

Monitoring of corrosion Potential and Mechanical Resistance of Contaminated Concrete Exposed to a Chlorinated Environment

M.A.B. Zamora,^{1,*} D.N. Mendoza,¹ H.H. Zamora,² F.A. Calderón³

¹Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. G. Aguirre Beltrán S/N, Xalapa, Veracruz, México, CP 91090

²Facultad de Ingeniería Industrial. UPA. Altamira, Tamaulipas, México.

³CIMAV S.C. Miguel de Cervantes 120 Chihuahua, Chih. México

Received 25 April 2008; accepted 23 October 2008

Abstract

The electrochemical and mechanical behavior were evaluated for specimens of concrete clean and contaminated with 2 and 4% of NaCl (of the weight of cement), elaborated with two types of cements: compound and waterproof. The dosage of the mixture of concrete was done on the basis of weight in two 0.45 and 0.65 water/cement ratios. The specimens under study were exposed in two media: clean water and 3% of NaCl solution. The test to evaluate the presence of corrosion of the reinforced steel consisted in the monitoring of the half cell potentials as the norm ASTM C-876-91 indicates. For the mechanical behavior the compression test was used, according to the ASTM C-39/C 39-M-99 norms. This paper presents the results obtained for the first 4 months of monitoring, identifying the influence of the attack of chlorides in the corrosion of steel and its mechanical properties. There is no a significant influence of the type of cement on the parameters of the study.

Keywords: concrete, steel, corrosion, potentials, chlorides.

Introducción

La corrosión del acero de refuerzo es la causa más importante del deterioro prematuro de las estructuras de hormigón reforzado [1]. Estudios en E.U.A por parte de la NACE muestran que en 1998, en el territorio estadounidense, tan solo en lo que se refiere a puentes, los cálculos de costos directos anuales ascendían a US \$3.800 millones [2]. El costo del ciclo de vida se ha convertido en un factor muy importante para los ingenieros constructores y profesionales en reparación, así como para las dependencias responsables de las estructuras, muelles, puentes,

* Corresponding author. E-mail address: mbaltazar@uv.mx

etc., debido al incremento en gastos de mantenimiento y reparación anticipadas [3].

El acero embebido en hormigón se encuentra protegido contra la corrosión, por pasivación provocada por la alcalinidad del agua en la disolución ($\text{pH} = 12,2$ ó superior), que penetra a través de los poros del hormigón. La alta alcalinidad del medio de un hormigón de buena calidad, hace que se forme una película pasiva sobre la superficie del acero embebido, la cual normalmente previene la disolución del acero [4]. Sin embargo, debido al comportamiento del hormigón como una membrana semipermeable, se produce el ingreso de sustancias o iones agresivos (cloruros, sulfatos) [5-6]. La presencia de estas sustancias agresivas, principalmente los cloruros, junto con el pH del medio, desempeñan un papel muy importante en el fenómeno de la corrosión [7].

Cuando las condiciones de servicio cambian y el hormigón se altera, o cuando a través de él penetran sustancias agresivas, de las cuales la penetración de los iones cloruro se considera la más importante [8], 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 hormigón puede fisurarse o desintegrarse
- c) la adherencia varilla-hormigón disminuye o desaparece.

Para muchos investigadores, el parámetro más importante que activa la corrosión en el acero de refuerzo es la concentración de cloruros libres, totales o por la relación (Cl^-/OH^-). Pero hay que tener en cuenta que en el inicio de la corrosión influyen diferentes factores como son, entre otros, las proporciones de los hormigones, el tipo de cemento, calidad de los agregados, relación agua/cemento, humedad relativa, condiciones de la superficie y medio ambiente [9].

Se han estudiado acciones correctivas tales como el uso de inhibidores de corrosión, recubrimiento epóxico de las varillas, eliminación electroquímica de los cloruros, que en ocasiones han fallado en proveer una protección satisfactoria para el acero de refuerzo [10]. La utilización de un cemento especial de tipo impermeable también se considera una acción preventiva para estructuras que estén expuestas a medios agresivos, como muelles, puentes, edificios, lo que traería como resultado un periodo de vida útil o de servicio mayor y con ello una reducción en los costos de mantenimiento preventivo y correctivo.

