puzolánicas, etc.⁵ Diversas investigaciones previas^{6,7} en edificios de concreto reforzado han mostrado una carbonatación significativa del concreto después de sólo 20 años de servicio; son de concreto, con resistencias en un rango de 20 a 30 MPa, y con coeficientes de carbonatación en un rango 5 a 8 mm/año^{1/2}. En otra investigación de campo en viviendas⁸ se encontró que los coeficientes de carbonatación eran más altos que aquellos encontrados en los edificios de concreto. Una evaluación de mezclas de concreto, con valores de resistencia en el mismo rango que las de las estructuras de concreto, mostró densidades de corriente de corrosión por arriba de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para las barras de refuerzo. Las velocidades de corrosión estaban en el rango de 8 a 23 $\mu\text{m}/\text{año}$.⁹

Como algunos de los elementos de concreto usados en las casas tienen menos de 10 cm de espesor, no existe la posibilidad de incrementar el recubrimiento de concreto sobre la barra; y el incremento de las propiedades del concreto serían muy costosas. Por tanto, el empleo de otro material de refuerzo sería una posible opción para controlar la corrosión inducida por la carbonatación. Una de estas posibilidades pudiera ser el uso de acero de refuerzo galvanizado. El recubrimiento galvanizado consiste en cuatro capas con diferentes concentraciones de zinc y hierro. El zinc y sus aleaciones son materiales anfotéricos por naturaleza, corroyéndose activamente tanto en ambientes altamente alcalinos como en ambientes ligeramente ácidos. En el caso de la carbonatación del concreto, con un pH cercano al neutro, el recubrimiento de zinc debería proteger al acero. Sin embargo, el recubrimiento de zinc podría sufrir autocorrosión durante la hidratación del cemento si el pH de la solución del poro es mayor de 13,3,¹⁰ hasta que se forma en la superficie una capa pasivante de hidróxido de zincato de calcio.

Como el espesor típico de un recubrimiento de zinc es del orden de $100\ \mu\text{m}$,¹¹ velocidades de corrosión promedio menores de $2\ \mu\text{m/año}$ serían necesarios para alcanzar una vida útil de 50 años mínimo. El objetivo de esta investigación fue determinar el desempeño de las barras galvanizadas como material alternativo bajo carbonatación y corrosión.

METODOLOGÍA

Especímenes y materiales

El cemento Portland se utilizó como material cementante en todos los casos, sin adición mineral. Adicionalmente se utilizó agregado calizo triturado, altamente poroso, tanto como agregado fino como agregado grueso; tres relaciones agua-cemento (*a/c*) fueron empleadas (0,84, 0,74 y 0,65); y los diseños de mezcla fueron preparados de acuerdo al ACI,¹² y los especímenes fueron colados siguiendo los procedimientos de la ASTM.¹³

Se emplearon tipos diferentes de especímenes de concreto: prismas instrumentados de $50 \times 100 \times 200\ \text{mm}$ para monitorear el proceso de corrosión; los especímenes estaban reforzados con dos barras corrugadas de $9,5\ \text{mm}$ de diámetro (del #3), una hecha de acero normal y la otra de acero galvanizado. Por su parte, para monitorear la corrosión, se colocó un electrodo de referencia interno, hecho de barras de titanio activado con recubrimiento de óxido de metales, en la mitad del espécimen (fig 1).¹⁴ Los especímenes por triplicado, y se recurrió a cilindros de concreto simple de $150\ \text{mm}$ de alto por $75\ \text{mm}$ de diámetro fueron usados para monitorear el avance del frente de carbonatación.

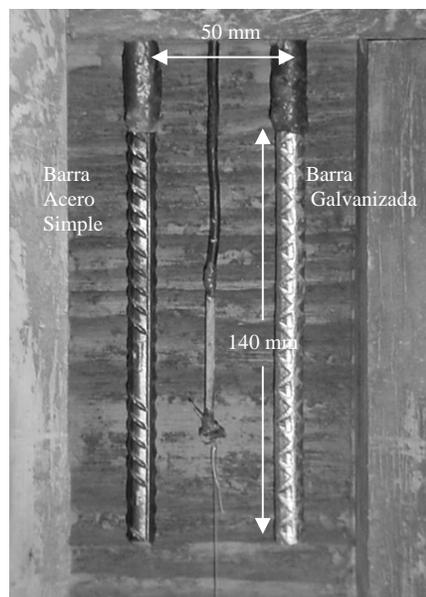


Fig 1. Disposición de los aceros en el molde previo al colado

Los especímenes se dejaron secar en el ambiente del laboratorio por 90 días (~60% HR), para ser expuestos posteriormente a un ambiente al 4% de CO₂ por 64 días. Después del período de carbonatación, fueron expuestos a un ambiente al 80% HR durante 40 días antes de ser expuestos a más de 90% HR.

Profundidad de carbonatación.

La profundidad de la carbonatación en el período de estabilización, previo al de carbonatación acelerada, se determinó usando especímenes de control. Durante la carbonatación, dos especímenes de concreto simple por mezcla de diseño se removieron de la cámara a edades diferentes. Una rodaja de ~50 mm de espesor fue quebrada, de cada espécimen con cincel y martillo, y una solución de fenolftaleína al 1% se roció sobre la superficie recién expuesta del concreto. La profundidad de carbonatación se midió en ocho lugares diferentes usando un vernier. Después de tomar las mediciones de carbonatación, el remanente del espécimen fue puesto de nuevo en la cámara.

Mediciones de potencial

Se registraron mediciones de media celda para cada barra, contra el electrodo de referencia interno antes, durante y después del período de carbonatación. El electrodo de referencia interno fue calibrado contra un electrodo de referencia externo cobre – sulfato de cobre, colocado en la superficie del concreto.

Resistencia eléctrica del concreto

La resistencia eléctrica del concreto fue monitorizada antes, durante y después de la carbonatación usando un medidor de resistencia eléctrica. La resistencia eléctrica fue medida de una barra a la otra usando un arreglo de dos puntos.

Resistencia a la polarización

Pruebas de resistencia a la polarización lineal usando un potencióstato fueron realizadas durante los períodos de carbonatación acelerada y de humectación sin necesidad de remover los especímenes de las cámaras respectivas. Las pruebas fueron conducidas iniciando desde el valor a circuito abierto en dirección negativa, hasta alcanzar unos 10 mV más negativos, a una velocidad de barrido de 0.01 mV·s⁻¹.¹⁵ La barra galvanizada (Barra X) fue usada siempre como electrodo de trabajo, mientras que la barra de acero simple (Barra Y) fue usada como electrodo auxiliar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los resultados de las mediciones de carbonatación. Los valores son el promedio de ocho mediciones de una superficie cilíndrica convertidas en mediciones de una superficie plana.¹⁶ Los especímenes estarían completamente carbonatados cuando la profundidad de carbonatación alcanzara los 37,5 mm. Antes de colocar los especímenes en la cámara de carbonatación, la profundidad de carbonatación se determinó durante el período de estabilización usando especímenes de control, y los datos fueron reportados como los correspondientes al día 0 de exposición acelerada. Debido al hecho de que algunas mezclas eran mejor que otras, la última profundidad de la carbonatación se determinó en fechas diferentes. La profundidad de carbonatación fue mayor conforme más alta fue la relación a/c.

Tabla 1. Profundidades de carbonatación y desviaciones estandar, (mm)

Mezcla	Días de exposición al 4% CO ₂											
	0		1		4		7		9		16	
0.84	9.3	0.6	19.5	0.7	21.5	1.2	23.7	0.8				
0.74	7.9	0.6	16.8	1.0	18.0	1.9			21.0	1.1		
0.65	7.3	0.8	14.3	1.3	16.1	2.3					20.4	1.6

La fig 2 muestra los potenciales promedio de las barras galvanizadas en función del tiempo. Los potenciales de las mezclas de 0,84 y 0,74 mostraron una transición de más de 600 mV hacia valores más negativos después de iniciada la exposición acelerada. Los especímenes de la mezcla 0,65 tuvieron un cambio de potencial menos pronunciado después de la exposición al CO₂. Al final del período de carbonatación acelerada, los potenciales de todos los especímenes estaban alrededor de -1,000 mV. Los potenciales cambiaron hacia valores más positivos después de removerlos de la cámara de carbonatación. Sin embargo, se estabilizaron en el rango -1,000 a -1,100 mV en la cámara de humectación. Los últimos valores son indicadores de una activación de la capa η (100% Zn).¹⁷

La fig 3 corresponde a los potenciales promedio para las barras de acero simple en función del tiempo. Todos mostraron una transición entre 200 y 300 mV hacia potenciales más negativos, después de iniciada la exposición. Los valores se estabilizaron durante este período en -600 mV, aproximadamente.

Después de mover los especímenes a la cámara de humectación, los potenciales disminuyeron 100 mV, aproximadamente, en la dirección menos positiva.

Los potenciales tendieron a estabilizarse en el rango -600 a -700 mV, el cual es el esperado para el acero embebido en concreto en condiciones de corrosión activa.

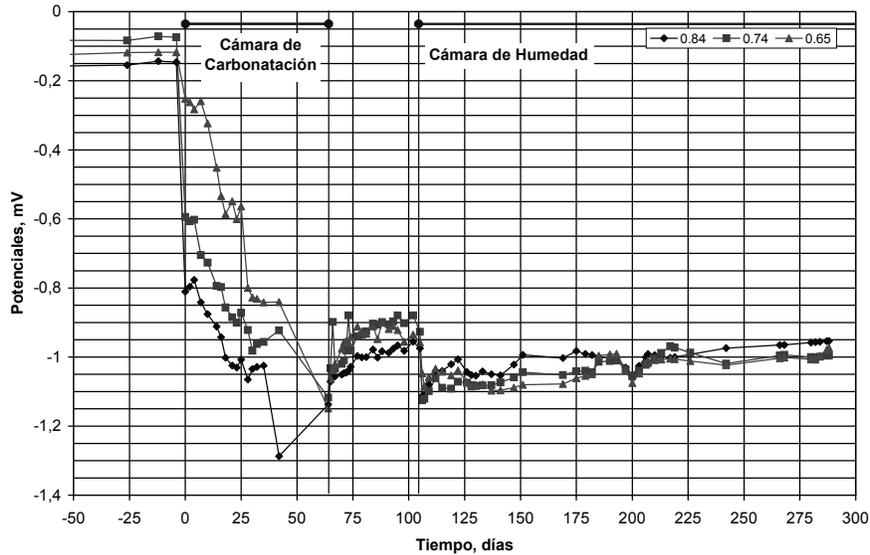


Fig 2. Potenciales promedio de las barras galvanizadas en función del tiempo

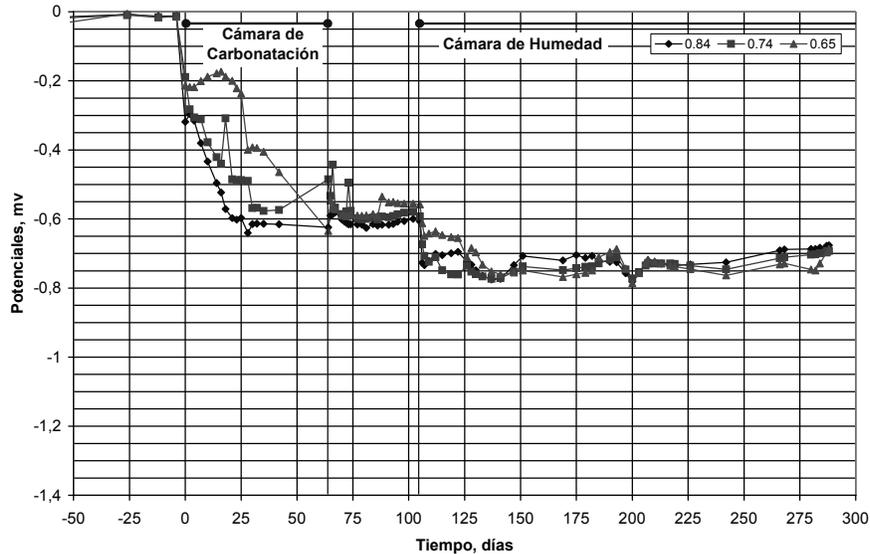


Fig 3. Potenciales promedio de las barras de acero simple, en función del tiempo

En la fig 4 se alude a la resistencia eléctrica promedio del concreto en función del tiempo. Conforme la carbonatación avanza, la resistencia eléctrica aumenta (~60% HR). Después de remover los especímenes de la cámara de carbonatación, la resistencia eléctrica disminuye ante el aumento de la humedad (~85% HR).

Sin embargo, una vez en la cámara de humectación (>90% HR), las resistencias disminuyen a valores muy bajos. Es observable que los valores finales están inversamente relacionados con la relación a/c, siendo la resistencia más baja la que corresponde a la mezcla con la relación a/c más alta.

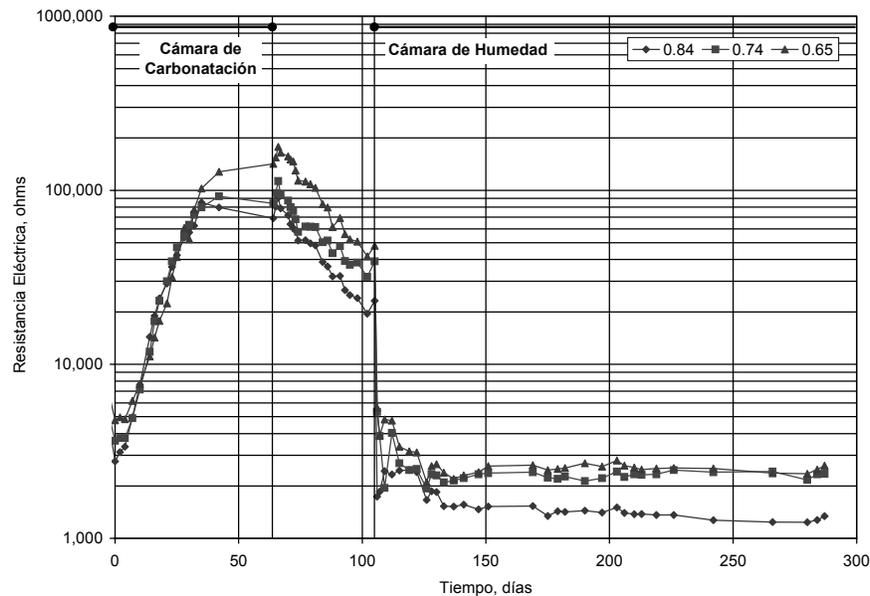


Fig 4. Resistencia eléctrica promedio del concreto en función del tiempo

Las densidades de corrientes de corrosión promedio de las barras galvanizadas se presentan en la fig 5. Como se observó en investigaciones anteriores^{16, 18}, las densidades de corrientes de corrosión durante el período de carbonatación acelerada son muy bajas. Es sólo después de que los especímenes son humectados, que la corrosión se desarrolla y las velocidades de corrosión activa son alcanzadas. Densidades de corrientes de corrosión extremadamente altas, del orden de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ se consiguieron a los pocos días, inmediatamente después de colocar los especímenes en la cámara de humectación. Las densidades de corrientes de corrosión se estabilizaron en el rango $0,06$ a $0,10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Estos valores corresponden a velocidades de corrosión en el rango de 1 a $1,5 \mu\text{m}/\text{año}$, y están en el mismo rango de aquellas observadas por otros investigadores.¹⁹

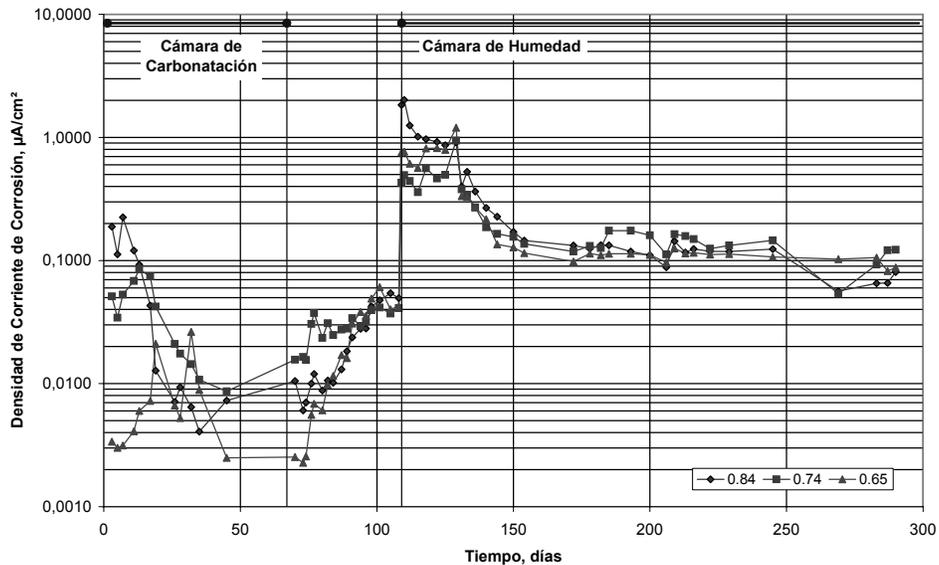


Fig 5. Densidades de corrientes de corrosión promedio en función del tiempo

Las velocidades de corrosión de las barras de acero simple embebidas en concreto carbonatado, alcanzaron un promedio de 11,7 $\mu\text{m/año}$ en una investigación previa bajo las mismas condiciones.⁹ Esos valores son un orden de magnitud mayor que aquellos observados en los especímenes galvanizados en esta investigación. Aunque el recubrimiento del galvanizado durará cerca de 70 años bajo las condiciones impuestas, el ambiente empleado es extremadamente agresivo (>90% HR). Por tanto, bajo condiciones reales se espera que el recubrimiento del galvanizado dure más de 70 años. Estos resultados apoyan el uso de acero de refuerzo galvanizado contra la corrosión inducida por la carbonatación, especialmente en el caso de elementos de concreto delgados y con poco recubrimiento.

CONCLUSIONES

- Las mayores velocidades de corrosión corresponden a las mayores relaciones agua/cemento
- Las barras de acero galvanizado en concreto carbonatado, se corroen a velocidades menores que las barras de acero simple
- Las barras de acero galvanizado pueden ser un buen material alternativo contra la corrosión inducida por la carbonatación en ambientes tropicales no marinos

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen al CONACyT (proyecto J34433-U) y a la Universidad Autónoma de Yucatán el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación. Las opiniones y las conclusiones son de los autores, y no necesariamente de las instituciones participantes. Los autores agradecen a L López Salazar, W Castillo y F Duarte Gómez por su participación en algunas de las pruebas realizadas.

REFERENCIAS

1. E I Moreno “*La Corrosión del Acero de Refuerzo Inducida por la Carbonatación del Concreto*”, Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 4, 2 (2000)
2. E I Moreno “*Valores de pH de la Pasta de Cemento Puzolánico Carbonatado*”, Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 5, 1 (2001)
3. P Castro, M Sanjuán, J Genescá, “*Carbonatación natural del concreto expuesto en ambiente marino*”, Memorias del XII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, México, (1997)
4. L Véleva, P Castro, G Hernández-Duque, M Schorr, Corrosion Reviews, 16, 3 (1998)
5. R F M. Baker, “*Initiation Period*,” en *Corrosion of Steel in Concrete*, ed. P Schiessl, Chapman and Hall, London, UK, (1988)
6. P Castro, E I Moreno, J Genescá, “*Carbonation-induced Corrosion of Concrete Coastal Buildings in the north of Yucatan, Mexico*,” Memorias del XIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, Mérida, México, (1999)
7. E I Moreno, P Castro, J Leal-Murguía, “*Carbonation-induced Corrosion of Urban Concrete Buildings in Yucatan, Mexico*,” CORROSION/2002, paper no. 220, NACE International, Houston, TX, (2002)
8. E I Moreno, R G Solís, E Cob, “*Reinforcing Steel Corrosion in Houses due to Concrete Carbonation in Urban Tropical Environments*,” CORROSION/2003, paper no. 280, NACE International, Houston, TX, (2003)
9. E I Moreno, E Cob, P Castro, “*Corrosion Rates from Carbonated Concrete Specimens*,” CORROSION/2004, paper no. 439, NACE International, Houston, TX, (2004)
10. A Macías, C Andrade, Brit. Corros. J., 18, 2 (1983)
11. E I Moreno, “*Comportamiento de Barras Galvanizadas en el Período de Iniciación de la Corrosión en Concretos Puzolánicos*,” Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 2, 2 (1998)
12. ACI 211.1-91 *Standard Practice for Selecting Proportions for normal heavyweight, and mass concrete* ACI International, Farmington Hills, MI, (1997)

13. ASTM C 192-98 *Standard Practice for Making and Curing Concrete test Specimens in the Laboratory* ASTM International, West Conshohocken, PA, (2002)
14. P. Castro, A. A. Sagüés, E. I. Moreno, L. Maldonado, J. Genescá, *Corrosion*, 52, 8 (1996)
15. A. A. Sagüés, S. C. Kranc, E. I. Moreno, *Corrosion Science*, 37, 7 (1995)
16. E. I. Moreno, "*Carbonation of Blended Cement Concretes*," Disertación Doctoral, University of South Florida, (1999)
17. S. R. Yeomans, *Corrosion*, 50, 1 (1994)
18. E. I. Moreno, A. A. Sagüés, "*Carbonation-Induced Corrosion on Blended-Cement Concrete mix Designs for Highway Structures*," CORROSION/98, paper no. 636, NACE International, Houston, TX, (1998)
19. J. A. González, C. Andrade, *Brit. Corros. J.*, 17, 1 (1982)



ALCONPAT

1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

DURABILIDAD DEL CONCRETO EN EDIFICIOS UNIVERSITARIOS: CARBONATACIÓN EN CLIMA CÁLIDO SEMIHÚMEDO

R G Solís Carcaño, E I Moreno

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería
Mérida, Yucatán, México

RESUMEN

En la actualidad se reconoce que las estructuras de concreto reforzado deben alcanzar una vida útil de 50 años o más, sin necesidad de acciones de mantenimiento correctivo. Sin embargo, edificios universitarios localizados en la ciudad de Mérida, con una edad de 25 años o menos, presentan daños típicamente asociados a la corrosión del acero de refuerzo. En este trabajo se investigó el fenómeno de la carbonatación del concreto en dos escuelas de la Universidad Autónoma de Yucatán, inmersas en un ambiente urbano a 40 km de la costa del Golfo de México. Se estudiaron estructuras de concreto reforzado con diversas antigüedades para fines comparativos. Los resultados mostraron diferentes profundidades de carbonatación en el concreto, mismas que se relacionaron con la variación, tanto de la calidad del material como de su edad; sin embargo, el principal factor asociado a la corrosión del acero fue la deficiencia en el espesor del recubrimiento. Por tanto, se concluyó que la durabilidad de las estructuras de concreto en el ambiente estudiado está siendo afectada, principalmente, por la falta de un estricto control de la calidad del material y un recubrimiento insuficiente al acero.

Palabras claves: carbonatación, concreto, corrosión, durabilidad, inspección.

INTRODUCCIÓN

La educación universitaria en Yucatán se inició en 1624 con la creación de la Real y Pontificia Universidad de San Francisco Javier. Después de varias transformaciones a través de tres siglos, y como heredera de la misión de ser la Máxima Casa de Estudios en Yucatán, en 1922 se fundó la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), con el nombre original de Universidad Nacional del Sureste y como parte del proyecto de crear tres universidades nacionales: la del Norte, con sede en Monterrey; la del Poniente, en Guadalajara; y la del Sureste, en Mérida.

