

DISEÑO DE PARCELAS SUBDIVIDIDAS PARA DETERMINAR LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

H. Hervert Zamora¹, D. Nieves Mendoza¹, J.C. Rolón Aguilari¹, R. Tobias Jaramillo¹,
J.C. Barrientos Cisneros¹, C.Z. Nava Vera¹, M. Barcenas Botello¹.

1. RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto determinar si la velocidad de corrosión presentada en vigas de concreto reforzado en presencia de NaCl (Cloruro de Sodio) y Na₂SO₄ (Sulfato de Sodio) al 3,5 %; es estadísticamente significativa entre ellas y definir cuáles son los efectos que causan su principal variabilidad.

Se elaboraron 12 vigas de concreto con una relación agua cemento máxima de 0.40 (ACI 318). Cada viga tiene cuatro zonas de 20 cm. (centímetros), dos zonas del armado cuentan con un recubrimiento epóxico, (zonas protegidas), las otras dos zonas no cuentan con ningún tipo de protección (zonas Desnudas). Seis vigas estuvieron expuestas en Na₂SO₄ y otras seis en NaCl al 3,5%. Se analizó la velocidad de corrosión presentada en cada una de las vigas por medio de tres técnicas estadísticas.

La primera de ellas, consistió en realizar una prueba de diferencia de medias bajo una distribución t student (distribución de probabilidad), sobre las vigas en ambas soluciones, para probar si el tratamiento al que estaban expuestas definía velocidades de corrosión significativas.

En la segunda, se realizó un Análisis de un diseño factorial general de dos factores, para visualizar las diferencias y efectos que causan la solución a las que están expuestas las vigas, y las diferencias entre cada una de ellas.

El tercer método, Análisis por medio de Parcelas Subdividas, nos permitió analizar la solución a la que están expuestas las vigas, la condición de la varilla, y las diferentes vigas de manera conjunta y con ello determinar cuál de estos factores afecta de manera significativa el comportamiento de la velocidad de corrosión.

Se concluyó que la velocidad de corrosión

presentada por las vigas expuestas en ambas soluciones no es estadísticamente diferente, esto debido a que el comportamiento presentado por las vigas inmersas en cada solución es estadísticamente semejante, además el sistema de zonas protegidas y no protegidas en las vigas bajo estudio, no tuvieron ninguna influencia en las mediciones de velocidad de corrosión de dichas vigas.

2. INTRODUCCIÓN

Se han registrado casos, en todo el mundo, de estructuras que alcanzaron el fin de su vida útil mucho antes de lo esperado o proyectado (1,2). El mantenimiento o reparación de esas estructuras ha alcanzado tal magnitud que ha atraído la atención de las autoridades (3), afectando la imagen del concreto reforzado como material durable. La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado depende de innumerables factores tales como su diseño (relación aire condicionado, cantidad de acero, tipo de obra), materiales que lo conforman (cemento, agregados, agua), ejecución (condiciones y tiempo de curado), y medio ambiente al que va a ser expuesto (urbano, marino, industrial, alguna combinación de estos) (4). Entre los parámetros del medio ambiente se encuentran la humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección de los vientos. Dependiendo de estos factores va a ser el tipo de ataque y mecanismo de degradación que pueden experimentar las estructuras de concreto. Los daños o deterioros que se pueden presentar en el concreto son: ataque por sulfatos, congelación y deshielo, reacciones álcali – agregado, ataques de sustancias ácidas, corrosión del acero de refuerzo, lixiviación de la cal, intemperismo y envejecimiento (5).

Siendo la corrosión del acero de refuerzo

una de las más preocupantes y estudiadas por muchos investigadores. Por efecto de la corrosión se reduce la sección de la varilla de acero, merma su adherencia con el concreto y se degradan sus propiedades mecánicas, con lo cual se desmerita su capacidad de trabajo estructural, y como resultado de la corrosión se originan productos de la misma, cuyo volumen es varias veces superior al de los elementos que les dan origen, y este aumento de volumen trae como consecuencia tensiones internas que agrietan progresivamente el recubrimiento de concreto e incluso lo desprenden totalmente en situaciones de corrosión avanzada. Lo anterior puede conducir a situaciones de alto riesgo y considerables pérdidas económicas por inadecuado mantenimiento y control de corrosión (6,7). Una adecuada inspección, evaluación y diagnóstico reduciría estos riesgos. Por lo anterior, el interés en el uso de técnicas de evaluación y de la velocidad de corrosión ha crecido considerablemente. Son muchos los investigadores que se han dedicado al desarrollo de nuevas formas para poder cuantificar la velocidad de corrosión del acero de refuerzo y poder predecir su vida residual (8,9, 10, 11, 12).

Por otro parte, el uso de la estadística ha permitido describir situaciones en base a datos numéricos hasta inferir el comportamiento sobre una población dada partiendo de una muestra con gran exactitud. Así mismo con la aparición de distintos programas estadísticos como el MINITAB, SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), SAS (The Statistical Analysis System), JMP (Software of Statistical Discovery), entre otros, el empleo de las técnicas estadísticas en los diversos campos de aplicación se ha visto favorecido. El objetivo del presente trabajo, es utilizar dos herramientas

¹ Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller".

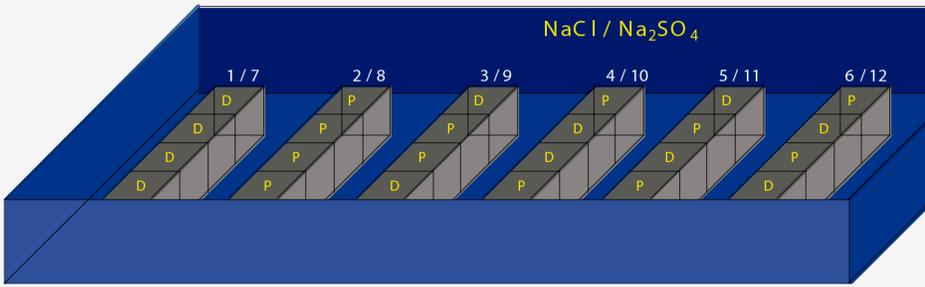


Figura 1. Arreglo de zonas protegidas.

estadísticas, para que en función de las condiciones de experimentación y del sistema de protección a las que se encuentran expuestas las probetas (vigas) bajo estudio, se pueda determinar estadísticamente que condición o condiciones tienen mayor peso en el incremento de la velocidad de corrosión.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales

Se elaboraron 12 vigas de concreto con sección de 20 x 20 x 80 cm., con una $f'c=300$ kg/cm². Una relación a/c máxima de 0.40 (ACI 318). Cada viga tiene cuatro zonas de 20 cm., dos zonas del armado cuentan con un recubrimiento epóxico, con la finalidad de aislar dicha parte de la armadura de la corrosión (zonas protegidas), las otras dos zonas no cuentan con ningún tipo de protección (zonas desnudas). Estas vigas son expuestas a ciclos de humectado y secado con sulfato de sodio (Na_2SO_4) y cloruro de sodio ($NaCl$) al 3.5%; seis vigas estuvieron expuestas a cada medio. El arreglo de zonas protegidas (P) y no protegidas (D) se observa en la figura 1.

3.2 Datos

Se recolectaron las mediciones de velocidad de corrosión de las 12 vigas de concreto, por cada viga se registraron cuatro mediciones, una referente a cada arreglo del sistema de protección de la varilla (desnuda, protegida). Se calcularon los promedios por semana de muestreo de estas mediciones, obteniendo con esto una medición por semana para cada viga, en total se obtuvieron ocho mediciones promedio por viga. Para efecto de realizar el análisis descriptivo lo más representativo posible; se segmentó la información primeramente por la solución a la que están expuestas, y después por viga; esto para visualizar el comportamiento electroquímico de cada

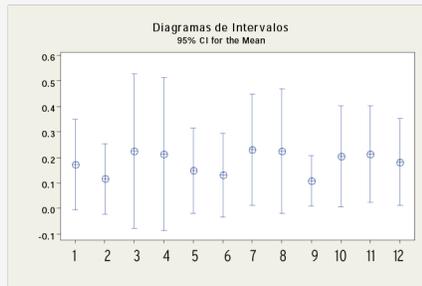
viga de manera independientemente.