Metodología experimental

Materiales para la elaboración del hormigón

- Cemento CPC 30R y Cemento CPC 30R Impermeable [11].
- Agregado Grueso: Grava volcánica de 24 mm.
- Peso específico (S_s) = 2.76, Absorción = 0.5%.
- Agregado fino: Arena cuarzosa, Modulo de Finura (MF) = 3.5.
- Peso específico (S_s) = 2.63, Absorción = 2.2 %.
- Agua: Potable.

Diseño de mezclas y elaboración de especímenes

Se diseñaron dos mezclas diferentes de hormigón con relación agua/cemento = 0.45 y 0.65 [12]. La Tabla 1 muestra la dosificación de ambas. Los especímenes (cilindros de hormigón de 15x30 cm), se elaboraron de acuerdo con las normas ASTM C470-87 y C192-81.

Tabla 1. Dosificación de las mezclas de hormigón.

Materiales / kg	Rel. a/c 0.45	Rel. a/c 0.65
Agua	204	204
Cemento	456	316
Grava	477	477
Arena	1269	1415

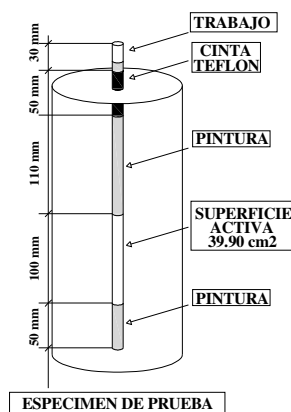


Figura 1. Especimen de hormigón.

Tabla 2. Nomenclatura especímenes para evaluar la corrosión

Relación a/c = 0.45		Relación a/c = 0.65	
4IBC	4PBC	6IBC	6PBC
4IBL	4PBL	6IBL	6PBL
4I2C	4P2C	6I2C	6P2C
4I2L	4P2L	6I2L	6P2L
4I4C	4P4C	6I4C	6P4C
4I4L	4P4L	6I4L	6P4L

- 4 y 6 indican la relación a/c 0.45 y 0.65.
- I y P se refieren al tipo de cemento, impermeable y normal compuesto respectivamente.
- B indica un hormigón limpio, el 2 un hormigón contaminado con 2% de NaCl y el 4 un hormigón contaminado con el 4% de NaCl.

- C y L representan los medios de exposición: C para un medio contaminado con 3% de NaCl y L para un medio limpio.

Tabla 3. Nomenclatura especímenes resistencia a la compresión.

Relación a/c = 0.45		Relación a/c = 0.65	
4IB-7	4PB-7	6IB-7	6PB-7
4IB-28	4PB-28	6IB-28	6PB-28
4IB-90	4PB-90	6IB-90	6PB-90
4I2-7	4P2-7	6I2-7	6P2-7
4I2-28	4P2-28	6I2-28	6P2-28
4I2-90	4P2-90	6I2-90	6P2-90
4I4-7	4P4-7	6I4-7	6P4-7
4I4-28	4P4-28	6I4-28	6P4-28
4I4-90	4P4-90	6I4-90	6P4-90

- 4 y 6 indican la relación a/c 0.45 y 0.65.
- I y P se refieren al tipo de cemento impermeable y normal compuesto, respectivamente.
- B indica un hormigón limpio, el 2 un hormigón contaminado con 2% de NaCl y el 4 un hormigón contaminado con el 4% de NaCl.
- 7, 28 y 90 indican los días en que fueron ensayados a la compresión.