Actualmente, la UADY cuenta con 17 campos, de los cuales 11 se construyeron en su totalidad durante el último tercio del siglo pasado, y cinco se ampliaron con nuevas estructuras en ese mismo período.

La durabilidad del concreto empezó a atraer la atención formal de los investigadores a finales de la década de los ochenta;¹ de aquí, que gran parte de la infraestructura física de esta universidad corresponda a una época en la que los diseñadores y constructores no se preocupaban por este fenómeno. Actualmente se reconoce que las estructuras de concreto deben alcanzar una vida útil de 50 a 70 años, antes de requerir acciones de mantenimiento correctivo. Sin embargo, algunas estructuras de concreto reforzado de los planteles de la UADY ya presentan daños asociados a la corrosión del acero de refuerzo, a una edad de 25 años o menos.

Actualmente, la experiencia ha mostrado que concretos con una resistencia de al menos 35 MPa, y que hayan sido mezclados con una relación agua/cemento por debajo de 0,55, obtienen una estructura impermeable con baja porosidad, lo cual constituye la base para su durabilidad. La infraestructura escolar en México, configurada en su gran mayoría por edificios de concreto reforzado de tres niveles como máximo, se construía hasta antes del gran sismo de 1985 utilizando una resistencia de diseño para el concreto de 20 MPa; aparte de esta especificación no se establecían requisitos de durabilidad, por lo que la relación agua/cemento debería corresponder aproximadamente a 0,70, que es suficiente para alcanzar tal resistencia. A partir del 1986 el comité que administraba la construcción de planteles escolares a nivel nacional cambió la especificación de la resistencia de diseño del concreto a 25 MPa, la cual corresponde a una relación agua/cemento de aproximadamente 0,62, sin incluir tampoco especificación alguna sobre durabilidad.

En el presente trabajo se estudiaron las estructuras de dos planteles de la UADY, que a la fecha presentan daños típicos asociados a la corrosión del acero de refuerzo: la Facultad de Economía (FE) y la Preparatoria N° 2 (PR2). La Facultad de Economía se construyó en etapas sucesivas, a partir de 1983; y está ubicada en el oriente de Mérida en una zona habitacional y comercial. Por otra parte, la Preparatoria N° 2 se construyó también por etapas, a partir de 1978; este plantel se ubica al poniente de Mérida, en una zona habitacional. Ambas se encuentran a una distancia aproximada de 40 km del Golfo de México en un ambiente urbano de mediana intensidad de tránsito vehicular, y distan aproximadamente 10 km de una zona industrial situada al sur de la ciudad. De acuerdo con el ambiente descrito, la corrosión del acero debe asociarse con la carbonatación del concreto.²

El clima imperante en la región, conforme el INEGI, es cálido semihúmedo, con lluvias en verano; se caracteriza por no tener diferencias notables entre las cuatro estaciones del año, y por tener una estación invernal seca. La humedad relativa del ambiente se comporta con ciclos diarios, que fluctúan de un 40% al medio día, a un 99% en la madrugada.

Los agregados utilizados en la región para la fabricación del concreto son producto de la trituración de rocas calizas extraídas de minas superficiales; cuyo origen geológico proviene de la formación Carrillo Puerto.

El objetivo del presente estudio fue realizar una exploración al fenómeno de la carbonatación en edificios universitarios con estructuras de concreto reforzado, en un ambiente urbano con clima cálido subhúmedo característico de la península de Yucatán.

METODOLOGÍA

Se eligieron dos escuelas (tabla 1) para una primera exploración al fenómeno de la carbonatación del concreto atendiendo dos criterios: que las estructuras presentaran daños y que estuvieran ubicadas en diferentes puntos cardinales de la ciudad (en este primer estudio, en el oriente y poniente).

Se realizó una inspección visual de los edificios de cada plantel, para caracterizar los daños que presentan; y se investigó la edad de cada edificio. En función del número de inmuebles de cada plantel, se determinó realizar pruebas físicas a dos módulos de la Facultad de Economía (C y D); ambos de un nivel y con una antigüedad de 18 años; y tres en la Escuela Preparatoria N° 2 (D, E y G; el primero de un nivel y los dos últimos de dos niveles) con antigüedades de 25, 25 y 10 años respectivamente. Durante la investigación se obtuvo información de que el edificio D de la Fac de Economía había sido construido en dos etapas, teniendo la última, una antigüedad de ocho años. Todos los edificios están estructurados a base de marcos tipo de una sola crujía, modulados a 3,19 m; y con un claro entre columnas del mismo marco, de 8,00 m.

Tabla 1. Características de los edificios.

Escuela	Edificio	Edad	Fachada estudiada	Niveles	Recub de la estructura
FE	C	18	Norte	1	Vinílica
FE	D	18/8	Sur	1	Vinílica
PR2	D	25	Norte	1	Vinílica
PR2	E	25	Sur	2	Vinílica
PR2	G	10	Sur	2	Vinílica

Para sistematizar el estudio se decidió realizar las pruebas en columnas en todos los edificios; de cada uno se estudiaron tres columnas. Las columnas tuvieron dos tipos de secciones, de 0,25 x 0,45 cm, en edificios anteriores a 1986, y de 0,30 x 0,45 cm para los inmuebles posteriores a 1986; los armados principales fueron de cuatro varillas del N° 5 para los de un nivel, y del N° 8 para los de dos niveles.

Se caracterizó el concreto mediante la prueba del martillo de rebote³ interpretando la calidad del concreto con base en un estudio realizado con concretos usados en la misma región; para esto, se tomaron 10 medidas de rebote en cada columna. De cada una se extrajeron dos corazones a alturas de 0,70 y 0,90 cm a partir del piso. Los corazones emplearon en pruebas de carbonatación y de porosidad.^{4,5}

En cada columna, después de la extracción de los corazones se localizó una barra de acero de refuerzo principal, y se midió el potencial con un electrodo de cobre - sulfato de cobre.⁶

RESULTADOS

Inspección visual

En la Facultad de Economía se observaron grietas longitudinales en vigas, siguiendo la dirección del acero de refuerzo principal en el lecho inferior; lo anterior, tanto en el edificio C como en el D (fig 1 y 2). En ambos casos, se observaron señales de que en algún momento ha habido filtraciones pluviales en las zonas dañadas. En el edificio D también se detectaron delaminaciones en el concreto que recubre los estribos, en vigas principales, y en cerramientos de rigidez.

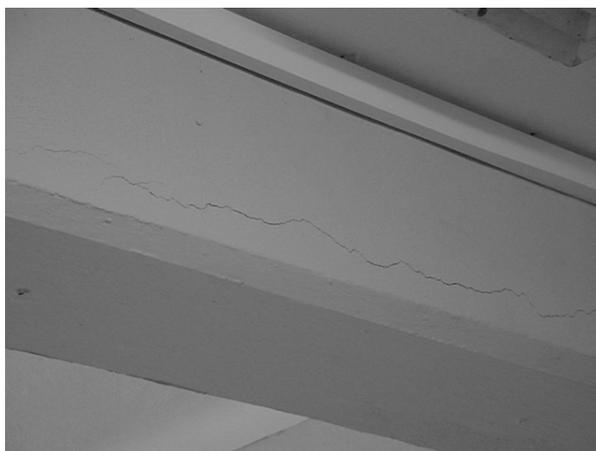


Fig 1. Grieta en viga principal en el edificio C; escuela FE



Fig 2. Delaminación en viga principal en el edificio D; escuela FE

En la Escuela Preparatoria N° 2 se observaron delaminaciones en el recubrimiento del acero en losas armadas macizas del edificio D (fig 3); se apreciaron grietas e incluso desprendimientos de concreto motivados por la corrosión del acero principal en las columnas en los edificios D, E e I (fig 4); se detectaron agrietamientos en el acero principal de vigas en el edificio D (fig 5); se observaron delaminaciones en el recubrimiento de estribos en vigas en los edificios D e I (fig 6); y también, agrietamientos siguiendo las varillas longitudinales de las cadenas de borde de las losas de entrepiso o azotea en los edificios D e I. Se hace la observación que por los criterios utilizados para seleccionar las estructuras a estudiar, el edificio I no fue incluido en esta etapa.



Fig 3. Delaminación en losa armada maciza en edificio D; escuela PR2



Fig 4. Grieta en columna del edificio E; escuela PR2

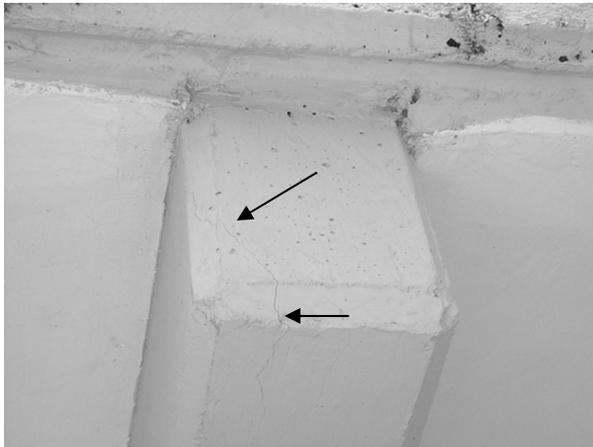


Fig 5. Agrietamiento en acero de vigas en el edificio D; escuela PR2



Fig 6. Delaminación en estribos de vigas en el edificio I; escuela PR2

Caracterización del concreto

Se utilizó el modelo de predicción de la resistencia a la compresión con base en el martillo de rebote, desarrollado para concretos de la región.⁷ En la Facultad de Economía la calidad del concreto fue cuestionable para el edificio C, con resistencias estimadas entre 10 y 15 MPa (18 años de antigüedad); para el modulo D, una columna presentó calidad de concreto aceptable, con resistencias estimadas entre 19 y 23 MPa (18 años de antigüedad); mientras que dos columnas presentaron concretos de alta calidad con resistencias estimadas arriba de 35 MPa (ocho años de antigüedad). La tabla 2 contiene los resultados de las mediciones del martillo de rebote.

Tabla 2. Medidas del martillo de rebote en la Facultad de Economía

Edificios	C			D		
Columnas	1	4	9	1	5	9
	18	19	16	22	40	40
	20	20	20	25	43	46
	21	22	20	22	41	54
	16	20	20	27	42	50
	14	20	18	28	44	52
	18	18	18	22	41	50
	16	20	19	22	40	44
	20	16	20	25	46	50
	18	18	18	25	42	50
	14	14	23	24	46	52
Promedio	18	19	19	24	42	49

En la Escuela Preparatoria N° 2, los tres edificios estudiados presentaron concretos de alta calidad con resistencias estimadas por arriba de los 35 MPa. La tabla 3 presenta los resultados de las mediciones del martillo de rebote.

Tabla 3. Medidas del martillo de rebote en la Escuela Preparatoria 2

Edificio	D		E		G		
Columna	11	14	2	6	1	6	9
	37	42	36	43	34	35	36
	40	43	39	40	36	32	35
	48	40	38	46	40	38	36
	41	42	40	50	37	30	38
	50	42	30	47	37	30	32
	38	40	40	44	37	34	35
	48	38	44	44	37	35	25
	40	42	40	50	35	28	34
	44	46	40	44	38	30	38
	30	44	36	45	39	32	26
Promedio	42	42	38	45	37	32	34

La tabla 4 muestra los resultados promedio para cada tipo de prueba por columna. La profundidad de carbonatación alcanzó el nivel de la barra de refuerzo en las columnas C-1, C-4, C-9 y D-1 de la Facultad de Economía, y en las columnas D-14 y E-2 de la Escuela Preparatoria N° 2. Los coeficientes de carbonatación en los edificios mayores a 15 años varían de 5,2 a 22,9 mm/año^{1/2} en el peor caso.

Para el caso de los inmuebles con edades de hasta 15 años, los coeficientes de carbonatación varían entre 1,5 y 7,8 mm/año^{1/2}. Los resultados de porosidad total⁴ estuvieron en el rango de 19 a 29%, y fueron consistentes con los resultados de porosidad efectiva,⁵ los cuales estuvieron en el rango 10 a 23%. Los resultados de la resistencia a la compresión utilizando los núcleos de concreto, aunque confirmaron cualitativamente la tendencia de los resultados con la prueba de dureza superficial no pueden tomarse cuantitativamente, ya que el número de especímenes no conformaron una muestra significativa. La prueba de resistencia a la compresión no pudo realizarse en muestras del edificio D de la FE, ya que no se pudieron obtener núcleos enteros debido a la pobre consistencia del concreto.

Tabla 4. Resultados promedio obtenidos en columnas diferentes

Esc	Edificio-columna	Rec	Prof Carb	C Carb	Porosidad total	P Efect	Edad
		(mm)	(mm)	(mm/año ^{1/2})	(%)	(%)	(años)
FE	C-1	25	97	22,9	27	--	18
	C-4	20	45	10,5	26	20	18
	C-9	25	37	8,7	26	21	18
	D-1	30	47	11,1	23	23	18
	D-5	40	22	7,8	20	16	8
	D-9	40	16	5,7	20	11	8
PR2	D-11	40	32	6,5	19	14	25
	D-14	30	40	7,9	19	13	25
	E-2	30	31	6,2	21	10	25
	E-6	30	26	5,2	21	13	25
	G-1	50	5	1,5	29	18	10
	G-6	30	6	1,9	28	10	10
	G-9	50	7	2,0	23	12	10

Esc: escuela; **Rec:** recubrimiento; **Prof Carb:** profundidad de carbonatación; **C Carb:** coeficiente de carbonatación; **P Efect:** porosidad efectiva

Potenciales de corrosión

Tablas 5 y 6 muestran los potenciales medidos en columnas seleccionadas en ambas escuelas. En particular, los potenciales de la FE (valores más negativos de -350 mV) confirman el daño por corrosión observado en el edificio C (fig 1). Por su parte, aun cuando los potenciales observados en el edificio D, de la escuela PR2, no son tan negativos como los observados en la tabla 5; no obstante, ya se aprecian algunos potenciales de corrosión a la altura de 0,2 m.

Tabla 5. Potenciales en columna C-1 de la FE

Altura (m)	Barra izquierda	Estribo	Barra derecha
1,6	-367	-358	-320
1,4	-360	-230	-254
1,2	-372	-367	-363
1,0	-353	-226	-250
0,8	-233	-277	-459
0,6	-403	-365	-242
0,4	-407	-362	-238
0,2	-440	-245	-288
0,0	-421	-253	-329

Tabla 6. Potenciales en columna D-11 de la escuela PR2

Altura (m)	Barra izquierda	Estribo	Barra derecha
1,8	56	-38	58
1,6	64	10	41
1,4	28	-199	65
1,2	65	-37	34
1,0	83	-12	36
0,8	78	-57	92
0,6	-87	-162	37
0,4	-120	-249	4
0,2	-142	-353	-243

DISCUSIÓN

Debido al cambio en las especificaciones de construcción para este tipo de edificios, los resultados pueden agruparse en dos categorías: construidos hasta 1986, y posteriores a 1986. En el primer grupo, se encuentran las columnas C-1, C-4, C-9 y D-1 de la Facultad de Economía; y las columnas D-11, D-14, E-2 y E-6 de la Preparatoria N° 2. En el segundo grupo se encuentran las columnas D-5 y D- 9 de la escuela Facultad de Economía, y las columnas G-1, G-6 y G-9 de la Escuela Preparatoria N° 2.

Para las columnas de concreto construidas hasta 1986, sólo en una de las ocho, el frente de carbonatación no ha alcanzado el nivel de la barra de refuerzo. Por tanto, la capa de pasividad no existe o está en proceso de desintegración, permitiendo la activación del acero en función de la disponibilidad de humedad. Para el caso de las columnas del segundo grupo, en ningún caso el frente de carbonatación ha alcanzado el nivel de la barra de refuerzo. Esto es debido no sólo a la mejor calidad del concreto (al cambiar la especificación de 20 a 25 MPa), sino también al aumento en el recubrimiento ya que en el primer grupo varía de 20 a 30 mm; mientras que en el segundo grupo varía de 30 a 50 mm, confiriendo al acero un mayor tiempo de protección.

La calidad del concreto se ve reflejada también en el coeficiente de carbonatación, que tiene un promedio de 9,9 mm/año^{1/2} comparado con el promedio de 3,8 mm/año^{1/2} para el segundo grupo. De acuerdo con criterios aceptados mundialmente, un concreto con un coeficiente de carbonatación entre 3 y 6 mm/año^{1/2} es considerado de calidad media,⁵ mientras que uno con un coeficiente de carbonatación mayor a 6 mm/año^{1/2} se estima como de baja calidad. Aunque cabe aclarar que en una columna (D-5) se obtuvo un coeficiente de carbonatación mayor a 6 mm/año^{1/2}.

El promedio de la prueba de porosidad total es similar en ambos grupos (~24%). El promedio de la prueba de porosidad efectiva mejora al pasar de 16% para el primer grupo, a 13% para el segundo grupo.

Estos resultados pueden parecer muy altos a la comunidad científica; sin embargo, es debido a la alta porosidad del tipo de agregado utilizado, tanto como agregado grueso como agregado fino. En una investigación anterior se encontró un promedio de 24% de porosidad total.⁸ Esto fue confirmado mediante una investigación de laboratorio⁹ donde se encontró que la porosidad total varió entre 23 y 24% para un rango de mezclas de concreto con relaciones agua – cemento, de 0,55 a 0,80.

La porosidad efectiva promedio reflejó la diferencia en calidad al ser 16% para el primer grupo y 13% para el segundo grupo. Estos resultados son consistentes con los obtenidos con los coeficientes de carbonatación, y apoyan el uso de esta técnica por sobre la determinación de la porosidad total, al menos cuando se utilizan agregados muy porosos que enmascaran las diferencias de calidad del concreto en las pruebas de porosidad total.¹⁰

Un pequeño cambio en la especificación, al pasar de 20 a 25 MPa, aunado a un aumento en el recubrimiento, al pasar de 25 mm a 40 mm (en promedio), ha logrado una mejoría apreciable en la durabilidad de las estructuras de concreto. Aunque este desempeño no es suficiente, es de esperarse que con mayores cambios en las especificaciones y reglamentos, el aumento en la difusión del conocimiento de los daños por corrosión y cómo evitarlos, y la aplicación de mejores controles de calidad, este tipo de daño por carbonatación del concreto se reduzca en construcciones futuras.

CONCLUSIONES

Estructuras de concreto reforzado con edades de 18 y 25 años presentan en la actualidad daños notables asociados al fenómeno de la corrosión del acero, inducida por carbonatación del recubrimiento de concreto.

En la Facultad de Economía, columnas con antigüedad de 18 años presentaron una combinación de concreto de calidad insuficiente (inferior a la especificada para esa época, de 20 MPa), y recubrimiento insuficiente (con un máximo de 25 mm); el resultado es que actualmente la profundidad de la carbonatación del concreto duplica y hasta triplica el recubrimiento del acero, y los potenciales medidos llegan a niveles más negativos de -300 mV. Todo lo anterior se ha manifestado con daños visibles en los elementos de la estructura donde se ha combinado un recubrimiento mínimo con condiciones críticas de humedad (locales cerrados y filtraciones).

En la Preparatoria 2, en columnas con antigüedad de 25 años se encontró que el concreto tuvo una calidad superior a la especificada (20 MPa) y que el recubrimiento fue mayor (entre 30 y 40 mm); como resultado de esto, el frente de carbonatación aun no ha alcanzado a la varilla de refuerzo en todos los casos, por lo que los potenciales medidos fueron principalmente positivos. Sin embargo, se observan daños en elementos estructurales como columnas, losas y vigas donde se combinan recubrimientos mínimos con condiciones críticas de humedad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen al CONACyT (proyecto J34433-U) y a la Universidad Autónoma de Yucatán el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación. Las opiniones y las conclusiones son de los autores, y no necesariamente de las instituciones participantes. Los autores agradecen a L López Salazar, E Cob Sarabia, D Serrano Ixtepan, y F Duarte Gómez por su participación en algunas de las pruebas realizadas.

REFERENCIAS

1. K Mehta, "*Durabilidad – Problemas críticos del futuro*" en tecnología del concreto para obras durables y sustentables, Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, (2000)
2. E Moreno, "*La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto*", Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 4, No. 2, (2000)
3. ASTM C 805, "*Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*," ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004)
4. ASTM C 642, "*Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*," ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004)
5. O Troconis de Rincón, A Romero de Carruyo, C Andrade, P Helene, I Díaz, "*Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*", Red DURAR, CYTED, Maracaibo, Venezuela, (1998)
6. ASTM C 876, "*Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*," ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004)
7. M A Salazar López "*Alcances del martillo de rebote Schmidt como procedimiento no destructivo para la evaluación de la calidad del concreto*" Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, (1985)
8. E I Moreno, P Castro, J Leal-Murguía, "*Carbonation-induced Corrosion of Urban Concrete Buildings in Yucatan, Mexico*," CORROSION/2002, paper no. 220, NACE International, Houston, TX, (2002)
9. E I Moreno, E Cob, P Castro, "*Corrosion Rates from Carbonated Concrete Specimens*," CORROSION/2004, paper no. 439, NACE International, Houston, TX, (2004)
10. E Cob Sarabia, "*Efectos de la carbonatación en concretos con agregado calizo*" Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, (2004)



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE LA CORROSIÓN EN CONCRETOS CON PUZOLANAS Y ESCORISA DE ALTO HORNO

**Rosa E Núñez Jaquez, Citlalli Gaona Tiburcio, Carlos P Barrios Durstewitz,
Facundo Almeraya Calderón, Alberto Martínez Villafañe**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S C Departamento de Deterioro de
Materiales e Integridad Estructural.
rosalba.nunez@cimav.edu.mx

Jorge Uruchurtu Chavarin

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma
del Estado de Morelos

RESUMEN

En la búsqueda de formas de protección de las estructuras de concreto reforzado en contra de la corrosión, se han desarrollado muchos métodos que se aplican en el acero o en el concreto; en este último, se han realizado modificaciones en su elaboración, adicionando diversos materiales que le confieren resistencia y protección en contra del deterioro. Algunos de estos materiales son las puzolanas y las escorias. Generalmente, las pruebas elaboradas en concretos reforzados con este tipo de mezclas, son desde el punto de vista estructural (resistencia a la compresión) y funcional (permeabilidad, resistencia a los sulfatos, etc.), por tanto, surge la necesidad de complementar los estudios con técnicas electroquímicas; es por ello que en este trabajo se hace una comparación entre concretos con mezclas de materiales puzolánicos y escoria, a través de las técnicas de ruido electroquímico e impedancia electroquímica.

Para el proceso experimental se prepararon especímenes cilíndricos de concreto reemplazando el 20% de peso en cemento con combinaciones de dos materiales (cenizas volantes, microsíllica, y escoria de alto horno), con dos varillas de acero embebidas, las cuales se colocaron en un medio salino (agua con sal al 5%) durante un determinado período de tiempo, y se observó cuál fue el comportamiento corrosivo.

En los resultados se muestra que la mezcla en la que se sustituyó el 10% de cenizas volantes y 10% de microsílica presenta mejor protección contra el deterioro de la varilla de refuerzo debido a las bajas velocidades de corrosión.

INTRODUCCIÓN

Es bien conocido en la actualidad que la principal causa de deterioro en estructuras de concreto reforzado, es la corrosión de la armadura de acero. Este problema genera la necesidad de un mantenimiento, y a su vez costos, por las reparaciones de los daños, e inclusive por la pérdida total de la estructura, o en casos extremos, de vidas.