3.3 Análisis Estadístico

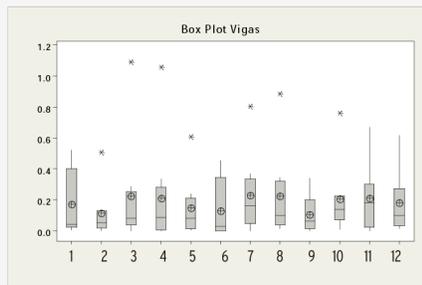
En base a los resultados obtenidos en las pruebas de bondad y ajuste y al análisis descriptivo de la información, se prosiguió a emplear dos técnicas estadísticas, una prueba Hipótesis para diferencia de medias; y un análisis de un diseño factorial por medio de parcelas subdivididas el cual permite analizar todos los factores de manera global, situación que no es posible en el Prueba de Hipótesis dado que esta prueba tiene como restricción que únicamente es posible analizar un factor por prueba.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis estadístico descriptivo



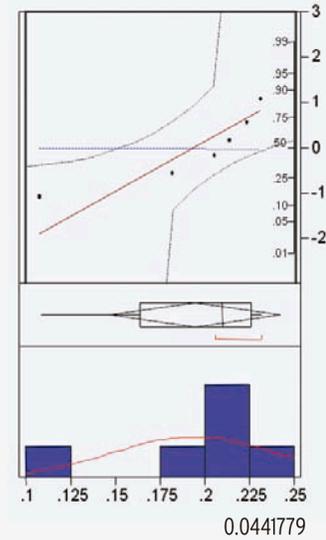
a)



b)

Figura 2. Diagramas de intervalos y Box plot de los datos de icorr.

Media 0.1678828
Desviación estándar
Gráfica de probabilidad QQ

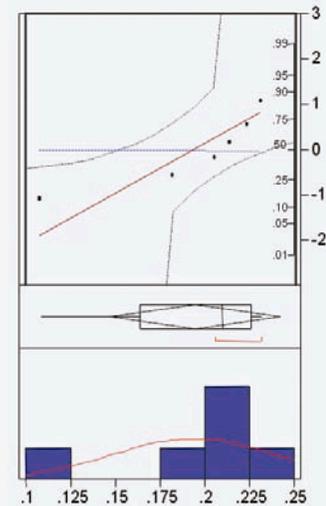


Media 0.1943802
Desviación estándar 0.0455222

Prueba de bondad y ajuste Shapiro-Wilk
W 0.813766 | Prob<W 0.0716

a) NaCl

Gráfica de Probabilidad Normal QQ



Prueba de bondad y ajuste Shapiro-Wilk
W 0.926969 | Prob<W 0.5598

b) Na₂SO₄

Figura 3. Análisis descriptivo por tratamiento al que están expuestas las vigas.

En la figura 2 inciso a), se muestran los diagramas de intervalos, se observa que tanto la viga 3 como la viga 4 presentan intervalos de confianza más amplios, esto debido a que la desviación estándar es mayor en ambas muestras en relación con el resto, comparando las vigas inmersas en cloruro de sodio con su respectiva inmersa en sulfato se observa que las amplitudes de los intervalos o el rango de actuación es similar en la mayoría de las vigas, con excepciones como la viga 3 con la viga 9, y la viga 2 con la viga 8. En la figura 2, el inciso b) se muestra los diagramas de caja; los datos de la viga 1, 6, 7, 8 presentan mayor dispersión. Los datos de la viga 3 y 4 contienen cada uno de ellos un dato atípico muy alejado del resto de la muestra.

En la figura 3, se describe el comportamiento de las mediciones de velocidad de corrosión (icorr) de las vigas expuestas en cloruro (a) y sulfato de sodio (b) respectivamente, por medio del cálculo de la media, desviación estándar, histogramas, diagramas de caja.

El supuesto de que los datos provienen de una distribución normal se demuestra mediante la prueba de bondad y ajuste de Shapiro Wilks, la cual es una prueba de hipótesis donde las hipótesis a probar son H_0 (las muestras se ajustan a una distribución normal, y H_a (las muestras no se ajustan a una distribución normal). Para concluir el análisis de las pruebas de hipótesis se emplea el criterio de la Regla General de decisión (13) con base al valor p^* (Tabla 2), de las pruebas realizadas de normalidad se obtuvieron los valores p igual a 0.56 y 0.07 para las vigas expuestas en cloruro y sulfato de sodio respectivamente, por lo que se concluye que en ambos casos los datos se ajustan a una distribución normal.

TABLA DE RESULTADOS PRUEBAS DE DIFERENCIA DE MEDIAS						
Nivel de confianza del prueba 95%				VALOR CRÍTICO 2.447		
	MEDIA	VARIANZA	VARIANZA PONDERADA	ESTADISTICO DE PRUEBA	HIPOTESIS	CONCLUSION
VIGA 1 Vs VIGA 7	0.17288 0.23169	0.00689068 0.03837986	0.150450218	-0.677076	H_0^* H_a^{**}	NO SE RECHAZA H_0 P VALOR : 0.52363
VIGA 2 vs VIGA 8	0.11655 0.22419	0.00762852 0.00423628	0.077022059	-2.420593	H_0 H_a	NO SE RECHAZA H_0 P VALOR : 0.0531
VIGA 3 vs VIGA 9	0.22506 0.10822	0.00876981 0.00158319	0.071947893	2.812859	H_0 H_a	SE RECHAZA H_0 P VALOR: 0.03064
VIGA 4 vs VIGA 10	0.2135 0.20597	0.04400797 0.0019367	0.151566273	0.086065	H_0 H_a	NO SE RECHAZA H_0 P VALOR : 0.934214
VIGA 5 vs VIGA 11	0.14844 0.21384	0.00286928 0.04087863	0.147898453	-0.765978	H_0 H_a	NO SE RECHAZA H_0 P VALOR: 0.472737
VIGA 6 vs VIGA 12	0.13088 0.18238	0.00387104 0.04217882	0.151739686	-0.587853	H_0 H_a	NO SE RECHAZA H_0 P VALOR: 0.578069

Tabla 2. Pruebas de Hipótesis particulares por cada viga.

* H_0 : El promedio de la velocidad de corrosión en vigas expuestas en NaCl es igual al promedio de la velocidad de corrosión en vigas expuestas en Na_2SO_4 .

** H_a : Existe diferencia significativa entre el promedio de la velocidad de corrosión de las vigas expuestas en NaCl con respecto a las vigas expuestas en Na_2SO_4 .

P Valor	Decisión
p valor < 0.05	Se rechaza H_0
p valor > 0.05 y < 0.20	incertidumbre
p valor > 0.20	No se rechaza H_0

Tabla 1. Regla General de decisión del p valor, para concluir pruebas de Hipótesis al 95% de confianza.

PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA DIFERENCIA DE MEDIAS

El objetivo de la prueba de hipótesis es comparar los promedios globales de velocidad de corrosión de las siguientes dos muestras: muestra 1: mediciones de velocidad de corrosión en $^2A/cm^2$ de las vigas expuestas en cloruro de sodio, muestra 2: mediciones de velocidad de corrosión en $^2A/cm^2$ de las vigas expuestas en sulfato de sodio; para así determinar si es que existe alguna diferencia entre ellas. Se realizó la prueba de hipótesis bajo una distribución t student de la cual se obtuvo un valor p 0.3317, mismo que nos permite concluir en base a la regla de decisión del valor p descrita anteriormente,

que el efecto que causa el factor del tratamiento al que fueron expuestas las vigas de concreto no influye de manera significativa en el comportamiento electroquímico de las mismas. Posteriormente se desarrolló un análisis estadístico más detallado realizando Pruebas de Hipótesis independientes por pares, comparando aquellas vigas que tuviesen el mismo sistema de protección de la varilla, esto con la finalidad de aislar la variabilidad que pudiese causar la las distintas condiciones de la varilla.

En la tabla 2 se muestran los resultados de las pruebas de Hipótesis particulares, en todas las pruebas se demuestra que el comportamiento de la velocidad de corrosión en ambos medios es estadísticamente igual, por lo tanto ambos medios son igualmente agresivos, exceptuando la viga 3 & 9 de la que se obtiene un valor p de 0.030, en base a este, se concluye que el factor tratamiento influye en la velocidad de corrosión de las vigas, es decir la solución a la que están expuestas la vigas 3 & 9 influye en el proceso de corrosión.

* P es la probabilidad de encontrarse con una muestra que nos dé un valor después de la zona de rechazo.

		réplica o bloque 1				réplica o bloque 2				...				réplica o bloque r			
		factor A				factor A				...				factor A			
		1	2	...	a	1	2	...	a	...				1	2	...	a
factor B	1	y_{111}	y_{121}	...	y_{1a1}	y_{211}	y_{221}	...	y_{2a1}	...				y_{r11}	y_{r21}	...	y_{ra1}
	2	y_{112}	y_{122}	...	y_{1a2}	y_{212}	y_{222}	...	y_{2a2}	...				y_{r12}	y_{r22}	...	y_{ra2}

	b	y_{11b}	y_{12b}	...	y_{1ab}	y_{21b}	y_{22b}	...	y_{2ab}	...				y_{r1b}	y_{r2b}	...	y_{rab}

Esquema del diseño de parcelas divididas (y_{ijk} , $i=1,..r$ $j=1,..a$ $k=1,..b$).

Dónde:

Factor A: tratamientos (vigas expuestas en cloruro de sodio, y sulfato de sodio).

Factor B: condición de la varilla (desnuda o protegida).

Réplica o bloque: viga 3, 4, 5, 6.

Con el objetivo de analizar el efecto que causan todos los factores de manera global sobre la velocidad de corrosión de las distintas vigas de concreto. Se procedió a realizar un diseño factorial, el cual debido a la forma de recolección de datos, es preciso aplicar un diseño factorial por parcelas subdivididas, mismo que permite aislar las variabilidades de cada factor sin que estas afecten las conclusiones globales.

DISEÑO DE PARCELAS SUBDIVIDIDAS

Antes de realizar el análisis factorial por parcelas subdivididas, se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de los errores, así como también aleatoriedad de los mismos. Ahora bien, se procedió a desarrollar el diseño del análisis factorial por parcelas subdivididas; el

algoritmo se muestra en el esquema del diseño de parcelas divididas.

En base al Análisis de Varianza (ANOVA) resultante del análisis del diseño factorial, tenemos que tanto el factor tratamiento, como el factor condición de varilla con valor p de 0.967, 0.897 respectivamente, no son estadísticamente significativos, es decir la velocidad de corrosión de las vigas de concreto inmersas en ambos medios agresivos y bajo las diferentes condiciones de la varilla, tiende a tener el mismo comportamiento, del mismo modo; resultaron despreciables los efectos causados sobre la velocidad de corrosión presentada en las vigas de concreto reforzado, por las posibles interacciones de estos dos factores.

En la figura 4, se observan tres gráficas cada una referente al comportamiento de

la velocidad de corrosión afectada por cada factor de manera independiente. Se observa que el único factor determinante es el factor viga, es decir lo que está afectando de manera significativa al comportamiento de la velocidad de corrosión es la diferencia de mediciones entre cada viga, se observa que las vigas que presentan mediciones más bajas de velocidad de corrosión es la viga 6 & 12, y las que presentan mediciones de velocidad de corrosión más altas que el resto son las vigas 4 & 10.

En la figura 5, se muestra un panorama global del comportamiento electroquímico que siguieron las vigas durante la etapa de estudio. La figura 5, consta de seis gráficas cada una referente a la interacción de dos efectos bajo estudio, en las dos primeras se analizan el efecto que presen-

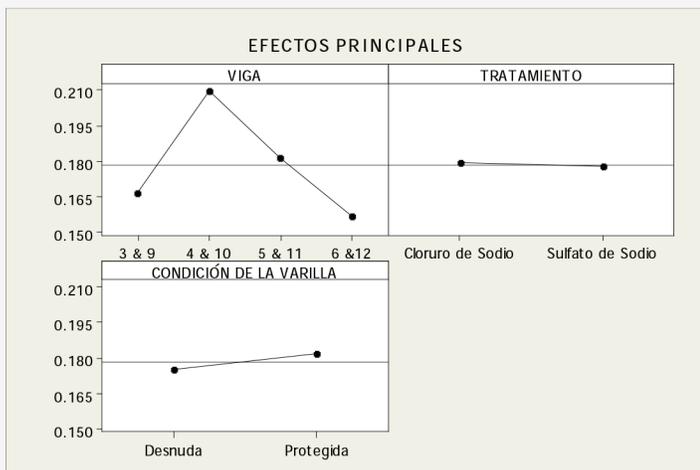


Figura 4. Efectos principales del diseño factorial por parcelas subdivididas.

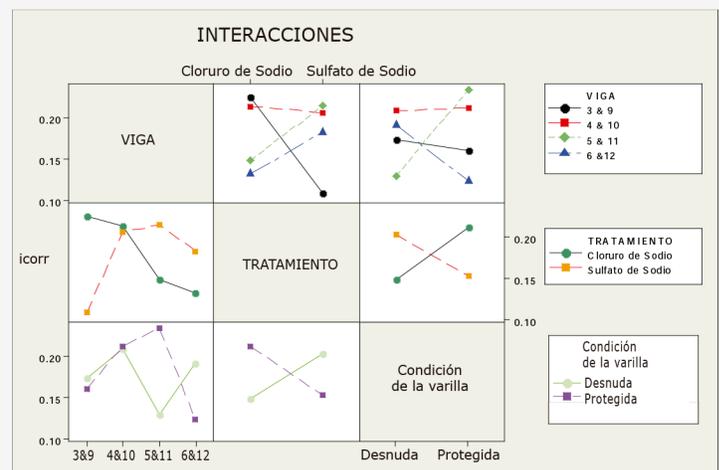


Figura 5. Interacciones de los efectos del diseño factorial por parcelas subdivididas.

tan las diferentes vigas contra el medio a los que fueron expuestas (cloruro y sulfato de sodio, tratamiento) y la condición de la varilla (desnuda y protegida) respectivamente; en él se observa, que la viga 4 & 10 mantiene estable la velocidad de corrosión al ser expuesta ante cloruro de sodio o sulfato de sodio, sin embargo la viga 3 & 8 presenta mayor variabilidad en la velocidad de corrosión al ser expuesta ante las dos soluciones, presentando una velocidad de corrosión aproximadamente menor que $0.20 \text{ }^2\text{A/cm}^2$ expuesta en NaCl y una velocidad de corrosión aproximadamente de $0.10 \text{ }^2\text{A/cm}^2$ expuesta en Na_2SO_4 . En la segunda gráfica la viga 3 & 9 y 6 & 12, presentan una velocidad de corrosión más alta donde no se cuenta con el sistema de protección de las varillas, y una velocidad de corrosión menor cuando se cuenta con este sistema de protección, la icorr de la viga 4 & 10 se mantiene estable al cambiar las condiciones de la varilla; estos resultados corroboran las hipótesis teóricas sobre el comportamiento electroquímico de las vigas.

En la misma figura, pero en las dos subsecuentes gráficas se analizan los efectos del tratamiento aplicado y la condición de la varilla, contra las diferentes vigas respectivamente; en la primera de ellas se muestra como la icorr de las vigas expuestas en cloruro de sodio muestra mediciones más altas para las primeras semanas y bajas para las últimas, caso contrario con las inmersas en sulfato de sodio, dicho comportamiento corrobora el mencionado anteriormente. Cuando se aplica el factor condición de la varilla el comportamiento es inverso, es decir las vigas expuestas en cloruro de sodio con protección catódica presentan mediciones altas, y las vigas con varillas desnudas mediciones de icorr bajas, caso contrario en las vigas expuestas en sulfato de sodio. Las últimas dos gráficas de la figura 5 describen los efectos causados por la condición de la varilla contra las diferentes vigas y el tratamiento aplicado.

5. CONCLUSIONES

En base a las pruebas realizadas se concluye lo siguiente:

- (a) El análisis por medio de diseño factorial en parcelas subdivididas permite observar como están afectando cada una de las variables y cuál de ellas es la que le afecta de manera más significativa a los resultados de velocidad de corrosión obtenidos.
- (b) El efecto más significativo estadísticamente en la medición de la velocidad de corrosión de las vigas de concreto reforzado, es la variabilidad en las vigas, y no el tratamiento al que fueron expuestas las vigas o la condición de la varilla.
- (c) El sistema de zonas protegidas y no protegidas en las vigas bajo estudio, de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas correspondientes y apoyando estas con los gráficos respectivos, no tuvieron ninguna influencia significativa en las mediciones de velocidad de corrosión de las vigas de concreto reforzado.
- (d) La velocidad de corrosión de las vigas expuestas en cloruro de sodio presentaron un grado de corrosión menor que las vigas expuestas en sulfato de sodio, excepto la viga 3 que presentó velocidades de corrosión más altas en cloruro de sodio y menores en sulfato de sodio.
- (e) La prueba de hipótesis para diferencia de medias demuestra que la velocidad de corrosión presentada por las vigas expuestas en cloruro de sodio contra la presentada en las vigas expuestas en sulfato de sodio no es estadísticamente diferente, es decir los medios agresivos en los que fueron inmersas las vigas de concreto no influyen en el comportamiento de la velocidad de corrosión de dichas vigas. ||

6. REFERENCIAS

(Endnotes)

- 1 P. Tourney, N. Berke, *A call for standardized tests for corrosion-inhibiting admixtures*, *Concrete International*, 1993;15: 57 – 62.
- 2 E. J. Wallbank. *The performance of concrete bridges: a survey of 200 highway bridges*. HMSO. London. 1989; 96.
- 3 ACI 364, *Guide for evaluation of concrete structures prior to rehabilitation*, *ACI Mater J* 1993; 90 (5): 479 – 498.
- 4 C. L. Page, N. R. Short, A. El Tarras, *Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes*, *Cem Concr Res*, 1981; 11 (3): 395 – 406.
- 5 DURAR, *Manual for Inspection, Evaluation and Corrosion Diagnosis in Reinforced Concrete Structures*. CYTED, Maracaibo, Venezuela. 2001.
- 6 S.L. Nadel, in *Publicly Speaking, Materials Performance*, Dec 1994: 59.
- 7 O. Chaix, W.H. Hartt, R. Kessler and R. Powers: "Localized Cathodic Protection of Simulated Prestressed Concrete Pilings in Seawater", *Corrosion*, 1995; Vol.51: 386-398.
- 8 O. Troconis, et al, *Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project—Preliminary results*, *Build Environ*, 2006; 41: 952 – 962.
- 9 E. I. Moreno, C. Cob, P. Castro, *Corrosion rates from carbonated concrete specimens*, *Corrosion/2004, paper No. 439*, *NACE International*, Houston, USA, 2004.
- 10 A. Torres-Acosta and M. Martinez-Madrid. *Residual life of corroding reinforced concrete structures in marine environment*, *J Mater Civ Eng*, 2003;15: 344 – 353.
- 11 C. Andrade and C. Alonso, *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*, *Constr Build Mater*, 1996;10 (5): 315 – 328.
- 12 ACI 365.1R-00. *Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report*. American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2000.
- 13 J. L. Devore. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, ed. Duxbury Brooks/Cole 5th. Ed., USA 2000.