Características del acero de refuerzo

En cada espécimen se embebió una varilla corrugada de acero 1018 de 3/8" de diámetro, como electrodo de trabajo, colocándoles una franja de 5 cm de cinta de fluorocarbono, en la parte superior, para evitar que se presenten zonas de aireación diferencial, concentración de sales o corrosión por hendidura [13-14]; además, se pintaron con pintura epóxica para tener un área determinada susceptible a la corrosión (ver Fig. 1)

Descripción de la nomenclatura

Para la identificación de los diferentes parámetros de estudio, se asignó una nomenclatura a los especímenes para la monitorización de corrosión (Tabla 2) y otra a los especímenes para evaluar su comportamiento mecánico (Tabla 3), como se indica a continuación:

Arreglo de la celda electroquímica

Los especímenes estuvieron expuestos en dos medios: agua limpia de la red y el agresivo, disolución al 3 % de NaCl. Los resultados que se presentan son de los primeros 4 meses de experimentación: un mes de etapa de curado y 3 meses de exposición. Los potenciales de corrosión o de media celda se midieron de acuerdo con la norma ASTM C-876-91[15], utilizando un electrodo de referencia

cobre-sulfato de cobre, Cu/CuSO₄. El dispositivo experimental se muestra en la Fig. 2.

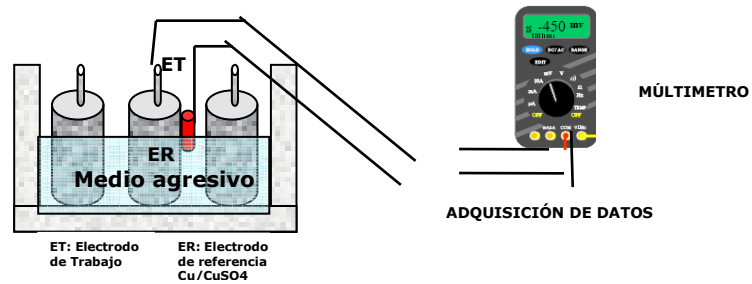


Figura 2. Celda electroquímica de experimentación.

Resultados y discusión

Resistencia a la compresión

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión axial sin confinamiento, de acuerdo con la norma ASTM C39-03 [16], a los 7, 28 y 90 días. Los resultados se presentan en las Fig. 3 y 4.

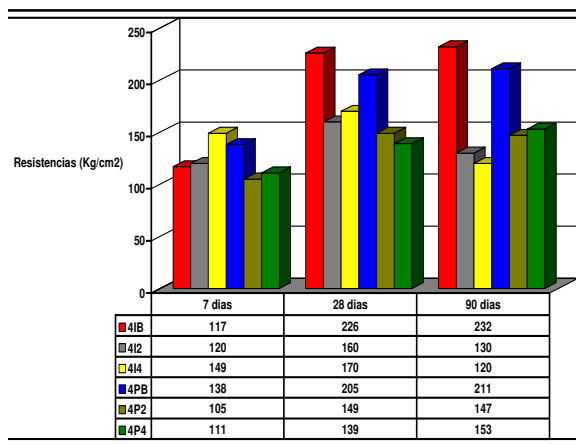


Figura 3. Resistencia a la compresión hormigón relación a/c = 0.45.

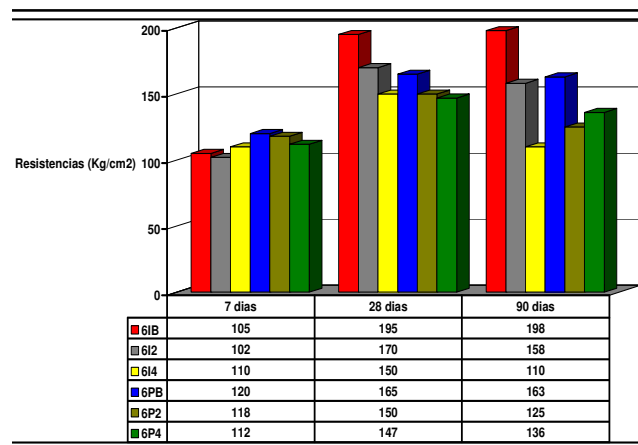


Figura 4. Resistencia a la compresión hormigón relación a/c = 0.65.