De las reparaciones que se han efectuado en concretos deteriorados se deduce que el factor más común, generador de la corrosión en estructuras reforzadas, es el ingreso de los iones cloruro.

Con respecto a este problema, investigaciones realizadas en los últimos años, señalan que después de identificar el agente que lo genera y la forma en como se produce el mecanismo, estas se han enfocado generalmente a la búsqueda de métodos de prevención y protección.

Dentro de las formas de protección contra la corrosión, existen las que son directas al acero de refuerzo y las indirectas; dentro de las directas están la protección catódica y recubrimientos; las indirectas son parcheos, revestimientos, extracción electroquímica de cloruros, realcalinización y añadir aditivos.

Con referencia a estos últimos, actualmente existe gran variedad de materiales que pueden emplearse como aditivos, utilizados para realzar las propiedades del concreto. Los más comunes son las cenizas volantes, producto de la combustión de carbón (p ej carboeléctricas); las escorias de alto horno; desechos de la elaboración del acero; y el humo de sílice que se genera en la industria del ferrosilicón o ferrosilicio.

Incorporar materiales cementantes suplementarios al cemento Portland tiene grandes ventajas, no solamente en el aspecto de costos; también es debido a que desarrolla excelentes propiedades mecánicas y características de larga durabilidad. Además, el uso de estos materiales es beneficioso para el ambiente, ya que el cemento es remplazado parcialmente por éstos, según lo muestran Gu P. y col (2000).

Los materiales cementantes son sustancias que por sí solas tienen propiedades hidráulicas cementantes (fragan y endurecen en presencia del agua). Los materiales cementantes incluyen la escoria de alto horno, al cemento natural, a la cal hidratada, y a las combinaciones de éstos y de otros materiales.

Las puzolanas son materiales silíceos que poseen una capacidad acusada de cementación. Cuando dichos materiales están finamente molidos y húmedos, reaccionan con los hidróxidos de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos con propiedades cementantes, que son silicatos monocálcicos de muy baja solubilidad, ejemplos de éstos son las cenizas volantes, y la microsíllica.

Cuando se utiliza como agente de mezclado exclusivo para alcanzar un concreto durable, la cantidad de adición de la ceniza volante es normalmente de 25 a 40% por masa de cemento (35 a 55% por volumen de partícula), según lo indica Buttler W B (1997).

Diversas investigaciones han demostrado que la proporción óptima de puzolana en una mezcla de cemento Portland y puzolana, está en el rango de 10 a 35% en peso de cemento más puzolana, dependiendo de la calidad de los materiales empleados.

Al mismo tiempo, remplazar cemento con escoria al 50% por masa es apropiado por economía, sin embargo, no resulta apropiado en mezclas binarias donde la durabilidad es importante.

No obstante, con la finalidad de buscar concretos con mejores propiedades, se han adicionando no solamente uno, sino que se han elaborado mezclas con la adición de dos o tres materiales.

A partir de varios estudios, se han comprobado las buenas propiedades y grandes ventajas de adicionar el cemento con algún tipo de puzolana o escoria, desde el punto de vista estructural y de servicio.

Generalmente, las pruebas realizadas en concretos reforzados con este tipo de mezclas, son desde el punto de vista estructural (resistencia a la compresión) funcionales (permeabilidad, resistencia a los sulfatos, etc) (Ozyldrim y col, 1994; Cao y col, 1989; Hinczack y col, 1992; Hinzack y col; 1990; Short y col, 1982).

Por tanto, surge la necesidad de complementar estos estudios con técnicas electroquímicas; es por ello que en el trabajo se hace una comparación entre concretos con mezclas de materiales puzolánicos y escoria, a través de las técnicas de ruido electroquímico e impedancia electroquímica.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Especímenes de concreto

Se elaboraron varios especímenes de concreto con cemento ordinario Portland I, a los cuales se les sustituyó los siguientes porcentajes por peso de cemento con los aditivos:

- 10% de cenizas volantes y 10% de escoria de alto horno
- 10% de cenizas volantes y 10% de microsíllica
- 10% de microsíllica y 10% de escoria de alto horno

Las dimensiones de los especímenes son de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro, con una relación a/c de 0.45 y una resistencia esperada de 250 kg/cm². A cada espécimen se le colocaron dos varillas de 3/8 pulg (0.95 cm) y 32 cm de longitud, de acero 1018, las cuales sobresalen 2 cm de la superficie del concreto, para ser empleadas en la pruebas electroquímicas.

Ruido electroquímico

Para la aplicación de la técnica de ruido electroquímico, se tomó la lectura de 4,096 puntos con una velocidad de un punto por segundo. Se empleó un electrodo de cobre-sulfato de cobre.

Impedancia electroquímica

La prueba de impedancia se efectuó en un rango de frecuencia de 0.001 a 10,000 Hz; la amplitud del voltaje fue de 10mV, y el número de puntos 43. El electrodo empleado es de cobre-sulfato de cobre.

Ambas técnicas se realizaron con el espécimen, inmerso en una solución al 5% en peso de NaCl.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La nomenclatura empleada para representar los resultados y el análisis de resultados se muestra en la tabla I.

Tabla I Nomenclatura empleada en el proceso experimental

Clave	Porcentaje de Material Sustituido
10CV-10EH	10% cenizas volantes – 10% escoria de alto horno
10CV-10MS	10% cenizas volantes – 10% microsíllica
10MS-10EH	10% microsíllica – 10% escoria de alto horno

Con referencia a los valores de i_{corr} proporcionados por Troconis y col 1997 (tabla II) se puede realizar el análisis de los resultados.

Tabla II - Clasificación de i_{corr}

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1- 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevada
> 1	Muy elevada

En la tabla III se resumen los resultados del análisis estadístico de las series de tiempo de potencial y corriente en la técnica de ruido electroquímico.

Tabla III. Resultados obtenidos del análisis estadístico

Espécimen	Tiempo exposición en solución salina	Rn ($\Omega\text{-cm}^2$)	i_{CORR} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
10CV-10EH	0	183926.248	0.1414
	3 meses	165011.877	0.1576
	4 meses	122973.18	0.2114
10MS-10EH	0	467808.835	0.0556
	3 meses	15338.1122	1.6951
	4 meses	12416.44	2.0939
10CV-10MS	0	93943.8286	0.2768
	3 meses	223444.393	0.1164
	4 meses	1100530.29	0.0236

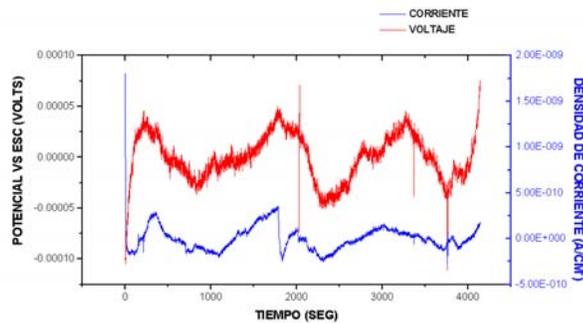
De acuerdo con los resultados anteriores, en las dos mezclas que contienen escoria de alto horno la velocidad de corrosión va en aumento conforme transcurre el tiempo de exposición en la sal; sin embargo, la que mayores o muy elevadas velocidades de corrosión presenta es la mezcla con 10% de microsíllica y 10% de escoria; las otras dos se encuentran en el rango de velocidades despreciables a moderadas; la que menor velocidad presenta es la que contiene 10% de cenizas volantes y 10% de microsíllica, lo que es de esperarse debido a las propiedades que confieren ambos materiales en cuanto a la reducción de poros en la masa del concreto.

Las pendientes obtenidas para los espectros de potencia son los siguientes:

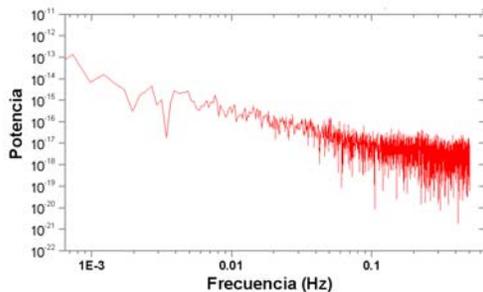
Tabla IV Pendientes obtenidas de los espectros de frecuencia

Espécimen	Tiempo exposición en sal	Pendiente (dB[V]/década)	Pendiente (dB[A]/década)
10CV-10EH	0	-1.18721	-0.5119
	3 meses	-0.91985	-1.9815
	4 meses	-0.8846	-0.7449
10MS-10EH	0	-0.66058	-0.18239
	3 meses	-0.8587	-1.92703
	4 meses	-0.2725	-0.4879
10CV-10MS	0	-1.3238	-0.3189
	3 meses	0	0.08286
	4 meses	-1.9988	-1.9598

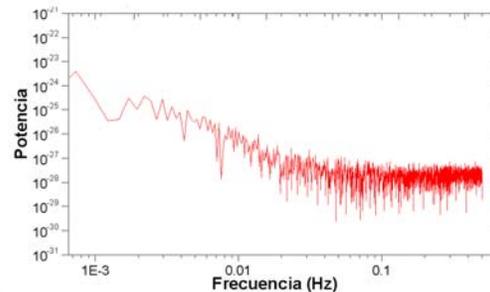
A continuación se muestran algunas gráficas de las series de tiempo y frecuencia obtenidas:



a)



b)



c)

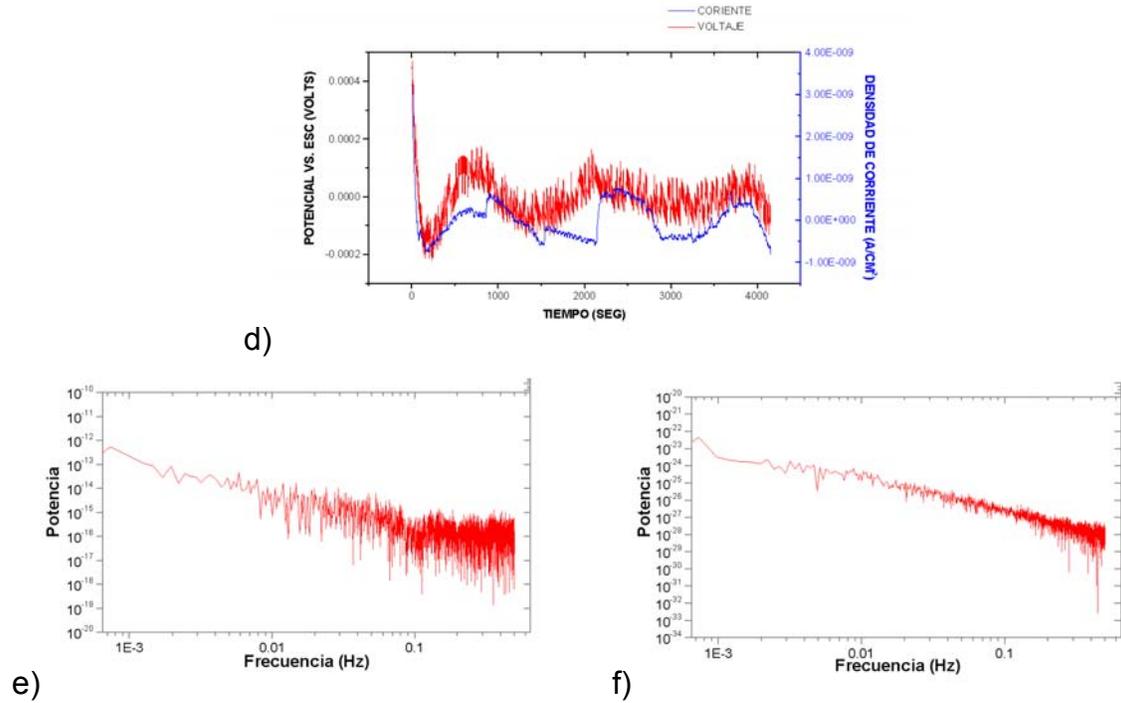


Fig 1. Espécimen 10CV-10EH: a) Series de tiempo; b) Frecuencia del voltaje; y c) Frecuencia de la corriente, a los 0 meses; d) Series de tiempo; e) Frecuencia del voltaje y; f) Frecuencia de la corriente a los 3 meses

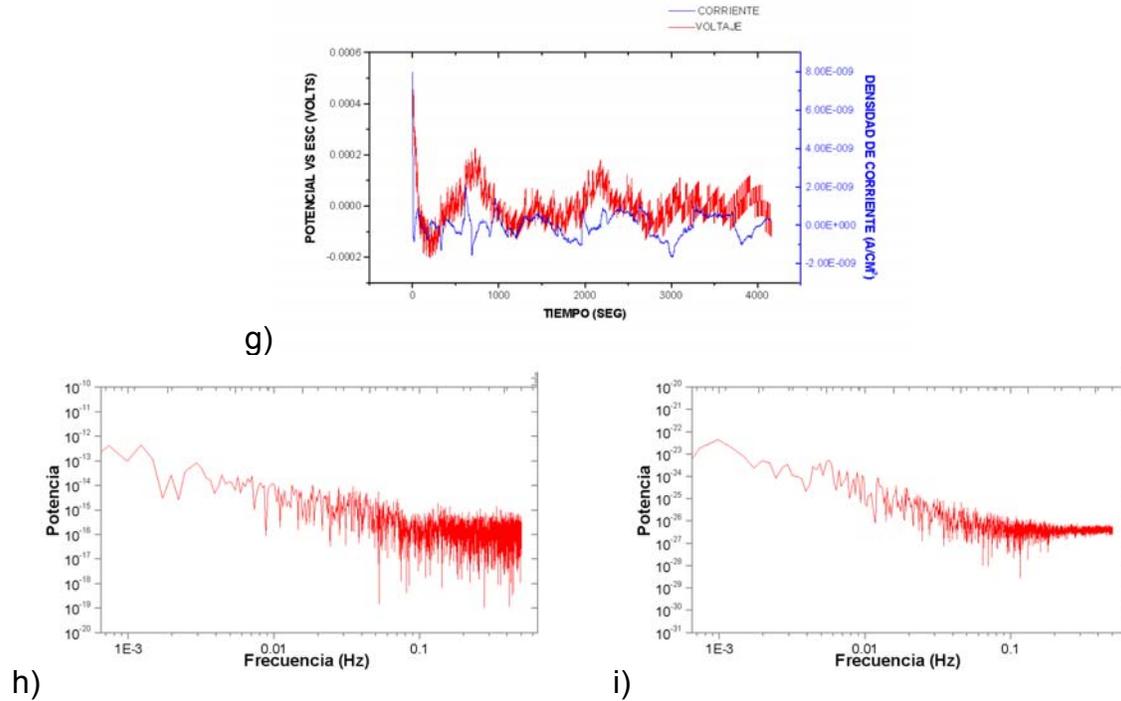
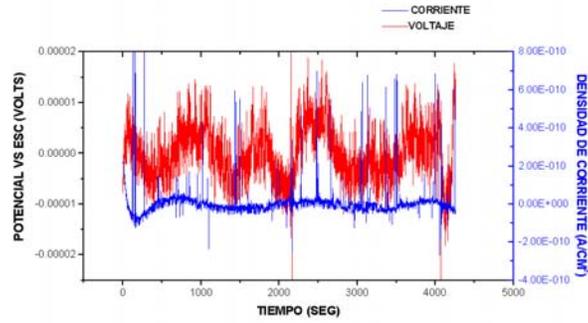
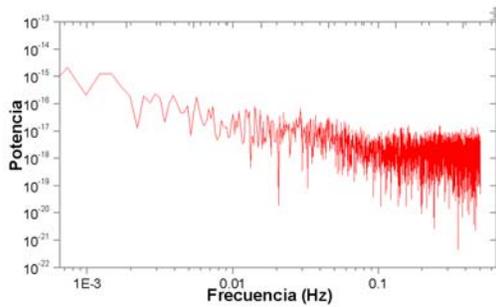


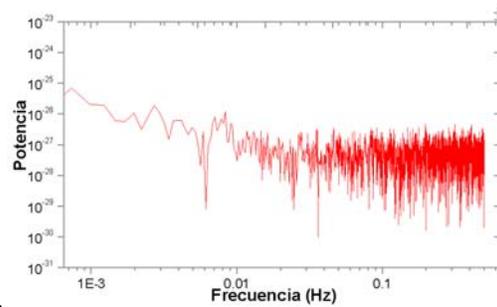
Fig 2. Espécimen 10CV-10EH: g) Series de tiempo; h) Frecuencia del voltaje y; i) Frecuencia de la corriente, a los 4 meses.



a)

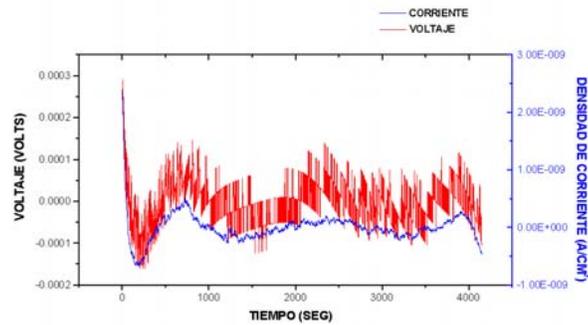


b)

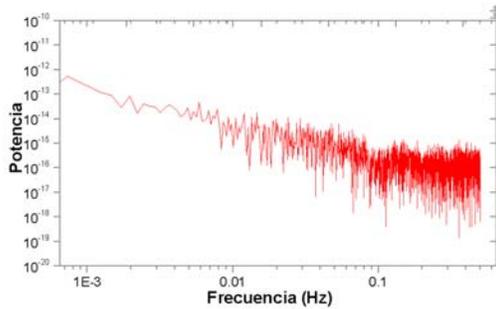


c)

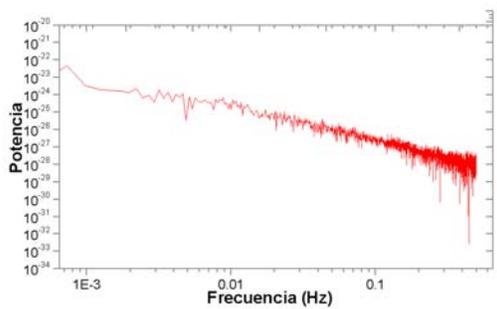
Fig 3. Espécimen 10MS-10CV: a) Series de tiempo; b) Frecuencia del voltaje y; c) Frecuencia de la corriente, a los 0 meses



d)



e)



f)

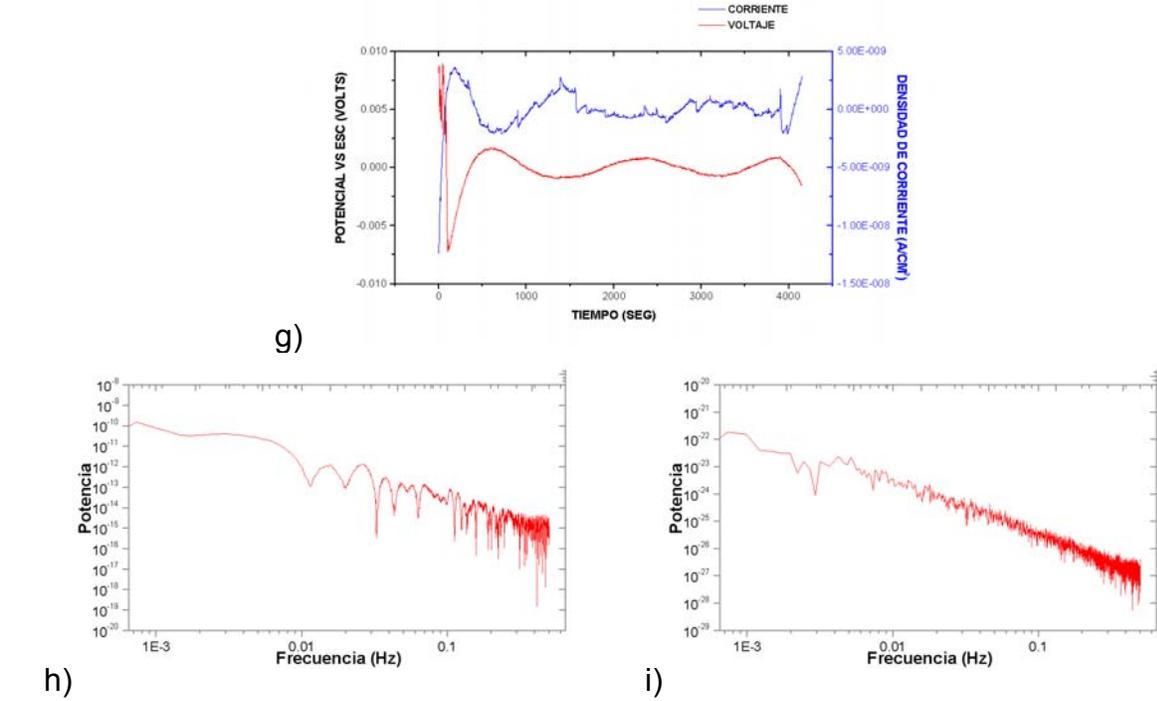
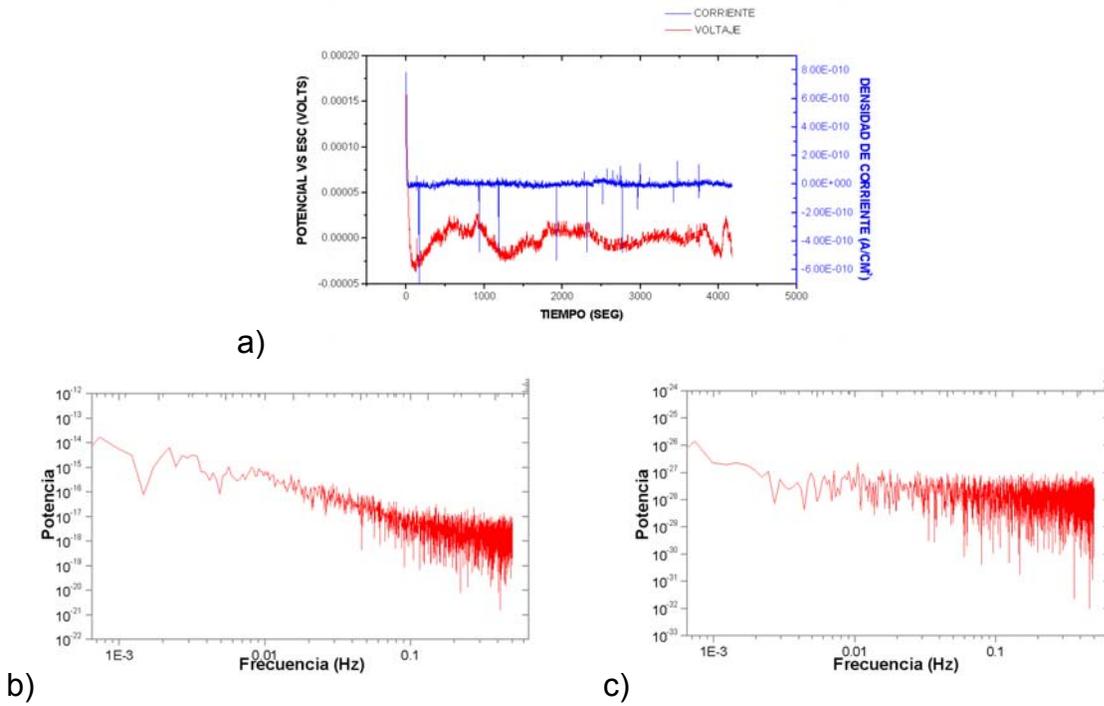


Fig 4. Espécimen 10MS-10CV: d) Series de tiempo; e) Frecuencia del voltaje y; f) Frecuencia de la corriente, a los 3 meses; g) Series de tiempo; h) Frecuencia del voltaje y; i) Frecuencia de la corriente, a los 4 meses



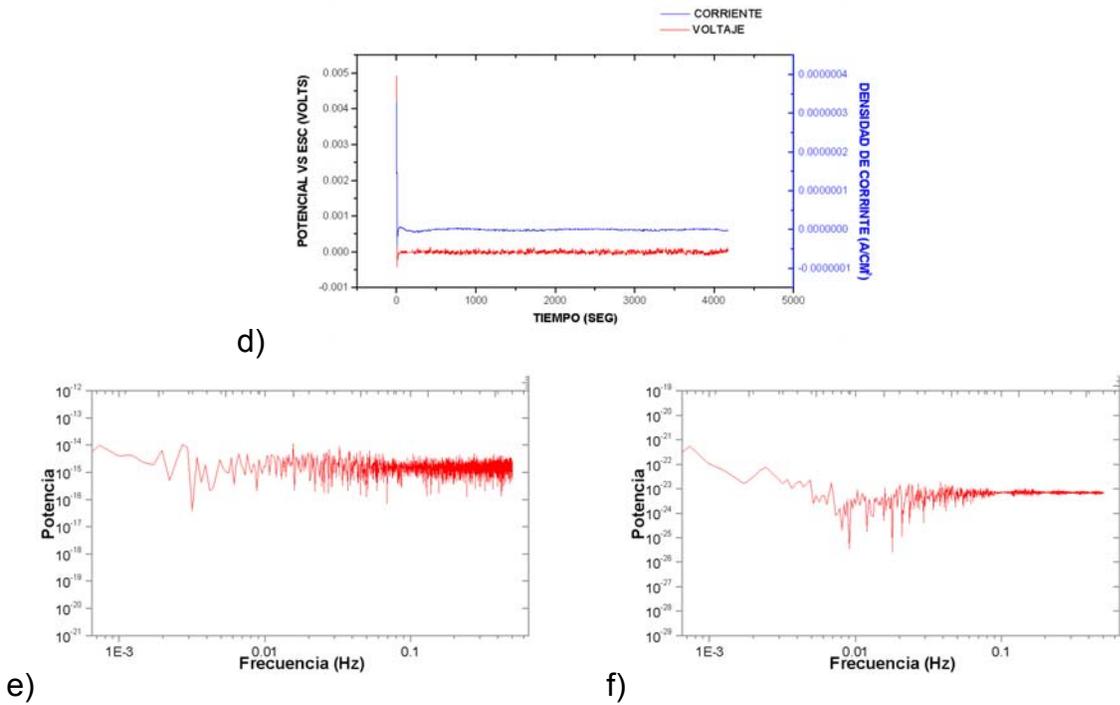


Fig 5. Espécimen 10MS-10EH: a) Series de tiempo; b) Frecuencia del voltaje y; c) Frecuencia de la corriente, a los 0 meses; d) Series de tiempo; e) Frecuencia del voltaje y; f) Frecuencia de la corriente, a los 3 meses

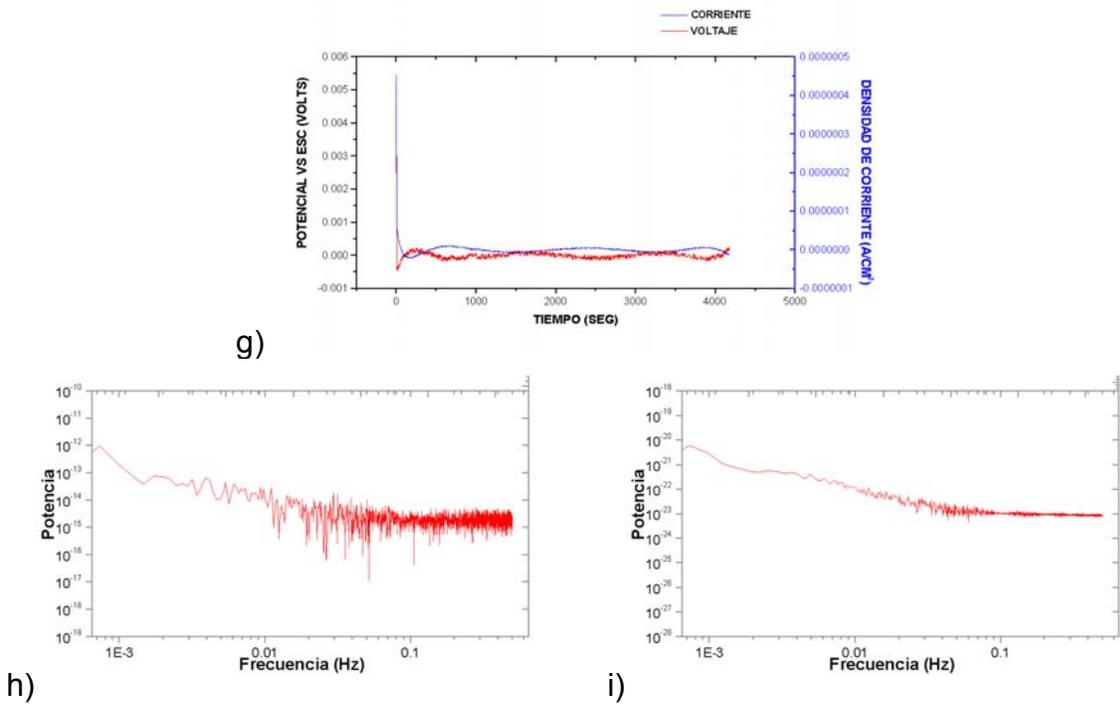


Figura 6. Espécimen 10MS-10EH: g)Series de tiempo; h)Frecuencia del voltaje y; i)Frecuencia de la corriente, a los 4 meses

De los valores de las pendientes, se observa que los valores son pequeños, por tanto, el fenómeno que se presenta es de una corrosión de tipo uniforme (esto se presenta si la pendiente en el espectro de frecuencia del voltaje, se encuentra entre 0 y -7 ; y la pendientes en el de la corriente, se encuentra entre 0 y -7).

A continuación se muestran algunas gráficas representativas de Nyquist de las pruebas de impedancia electroquímica, y los respectivos valores de i_{corr} obtenidos.

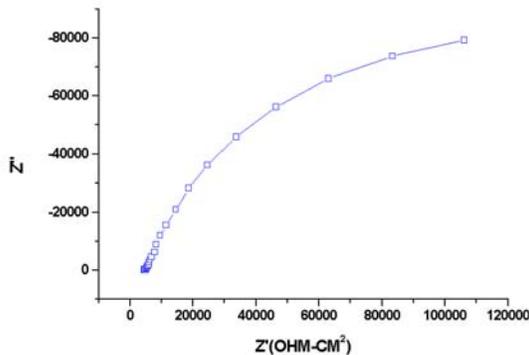


Fig 7. Muestra 10CV-10EH a los 3 meses, $i_{corr}=0.1576 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

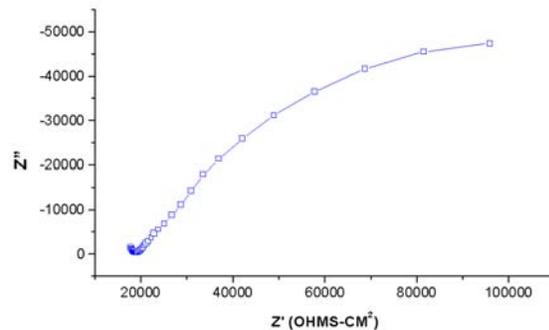


Fig 8. Muestra 10MS-10CV a los 3 meses, $i_{corr}=0.1164 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

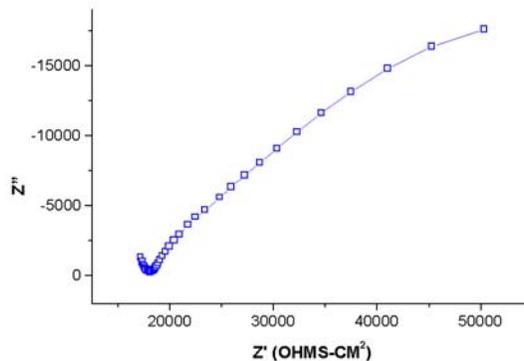


Fig 9. Muestra 10MS-10EH a los 3 meses, $i_{corr}=1.6951 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

De los diagramas de Nyquist se deduce que los fenómenos que se dan son de activación, y que las velocidades de corrosión son aproximadas a las obtenidas con la técnica de ruido electroquímico. Estos valores los proporciona directamente el software del equipo empleado (interface Solartron, software Zplot).

CONCLUSIONES

Los especímenes que menores velocidades de corrosión presentan son los que tiene una mezcla en la que se sustituyó el 20% de cemento en peso, con 10% de cenizas volantes y 10% de microsilica.

El tipo de corrosión que se da en todos los casos es de un tipo uniforme.

Las velocidades de corrosión obtenidas para cada tipo de mezcla son muy parecidas en las dos técnicas; por tanto, se puede tener confiabilidad en lo resultados, ya que los resultados obtenidos después del análisis de los datos de ruido electroquímico, son semejantes a los obtenidos con el software del equipo con el que se aplicó la técnica de impedancia.

REFERENCIAS.

- Butler W B. Durable Concrete Containing three or four Cementitious Materials. SP 170-15. *Durability of Concrete*. ACI. (1997)
- Cao HT Jedy M, and Rahimi M. Properties of High Strength Concrete using Cement Blended with Silica Fume, Fly Ash and Blast Furnace Slag. Concrete Institute of Australia. Concrete '89. Australia, May, (1989)
- Gu P, Beaudoin J J, Zhang M, Malhotra V M. Performance of Reinforcing Steel in Concrete Containing Silica Fume and Blast Furnace Slag Pounded with Sodium Chloride Solution. *ACI Materials Journal*. (2000)
- Hinczack I, and Roper H Ternary Cements, Short and Long-Term Properties. Concrete for the Nineties. Conference Proceedings. Australia, Sep, (1990)
- Hinczak I, Roper H, and South W. Ternary and Quaternary Cement Systems. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. *Supplementary Papers*. (1992)
- Ozyildirim C. Resistance to Penetration of Chlorides into Concretes Containing Latex, Fly Ash, Slag, And Silica Fume. SP 145-26 ACI. Durability of Concrete 3th International Conference. Nice, France, (1994)
- Short N R, y Page C L. The Diffusion of Chloride Ions Trough Portland and Blended Cement Pastes. *Silicates Industries*. (1982)
- Trocónis de Rincón Oladis, y col. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. RED DURAR. Maracaibo, Venezuela. (1997)



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN CONCRETO PROTEGIDAS CATÓDICAMENTE EN UN MEDIO MARINO

M R Sosa, R Camacho, T Pérez, J A González, L R Dzib

Programa de Corrosión del Golfo de México, Universidad Autónoma de Campeche, Av Agustín Melgar s/n, CP 24030, Campeche, Campeche, México.

RESUMEN

Se reporta el avance de un proyecto de investigación en ejecución sobre el estudio de la protección catódica del acero de refuerzo de estructuras de concreto inmersas en agua de mar por medio de dos sistemas: a) ánodo de sacrificio por rociado térmico de zinc; b) corriente impresa. Se utilizaron vigas de concreto rectangulares fabricadas con una relación agua/cemento de 0.65, con y sin NaCl en el agua de amasado. Los valores de potencial del acero de las vigas con rociado térmico de zinc indicaron que dicho sistema no protege adecuadamente al acero, alcanzándose potenciales mínimos de -600 mV vs Ag/AgCl. Por otro lado, el acero de refuerzo en vigas protegidas con corriente impresa presentó valores de potencial de -820 a -920 mV vs Ag/AgCl, lo que indica una protección aceptable.

Palabras clave: protección catódica, concreto, rociado térmico de zinc, corriente impresa

ABSTRACT

Preliminary results of a research in progress dealing with the study of the cathodic protection (CP) of steel rebar embedded in concrete structures immersed in seawater are reported. Two different CP systems were analysed, a) sacrificial anode by Thermal Spraying of Zinc, b) Impressed Current. Rectangular concrete slabs manufactured using a water/cement ratio 0.65, with and without the addition of NaCl in the mixing water. The corrosion potential values of the steel rebar set in the slabs with thermal spraying of zinc indicated that this system does not protect efficiently the steel as the minimum potential reached was -600 mV vs Ag/AgCl. On the other hand, the steel embedded in the slabs protected with impressed current showed potential values from -820 to -920 mV vs Ag/AgCl, which indicated an acceptable protection level.

Keywords: Cathodic protection, concrete, thermal spraying, impressed current.

INTRODUCCIÓN

La corrosión del refuerzo metálico es el principal causante de los mayores problemas en estructuras de concreto, ocasionando grandes pérdidas económicas e incluso de vidas humanas¹. La manera convencional de prolongar la vida útil, es con reparaciones aplicadas a las zonas que hayan presentado agrietamientos y desprendimientos. Sin embargo, los materiales o los procedimientos adoptados para la reparación, no siempre confieren a la estructura las características de durabilidad compatibles con la importancia de la obra, y con los elevados costos de reparación y reconstrucción de las mismas.

En los últimos 10 años, en los Estados Unidos de América se ha utilizado la protección catódica por corriente impresa y ánodos galvánicos para proteger estructuras de concreto armado^{2,3}. Ambos sistemas presentan ventajas e inconvenientes en su instalación, operación y mantenimiento de acuerdo con el tipo de estructura y condición de servicio. Aunque esta información es accesible, en México los estudios al respecto son aún a nivel de laboratorio de investigación que buscan extrapolar sus resultados a condiciones reales, y aprovechar la experiencia de investigadores de otros países. De ahí la importancia de generar información que aporte recomendaciones para la selección y operación del tipo de protección a emplear en las condiciones particulares del país, previo a su instalación y en condiciones de servicio. Es por ello, que el presente trabajo pretende analizar la eficiencia de este sistema alternativo de protección catódica, por rociado térmico de zinc del refuerzo de acero embebido en estructuras de concreto expuestas en agua de mar del Golfo de México.

La protección catódica ha demostrado efectividad en estructuras de acero enterradas. El principio de funcionamiento es una pila galvánica, en la que se hace pasar una corriente eléctrica a una pieza metálica deseada para que se comporte como cátodo por medio de un metal con un potencial más negativo en la serie electromotriz, o utilizando una fuente de poder^{4,5}.

La protección catódica por corriente impresa tiene la ventaja de aplicar corriente suficiente para la protección, pero se requiere mantenimiento constante y está sujeto a interrupciones de suministro de energía para su funcionamiento. No obstante, la versatilidad en la regulación de suministro de corriente a la armadura y la opción de adaptarse a situaciones especiales en estructuras de diferentes formas geométricas han sido criterios de selección determinantes en algunas estructuras reales de gran importancia^{1,2,6}

Varios investigadores^{3,7,8} han realizado estudios en los que encontraron que el aluminio y el zinc tienen mayor eficiencia, y que la resistividad del concreto es fundamental para el funcionamiento de la protección. Holcomb, et al¹, y Brousseau², y Bermúdez⁶ realizaron pruebas con ánodos de aluminio aleado con zinc y estaño rociados térmicamente, mencionando las ventajas en costo y una eficiencia muy elevada.

Con base en lo anterior, el presente estudio pretende generar conocimiento de los sistemas de protección catódica por rociado térmico de zinc y corriente impresa bajo las condiciones ambientales predominantes en Campeche, con la finalidad de mejorar los actuales, y de poder proponer nuevos diseños y modelos de sistemas de protección. Los resultados preliminares han dado datos importantes en cuanto a la poca eficiencia que está presentando la protección por rociado térmico de zinc respecto a la corriente impresa.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Material

Para elaborar las vigas de concreto se utilizó cemento Portland tipo I, triturado de caliza como agregado grueso (grava), polvo de piedra como agregado fino y agua potable. El refuerzo metálico consistió en varillas de acero de 3/8 pulg.

Fabricación de vigas de concreto

Se fabricaron 20 vigas de concreto armado 20 x 20 x 100 cm con una relación agua/cemento de 0.65 de acuerdo con estándares de preparación nacionales e internacionales^{9,10}. El diseño de fabricación utilizado se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de la mezcla de las vigas de concreto armado

Vigas	Contenido de cemento (kg/m ³)	Contenido de polvo de piedra (kg/m ³)	Contenido de grava (kg/m ³)	Contenido de agua (kg/m ³)	Contenido de cloruro de sodio (g/l)
10	125	300	275	82.5	35
10	125	300	275	82.5	0

Las vigas fueron sumergidas en piletas conteniendo una disolución saturada de hidróxido de calcio (cal) durante 28 días (tiempo de curado)¹⁰. Durante este tiempo se realizaron mediciones de potencial de corrosión, aplicando la norma ASTM C-876-91¹¹.

Pre-dañado de la varilla de refuerzo

Conforme a diversos investigadores^{5,12}, se requiere una densidad de corriente superior a 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para corroer el acero embebido en concreto. Las vigas a proteger catódicamente (tabla 2), fueron conectadas en un circuito eléctrico en serie con la finalidad de aplicarle una corriente anódica de 4.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, para corroer un área de 1,500 cm^2 de acero por viga, durante 28 días (polarización anódica). Las vigas se colocaron en agua de mar.

La respuesta del sistema a la corriente anódica aplicada al acero se evaluó midiendo el potencial de corrosión del acero refuerzo de acuerdo con la Norma ASTM C-876-91¹¹.

Aplicación de zinc por rociado térmico

Este procedimiento se aplicó a ocho probetas de trabajo; de éstas, cuatro se prepararon con NaCl en el agua de amasado, y cuatro sin NaCl. La presencia de cloruros en el agua de amasado fue para simular la concentración de cloruros del agua de mar, que eventualmente se utiliza en zonas costeras para preparar las mezclas.

Antes de la aplicación del rociado térmico la superficie de las vigas se preparó mediante de chorro de arena a presión. Lo anterior se ejecutó con el propósito de asegurar la fijación del recubrimiento metálico en el sustrato de concreto. El rociado térmico involucra la fusión e inmediata expulsión a presión de partículas microscópicas de zinc fundido las cuales se depositan por impacto mecánico sobre la superficie de las vigas de concreto. Una vez aplicado el recubrimiento de zinc metálico en las cuatro caras de las vigas, se procedió a realizar la conexión entre la capa de zinc y el acero de refuerzo mediante de un conductor metálico que hizo contacto eléctrico con la varilla de acero y la capa de cinc depositado.

Polarización catódica

Después que las vigas se polarizaron anódicamente, se procedió a protegerlas catódicamente mediante rociado térmico de zinc y corriente impresa^{5,13} expuestas a las condiciones indicadas en la tabla 2.

Tabla 2. Condición de exposición de las vigas de concreto

Vigas	Protección por corriente impresa	Protección por ánodo de zinc	Exposición a la atmósfera	Exposición al agua de mar	Contenido de cloruro de sodio (g/l)
10	4	4	1	1	35
10	4	4	1	1	0

Para determinar la cantidad de consumo de corriente por parte del acero, se colocó una resistencia de 10 Ohms entre el zinc y el acero, y entre la fuente de poder y el acero en el sistema por ánodo de sacrificio y por corriente impresa respectivamente. El nivel de polarización en cada sistema de protección fue determinado en base al potencial de corrosión del acero.

Aplicación de corriente impresa

La aplicación de la corriente impresa se llevó a cabo conectando el polo negativo de la fuente de poder al acero a proteger; y el polo positivo se conectó a un ánodo inerte, que en este caso fue una malla de acero.

RESULTADOS

Curado

Una característica del concreto que lo convierte en un medio protector del acero de refuerzo es su elevado grado de alcalinidad, pH (12.5 - 13.5), lo que favorece la pronta pasivación del acero; es decir, acelera inicialmente la corrosión para que se formen óxidos de hierro, mismos que bajo estas condiciones son poco solubles, compactos y homogéneos reduciendo así la velocidad del proceso de corrosión. La fig 1 presenta el potencial de corrosión del acero de refuerzo durante el tiempo de curado. Estos resultados corresponden al promedio de 10 vigas, sin y con contenido de cloruro de sodio, respectivamente.

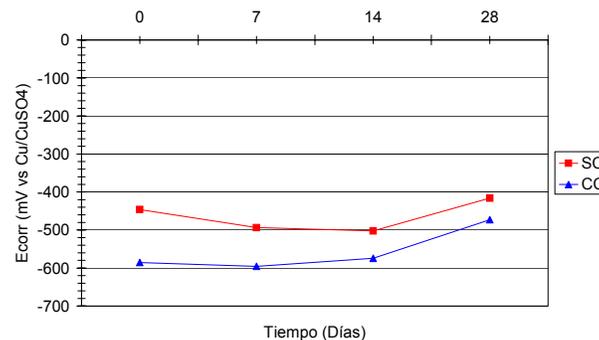


Fig 1. Potencial de corrosión durante el proceso de curado

En la fig 1 se observa que los valores de potencial de corrosión del acero de refuerzo de las vigas fabricadas sin contenido de cloruro de sodio, CS, se encuentran en el intervalo de -400 y -500 mV vs Ag/AgCl, y las vigas fabricadas con cloruro de sodio en el agua de amasado, CC, se encuentran entre -500 y -600 mV vs Ag/AgCl.

Polarización anódica

En la fig 2 se presenta el seguimiento del potencial de corrosión durante la aplicación de la corriente anódica de las vigas sin y con cloruro de sodio (PS y PC) respectivamente, así como las muestras testigo (TS y TC).

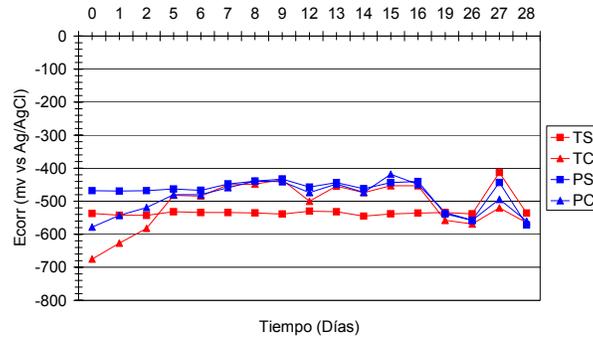


Fig 2. Potenciales de corrosión vs tiempo durante la polarización anódica

Se observa que los potenciales de corrosión del acero de refuerzo en las vigas polarizadas anódicamente, PS y PC, y las vigas testigos, TS y TC, se encuentran en el intervalo de -400 a -600 mV vs Ag/AgCl. Se puede apreciar que el contenido de cloruros y la polarización no afectan su comportamiento. Los potenciales de corrosión obtenidos indican que el acero de refuerzo de todos los sistemas (TS, TC, PS y PC) se encuentra activo. Estos resultados sugieren que la corriente anódica aplicada al acero embebido en concreto para lograr su activación es mínima, puesto que sus valores de potencial son muy cercanos a los que se obtienen con sumergir una estructura de concreto en agua de mar. Sin embargo, el criterio termodinámico es limitado en cuanto a la cinética del proceso que se lleva a cabo en la interfase acero-concreto; y el paso de corriente es indicativo que el material se corroe a mayor velocidad.

Protección catódica

En la fig 3 se presenta el promedio de los potenciales de corrosión del acero bajo ambos sistemas de protección y del acero sin protección catódica, patrón de referencia. Las iniciales TS y TC son las testigos; las CCS y CS son las vigas protegidas por corriente impresa; y las ZS y ZC las vigas protegidas por ánodo de zinc, sin y con cloruro de sodio respectivamente.