Se observa que los hormigones contaminados con 2 y 4 % de NaCl, sufrieron una disminución en su resistencia a la compresión superior al 20% en ambas relaciones a/c 0.45 y 0.65, tanto para el cemento compuesto normal como para el impermeable. Esta disminución es muy significativa dado que es el parámetro que rige, hasta estos momentos, el diseño de las estructuras de hormigón reforzado que se edifican en todo el mundo.

Potenciales de corrosión

La monitorización de potencial de media celda en los especímenes se hizo en la zona central como recomienda la literatura [17]. La interpretación de los valores de los potenciales de corrosión se basó en la norma ASTM C876-91 (ver Tabla 4).

Tabla 4. Potenciales de corrosión en hormigón reforzado.

Potenciales de corrosión Norma ASMT C876-91	
Potenciales más positivos que -200 mV	Riesgo de que ocurra corrosión es del 10%
Si está entre -200 y -350 mV	se tiene una incertidumbre
Si son más negativos que -350 mV	se tendrá una probabilidad de que se esté corroyendo el acero, del 90%

En la Fig. 5 se observa una tendencia de todos los especímenes a presentar potenciales de corrosión que, de acuerdo a la norma ASTM C-876-91, indican una incertidumbre de que se esté desarrollando la corrosión, teniendo los especímenes con relación 0.45 los valores más positivos, lo cual indica un mejor comportamiento que los de 0.65.

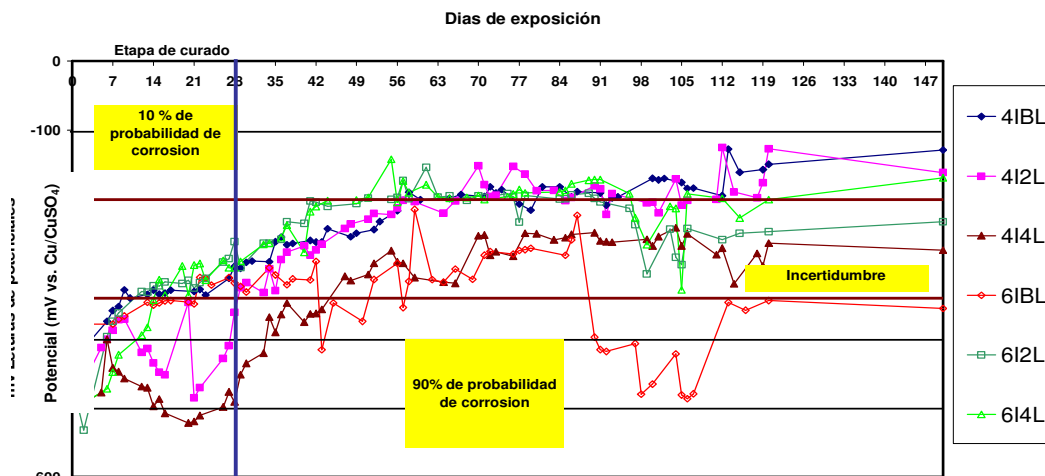


Figura 5. Especímenes expuestos en un medio limpio.

En la Fig. 6 se observa la influencia determinante del medio agresivo. Los valores encontrados presentan una tendencia en todos los especímenes, después de la etapa de curado a valores de potenciales más negativos conforme al paso del tiempo, a estar ubicados en un rango del 90% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C-876-91. Se puede observar también que los especímenes con relación 0.45 son los que presentan valores menos negativos y, consecuentemente, son más resistentes al efecto del medio agresivo.