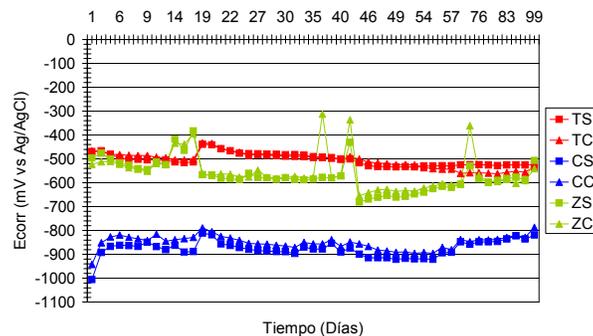


Fig 3. Potencial de corrosión vs tiempo durante la protección catódica

Los potenciales de las vigas testigo, TS y TC, y las vigas polarizadas catódicamente por ánodos de zinc, ZS y ZC, se encuentran en un intervalo de -400 a -600 mV (Ag/AgCl), los cuales corresponden a condiciones de actividad para el acero de refuerzo, es decir, se promueve el proceso de corrosión del acero de refuerzo. Las vigas CS y CC, protegidas catódicamente por corriente impresa, presentan valores de potencial de corrosión en el intervalo de -800 y -900 mV (Ag/AgCl).

Exposición a la atmósfera

La fig 4 corresponde al potencial de corrosión vs tiempo de vigas expuestas a la atmósfera. Las iniciales AS y AC son los dos tipos de vigas sin y con contenido de cloruro de sodio, respectivamente.

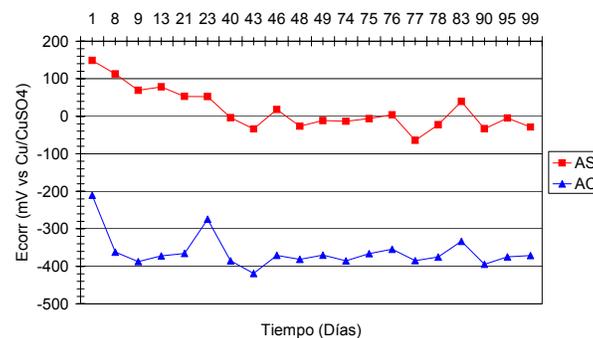


Fig 4. Potencial de corrosión vs tiempo en vigas expuestas a la atmósfera

En esta figura se observa que las vigas fabricadas sin contenido de cloruro de sodio, AS, se encuentran en un intervalo de 200 y -100 mV (Cu/CuSO₄). Se considera que para valores más positivos que -200 mV vs Cu/CuSO₄ la probabilidad de que suceda la corrosión es poca; es decir, el acero se encuentra pasivado o inactivo^{11,12}. Estos valores de potencial indican que el acero se pasivó, manteniendo este comportamiento hasta el final de las mediciones. Por otro lado, las vigas fabricadas con cloruro de sodio disuelto en el agua de amasado, AC, los potenciales se encuentran en general en un intervalo -350 a -400 mV. Comparando los resultados de las vigas elaboradas con y sin cloruros, indican una mayor actividad en las vigas que contienen cloruros.

Consumo de corriente

La fig 5 presenta el consumo de corriente por parte del cátodo (acero de refuerzo), durante la protección catódica por ánodo de zinc y corriente impresa. Las iniciales CS y CCS corresponden a las vigas protegidas por corriente impresa; y las ZS y ZC a las vigas protegidas por ánodo de zinc, sin y con cloruro de sodio, respectivamente.

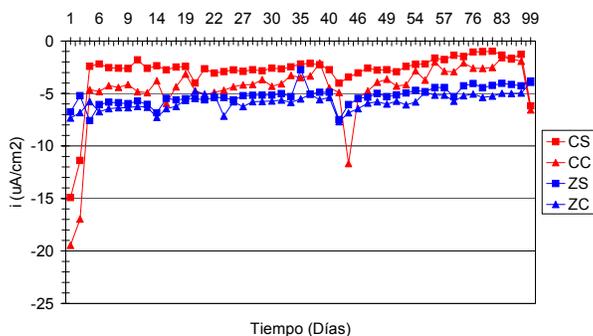


Fig 5. Densidad de corriente vs tiempo durante la polarización catódica

DISCUSIÓN

Curado

Para obtener un concreto de buena calidad, el concreto armado debe ser curado en un ambiente adecuado durante las etapas tempranas de endurecimiento. Se llama curado¹⁰ al procedimiento que se utiliza para promover las reacciones de hidratación de los componentes del cemento. Cuando el concreto está curado totalmente, no es tan vulnerable como cuando se encuentra en estado húmedo, plástico o fresco. Un curado inadecuado reduce la capacidad estructural del elemento y por tanto la durabilidad de éste, además de provocar que la permeabilidad de la estructura se incremente, aumentando el acceso de aire y agua a través de poros, con factibilidad de alcanzar al acero de refuerzo y propiciar así el deterioro de éste.

Los resultados mostrados en la fig 1, indican que el acero de las vigas CS se encuentra menos activo que el acero en las vigas CC, las cuales presentan una mayor actividad. De acuerdo con el criterio propuesto en la Norma ASTM C876-91¹¹, para que el acero esté en estado pasivo debe alcanzar potenciales más positivos a -220 mV vs Cu/CuSO₄. Sin embargo, el acero de refuerzo en ambas condiciones estudiadas, CS y CC, no alcanzó el estado pasivo como lo indican los valores de potencial registrados que fueron más negativos de -350 mV vs Cu/CuSO₄. Estos valores de potencial indican un alto grado de probabilidad de que la corrosión del acero se esté llevando a cabo.

Protección catódica

Uno de los criterios para estimar la eficiencia de la protección catódica considera que una estructura de acero está protegida catódicamente, cuando su potencial se encuentra en un rango de -800 a -950 mV vs Ag/AgCl. Los resultados de potencial de corrosión obtenidos sugieren que el rociado térmico de zinc no protege al acero de refuerzo en las vigas de concreto; a diferencia del sistema de protección por corriente impresa, que sí logra proteger al acero de refuerzo.

Exposición a la atmósfera

Con base en los resultados mostrados en la fig 4 se observa claramente el efecto del contenido de cloruros y el efecto del medio¹⁵, que es el factor principal sobre el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo. En relación con las vigas testigos, sumergidas en agua de mar sin protección catódica (fig 3, TS y TC), se concluye que éstas están mucho más activas que las expuestas a la atmósfera. No obstante, las vigas con cloruros expuestas a la atmósfera presentan potenciales activos.

Consumo de corriente

En la fig 5 se observa que las vigas polarizadas por corriente impresa, CS, presentan valores mayores a $-5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Los valores inferiores al inicio del estudio se relacionan con el proceso de activación del acero en las vigas, por lo cual demandó un mayor consumo de corriente. En cuanto a las vigas polarizadas mediante ánodo de zinc se observa un mayor consumo de corriente catódica, por debajo de $-5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; no obstante, no se logran alcanzar potenciales de protección, (fig 3).

Por otra parte, también se observa en ambos casos el efecto sobre el contenido de cloruro, el cual es perjudicial al sistema ya que tiende a romper la película pasiva sobre la varilla del acero de refuerzo y activar el proceso de corrosión, por lo que la demanda de corriente aumenta.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que el sistema de protección catódica por corriente impresa ofrece una subjetiva protección contra la corrosión al acero de refuerzo, respecto al sistema de protección catódica por ánodo de zinc. Las vigas testigo (exposición en agua de mar y atmósfera), apoyan en la interpretación del comportamiento electroquímico de las vigas protegidas por protección catódica.

REFERENCIAS

1. R G Holcomb, C B Cryer, "Cost of Impressed Current Cathodic Protection for Coastal Oregon Bridges", *Materials Performance*, V. 37, No. 9, (1998)
2. R Brousseau, B Baldock, G Pye and Ping Gu, "Sacrificial Cathodic Protection of a Concrete Overpass Using Metallized Zinc: Latst Update", *NACE Corrosion Congress '97*, Paper No. 239, (1997)
3. M Funahashi, S F Daily, W T Young, "Performance of Newly Developed Sprayed Anode Cathodic Protection System", *NACE Corrosion Congress '97*, Paper No. 254, (1997)
4. Fontana M. G., "Corrosion Engineering". Third Edition. Mc Graw-Hill Publishing Company. Chapter three, (1967)

5. M K Theodore. Cathodic protection criteria. A literature survey papers selected and reviewed by NACE task group T-10-1 on review of RP0169-83, (1989)
6. C M Bermúdez, L O Aguirre, C Vásquez y H Castillo, "Protección Catódica del Concreto en ambientes Salinos Utilizando Ánodo de Sacrificio de Aluminio", 2nd Latinamerican Region Corrosion Congress, No. LA 96006, (1996)
7. D A Whiting, M A Nagi and J P Broomfield, "Laboratory Evaluation of Sacrificial Anode Materials for Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridges", Corrosion, V. 52, No. 6, (1996)
8. W H Hartt, "Analytical Evaluation of Sacrificial Anode Cathodic Protection systems for Steel in Concrete", NACE Corrosion Congress '97, Paper No. 252.
9. ACI 211.1, Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal and Heavyweight Concrete.
10. NOM C-159-85, Concreto Elaboración y Curado en Laboratorio de Especímenes.
11. ASTM C876-91-10, Half-cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete.
12. Manual de Inspección. Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Red Temática XV.B DURAR, 2a. Edición, Jul, (1998).
13. M Pourbaix, Corrosion Science 14, 25, (1974)
14. R J Kessler, R G Powers and I R Lasa, "Cathodic Protection Using Zinc Sheet Anodes and an Ion Conductive Gel Adhesive", NACE Corrosion Congress '97, Paper No. 234
15. Luis R Dzib Pérez, Influencia de la Corrosividad Atmosférica sobre el Comportamiento Electroquímico de Acero Desnudo y Acero Pintado, Tesis profesional de Q.F.B., Univ. Aut. de Campeche, (1997)



ALCONPAT

1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

CARACTERIZACIÓN DE BARRAS DE ACERO INOXIDABLE EN CONCRETOS CONTAMINADOS POR CLORUROS

Augusto J Ramírez Rentarías, Gerardo R Serrano Gutiérrez*

Facultad de ingeniería.* División de Posgrado, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro, Qro. 76000, México.

ramirez.aug@gmail.com, rsguti@uaq.mx

Andrés A Torres Acosta, Miguel Martínez Madrid

Instituto Mexicano del Transporte. Km. 12 Carretera Querétaro-Galindo,
Sanfandila, Querétaro, México.

atorres@imt.mx, miguel.martinez@imt.mx

RESUMEN

En la península de Yucatán (México), se ha reportado la existencia de un muelle construido en 1937-1941, en el cual se utilizó acero inoxidable tipo 304 como material de refuerzo por temperatura, que hasta la fecha se encuentra en buenas condiciones en comparación con otro muelle construido en 1970 en el mismo lugar, usando acero al carbón, el cual se encuentra fuera de servicio por los daños de corrosión que presenta. En inspecciones realizadas a dicha estructura durante 2003-2004, se observó la existencia de barras lisas de acero inoxidable tipo 304, mostrando éstas signos de corrosión marginal principalmente en los ganchos. Por consiguiente, en este trabajo se estudia el comportamiento de acero inoxidable 304 y 316 en concreto contaminado por cloruros y aplicándole esfuerzo por tensión a las barras mediante la formación de ganchos de 90° y 180°, y se compara con resultados de barras rectas sin esfuerzo residual alguno.

ABSTRACT

In the Yucatan Peninsula (Mexico), it has been reported the existence of a pier built between 1937-1941, using stainless steel as shrinkage reinforcement, which up to date, presents good conditions in comparison with another pier built in 1970 in the same place, using low carbon steel, which is out of service due to corrosion. In inspections performed to the pier during 2003-2004, it was observed the existence of type 304 stainless steel smooth bars, showing few signs of corrosion mainly at the anchorage hooks. Consequently, in this work, a study was performed with 304 and 316 stainless steel hook bars (90° and 180°) in chloride contaminated concrete compared with straight bars without any residual deformation.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es innumerable el número de estructuras de concreto reforzado dañadas por corrosión. En base al elevado costo de mantenimiento continuo, se ha planteado la búsqueda y el diseño de estructuras altamente resistentes a ambientes agresivos. En Estados Unidos, el costo anual directo por corrosión es de 276 billones, que representa el 3.1% del PIB en EE.UU. [1]

Como opción para disminuir los costos de mantenimiento de estructuras de concreto se plantea el uso del acero inoxidable. Este acero de bajo carbón (menos del 1%) contiene cantidad de cromo al menos del 10,5 % de su peso [2]. El contenido de cromo permite que se genere una película de óxido de cromo invisible que se forma en la superficie de la barra y hace que el material se encuentre "pasivo" y resistente a la corrosión, incluso cuando una cantidad muy pequeña de oxígeno está presente [3]. La resistencia a la corrosión y otras propiedades de los aceros inoxidables son incrementadas utilizando concentraciones mayores de cromo, o adicionándole otras como molibdeno, níquel, etc. Los aceros inoxidables más comunes son el 304 (el de mayor uso), el 310 (usó para las temperaturas altas), el 316 (tiene la resistencia de corrosión buena).

Las primeras investigaciones sobre el comportamiento de barras de acero inoxidable en concreto contaminado con cloruros se originaron a mediados de los años 70, los cuales fueron desarrollados por Browne et al. [4] utilizando probetas de concreto de alta porosidad (relación agua cemento, a/c, de 0,6 y 0,75), mezcladas con cloruros de 0 a 3,2% (en base al peso del cemento), con un recubrimiento de 10 a 20 mm. de concreto. Después de 10 años de exposición, los aceros inoxidables (304 y 316), no sufrieron daños por corrosión, mostrando buen comportamiento en concretos con contaminación del 1% de cloruros por peso del cemento. Bertolini et al. [5], estudiaron los efectos de los diferentes factores de corrosión del acero inoxidable. Las pruebas se llevaron a cabo en barras de acero inoxidable (304 y 316). El concreto utilizado era mixto con 400 kg/cm³ de caliza-Portland con una relación a/c de 0,55. La velocidad de corrosión de los aceros inoxidables 304 y 316, en concreto contaminado con 5% cloruro (en base al peso del cemento) fue despreciable, incluso bajo condiciones de exposición típico de ambientes muy agresivos de temperatura y humedad [5]. Hasta el momento, las investigaciones efectuadas alrededor del mundo, acerca del tema, coinciden en que los aceros inoxidables (304 y 316) ofrecen una alta resistencia a la corrosión en ambientes considerablemente agresivos. Cabe hacer mención que estas pruebas experimentales se han realizado principalmente en barras rectas, por lo que a la fecha no existen pruebas de corrosión en barras sometidas a esfuerzos residuales.

En la Península de Yucatán (México), se ha reportado la existencia de un muelle construido en 1937-1941, utilizando acero inoxidable tipo 304 como material de refuerzo, que hasta la fecha se encuentra en buenas condiciones en comparación con otro muelle construido (1970 en el mismo lugar) usando acero bajo en carbono, el cual se encuentra completamente destruido.

En inspecciones realizadas a dicha estructura durante el periodo 2002-2004, se observó la existencia de barras de acero inoxidable “304”, mostrando éstas signos de corrosión principalmente en los ganchos. Es común que el acero inoxidable tenga problemas de corrosión bajo esfuerzo tomando en cuenta la presencia de cloruros [5]. Al acondicionarse los ganchos a 90° ó 180°, en los extremos de las barras para mejorar la adherencia de éstas al concreto, se generan esfuerzos de tensión/compresión en el acero. Además, durante las inspecciones realizadas al muelle se han determinado concentraciones de cloruros de entre 1% y 2% por peso del concreto, a la profundidad de la barra de refuerzo (10 cm.), lo que hace suponer que el acero inoxidable en esta construcción es susceptible a la corrosión.

Así, el objetivo de esta investigación es demostrar que los esfuerzos a tensión producidos en los ganchos y dobleces de las barras de acero inoxidable, pueden disminuir la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables 304 y 316. Para ello se fabricaron probetas de concreto contaminadas con cloruros y reforzadas con aceros inoxidables 304 y 316. La resistencia a la corrosión de estos aceros, en las condiciones de esfuerzo, fue evaluado utilizando técnicas electroquímicas como son mediciones de potencial de media celda y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE), comparando así los parámetros electroquímicos entre barras rectas y dobladas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Para la caracterización del acero inoxidable se elaboraron 8 probetas prismáticas con dimensiones de 200 x 100 x 50 mm siguiendo la geometría utilizada en estudios anteriores [6, 7]. Estas probetas alojaron 3 barras de acero inoxidable de $\frac{3}{8}$ pulg y un electrodo de referencia de titanio de 30 mm de longitud. La Figura. 1 presenta las dimensiones y disposición de las barras en los prismas. Los prismas incluían tres barras de acero inoxidable, a dos de las cuales se les aplicaron esfuerzos residuales de tensión mediante la deformación de éstas en ganchos de 90° y 180°. Una tercera barra recta se colocó longitudinalmente en el prisma, a la cual no se le aplicó esfuerzo alguno. En la tabla 1, se presenta el número de barras utilizadas y sus condiciones.

El diseño de la mezcla, se realizó simulando la estructura del muelle Progreso en Yucatán, México, el cual tiene una resistencia característica de 25 MPa, y sus proporciones se elaboraron utilizando la proporción mostrada en la tabla 2. La contaminación del 1 y 2% en peso del concreto se seleccionó también en función de los datos recabados en las inspecciones realizadas al muelle de Progreso

Para este diseño y elaboración de los prismas se tomó un tiempo de curado de 28 días. Una vez curados los prismas se procedió a estabilizar sus propiedades electroquímicas en ambiente de laboratorio con una humedad relativa de 60% a 65%, en un periodo de 75 días.

Posteriormente se colocaron en una cámara de humedad controlada por un periodo de 200 días, la humedad relativa fue de 85% a 90% con una temperatura promedio 20 ± 5 ° C, tratando de simular un ambiente marino similar al de Progreso Yucatán, México.

Las pruebas electroquímicas realizadas fueron: potencial de media celda; y EIE. Estas medidas de potenciales se determinaron aplicando la Norma ASTM C-876-95 [8]. Para la medición en los 275 días de experimentación se utilizó un voltímetro de alta impedancia. Las mediciones se realizaron vs. electrodo de referencia interno de Titanio activado (Ti/TiO₂) cada determinado tiempo. Estos potenciales fueron convertidos a potenciales Vs. Cobre Sulfato de Cobre (CSC) realizando mediciones de calibración periódicas entre el electrodo interno de Ti/TiO₂ y el de CSC. Las mediciones de EIE se realizaron mediante un potenciostato/Galvanostato/ZRA. Los ensayos de EIE se realizaron con una frecuencia inicial de 300 kHz. y una frecuencia final de 2 mHz. Con una amplitud de 10 mV. Los datos experimentales fueron simulados utilizando un circuito equivalente tipo Randles (resistencia en serie con un capacitor en paralelo con otra resistencia).

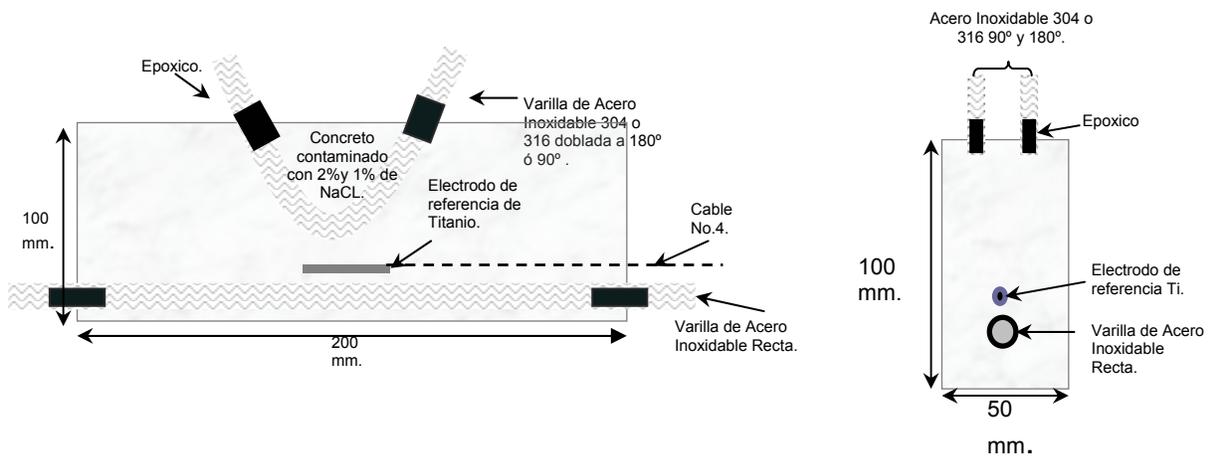


Fig 1. Ubicación del acero, dentro de las probetas realizadas con acero inoxidable 304 y 316; barras longitudinales y barras a 90° y 180°.

Tabla 1. Barras de acero inoxidable utilizado en la experimentación

Acero Inoxidable	Barra rectas	Gancho a 90°	Gancho a 180°
304	6	4	4
316	2	4	4
Total de varillas utilizadas			24

Tabla 2. Proporción de materiales para la elaboración de las probetas

Materiales Para el concreto	Proporciones Kg / m³
Cemento	445
Grava	885
Arena	987
Agua	201
NaCl 1%	25.18
NaCl 2%	50.36

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los Materiales

La resistencia a la compresión a 28 días del concreto utilizado en la fabricación de los prismas fue estimada utilizando cuatros cilindros de 10 x 20 cm. El valor obtenido fue de 22 y 16 MPa, para los concretos con 1% y 2% de cloruros. La composición química de las barras de acero inoxidable 304 y 316 utilizadas en esta investigación cumple con la norma AISI-SAE.

Pruebas Electroquímicas

Las medidas de potenciales informan sobre la posibilidad de corrosión de la armadura de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados respecto a las condiciones de humedad, contaminación, calidad del concreto, etc. [10]. Según el criterio de valoración de potenciales del acero al carbón en concreto Vs. CSC, establecido en el Manual de la Red DURAR y de acuerdo a las condiciones del medio de exposición se sabe que [11]:

- Si el potencial vs. CSC se encuentra entre ± 200 mV. En condiciones de bajo contenido de cloruro, un pH $> 12,5$ y alto contenido de humedad relativa, el espécimen se encontrará pasivo con un riesgo de daño despreciable. Si por el contrario, el medio posee una elevada humedad relativa, altas concentraciones de cloruros en presencia de oxígeno y los potenciales oscilan entre -200 y -600 mV, existe un alto riesgo de daño y la posibilidad de ataque por corrosión localizada. Cabe aclarar que estos valores fueron obtenidos para acero al carbón y a la fecha no se ha generado norma alguna para el acero inoxidable, por lo que se tomará como válido este criterio para este caso.

Las fig 2 y 3 muestran el comportamiento desarrollado en los aceros 304 y 316 contaminados con un 2% de NaCl. Se presentan en esta publicación los valores para 2% únicamente, ya que los prismas que tienen una contaminación del 1% presentan datos similares. En estas figuras se muestran los valores de potencial tanto para barras

rectas, así como para los ganchos de 90° y 180°. Tomando lo establecido por las normas ASTM C-876 y el manual DURAR, se determinó que los valores demostraban que las varillas se encuentran en estado pasivo al tener lecturas de -200 mV vs. CSC, estos valores fueron muy similares a las barras dobladas, por lo que no se encontró diferencia importante alguna. Cabe mencionar, que estos valores corresponden, según los criterios seguidos, a valores de potencial de acero al carbón pasivo.

Con los resultados de las pruebas de EIE aplicada al sistema evaluado se generaron tres diagramas: Bode Magnitud, Bode Fase y Nyquist. Éstos permitieron estudiar los parámetros electroquímicos mediante modelos de circuitos equivalentes y ajustes matemáticos. Los resultados obtenidos para los ganchos a los 270 días permitió definir diferentes procesos en la interfase metal/electrolito, y de esa manera conocer la resistencia a la polarización aparente (R_p) y los valores de Capacitancia (C). Los promedios obtenidos se presentan en la tabla 3.

Se puede observar de la tabla 3 que los valores de R_p aumentaron al transcurrir el tiempo de experimentación en todos los casos, implicando que ambos tipos de acero (304 y 316) fueron formando alguna capa de óxido en la superficie que hizo que las barras se pasivaran. Los valores de R_p obtenidos se calcularon considerando el área total de la barra de refuerzo en contacto con el concreto como activa, lo cual no corresponde a las condiciones normales de corrosión de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros que presenta un fenómeno de corrosión muy localizado [5, 7]. En estudios previos utilizando barras de acero inoxidable 304 y 316 rectas en concreto y soluciones de hidróxido de calcio se obtuvieron valores de R_p de entre 7,600 y 29,800 $\text{K}\Omega\text{cm}^2$ (promedio 9,400 $\text{K}\Omega\text{cm}^2$) cuando permanecieron pasivas, y entre 4,400 y 10,300 $\text{K}\Omega\text{cm}^2$ (promedio 6,730 $\text{K}\Omega\text{cm}^2$) para barras activas [7].

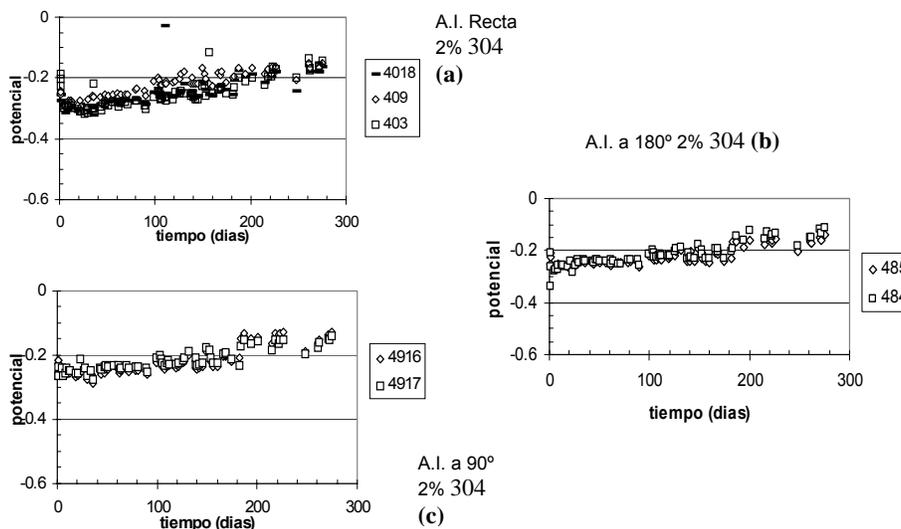


Fig 2. Lecturas de potencial eléctrico del acero inoxidable 304, el cual se encuentra contaminado con 2% de NaCl. En las tablas de potencial, (a) varillas rectas; (b) a 180°; y (c) a 90°, comportamiento del acero inoxidable vs. respecto al tiempo (275 días).

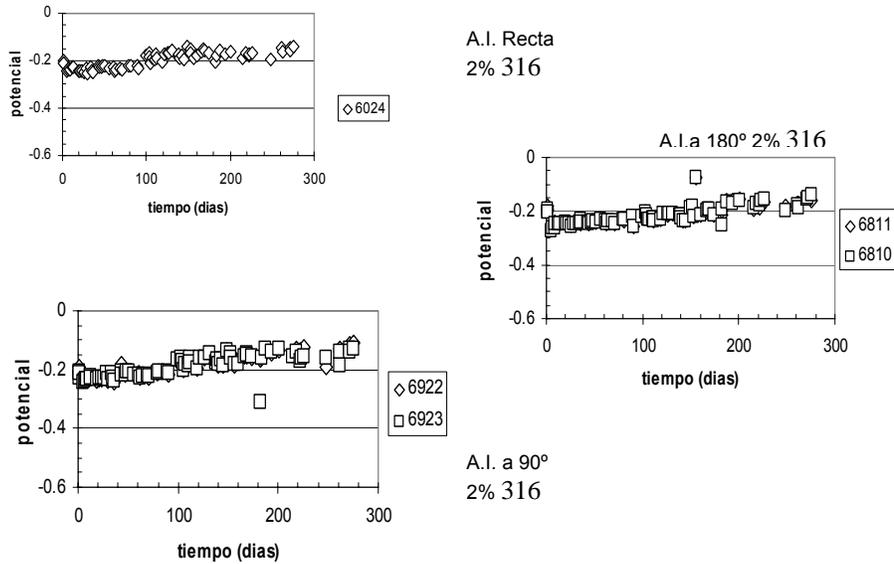


Fig 3. Lecturas de potencial eléctrico del acero inoxidable 316, el cual se encuentra contaminado con 2% de NaCl. En las tablas de potencial, (a) varillas rectas, (b) a 180° y (c) a 90°, comportamiento del acero inoxidable vs. respecto al tiempo (275 días).

Cabe señalar que los valores de Rp obtenidos por Millano [7] no poseen una gran diferencia entre lo que llamaron acero pasivo y activo (< 28%). Los valores de Rp obtenidos en este estudio (menores que 4,600 KOhms-cm²) para barras rectas son del orden de acero activo presentes en investigaciones previas [7]. De la tabla 3 se puede observar que los valores de Rp (270 días) para barras de acero tipo 316 en ganchos de 180° son los más bajos, lo cual implicaría que estas barras son más susceptibles a corroerse aceleradamente por esfuerzos residuales. Esto deberá ser comprobado con mayores datos.

Tabla 3. Valores promedio de Rp y capacitancia (promedio de dos barras)

Especímen	EIE a los 22 días		EIE a los 181 días		EIE a los 270 días	
	Rp kΩ-cm ²	C μF/cm ²	Rp KΩ-cm ²	C μF/cm ²	Rp KΩ-cm ²	C μF/cm ²
304_R 1%	2829	143	3858	95	4615	113
316_R 1%	1618	173	2460	99	3329	149
304_R 2%	2429	135	3574	102	3983	132
316_R 2%	1693	191	2787	99	3898	152
304_90° 1%	2639	127	2568	92	3995	112
316_90° 1%	1206	186	2428	104	3231	154
304_90 2%	2615	125	3852	93	4432	117
316_90° 2%	1464	186	2579	107	3161	149
304_180° 1%	2855	96	3648	63	4660	85
316_180° 1%	1859	154	2588	64	2841	117
304_180° 2%	2527	90	4252	60	3657	95
316_180° 2%	1646	158	2869	76	2718	113

Donde: R= Barras rectas; Rp = Resistencia a la polarización; C = Capacitancia

Los valores obtenidos de la capacitancia (tabla 4) fluctuaron entre 60 y 200 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, siendo que los valores más pequeños se observaron en los ganchos de acero tipo 304. Tomando como referencia valores de investigaciones anteriores de capacitancia para acero al carbón [11-13] y acero inoxidable [7] que fluctuaron entre 20 y 50 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para acero al carbón pasivo, 100 y 265 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para acero al carbón activo, 1 y 4 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para inoxidable pasivo y 20 y 65 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para inoxidable activo, se puede inferir que mientras menor es el valor de la capacitancia del circuito equivalente utilizado para simular los datos de EIE, el acero se encuentra en estado pasivo. Los valores de capacitancia para barras rectas obtenidos en esta investigación fueron todos mayores de 100 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ que corresponderían a acero activo. Para el caso de ganchos a 180° con barras de acero tipo 304, los valores de capacitancia fueron menores de 100 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ (90 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ en promedio) indicando menor actividad de corrosión, aunque la diferencia es marginal.

CONCLUSIONES.

Los resultados hasta ahora obtenidos han demostrado que los aceros inoxidables tipo 304 y 316 no presentan problemas de corrosión en concretos con alta contaminación por cloruros de hasta 2% en peso. Esto apoya la versión que las barras de acero en el muelle de Progreso, ubicado en Yucatán, México, no se encuentren aún mostrando signos de corrosión. Hasta ahora los resultados muestran diferencias marginales en el comportamiento electroquímico entre barras rectas de inoxidable y barras que presentan esfuerzos residuales (formación de ganchos), aunque se pudo observar que a 270 días de exposición en este ambiente, las barras de inoxidable 316 presentan una leve disminución de su resistencia a la corrosión cuando son utilizadas como ganchos a 180°. Por otro lado, las barras inoxidables tipo 304 presentaron valores de capacitancia menores que las otras condiciones cuando están siendo usadas como ganchos de 180°, indicando así un comportamiento de mayor pasividad que los otros casos estudiados.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen al proyecto CONACYT U42362-K "Facilitating Collaborative Research in the Americas: the materials science of portland cement-based materiales," y por las facilidades otorgadas para la participación en el simposio Fib 2005. Y al Instituto Mexicano del Transporte, por brindar sus laboratorios en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural. Las opiniones y resultados en esta publicación son de los autores.

REFERENCIAS.

- [1] Koch GH, Brongers, M P H, Thompson, N G, Virmani, Y P, and Payer, J H, "Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States," Federal Highway Administration, Final Report No. R315-01, Springfield, VA, March, (2002)
- [2] Uso selectivo del acero inoxidable. Internet: www.arminox.com.au
- [3] Aceros inoxidables. Desarrollo y aplicaciones, Internet: www.monografia.com
- [4] B L Brown, D Harrop, K W J Treadaway, Corrosion testing of steel for reinforced concrete, Building Research Establishment, Garston, 45/78, (1978)
- [5] Bertolini Luca, Gastaldi Matteo, Pedefferri P, Redaelli E, "Factors influencing the corrosion resistance of austenitic and duplex stainless steel bars in chloride bearing concrete", Dipartimento di Chimica Fisica Applicata, Politécnico de Milano, Milano, Italia, (2002)
- [6] Moreno, E I, "Carbonation of blended cement concretes," Disertación Doctoral, University of South Florida, Tampa, Florida, EE.UU, (1999)
- [7] Millano, V, "Estabilidad de la película pasiva de los aceros inoxidables austeníticos 304 y 316 en concreto carbonatado o contaminado con cloruros", Trabajo especial de Magíster scientiarum en corrosión", May, (2004)
- [8] ASTM C876 – 95 "Test Method for Half - Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in concrete". ASTM, Philadelphia, (1999)
- [9] Sagües A A, Peach-Canul M A, "Corrosion macrocell behavior of reinforcing steel in partially submerged concrete columns". Corrosion Science, Vol. 45, (2003)
- [10] DURAR, "Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en Estructuras de Concreto Armado". CYTED, Tercera Edición Ago, (2000)
- [11] J A Gonzalez, J M Miranda, N Birbilis, and S Feliu , "Electrochemical Techniques for Studying Corrosion of Reinforcing Steel: Limitations and Advantages", the journal of science and engineering Corrosion. Vol. 61, No.1 Jan, (2005)
- [12] M Saremi, E Mahallati, "A Study on chloride-induced depassivation of mild steel in simulated concrete pore solution", Cement and Concrete Research Pergamon, Vol. 32, June, (2002)
- [13] Glass, Page, Short, Zhaug (1994) "The analysis of potentiostatic transients applied to the corrosion of steel in concrete. Vol. 39, No.9, Sep, (1994)



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

DURABILIDAD DEL SISTEMA ACERO-CONCRETO Y SU RELACION CON LA ACCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE EN UNA ZONA URBANO-INDUSTRIAL.

Rodríguez-Ramírez M, Almeraya-Calderón F, Orozco C V M, Borunda T A, Lardizabal D, Gaona-Tiburcio C y Martínez-Villafañe A

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S C, (CIMAV)
División de Deterioro de Materiales e Integridad Estructural/Grupo Corrosión
Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua 31109, Chihuahua, Chih., México

A. Torres Acosta

Instituto Mexicano del Transporte, Km. 12 Carretera Querétaro-Galindo,
Sanfandila, Querétaro, México. atorres@imt.mx

RESUMEN

Este trabajo forma parte del proyecto DURACON, el cual, busca caracterizar la durabilidad de concretos expuestos en condiciones ambientales reinantes en Iberoamérica, basándose en la exposición de probetas armadas en al menos dos atmósferas distintas, una marina y una urbana, en cada país iberoamericano participante. Los resultados obtenidos de exponer probetas de concreto reforzado a condiciones ambientales reinantes en la Cd. de Chihuahua durante 15 meses de exposición. Se diseñaron dos tipos de concretos, uno con una relación $a/c = 0,65$ y $a/c = 0,45$ y, tres espesores de recubrimiento (1,5, 2,0 y 3,0 cm). Los ensayos estuvieron centrados principalmente en la medida de parámetros electroquímicos que permitieron evaluar la cinética de corrosión de las armaduras, mediante pruebas de potenciales de corrosión e implementando la técnica de resistencia a la polarización para determinar la velocidad de corrosión. Toda esta información permitirá, con el uso de modelos específicos, diseñar obras en concreto armado durables, y reparar adecuadamente las ya existentes, lo que repercutirá en una disminución en las pérdidas económicas que actualmente está causando el fenómeno de la corrosión en nuestro país.

Palabras clave: corrosión, concreto, durabilidad, DURACON, ambiental

INTRODUCCIÓN

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

Las investigaciones relacionadas con la corrosión de armaduras han sido amplias en los últimos diez años, pero han estado especialmente enfocadas. 1) al estudio de las causas y mecanismos de deterioro, 2) al desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y control (tanto en laboratorio como in situ) y 3) al empleo de métodos de protección. Más recientemente se planteó la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras afectadas por corrosión, por lo que en los últimos años se ha ido centrando el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de estructuras en servicio no deterioradas o estimar la futura en el caso de nuevas, influyendo desde la fase de proyecto.

Las características físicas del concreto como aislante están relacionadas con la estructura de la red de poros, que se genera, debido al exceso de agua que es necesario utilizar en el amasado para hacer suficientemente trabajable el material. La porosidad total del concreto está constituida, tanto por los poros cerrados u ocluidos como por una red de poros, cuyos tamaños oscilan entre pocas μm hasta alrededor de $100\mu\text{m}$ (poros de gel) desde $\sim 100\mu\text{m}$ hasta $\sim 10^5 \mu\text{m}$ (poros capilares) y desde $10^5 \mu\text{m}$ hasta el orden de mm, que son los llamados poros de aire o grandes poros. Todos los que están comunicados entre sí están relacionados con el concepto de permeabilidad o penetrabilidad, que es la característica fundamental que va a controlar la llegada de agentes agresivos hasta la varilla. La permeabilidad del concreto a una determinada sustancia no depende solo del tamaño y número de poros, como en el caso de los materiales porosos inertes, sino que influyen en ella también fenómenos de absorción, las reacciones químicas que se pueden producir, el necesario equilibrio de capas eléctricas, etc. Todo ello hace que algunos autores [1-3] consideren que el concreto se comporta como una membrana semipermeable.

Cuando la humedad ambiental es suficiente, estos poros del concreto están rellenos por un líquido acuoso constituido principalmente por iones OH^- (alcalinidad elevada con un pH entre 12 y 14), Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y So_4^{2-} . La cantidad relativa de cada uno de ellos depende del tipo y proporción de cemento utilizado y de la relación agua/cemento, fundamentalmente, además, esta composición varía con la edad del concreto, habiéndose demostrado que a partir de los 28 días de edad, el ión Ca^{2+} prácticamente desaparece de la disolución, que pasa a estar constituida casi completamente por NaOH y KOH. A esta elevada alcalinidad y con el contenido de O_2 normal en las estructuras enterradas o sumergidas, el acero se recubre de una capa de óxidos muy adherente, compacta e invisible (pasivante) que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión, mientras el concreto sea de buena calidad, no esté

fisurado y no cambie sus características físicas o químicas por agresiones exteriores [4].

Cuando las condiciones de servicio cambian y el concreto se altera, o a través de él penetran sustancias agresivas, la corrosión de las varillas se desencadena con una triple consecuencia: a) el acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido; b) debido a las presiones que ejerce el óxido al generarse, el concreto puede fisurarse o desintegrarse; y c) la adherencia varilla-concreto disminuye o desaparece.

Por otra parte, la carbonatación también es un problema que actualmente está afectando a muchas estructuras en nuestros países, por la diversidad de climas que poseemos, aunque en menor escala que el problema con los cloruros, pero se tienen dificultades similares para su predicción. Así, estos problemas tienen una relación directa con los parámetros metereoquímicos del ambiente al cual se encuentran expuestas las estructuras.

Se han dado distintas definiciones al concepto de vida en servicio o vida útil relacionada con la idea de durabilidad de una estructura de concreto [5]. Desde el punto de vista de la corrosión de las varillas se ha propuesto un modelo simple, se está intentando definir todos los parámetros que llevarían a poder calcular previamente la vida en servicio o la durabilidad de una determinada estructura en condiciones de servicio con un coeficiente de seguridad suficiente. Esto en conjunto con los modelos que se definirán en el proyecto y los resultados de la evaluación físico-química y electroquímica de las diferentes probetas expuestas, permitirán definir una mejor forma de diseñar obras en concreto durables y reparar adecuadamente las ya existentes que presentan este problema.

Por esto el proyecto que se está sometiendo en la actualidad es de vital importancia para obtener la información faltante en cuanto al deterioro producido en las infraestructuras de concreto en general y su interdependencia con el ambiente en el que están expuestas. El hecho de poder contar con manuales que consideren el efecto del medio ambiente como parámetro de diseño estructural ha sido poco estudiado en todo el mundo, no solo en países en vías de desarrollo como México. Este proyecto sería la punta de lanza que ayudará a estar en la vanguardia en este rubro de durabilidad de concreto que, en el ámbito mundial, ha estado desarrollándose de una manera continua.

Cabe aclarar que este proyecto tiene carácter internacional, ya que en la actualidad el CYTED aprobó el Proyecto XV.3 Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto, también llamado DURACON, en donde el IMT (Instituto Mexicano del Transporte) está fungiendo como coordinador de la parte Mexicana y CIMAV participa con una estación de monitoreo, la cual cubrirá el norte del país, considerando el clima tan extremo que se tiene en esta entidad.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La estación de ensayo natural fue constituida por paneles metálicos para sostener los especímenes de concreto a un metro por encima del suelo, y orientados hacia la dirección de los vientos predominantes.

Materiales para la fabricación de especímenes de concreto

Los concretos estudiados fueron fabricados tomando en cuenta las especificaciones que se dan a continuación:

1. Tipo de cemento: Portland I (Superficie específica Blaine a 3600 y 8% de C_3A)
2. Árido silíceo triturado de 19 mm (grueso)
3. Arena cuarzosa
4. Relación a/c: 0,45 y 0,65
5. Adición de plastificante 0.3% vs cemento (tipo Plastiment VZ de Sika o similar)
6. Asentamiento 10 más o menos 1,0 cm
7. Encofrado en madera resinosa
8. Curado bajo agua por 7 días
9. Se prepararon 6 vigas de concreto con armadura (tres con relación a/c = 0,45 y tres con relación a/c = 0,65)

Especímenes de concreto para las estaciones de ensayo natural

Los especímenes de concreto que fueron expuestos en las estaciones de ensayo natural son: Especímenes prismáticos de 15x15x30 cm con 3 armaduras, con espesores de recubrimiento de 1,5, 2 y 3 cm (fig 1 y 2).

Para cada composición de concreto objeto de estudio, se fabricaron 3 especímenes con armadura. Así, dado que se han planteado dos composiciones diferentes de concreto, se expusieron 6 especímenes de concreto (fig 3).

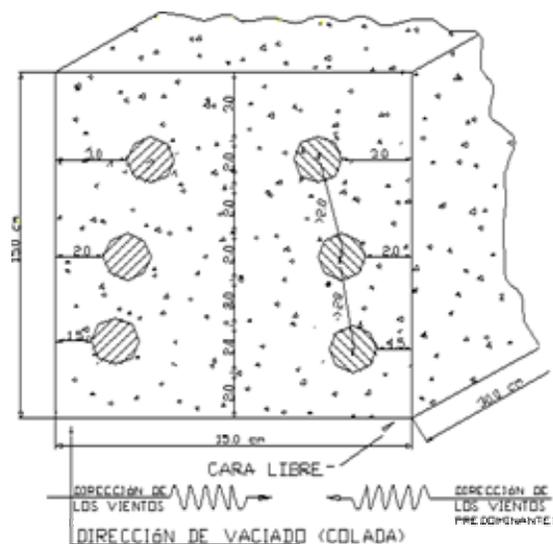


Fig 1. Sección transversal de la viga

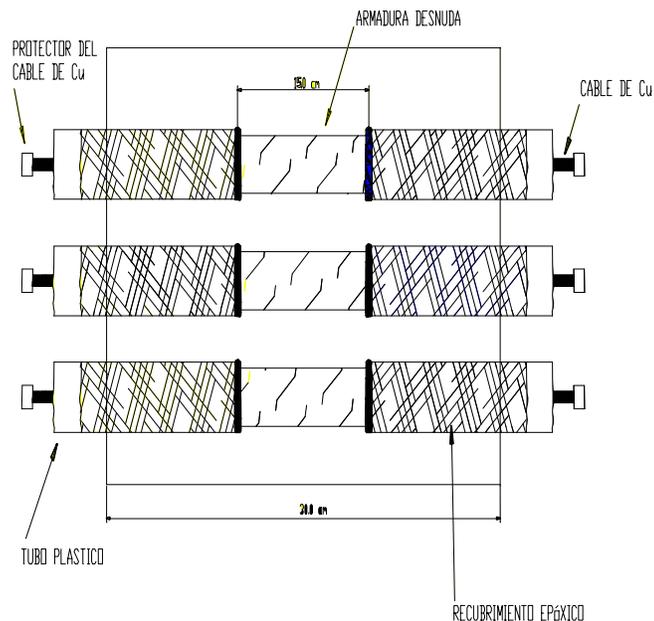


Fig 2. Sección longitudinal de la viga

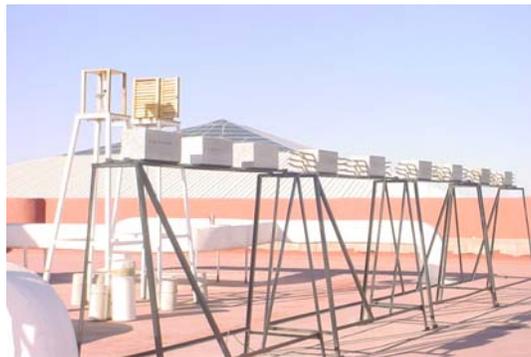


Fig 3. Estación de monitoreo

Ensayos a realizar sobre los especímenes de concreto expuestos en las estaciones de ensayo natural

Los especímenes de concreto con armaduras se expondrán en las estaciones de ensayo natural por un período de hasta cuatro años. Durante este período, se realizarán ensayos para determinar ciertos parámetros de durabilidad, como se especifica a continuación:

1. Potencial de media celda (ASTM C 876)
2. Potencial de media celda y Resistencia de Polarización Lineal (GECOR)

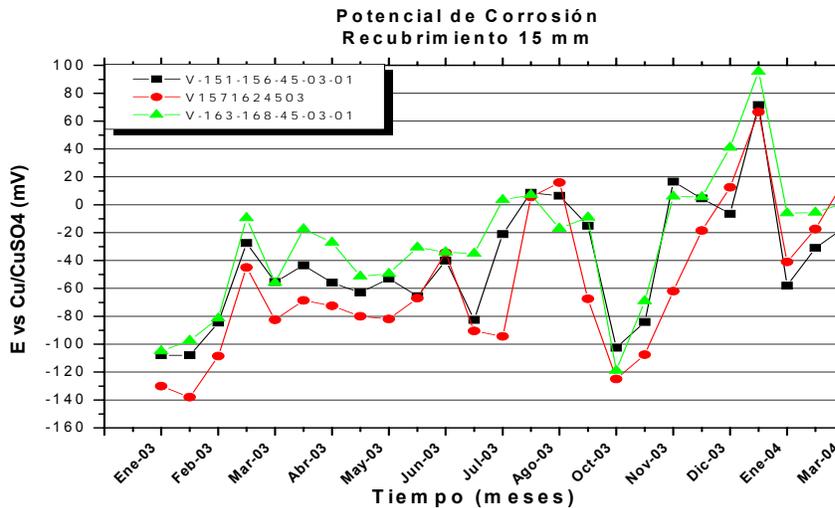
RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Potencial de media celda (Potenciales de Corrosión): El análisis de las gráficas de potencial obtenidas de cada una de las vigas en estudio, se realizó de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos por la norma ASTM C-876-91 (tabla 1) [6].