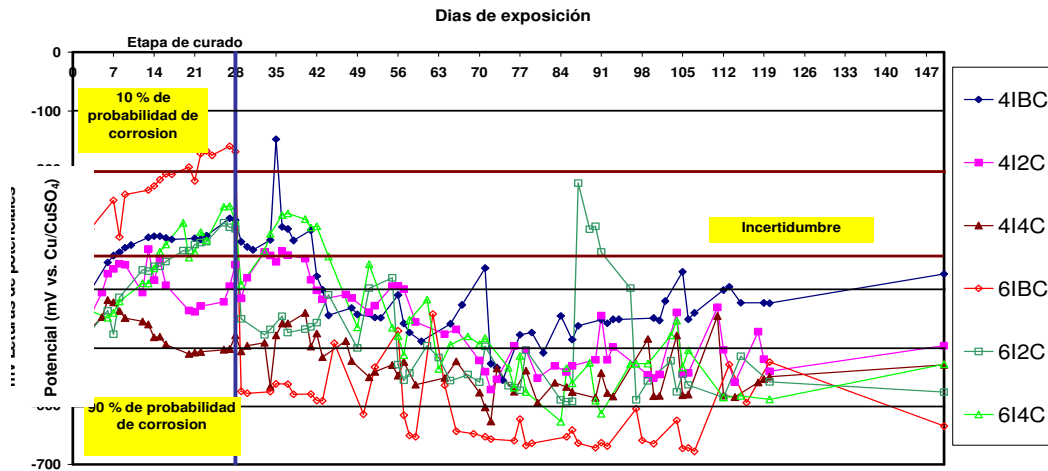


Figura 6. Especímenes expuestos en un medio al 3.5% de NaCl.

En la Fig. 7 se observa una tendencia de todos los especímenes a presentar valores de potenciales de corrosión más positivos conforme transcurre el periodo de exposición, con un comportamiento muy homogéneo de todos ellos. De acuerdo a la norma ASTM C-876-91 estos valores los sitúan con una probabilidad de corrosión del 10%. Hasta este punto de la experimentación no se observa influencia alguna del tipo de cemento o del grado de contaminación del hormigón.

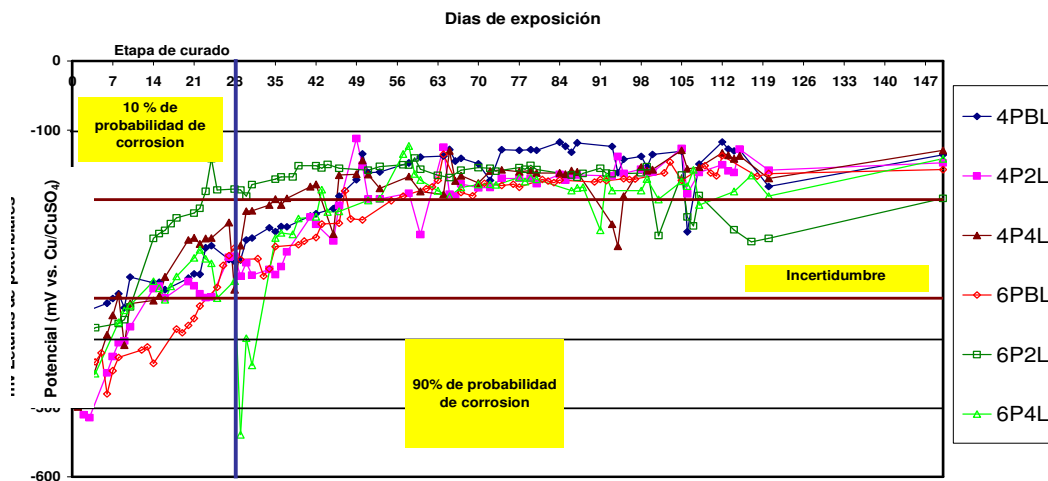


Figura 7. Especímenes expuestos en un medio limpio.

En la Fig. 8 también se observa, como en los especímenes de cemento impermeable, la influencia determinante del medio agresivo, presentando una tendencia en todos los especímenes, hacia valores que indican un 90% de probabilidad de corrosión. Si bien dos de ellos, en algún lapso de la experimentación, presentaron potenciales más nobles, al final del periodo ensayado caen en valores más negativos, lo que indica la presencia del fenómeno de corrosión.

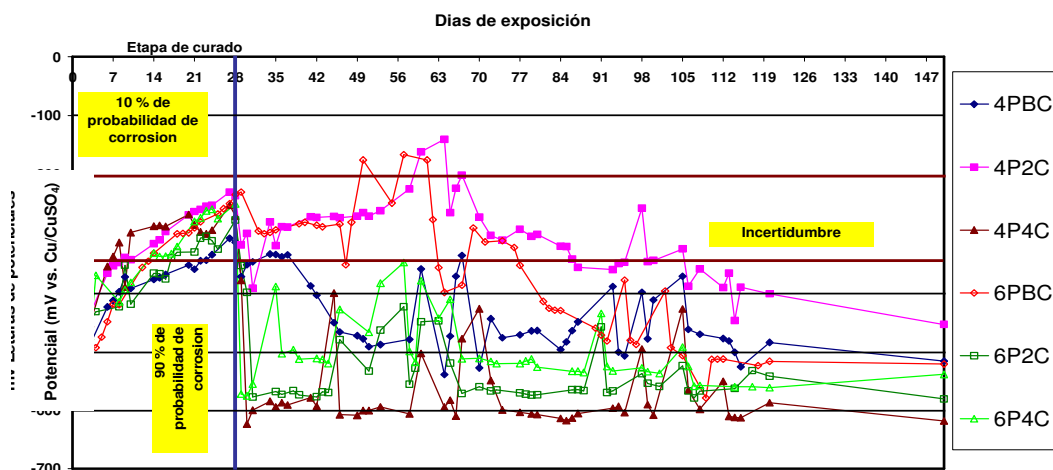


Figura 8. Especímenes expuestos en un medio al 3.5% de NaCl.

Conclusiones

Potencial de corrosión

- Los especímenes de cemento impermeable expuestos a un medio limpio presentan potenciales que indican incertidumbre de que exista corrosión, de acuerdo con la norma ASTM C-876-91. Se observa poca influencia del grado de contaminación de ambos hormigones. Los especímenes de cemento compuesto normal presentan un comportamiento mejor y más homogéneo que los de cemento impermeable, ubicándolos en un 10% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma y observando una influencia casi nula de la relación a/c y del grado de contaminación del hormigón.
- Los especímenes de cemento impermeable expuestos a una disolución al 3.5% de NaCl (medio agresivo) presentan, con el paso del tiempo, potenciales que indican un 90% de probabilidad de corrosión, de acuerdo con la norma ASTM C-876-91. Se observa poca influencia del grado de contaminación de ambos hormigones, teniendo los especímenes con relación $a/c = 0.65$ los valores más negativos. Los especímenes de cemento compuesto normal también presentan, al transcurrir el tiempo de exposición, valores más negativos ubicando todos los especímenes con una probabilidad de corrosión del 90%.

Resistencia mecánica

- La mayor resistencia a la compresión la presentaron los especímenes de relación $a/c = 0.45$, teniendo mayor resistencia los especímenes elaborados con el cemento impermeable.
- La resistencia en los especímenes de relación $a/c = 0.45$ contaminados con 2% de NaCl, disminuye entre un 31% y un 44% y en los especímenes de $a/c = 0.65$ entre un 25% y un 20%.
- La resistencia en los especímenes de relación $a/c = 0.45$ contaminados con 4% de NaCl, disminuye de 30% a 49% y en los especímenes de relación $a/c = 0.65$ la resistencia disminuye de 20% a 45%.
- El parámetro determinante en el presente estudio fue el medio agresivo, influyendo éste directamente en la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo y disminuyendo la resistencia a la compresión de ambos hormigones.

Agradecimiento

Se agradece a PROMEP el apoyo otorgado para la realización de este proyecto de investigación, autorizado por la SES mediante oficio no. PROMEP/103.5/07/2753, con cargo al “Proyecto de Apoyo a la Incorporación de Nuevos Profesores de Tiempo Completo PROMEP”.

Monitorización de potenciales de corrosión y resistencia mecánica de un hormigón contaminado expuesto a un medio clorado

Resumen

Se evaluó el comportamiento electroquímico y mecánico de especímenes de hormigón limpio y contaminado con 2 y 4% de NaCl (de la cantidad de agua), elaborados con dos tipos de cemento: Compuesto e Impermeable. La dosificación de la mezcla de hormigón fue en base a peso con dos relaciones agua/cemento 0.45 y 0.65. Los especímenes de estudio se expusieron en dos medios: agua limpia y disolución al 3% de NaCl. La prueba para evaluar la presencia de corrosión del acero de refuerzo, fue la monitorización de potenciales de media celda, como indica la norma ASTM C-876-91; para el comportamiento mecánico, se realizó la prueba a la compresión, según la norma ASTM C-39/C 39 – M - 99. El presente trabajo presenta los resultados de los primeros 4 meses de monitorización. No se observó una influencia importante del tipo de cemento en los parámetros de estudio, identificándose la influencia del ataque de los cloruros en la corrosión del acero y en sus propiedades mecánicas.

Palabras clave: hormigón, acero, corrosión, potenciales, cloruros.

Referencias

1. C.Q. Li, R.E. Melchers, W. Lawanwisut, *Magazine of Concrete Research* 57 (2005) 557.
2. *Materials Performance* (Supplement 4th July) (2002).
3. P. Gu, S. Elliot, J.J. Beaudoin, B. Arsenaault, Corrosion Resistance of Stainless Steel in Chloride Contaminated Concrete, *Cement and Concrete Research* 26 (8) (1996) 1151-1156.
4. G.S. Duffó, W. Morris, I. Raspini, C. Saragovi, A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years, *Corrosion Science* 46 (2004) 2143-2157.
5. C. Andrade, *Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección* 15 (4) (1984).
6. S.C. Kranc, A.A. Sagües, Polarization Current Distribution and Electrochemical Impedance Response of Reinforced Concrete when Using Guard Ring Electrodes, *Electrochim. Acta* 38 (14) (1993) 2055-2061.
7. C. Andrade, *Matériaux et Constructions. RILEM* 29, (1996) 40-46 and 97-104.

8. O.T. Rincón, *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Durar, 2ª ed., Red Temática del CYTED, 1998.
9. C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, P. Castro, Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in standardized OPC mortar, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 1047-1055.
10. P. Gu, S. Elliot, J.J. Beaudoin, B. Arsenault, Corrosion Resistance of Stainless Steel in Chloride Contaminated Concrete, *Cement and Concrete Research* 26 (8) (1996) 1151-1156.
11. S. C. NMX-C-414-ONNCCE-2004, en *Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, 2004.
12. *Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo*, ACI 211.1, IMCYC 2004, p. 29-34.
13. M.A. Baltazar, *Corrosión por Sulfatos en Concreto Reforzado*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chih., México, 2000.
14. M.A. Baltazar, F. Almeraya-Calderón, V. Orozco-Carmona, D. Nieves-Mendoza, C. Gaona-Tiburcio, A. Borunda-Terrazas, A. Martínez-Villafañe, Evaluación de la Velocidad de Corrosión del Acero en Hormigón Expuesto a Soluciones de Sulfatos, *Port. Electrochim. Acta* 22 (4) (2004) 335-344.
15. Standard Test for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete, in *Annual Book of ASTM Standars*, Philadelphia, 1992, Vol. 04.02, C876-91.
16. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in *Annual Book of ASTM Standars*, Philadelphia, 1992, Vol. 4.02, C39/C39M-04.
17. Z.M. Baltazar, *Comportamiento de la corrosión del acero al carbono e inoxidable embebido en concreto y en presencia de NaCl y Na₂SO₄*, Tesis de Doctorado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Chihuahua, Chih., México, 2005.