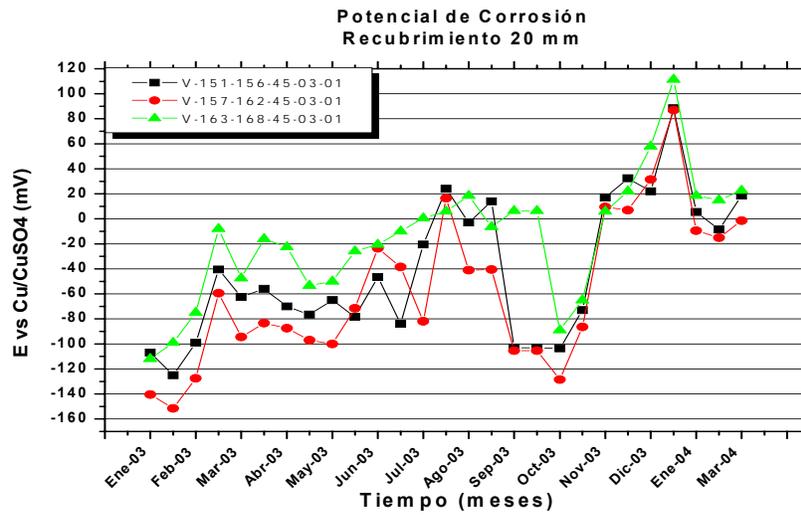
Tabla 1. Interpretación de resultados norma ASTM C876-91

Potencial de media celda (mV)	Riesgo de daño
< -200	10 % de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Cierta incertidumbre
> -350	90 % de probabilidad de corrosión

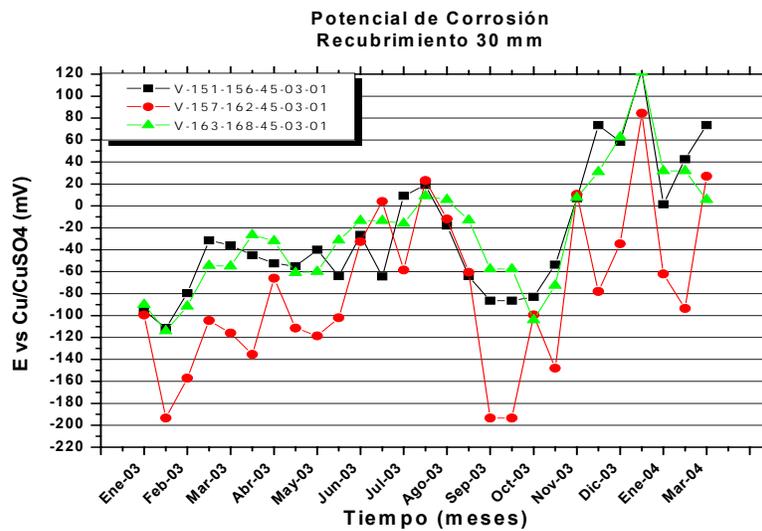
En la fig 4 (inciso a-c) se observa el comportamiento del potencial a lo largo de un año de exposición para las vigas 1, 2 y 3 con la relación a/c 0,45 y con los tres recubrimientos (1,5, 2,0 y 3,0 cm). Los valores de los potenciales no superaron los -200 mV lo que indica que existe un 10 % de probabilidad de que exista corrosión de acuerdo con ASTM. Los potenciales en las vigas ya mencionadas comenzaron con valores de -120 mV al inicio del estudio, llegando a alcanzar valores de 120 mV después de 15 meses de exposición, esto significa que el acero refuerzo se pasivo (fig 4).



a) Relación a/c: 0,45, Rec 15 mm.



b) Relación a/c: 0,45, Rec 20 mm

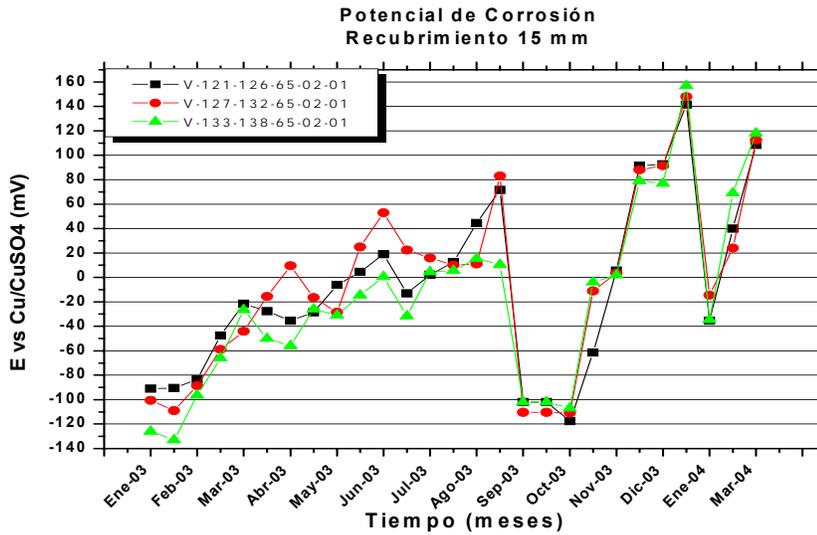


c) Relación a/c: 0,45, Rec 30 mm

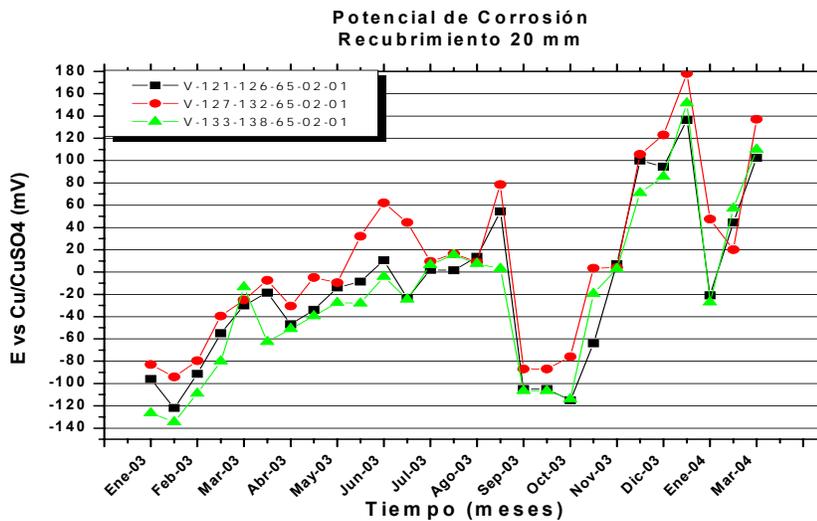
Fig 4. Comportamiento del potencial en las vigas 1 - 3

En las vigas con relación a/c de 0,65 (fig 5, incisos a-c) se observa que los valores son mas negativos que la relación a/c de 0,45. Los valores de los potenciales permiten observar que existe un 10 % de probabilidad de corrosión de acuerdo como se establece en ASTM.

El comportamiento de los potenciales, que se observó en estas tres vigas (4-6) fue de una tendencia a la formación de una película pasiva sobre la superficie de las varillas de refuerzo y, de acuerdo con las condiciones climatológicas de la región, el porcentaje de humedad relativa (HR) disminuye drásticamente lo que ocasiona que el sistema de corrosión sea más lento o se acelere.



a) Relación a/c: 0,65, Rec 15 mm



b) Relación a/c: 0,65, Rec 20 mm.

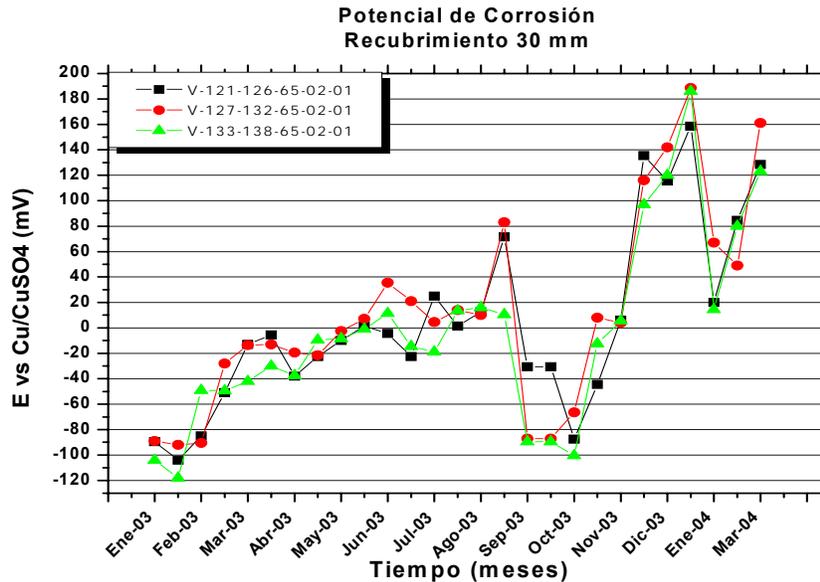


Fig 5. Comportamiento del potencial en las vigas 4 - 6

Velocidad de Corrosión: El análisis de las graficas de i_{corr} obtenidas de cada una de las vigas en estudio, se realizo de acuerdo a la referencia internacional DURAR (ver Tabla 2) [7].

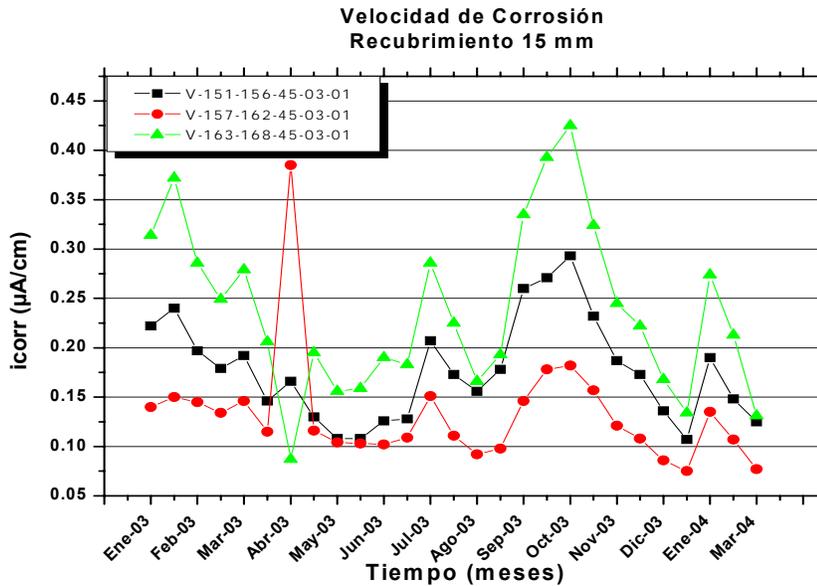
Tabla 2. Clasificación de i_{corr} en términos de vida útil (DURAR) [7].

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderado
0.5-1	Elevada
>1	Muy elevada

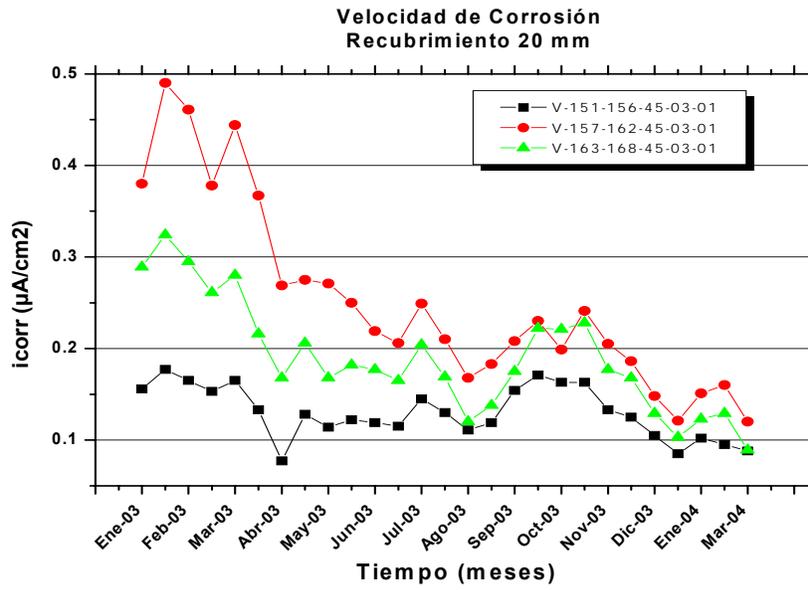
En la fig 6 (incisos a-c) correspondientes a las vigas 1-3 con relación a/c de 0,45 se observan los siguientes comportamiento de i_{corr} . El recubrimiento (rec) de 15mm (inciso a), la i_{corr} se encuentra en intervalo de 0,10 a 0,45 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ lo cual permite clasificarlo como una corrosión moderada, basándose en los criterios del DURAR. El rec de 20 mm tuvo un comportamiento descendente, lo que permite identificar que la corrosión de la varilla se esta pasivando (corrosión moderada) dado que la i_{corr} esta en un intervalo de 0,1 a 0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

El rec de 30mm, inciso c, comienza con una velocidad de corrosión elevada ($0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) los primeros 4 meses de exposición, y con el paso del tiempo se vuelve una corrosión moderada y en el caso de las otras 2 vigas el comportamiento se muestra de manera muy diferente debido a que sus valores no varían con respecto al tiempo presentando una velocidad de corrosión de tipo moderada.

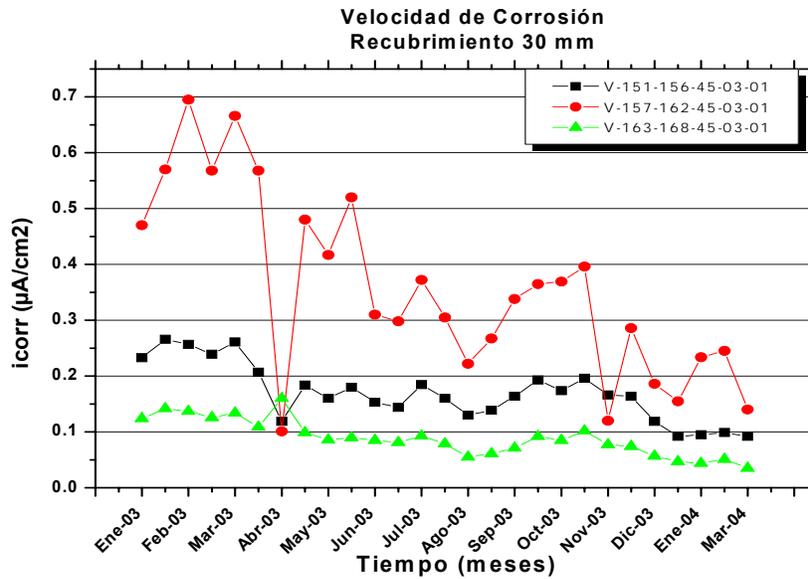
En las vigas 4-6 con relación a/c de 0,65 (fig 6, incisos a-c). El comportamiento del rec de 15 mm para las vigas 4-6 se observa que los valores de velocidad de corrosión son de manera moderada, pero entre los meses 8-10 (Agosto-October) esa velocidad de corrosión se acelero sin llegar a una velocidad de corrosión elevada y en los siguientes meses volvió a un pasivacion dando por consiguiente una velocidad moderada. En las vigas 4-6 con rec de 20 mm (inciso b), presentaron las siguientes características: La viga 5 el tuvo un comportamiento más activo que en las otras 2 vigas siendo que los valores de i_{corr} son más altos en la viga 2. Pero la velocidad de corrosión fue moderada para las 3 vigas exceptuando los meses de Abril-Agosto donde la velocidad fue despreciable según lo establece el DURAR. En el inciso c, de la gráfica 4. El rec de 30 mm tuvo un comportamiento similar al del rec 20 mm con velocidad de corrosión moderada.



a) Relación a/c: 0,45, Rec 15 mm

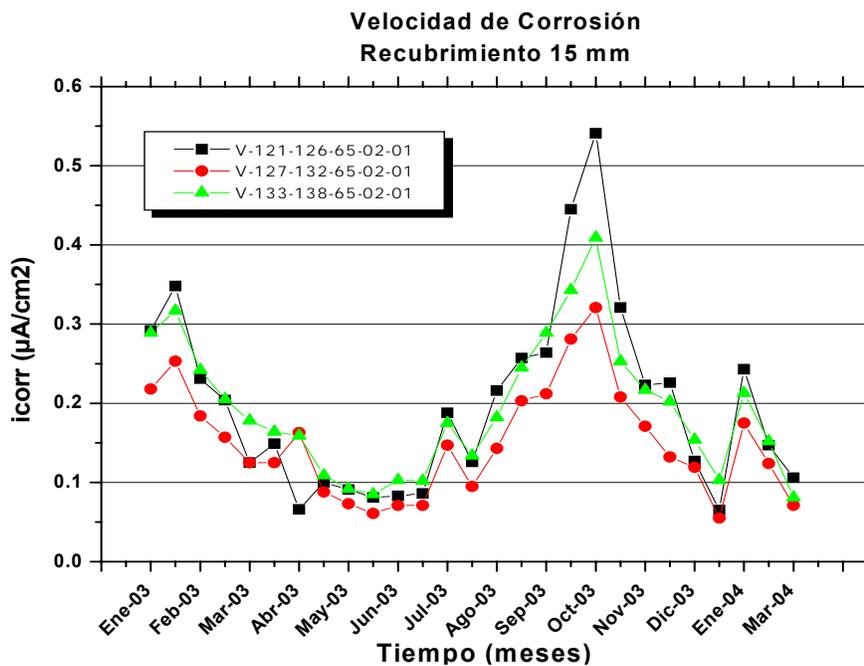


b) Relación a/c: 0,45, Rec 20 mm

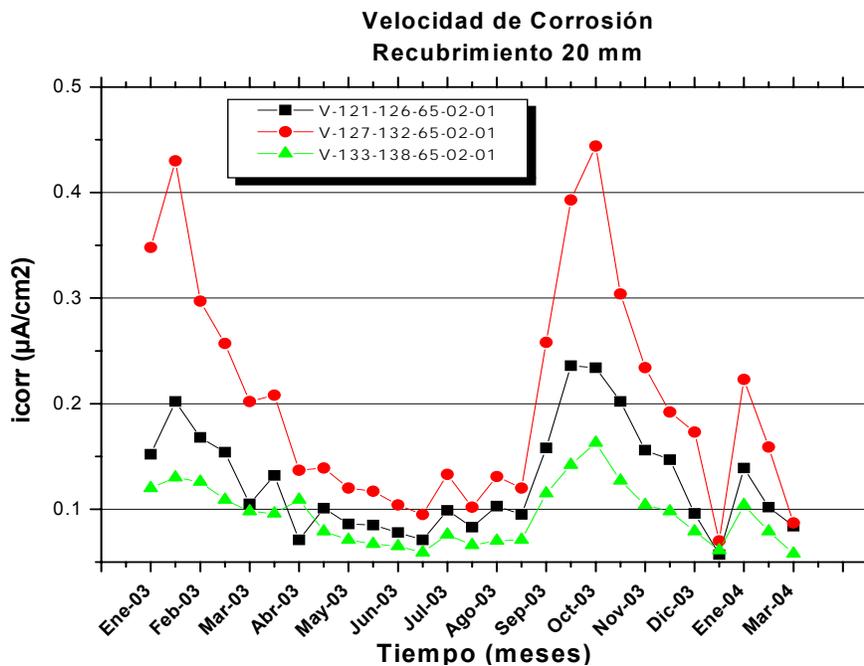


c) Relación a/c: 0,45, Rec 30 mm

Fig 6. Comportamiento de la intensidad de corriente i_{corr} en las vigas 1-3



a) Relación a/c: 0,65, Rec 15 mm



b) Relación a/c: 0,65, Rec 20 mm

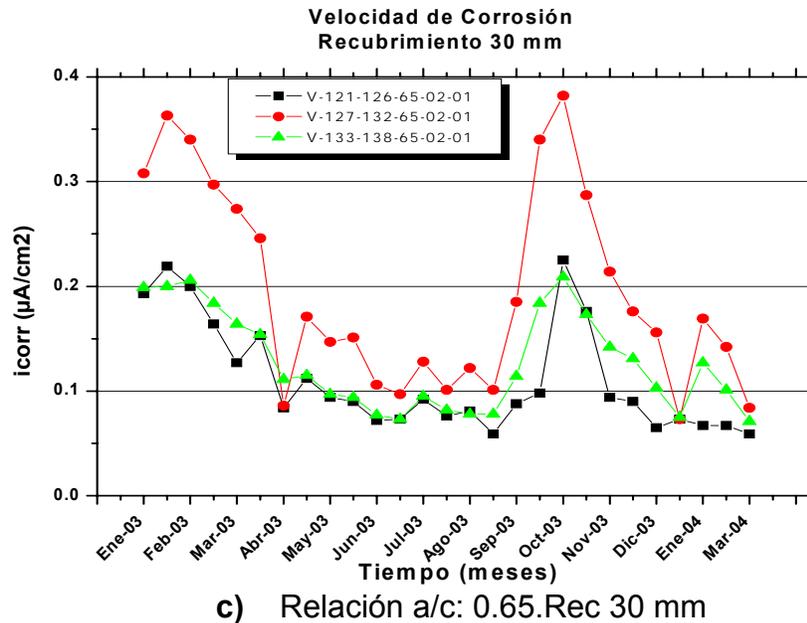


Fig 6. Comportamiento de la intensidad de corriente i_{corr} en las vigas 4 - 6

CONCLUSIONES

- Los potenciales de corrosión observados en las varillas de refuerzo de las vigas con una relación $a/c = 0,65$, estas se comportan más activos en los primeros días de exposición. Sin embargo conforme aumenta el tiempo de exposición los potenciales se vuelven más nobles, tendiendo a presentar un 10% de probabilidad de corrosión, de acuerdo con los criterios de interpretación ASTM, siendo el mismo caso para las vigas con una relación $a/c = 0,45$. Hasta la última fecha de monitoreo mostrada en esta investigación, no se observa ninguna influencia del recubrimiento en el comportamiento de los valores del potencial.
- La intensidad de corrosión para las seis vigas con las dos relaciones a/c y los tres tipos de recubrimientos, mostraron velocidades de corrosión moderada, según a los criterios establecidos por la referencia internacional de valores de corrosión DURAR. De igual manera, los diversos recubrimientos no influyen en los valores de la i_{corr} .
- Se observó que a humedad relativa (HR) alta, los potenciales de corrosión en las seis vigas y con los tres recubrimientos tienden a ser más activos, y cuando la humedad relativa (HR) es baja estos potenciales son más nobles. Y en contraparte,
- Se observó que a medida que la humedad relativa disminuye la intensidad de corrosión es baja y cuando la humedad es alta la intensidad de corrosión se incrementa, por lo cual el sistema de corrosión acero-concreto se vuelve activo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico al CIMAV, CONACYT y al Programa de Mejoramiento al Profesorado PROMEP de la Secretaria de Educación Publica SEP. Así mismo también se agradece la colaboración del Grupo de Ambiental del CIMAV, Ing Elías Ramírez y M C Alfredo Campos.

REFERENCIAS

- [1] Andrade C. Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol XV. No. 4, (1984)
- [2] Andrade, C. "Calculation of Chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements". Cement and Concrete Research, 23, 724-742 (1993)
- [3] Andrade, C, Sanjuán M A, Escudero A, and Río O. "Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments in non-steady-state conditions". Cement and Concrete Research, 24, 1214-1228 (1994)
- [4] Andrade C. Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras, , CSIC, Madrid, España, Sept (1988)
- [5] Lewis D.A. and Copesnhagen W. J. Industrial Chemist. Vol. 11 No. 10, (1957)
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, (1991), *ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM, Philadelphia, USA
- [7] Oladis Trocónis de Rincón y Miembros de la Red DURAR."Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado". CYTED. ISBN 980-296-541-3 Maracaibo, Venezuela. 1997(1era. Edición). 1998, 2da. Edición.



1er Congreso Nacional de ALCONPAT- México 2004
(Pre-CONPAT, Paraguay 2005)
Instituto Mexicano del Transporte
Santiago de Querétaro, Qro, México
Editado por A Torres Acosta, F Lee Orantes

PROPUESTA PARA DETERMINAR CONCRETOS DURABLES ANTE EL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE OAXACA, Y SU IMPACTO EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL A BASE DE CONCRETO.

E López

Instituto Tecnológico de Oaxaca, Av Bravo Ahuja No.125, Esq Calz Tecnológico, C P 68030, Oaxaca, Oaxaca, México, elopez@itoaxaca.edu.mx,

P Castro-Borges

Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, Km 6 Ant. Carr a Progreso, C P 97310, Mérida, Yucatán, México, pcastro@mda.cinvestav.cinvestav.mx

V O'Reilly

Comisión Nacional de Cemento y el Hormigón de Cuba, Apartado Postal 6110, Habana, 6, C P 10600, Ciudad de la Habana, Cuba

RESUMEN

Esta propuesta plantea dos objetivos: diseñar concretos con criterios de durabilidad para vivienda de interés social; y determinar la relación entre la vivienda de interés social a base de concreto y el bienestar de sus habitantes. Respecto a durabilidad del concreto se caracterizarán los agregados pétreos en uso, se diseñarán mezclas con diferentes relaciones agua-cemento y revenimiento y se determinarán parámetros ambientales y climáticos característicos de la Ciudad de Oaxaca. A estos concretos, en estado endurecido se les determinará: frente de carbonatación, velocidad de pulso ultrasónico, porosidad y resistencia a la compresión. Respecto a la relación vivienda de interés social y bienestar, se propone evaluar las dimensiones de ingreso, salud, educación y vivienda. Lo anterior permitirá construir vivienda de interés social a base de concreto, con materiales adecuados, dosificaciones correctas y acorde al medio ambiente de esta región; que contribuya al desarrollo de la Ciudad de Oaxaca.

INTRODUCCIÓN

Los teóricos del desarrollo**** realizaron las consideraciones teóricas básicas entre la provisión de infraestructura² y el desarrollo regional. Otras investigaciones³ han adicionado variables, como empleo o inversión, a este tipo de estudios para comprender mejor esta relación. Aún cuando la provisión de infraestructura es un elemento significativo de política regional, su influencia sobre el desarrollo regional no está totalmente definida. Es difícil definir el tipo de infraestructura para cada etapa del desarrollo regional. Las regiones comparativamente bien desarrolladas no necesariamente tienen las mismas necesidades de infraestructura de las regiones subdesarrolladas, esto dependerá de²: a) las características económicas de la región que recibe la inversión, b) del tipo de inversión en infraestructura, y c) del factor tiempo. Tomando como base la relación entre la infraestructura y el desarrollo regional, el presente trabajo está enfocado a realizar un análisis de un indicador, para la Ciudad de Oaxaca, de la inversión en infraestructura social: la vivienda de interés social; y la relación que guarda con uno de los materiales de construcción de mayor uso en la actualidad: el concreto hidráulico.

El crecimiento de la población en la Ciudad de Oaxaca, la emigración del campo a esta Ciudad, el déficit de vivienda, las nuevas técnicas de construcción a base de concreto y la necesidad de investigaciones sobre la durabilidad del concreto, son parte del problema que sustenta esta propuesta.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se aplicaron 35 encuestas a transportistas de acarreo de agregados y a constructores de la ciudad de Oaxaca, para determinar el tipo de agregado que utilizan y el origen de este. Posteriormente se entrevistaron a directivos de las agrupaciones de transporte de agregados, los resultados de estas actividades se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de agregados utilizados en la Ciudad de Oaxaca

Agregados	% de uso	Entrevistados	Origen
De río	30	10	Atoyac, Totolapan
Triturados	70	25	Antequera y Bogosa

**** Hansen (1965b) consideró dos clases de inversión: inversión en infraestructura social (IIS) e inversión en infraestructura económica (IIE). La primera está pensada para ampliar el capital humano por medio de inversión en educación, instalaciones de salud pública, vivienda para adultos, etc. La IIE, orientada hacia actividades directamente productivas consiste en, por ejemplo, sistemas de transporte, oferta de servicios públicos como agua, gas y electricidad, irrigación y drenaje, entre otros.

Con base a la información recabada, lo anterior se determinó realizar el experimento con agregados triturados de Antequera, ya que era el banco de material de mayor demanda.

Una vez definido el material que se estudiaría, se procedió a realizar el muestreo, tal como lo marca la norma NMX-C-0304. Se redujeron las muestras de acuerdo al procedimiento de la norma NMX-C-170. Y, se les determinaron las pruebas de: módulo de finura, peso volumétrico seco suelto y compacto, por ciento de absorción y densidad específica, de acuerdo al procedimiento de las normas NOM-C-111, NOM-C-73, NOM-C-164 Y NOM-C-165, respectivamente.

RESULTADOS PRELIMINARES

De acuerdo a la normatividad vigente del American Society for Testing and Materials y las Normas Oficiales Mexicanas, para calcular la dosificación de las mezclas, es necesario conocer las características de los agregados pétreos a utilizar. Estos resultados se presentan a continuación:

Tabla 2. Características de los agregado pétreos

Prueba	Arena	Grava	Norma
Modulo de finura	3,58	6,90	NOM-C-111
Peso volumétrico seco suelto, Kg/m ³	1,543	1,447	NOM-C-73
Peso volumétrico seco compacto, Kg/m ³	1,608	1,737	
% de absorción	0,40	2,04	NOM-C-164
Densidad especifica, gr/cm ³	2,65	2,63	NOM-C-165

En la Tabla 2 puede observarse un módulo de finura para la arena de 3,58, cuando la norma NOM-C-111 permite valores entre 2,30 y 3,20. Todos estos valores son importantes para el diseño de mezclas de concreto.

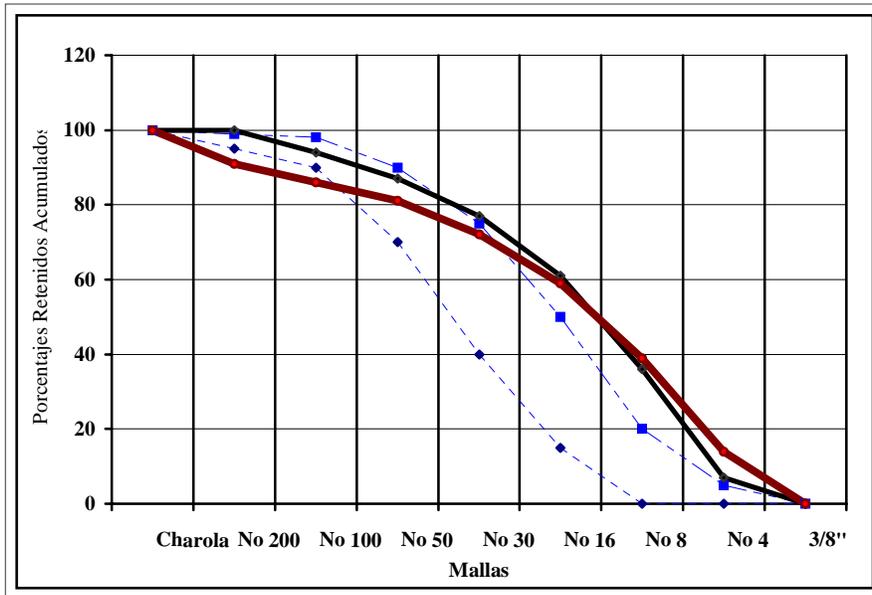


Fig 1. Composición granulométrica del agregado fino, muestra 1 y 2

La fig 1 y 2, muestran la curva granulométrica del agregado fino y grueso. En dicha gráfica puede observarse que las curvas granulométricas del agregado no cumple con los límites granulométricos que marca la norma oficial NOM-C-111. Estas pruebas se realizaron por duplicado, y para muestras diferentes.

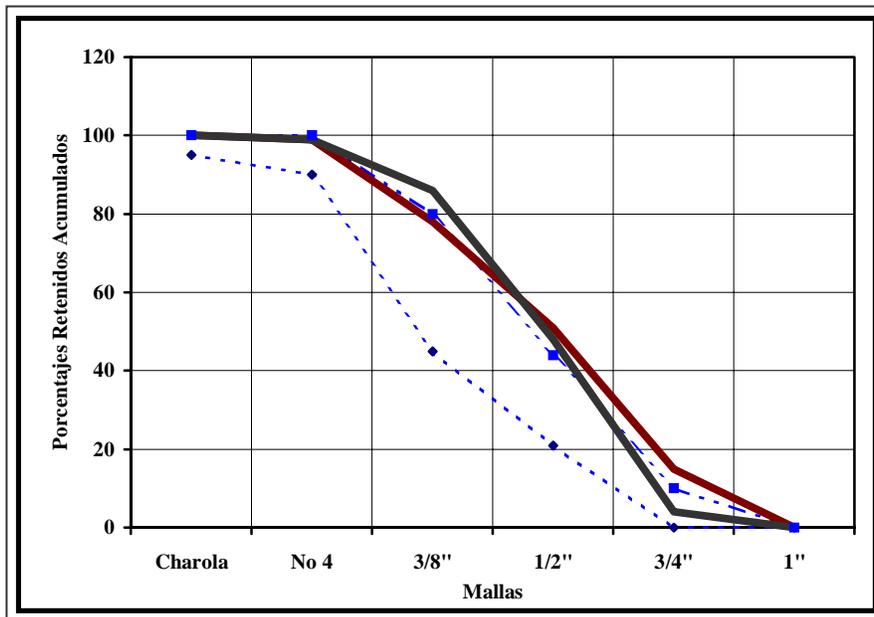


Fig 2. Composición granulométrica del agregado fino, muestra 1 y 2

Estos valores corresponden a agregados triturados de Antequera, del banco “Cerro la mina”, ubicado en la comunidad de Santa María del Tule, en las coordenadas geográficas 17°03’ de latitud norte y 96°38’ de longitud oeste, a 1560 m.s.n.m.

Referente a la vivienda de interés social de la Ciudad de Oaxaca, ésta se cuantificó para el periodo 1970-1999. La información obtenida se muestra en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Vivienda construida por el IVO, 1970-2002

UNIDAD, AÑO DE CONSTRUCCIÓN	MUNICIPIO	NO. DE VIVIENDAS	HABITANTES
1. Benito Juárez, 1997	San Pablo Etlá	482	358
2. Los Álamos, 1995	Oaxaca de Juárez	284	841
3. Benito Juárez, 1975	Santa Lucía del Camino	85	303
4. Montoya, 1984	Oaxaca de Juárez	861	3169
5. Colinas de Monte Alban, 1985	Oaxaca de Juárez	320 Y 227	1618
6. Lomas de Santa Rosa, 1974	Oaxaca de Juárez	727	3347
7. Trinidad de las Huertas, 1974	Oaxaca de Juárez	612	1768
8. El Retiro, 1981	Santa María El tule	1 219	4148
9. Vista Hermosa, 1990	Oaxaca de Juárez	716	2182
10. Riveras del Atoyac, 1975	Santa Cruz Xoxocotlán	683	2301
11. El Rosario, 1985	San Sebastián Tutla	1346	
12. Rancho Aguayo, 1993	Santa Cruz Xoxocotlán	482	925
13. San Jacinto IDECASA, 1994	San Jacinto Amilpas	30	202
14. Real San Jacinto, 1995	San Jacinto Amilpas	168	430

Tabla 4. Vivienda construida por el INFONAVIT, 1970-1999

UNIDAD, AÑO DE CONSTRUCCIÓN	MUNICIPIO	NO. DE VIVIENDAS	HABITANTES
1. Hacienda Blanca, 1998	San Pablo Etla	482	Pendiente
2. Rinconada Villas,	Santa Cruz Xoxocotlán	264	1183
3. El Rosario, 1989	San Sebastián Tutla	2 073	Pendiente
4. Santa Cruz Amilpas, 1986	Santa Cruz amilpas	1 075	4086
5. Ricardo flores Magón, 1981	Oaxaca de Juárez	1 471	5397
6. 1º. De Mayo, 1973	Oaxaca de Juárez	2 464	9063
7. Santa Lucía, 1985	Santa Lucía del Camino	162	Pendiente
8. Los Álamos, 1993	Oaxaca de Juárez	664	841
9. San Agustín, 1979	San Agustín de las J.	61	177
10. Guelaguetza, 1981	San Andrés Huayapan	125	373
11. Rancho Aguayo, 1986	Santa Cruz Xoxocotlán	86	925

Además, se determina el prototipo de vivienda, el material con que fueron construidas, su planta arquitectónica y fachada y el área geográfica básica (AGEB) a que corresponde cada unidad habitacional.

DISCUSIÓN

Mientras no se tomen las medidas necesarias para mejorar la calidad de los materiales, y el estudio de los agentes físicos y químicos regionales que afectan la durabilidad del concreto con los que se construye la infraestructura económica y social de una región y no se le de la importancia al estudio de patología de las construcciones, continuará el crecimiento de ésta, pero con el riesgo de que en poco tiempo no se tenga el presupuesto necesario para reparar, o en su caso, sustituir dichas construcciones.

Respecto a los agregados, aún cuando las granulometrías de la grava y la arena (fig 1 y 2) no cumplen con los límites granulométricos establecidos por la norma NMX-C-111, esta misma norma permite la utilización de estos materiales siempre y cuando se hagan los ajustes pertinentes en el proporcionamiento de mezclas, para descompensar las deficiencias en la granulometría.

Por lo antes expuesto, y con la finalidad de obtener concretos con criterios de durabilidad para vivienda de interés social y contribuir al bienestar de los habitantes de la Ciudad de Oaxaca, se plantea una investigación en dos vertientes: obtener concretos durables y establecer las relaciones entre la vivienda de interés social a base de concreto y el bienestar de sus habitantes.

Obtención de concretos durables para vivienda de interés social

Esta parte de la investigación se inició con la caracterización de agregados pétreos triturados, a los que se les determinó: granulometría, módulo de finura, peso volumétrico seco suelto, peso volumétrico seco compacto, porcentaje de absorción y densidad específica (tabla 2). Estas pruebas, de acuerdo a los procedimientos que marcan las Normas Oficiales Mexicanas.

Posteriormente, se dosificarán mezclas por los métodos del ACI y O'Reilly. El método ACI es el de mayor aplicación en la Ciudad de Oaxaca para diseñar concretos y se aplicará el método O'Reilly, para tener un parámetro de comparación, ya que este método ofrece un ahorro de cemento de 15%. La tabla 5, muestra las variables de las mezclas y el número total de cilindros a elaborar.

Tabla 5. Variables para el diseño de mezclas

Variable	Valores	Observaciones
Relación agua-cemento	0,40, 0,50 y 0,70	
Consistencia	8,0, 11,0 y 15,0 cm	Medida con el cono de Abrams
Métodos de dosificación	ACI y O'Reilly	
Número de cilindros	3(rel a/c) x 3(consist) x 2(métodos) = 18 diseños x 60(cilindros) = 1080 cilindros para determinar resistencia a la compresión	

La combinación de las variables arrojan 18 dosificaciones de mezclas, producto de las variables de la tabla 3. Se elaborarán 60 cilindros por cada dosificación, de acuerdo a la norma oficial ACI 301, que indica que deberán hacerse 30 pruebas para un análisis estadístico adecuado de los resultados. Se entiende como una prueba el promedio de al menos dos resultados de mezclas iguales.

Las pruebas a realizarse a los concretos endurecidos a los 28 días de edad son: resistencia a la compresión, absorción total y capilar y porosidad total; de acuerdo al procedimiento de las normas NMX-C-083, NOM-C-257, NOM-C-263 y método de Göran Fagerlund, respectivamente.

Se determinarán los parámetros ambientales siguientes: concentración de cloruros, concentración de sulfatos, polvos solubles e insolubles y concentración de CO₂; de acuerdo al procedimiento de las normas del Manual de evaluación de la corrosividad atmosférica (Método CEC-ATM-001 y CEC-ATM-002), ASTM-D-512, ASTM-D-516, respectivamente. Además, se registrarán los parámetros climatológicos siguientes: humedad ambiental, régimen de vientos, precipitación, temperatura e insolación. Lo anterior, para determinar los agentes ambientales que puedan estar deteriorando las viviendas de interés social construidas con este material.

Se expondrán probetas de concreto al medio ambiente para determinar: frente de carbonatación, resistividad eléctrica y ultrasonido, de acuerdo al procedimiento de las normas ASTM-C-856, Manual DURAR y NOM-C-275, respectivamente; para un periodo de seis meses, uno, dos, y tres años.

Relación entre vivienda de interés social y concreto durable

Para evaluar el impacto del concreto hidráulico en el desarrollo de la Ciudad de Oaxaca, primeramente se analizó el tipo de vivienda de interés social construida en esta Ciudad y como ha impactado el concreto hidráulico en éstas. Se determinarán los problemas que han sufrido las viviendas ante las condiciones climático ambientales de la Ciudad de Oaxaca.

Posteriormente se realizará un comparativo entre los concretos comúnmente utilizados y los concretos propuestos para la construcción de vivienda de interés social. Una vez obtenidos los valores anteriores se construirá un índice de bienestar, para determinar la influencia de la vivienda de interés social a base de concreto durable en el bienestar de sus habitantes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por los apoyos recibidos. Al Instituto Tecnológico de Oaxaca, por las facilidades para desarrollar este trabajo.

A Pedro Castro, Vitervo O'Reilly y Paulo Helene por las sugerencias para integrar esta investigación y por las revisiones del avance de este trabajo. A Osbaldo Rojas, Rubén Jarquín y Francisco Lázaro, por su apoyo para la obtención de la información.

REFERENCIAS

- i. A Hirshman, *La estrategia del desarrollo económico*, ed. F.C.E., México. (1975)
- ii. D DIAMOND, y N Spence, *Infraestructure and regional development: theories*, ed. Built environment, Vol. 10, No. 4. (1985)
- iii. ONNCCE, NMX-C-030-1997-ONNCCE, *Industria de la construcción - Agregados – Muestreo*, ed. Organismo Nacional de Normalización Certificación de la Construcción y Edificación, México, (1997)
- iv. ONNCCE, NMX-C-170-1997-ONNCCE, *Industria de la construcción - Agregados - Reducción de las muestras de agregados obtenidos en el campo, al tamaño requerido para las pruebas*, ed. Organismo Nacional de Normalización Certificación de la Construcción y Edificación, México, (1997)
- v. SECOFI-DGN, NOM-C-111-1992, *Industria de la construcción - Agregados para concreto – Especificaciones*, Norma Oficial Mexicana, ed. Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y fomento industrial, México, (1992)
- vi. SECOFI-DGN, NOM-C-73-1983, *Industria de la construcción - Agregados para concreto - Masa volumétrica - Método de prueba*, Norma Oficial Mexicana, ed. Publicada por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y fomento industrial, México, (1983)
- vii. SECOFI-DGN, NOM-C-164-1986, *Industria de la construcción - Agregados - Masa específica y absorción de agua del agregado grueso - Método de prueba*, Norma Oficial Mexicana, ed. Publicada por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y fomento industrial, México, (1986)
- viii. SECOFI-DGN, NOM-C-165-1984, *Industria de la construcción - Agregados - Masa específica y absorción de agua del agregado fino - Método de prueba*, Norma Oficial Mexicana, ed. Publicada por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y fomento industrial, México, (1984)
- ix. SECOFI-DGN, NOM-C-257-1983, *Industria de la construcción - Concreto – Masa específica, absorción y vacíos - Método de prueba*, Norma Oficial Mexicana, ed. Publicada por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y fomento industrial, México, (1983)
- x. SECOFI-DGN, NOM-C-263-1983, *Industria de la construcción - Concreto – Masa específica, absorción y vacíos - Método de prueba*, Norma Oficial Mexicana, ed. Publicada por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y fomento industrial, México, (1983)

- xi. CEC, Manual de evaluación de la corrosividad atmosférica, ed. Centro de Estudios de Corrosión (CEC), Trad. CEC, Venezuela, (2001)
- xii. ASTM, ASTM-D-512-94, Methods for Chloride Ion in Water, American Society for Testing and Materials, E.E.U.U, (1984)
- xiii. ASTM, ASTM-D-516-95, Standard Test Methods for Sulfate Ion in Water, American Society for Testing and Materials, E.E.U.U, (1985)
- xiv. ASTM, ASTM-D-856-95, Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, American Society for Testing and Materials, E.E.U.U, (1995)
- xv. CYTED, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, DURAR Red Temática XV.B, Durabilidad de la armadura, Brasil, (1997)
- xvi. SECOFI-DGN, NOM-C-275-1986, Industria de la construcción - Concreto – Determinación de la velocidad de pulso. Método de ultrasonido, Norma Oficial Mexicana, ed. Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y fomento industrial, México, (1986)



CIUDAD DE MÉXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730 México, D. F.
Tel (55) 5615 3575
5598 5218
Fax (55) 5598 6457

SANFANDILA

Km 12+000, Carretera
Querétaro – Galindo
76700 Sanfandila, Qro.
Tel (442) 216 97 77
216 96 46
Fax (442) 216 96 71

**Internet <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx**