

# CORRELACIÓN ENTRE ANCHO DE GRIETA DEL RECUBRIMIENTO DEL CONCRETO Y CORROSIÓN DEL REFUERZO EN ELEMENTOS EXPUESTOS A UN AMBIENTE NATURAL CONTAMINADO POR CLORUROS

Carmen Andrade<sup>a</sup>, Alejandro Muñoz<sup>b</sup>, Andrés Torres-Acosta<sup>c</sup>

## RESUMEN

La corrosión del refuerzo genera daños variados a estructuras de concreto que influyen en la capacidad de carga; entre estos daños se puede mencionar el agrietamiento del recubrimiento del concreto. Este trabajo proporciona resultados de campo en el tema de propagación de grietas del recubrimiento del concreto por corrosión del refuerzo después de una exposición natural por varios años. Los elementos estructurales evaluados fueron una viga T y una columna cuadrada expuestos al ambiente atmosférico de Madrid, España. Dos formulas empíricas fueron usadas para correlacionar los valores obtenidos del agrietamiento del recubrimiento por corrosión:  $w=k Px/(C/\phi)$ , y  $w=k Px/Ro$ , en donde  $w$  es el ancho de la grieta por corrosión,  $k$  es una constante de proporcionalidad,  $Px$  es la penetración por la corrosión en el tiempo,  $C/\phi$  es la relación recubrimiento de concreto/diámetro del refuerzo, y  $Ro$  es el radio original del refuerzo.

**Palabras clave:** Corrosión, grietas, vida remanente, picadura, velocidad de corrosión, durabilidad.

## ABSTRACT

Reinforcement corrosion leads into several damages which influence the structural load-bearing capacity, among which can be mentioned the cracking of concrete cover. This work gives results on the crack width growing in accelerated corrosion tests and from the observation during several years of real concrete elements. The elements studied were one T beam and one column exposed to the atmosphere of Madrid, Spain. Two empiric expressions have been fitted to the results of cover cracking:  $w=k Px/(c/\phi)$  and  $w=k Px/Ro$ , where  $w$  is a crack width in the time,  $k$  is a proportional factor,  $Px$  is the corrosion penetration in the time,  $c/\phi$  is the concrete cover/diameter relation and  $Ro$  is the original radius of the bar.

**Keywords:** Corrosion, cracking, remaining life, pitting, corrosion rate, durability.

## RESUMO

A corrosão do reforço gera diversos danos em estruturas de concreto que influenciam a capacidade de carga; dentre esses danos pode-se mencionar a aparição de fissuras no revestimento de concreto. Este trabalho apresenta os resultados de campo no tema de propagação de fissuras no revestimento de concreto por corrosão do reforço, após a exposição natural por vários anos. Os elementos estruturais avaliados foram uma viga T e uma coluna quadrada, expostos ao ambiente atmosférico de Madrid, Espanha. Duas fórmulas empíricas foram usadas para correlacionar os valores obtidos de fissuramento no revestimento por corrosão:  $w=k Px/(C/f)$ , e:  $w=k Px/Ro$ , onde  $w$  é a largura da greta por corrosão;  $k$  é uma constante de proporcionalidade;  $Px$  é a penetração da corrosão ao longo do tempo;  $C/f$  é a razão: revestimento de concreto/diâmetro do reforço; e  $Ro$  é o raio original do reforço.

**Palavras-chave:** corrosão, fissuras, vida residual, picada, velocidade de corrosão, durabilidade.

## INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto son consideradas permanentes y con un bajo coste de mantenimiento. Esto es cierto en algunos ambientes y con la selección apropiada de materiales y métodos de construcción cuidadosamente ejecutados. Sin embargo, desde hace algunas décadas, el agrietamiento y el descascamiento del recubrimiento asociado a la corrosión del acero de refuerzo han generado muchos problemas a nivel mundial.

<sup>a</sup> IETec- CSIC, Madrid, España.

<sup>b</sup> Universidad Marista de Querétaro AC, Querétaro, Querétaro

<sup>c</sup> Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Querétaro.

El acero de refuerzo está protegido de la corrosión por una capa pasiva de productos de hidratación del cemento con un ambiente altamente alcalino. Sin embargo, en ambiente marino los iones-cloruro del agua de mar se acumulan en la superficie del concreto y migran lentamente a través del recubrimiento del mismo hasta llegar a la superficie del refuerzo. Cuando la concentración de iones-cloruro en la superficie del acero de refuerzo alcanza el valor crítico, la capa pasiva protectora del acero se rompe y comienza el proceso de corrosión activo. La generación de la grieta se suele producir en tres etapas:

- 1) Periodo de iniciación del agrietamiento, durante el cual las grietas se desarrollan hasta alcanzar la superficie del concreto.
- 2) Periodo de propagación del agrietamiento, durante el cual crece el ancho de grieta, pudiendo producirse el desprendimiento del recubrimiento del concreto.
- 3) Cuando la propagación puede progresar coalesciendo con otras grietas para dar lugar al desprendimiento de trozos enteros del recubrimiento.

La transformación del acero de refuerzo del concreto en productos de corrosión está parcialmente comprendida. Las técnicas analíticas no se pueden emplear in situ para determinar el tipo de productos de corrosión generados en la superficie del refuerzo embebido dado que el acero no está expuesto al exterior. Pero, los productos de corrosión pueden oxidar la barra hasta exponerla al ambiente. Aunque hay discrepancias sobre el tipo de productos de corrosión formados en la interfaz concreto/acero<sup>[1-5]</sup>, se establece que la densidad de dichos productos es inferior a la del acero<sup>[6]</sup>, resultando un volumen de expansión que grieta el recubrimiento de concreto.

El proceso mecánico de la expansión del refuerzo por corrosión se muestra en la Fig. 1. El acero de refuerzo se considera como un cilindro con un radio inicial  $R_0$ , embebido en un medio de concreto semi-infinito con un recubrimiento  $C$ , y una longitud de corrosión  $L$  (llamada Región anódica). Cuando la corrosión progresa, el radio del acero disminuye en una cantidad  $x$  (penetración de la corrosión). Sin embargo, los productos de corrosión (que tienden a permanecer en la superficie del acero) ocupan un volumen mayor al del acero original. Esto da lugar a un aumento del volumen  $\Delta r_{EF}$ , sobre el radio de acero inicial, con un valor total de  $R_0 + \Delta r_{EF}$ . El concreto que rodea el acero es presionado por una expansión radial efectiva, resultando un rompimiento del recubrimiento y su agrietamiento.

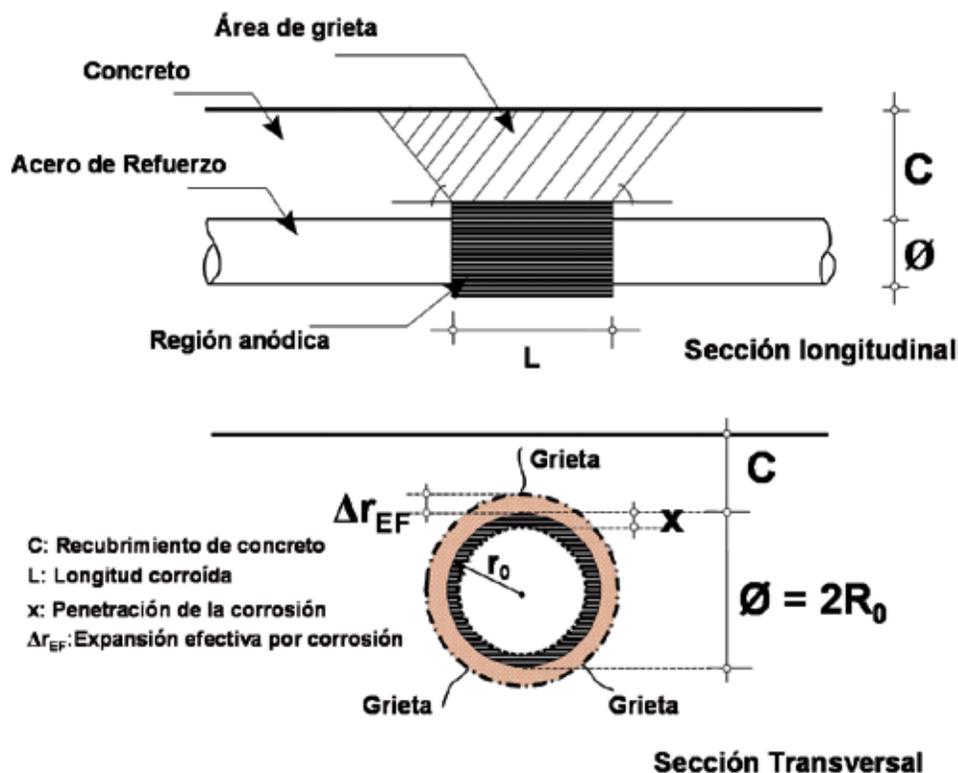


Fig. 1. Parámetros implicados en el proceso de corrosión.

En la literatura<sup>[7-14]</sup> existen investigaciones teóricas, experimentales y observaciones *in situ* del agrietamiento del recubrimiento de concreto debido a la expansión de los productos de corrosión. Sin embargo, los aspectos fundamentales del mecanismo de agrietamiento esenciales para el pronóstico de la durabilidad son inciertos.

Como se ha explicado<sup>[14-16]</sup>, la corrosión del refuerzo induce esfuerzos internos que agrietan el concreto. Sin embargo, la magnitud de los esfuerzos y la descripción cuantitativa de su desarrollo son poco conocidas, por lo que la información adicional sobre la relación entre la expansión de los productos de corrosión y la presión interna es deseable para hacer modelos de predicción. Existen trabajos previos que han analizado la relación entre la abertura de grietas y la cantidad de óxidos generados por la corrosión, expresada como penetración de la corrosión o pérdida de diámetro de las barras mediante ensayos acelerados y no acelerados. Algunos modelos analizan el tiempo necesario para generar el agrietamiento en función del recubrimiento de concreto, de sus características físicas y de la acumulación del producto de corrosión<sup>[17-18]</sup>. Otros modelos asumen una acumulación constante de productos de corrosión<sup>[19-20]</sup>, mientras que otros modelos encontrados en la bibliografía<sup>[10,21]</sup> obtienen un límite superior y otro inferior asumiendo una interfaz concreto/acero con una adherencia perfecta. También, se han realizado trabajos con modelos numéricos empleando el método de elementos finitos y analizando el agrietamiento con el modelo de grieta difusa, asumiendo un reblandecimiento lineal del concreto<sup>[19]</sup>, una fractura elástico lineal y una malla movable colocada alrededor de la zona de agrietamiento para obtener la concentración del esfuerzo local<sup>[22]</sup> y con elementos de contacto<sup>[23]</sup>. Otros autores desarrollan modelos basados en la penetración de ataque por corrosión crítica para iniciar el agrietamiento y su relación con el radio del acero de refuerzo<sup>[24]</sup>, en la reducción de la sección de acero por corrosión y su relación con la relación recubrimiento/diámetro y las características del concreto<sup>[25-28]</sup>. Las investigaciones previas, cálculos y simulaciones del inicio del agrietamiento se comparan con diferentes técnicas experimentales y se concluye que el inicio del agrietamiento depende principalmente de la calidad del concreto, sus características, y relación recubrimiento/diámetro.

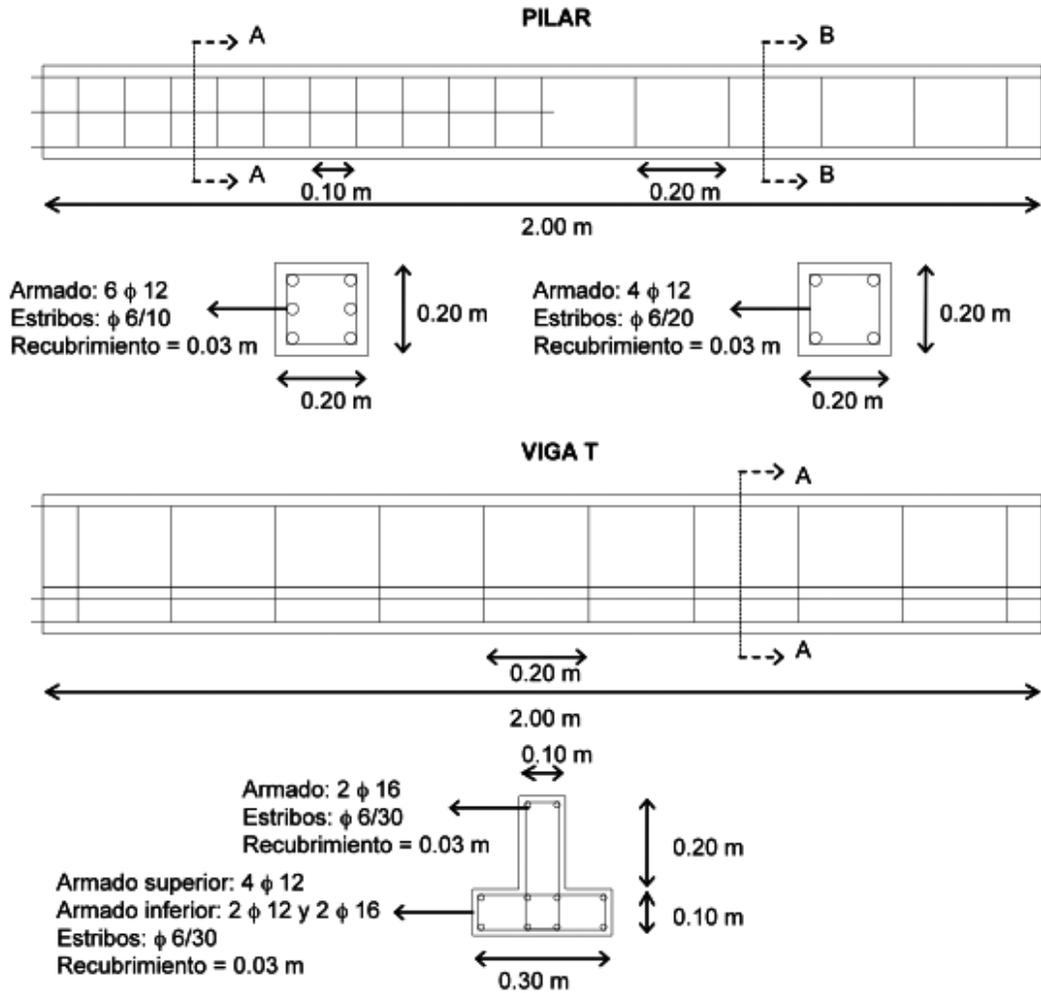
Este trabajo se centra en revisar dos ecuaciones empíricas ( $w=k P_x/(C/\phi)$ , y  $w=k' P_x/R_0$ ) para estimar la penetración de ataque por corrosión  $P_x$  necesaria para generar determinados anchos de grieta a partir de los datos de agrietamiento y corrosión medidos en unos elementos de concreto, fabricados en 1990, a los que se añadieron cloruros en el fabricado. Estos elementos, tipo viga T y columna, han estado expuestos en Madrid a humedad y temperatura ambiente en exterior. Su velocidad de corrosión media anual se ha comprobado que se sitúa entre 1,5 y 2,0  $\mu\text{m/año}$ .

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Los elementos de estudio son una columna y una viga T. Estos elementos de tamaño real se fabricaron para estudiar la evolución de la velocidad de corrosión y la de las grietas que se originan por ella, intentando reproducir las condiciones reales en cuanto a tamaño y permanencia en una exposición a la atmósfera no protegida de la lluvia. La columna tiene dimensiones de 200x200 mm y 2 m de largo (Fig. 2). El armado consiste en dos secciones con diferente cuantía. La primera sección tiene dos barras superiores y dos inferiores de 12 mm de diámetro y estribos de 6 mm de diámetro a cada 200 mm. La segunda sección tiene seis barras de 12 mm de diámetro y estribos de 6 mm a cada 100 mm. El recubrimiento de toda la estructura es de 30 mm.

La sección de la viga T consiste en un patín de 300 x 100 mm, con alma de 200 x 100 mm. El armado del alma son dos barras de 16 mm de diámetro. En la parte superior del patín hay cuatro barras de 12 mm de diámetro mientras que en la parte inferior y en la central, hay dos barras de 16 mm de diámetro. En los extremos hay dos barras de 12 mm de diámetro. Los estribos son de 6 mm de diámetro a cada 200 mm. El recubrimiento de la estructura es de 30 mm. Ambos elementos fueron fabricados en 1990 y la dosificación nominal del concreto empleado fue de 360  $\text{kg/m}^3$  de cemento, 1,080  $\text{kg/m}^3$  de agregado 5-12 mm, y 840  $\text{kg/m}^3$  de agregado 0-5 mm. La relación agua/cemento ( $a/c$ ) fue de 0.7. Se añadió un 3% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  al agua de fabricación. Dado que se fabricaron un conjunto de vigas, columnas y tableros (los últimos no incluidos en este estudio), el concreto fue comercial, servido por una central y transportado por un camión-concreto (tipo trompo). El curado se realizó durante 7 días mediante la colocación de plásticos para evitar la desecación con riegos intermitentes. Una vez finalizado el curado se retiraron los plásticos. Todos los elementos han permanecido expuestos a la atmósfera de Madrid sin ninguna protección de la lluvia. La disposición de los elementos es tal que una cara de los elementos permanece en sombra y la otra de cara al sol (Imagen. 1).

Desde la fabricación de los elementos a fines del 2006, fueron realizadas 12 mediciones de anchos de grieta para la viga T, y 8 mediciones para la columna, las cuales se muestran en la Tabla 1. Cabe decir que de todas las mediciones se han obtenido hasta una serie de 170 valores para la viga, y 87 para la columna, quedando con seguimiento continuo desde la primera hasta la última medida 33 puntos en la viga y 24 en la columna. La evaluación terminó en este proyecto hasta



**Fig. 2.** Detalle de las secciones de las estructuras estudiadas.

finis del 2006. Actualmente se está retomando el proyecto utilizando las mismas vigas antes de ser demolidas para análisis más detallados de la degradación del refuerzo. Los resultados de esta otra etapa se presentarán en un estudio futuro.

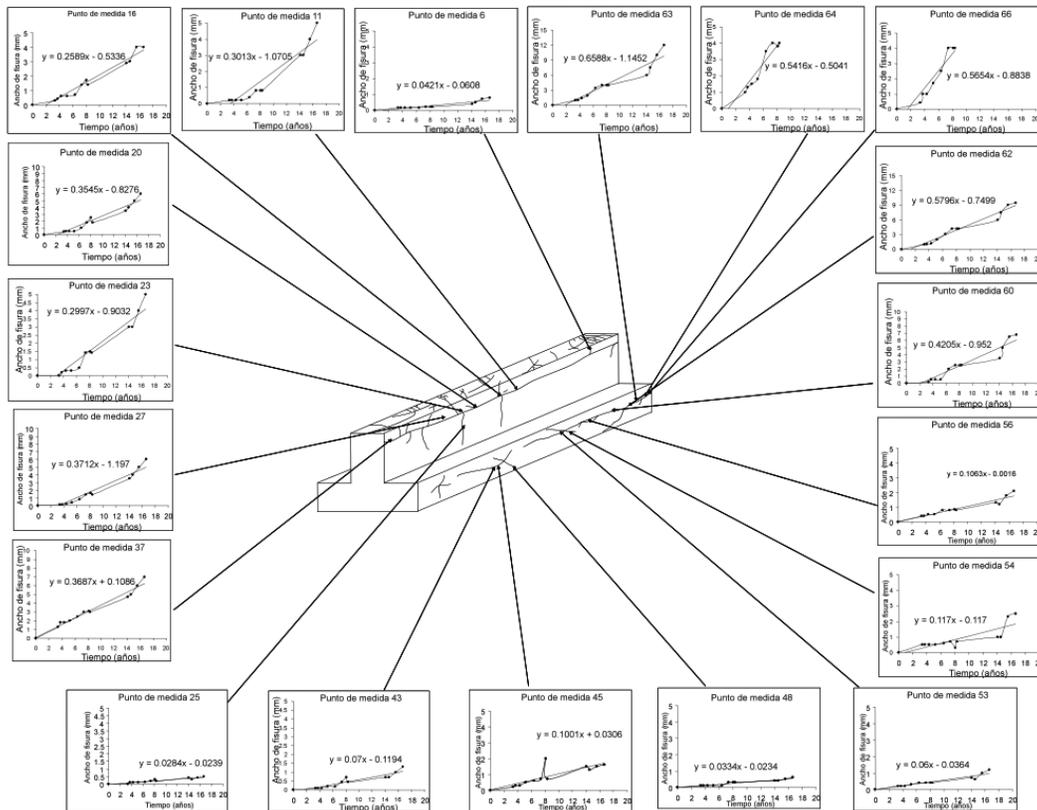
**Imagen 1.** Disposición de los elementos.



Tabla 1. Fechas de medición de las grietas.			
Elemento: Viga T		Elemento: Columna	
Medida	Fecha de Medición de Agrietamiento	Medida	Fecha de Medición de Agrietamiento
0	15 febrero 1990 (fabricación)	0	15 febrero 1990 (fabricación)
1	1 julio 1993	1	25 agosto 1995
2	17 noviembre 1993	2	28 mayo 1997
3	21 junio 1994	3	26 marzo 1998
4	4 mayo 1995	4	1 julio 1998
5	9 julio 1996	5	18 marzo 2004
6	9 julio 1997	6	13 septiembre 2004
7	27 marzo 1998	7	14 septiembre 2005
8	22 junio 1998	8	16 octubre 2006
9	18 marzo 2004		
10	13 septiembre 2004		
11	14 septiembre 2005		
12	16 octubre 2006		

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En las Figs. 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos, incluyendo la ubicación y el seguimiento de las grietas medidas.



**Fig. 3** Grietas en la viga T y su seguimiento.

Se tomó como criterio general del análisis estadístico el adjudicar todos los datos de agrietamiento obtenidos en todas las medidas realizadas en los elementos de estudio. Para el cálculo del factor de proporcionalidad se han tomado como límites de velocidad de corrosión  $I_{cor}^{rep}$  entre 1,5 y 2,0  $\mu\text{m}/\text{año}$ . La formulación planteada es del tipo  $w = k P_x / (C/\phi)$ , donde  $w$  es la abertura de grieta en el tiempo  $t$ ,  $k$  es un factor de proporcionalidad,  $P_x$  es la penetración de la corrosión en el tiempo  $t$ , y  $C/\phi$  es la relación recubrimiento/diámetro de la barra. Otra expresión usada fue similar sólo que se usó como denominador  $R_0$  que es el radio original de la barra en lugar de  $C/\phi$ .

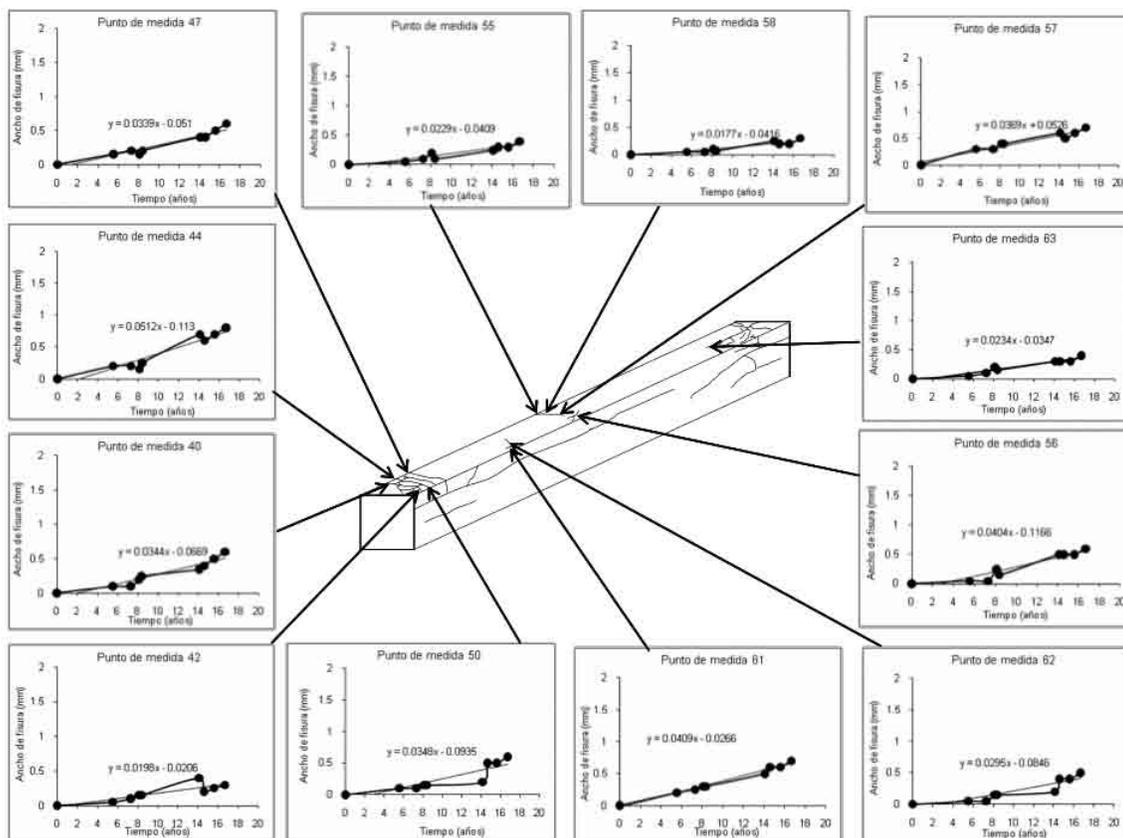


Fig. 4. Grietas en la columna y su seguimiento.

A continuación se muestran las fórmulas empíricas utilizadas con sus variables y unidades correspondientes:

$$w = k \frac{P_x}{C/\phi} \quad \text{Ec. 1}$$

Despejando  $k$ , nos queda:

$$k = \frac{w C}{P_x \phi} \quad \text{Ec. 2}$$

Pero, sabemos que  $P_x$  es igual a:

$$P_x = 0.0115 I_{cor}^{rep} t \quad \text{Ec. 3}$$

Sustituyendo  $P_x$  en la fórmula 2:

$$k = \frac{w_{(mm)} C_{(mm)}}{0.0115 I_{corr}^{rep} (mm/año) t_{(año)} \phi_{(mm)}} \quad \text{Ec. 4}$$

por lo que  $k$  es adimensional.

Para la segunda fórmula empírica evaluada se siguió el mismo procedimiento, sólo que se usó  $R_0$  que es el radio original de la barra en lugar de  $C/\phi$ . Por lo que al final queda:

$$k = \frac{w_{(mm)} R_0 (mm)}{0.0115 I_{corr}^{rep} (mm/año) t_{(año)}} \quad \text{Ec. 5}$$

por lo que  $k$  es en milímetros.

Los valores límite de velocidad de corrosión tomados son los mencionados con anterioridad (1,5 y 2,0  $\mu\text{m}/\text{año}$ ). Para el caso de la Viga T, se tienen diferentes diámetros de refuerzo que influyen en las grietas y para cada ancho de grieta detectado, según la zona y la forma de la grieta, se le asignó un valor del diámetro del refuerzo, existiendo tres diámetros diferentes: 6 mm (estribos), 12 mm (barras inferiores) y 16 mm (barras superiores). Para el caso de la columna, los diámetros fueron de 6 mm y 12 mm, y también se consideraron en el cálculo de la constante  $k$ . Los recubrimientos usados en las fórmulas también están relacionados con el diámetro del refuerzo que genera la grieta, teniendo las posibilidades mencionadas para cada estructura. El tiempo usado en los cálculos, fue el transcurrido hasta la medición del ancho de grieta correspondiente.

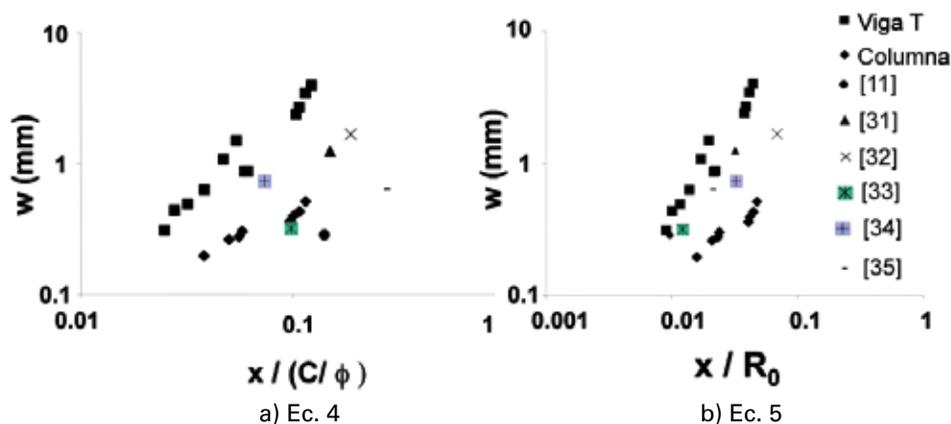
En publicaciones anteriores<sup>[29-30]</sup> se mostraron los resultados de la evolución del agrietamiento de elementos de concreto dañados por corrosión al estar expuestos al ambiente. A continuación se muestra el estudio más reciente de

**Tabla 2. Media y desviación estándar de los datos de ancho de grieta promedio de los elementos de estudio (exposición natural) y otros investigadores (exposición acelerada).**

		Wprom (mm)	Desv. Est.			wprom (mm)	Desv. Est.
Viga T	1-jul-93	0.31	0.34	Columna	25-ago-95	0.20	0.21
	17-nov-93	0.43	0.42		28-may-97	0.26	0.28
	21-jun-94	0.48	0.46		26-mar-98	0.28	0.26
	4-may-95	0.63	0.62		1-jul-98	0.30	0.31
	9-jul-96	1.07	1.02		18-mar-04	0.36	0.16
	9-jul-97	1.49	1.26		13-sep-04	0.39	0.12
	27-mar-98	0.86	1.11		14-sep-05	0.43	0.14
	22-jun-98	0.87	1.00		16-oct-06	0.51	0.15
	18-mar-04	2.38	1.86				
	13-sep-04	2.68	2.33				
	14-sep-05	3.41	2.78				
	16-oct-06	3.94	3.14				
	Adherencia [31]	1.25	0.52		Prismas [11]	0.28	0.20
Columnas [32]	1.66	0.76	Cilindros [34]	0.73	0.49		
Prismas [33]	0.32	0.30	Prismas [35]	0.63	0.58		

los datos obtenidos de forma natural, con los especímenes antes descritos, y con los datos de otros investigadores obtenidos en la Bibliografía.

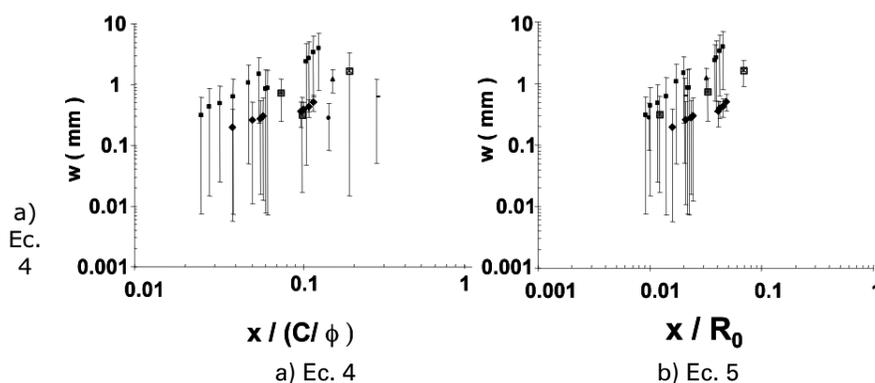
La Tabla 2 muestra las medidas de agrietamiento promedio obtenidas en cada una de las fechas de medición de los elementos expuestos al ambiente, así como la media de los datos obtenidos en laboratorio por diferentes investigadores. La Fig. 5 muestra gráficamente los datos de ancho de grieta promedio  $w$  obtenidos en este estudio para las ecuaciones 4 y 5 propuestas. Del mismo modo, la Fig. 6 muestra para ambas ecuaciones, los datos de ancho de grieta promedio con la dispersión o desviación estándar para cada fecha de medición de los elementos expuestos al ambiente y de los datos de los investigadores.



**Fig. 5.** Relación de agrietamiento de viga T, columna y otros investigadores con las ecuaciones propuestas.

Se puede observar que la tendencia de agrietamiento por corrosión natural y los datos obtenidos en laboratorio tiene una tendencia lineal si se colocan en escala logarítmica. Sin embargo, dependiendo del tipo de elemento expuesto al ambiente, los valores de ancho de grieta promedio son más elevados. Así, los valores de la viga T son mayores a los de la columna y a los obtenidos en pruebas aceleradas. Los datos obtenidos en pruebas aceleradas se mantienen entre los datos de la viga T y la columna expuestos al ambiente. La tendencia se mantiene para ambas ecuaciones propuestas. Las desviaciones de cada medición aumentan conforme aumentan los anchos de grieta promedio medidos.

La Fig. 7 muestra la distribución de los datos de ancho de grieta medidos desde la fabricación de los elementos (viga T, y columna) corroídos de forma natural. Se observa que la distribución de los datos es logaritmo normal en ambos casos y que, debido a que la viga T presenta un mayor número de medidas y de grietas, se presentan anchos de grietas muy elevados comparados con los anchos de grietas medidos en la columna.



**Fig. 6.** Relación de agrietamiento de viga T, columna (corrosión natural) y otros investigadores (corrosión acelerada) con las ecuaciones propuestas. Dispersión de los datos, escala logarítmica.

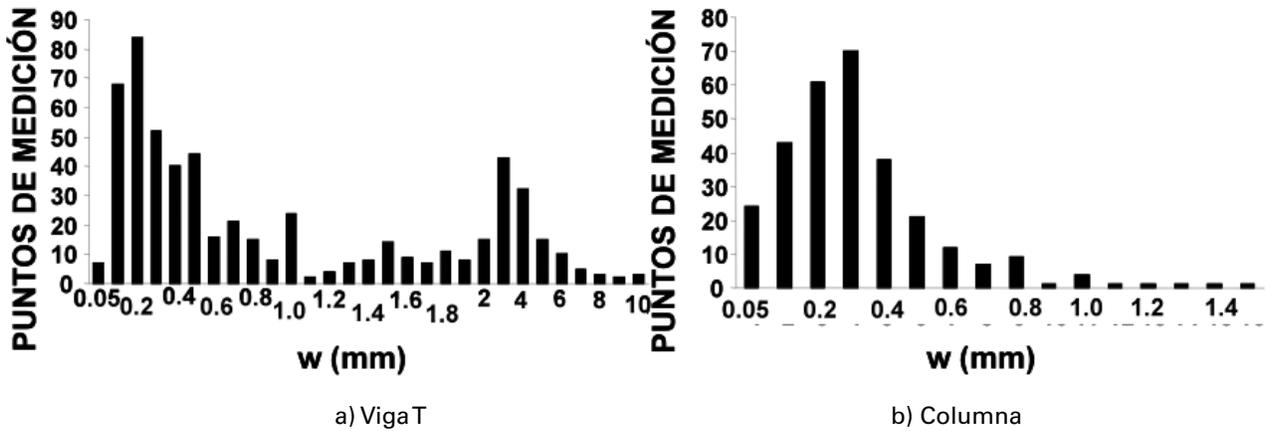


Fig. 7. Distribución de datos agrietamiento de viga T y columna (corrosión natural).

Continuando con el tratamiento de los datos obtenidos, la Fig. 8 muestra las líneas de tendencia y las ecuaciones de las mismas para los elementos corroídos de forma natural (viga T y columna) y para los datos obtenidos en pruebas aceleradas por otros investigadores. Se observa y confirma lo expuesto anteriormente. Los datos de la viga T son superiores a los de la columna y a los obtenidos por otros investigadores a nivel laboratorio (acelerados). El comportamiento de las ecuaciones cambia. Para la ecuación 4 los valores de las pendientes de las tendencias lineales son menores a las de las obtenidas con la ecuación 5. También, se puede observar una menor diferencia entre los datos tratados mediante la ecuación 5 que la obtenida mediante la Ecuación 4, confirmando lo comentado en publicaciones anteriores<sup>[29-30]</sup>.

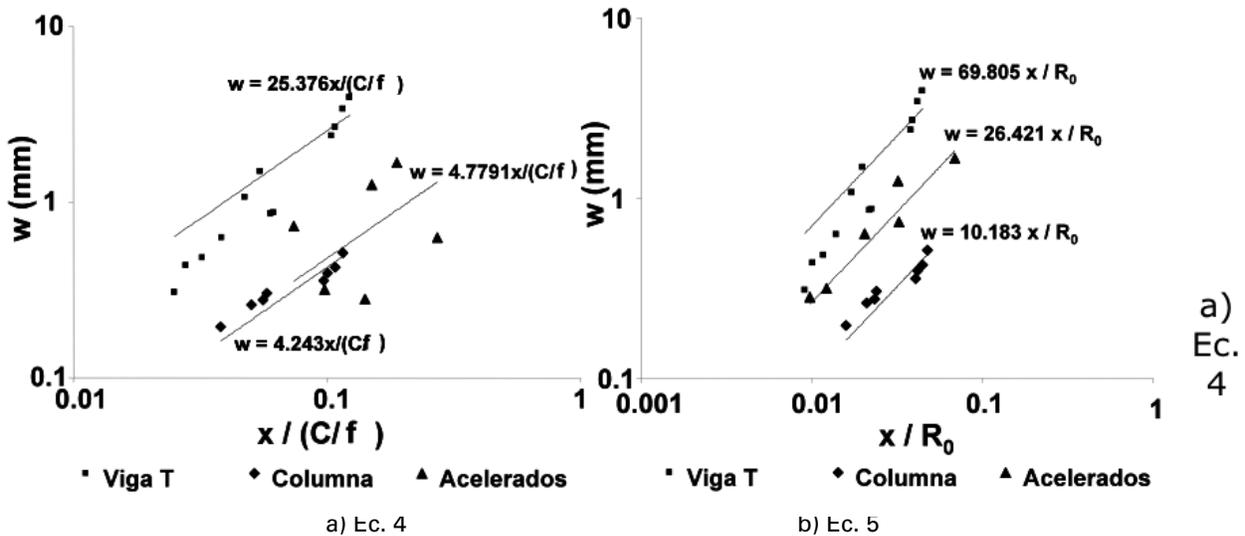
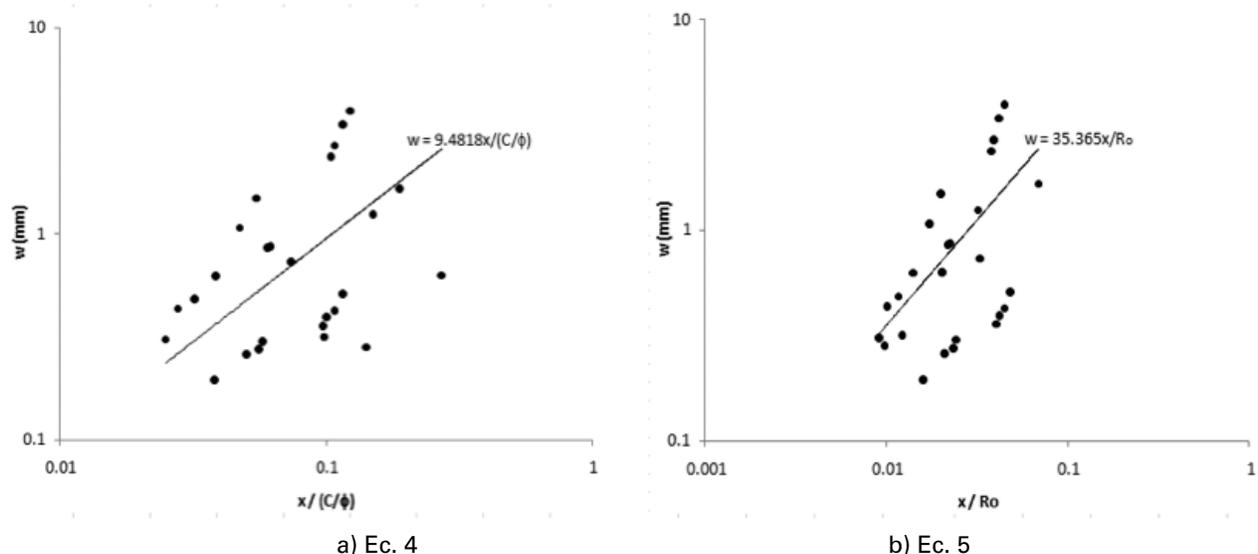


Fig. 8. Relación de agrietamiento de viga T, columna (corrosión natural) y en laboratorio de otros investigadores (corrosión acelerada) con las ecuaciones propuestas. Pendientes equivalentes al factor k por cada serie de datos.

La Fig. 9 muestra la tendencia de todos los datos obtenidos en este estudio así como el valor de la pendiente k y k' de las ecuaciones propuestas para estimar el ancho de grieta promedio. Podemos observar, que el valor de los factores k

y  $k'$  propuestos en publicaciones anteriores<sup>[29-30]</sup> varía, debido a que se ha realizado un mejor análisis de los datos obtenidos y consultados. A reserva de continuar con este estudio y realizar más verificaciones en campo sobre la aplicación de las ecuaciones propuestas, que han dado resultados aceptables para la estimación de la pérdida de sección promedio observando el ancho de grieta, la geometría del elemento y el factor  $k$  apropiado, se recomienda emplear como factores  $k$  y  $k'$  los valores de 9.5 y 35.5 mostrados en las figuras anteriores. Estos factores se incrementaron en un 50 y 40% aproximadamente a los propuestos en trabajos anteriores.



**Fig. 9.** Datos agrietamiento de viga T, columna (corrosión natural) y otros investigadores (corrosión acelerada) con las ecuaciones propuestas. Pendiente equivalente al factor  $k$  para todos los datos.

## CONCLUSIONES

Las ecuaciones empíricas propuestas (4 y 5) nos pueden dar una idea más cercana del mecanismo de propagación natural de la agrietamiento de elementos estructurales dado que los factores  $k$  y  $k'$  de cálculo han sido calibrados con datos de elementos reales. Sin embargo, es necesario obtener una mayor cantidad de datos de agrietamiento producto de la corrosión de elementos de concreto reales y posteriormente corroborar si estos factores  $k$  y  $k'$  cumplen con los modelos de vida remanente propuestos en la literatura.

## REFERENCIAS

- [1] Bedu, P, "Volumetric changes of cement paste under exposure to the simulated corrosion products of steel and their influence on cracking susceptibility", M. Sc. Eng. Thesis, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, 1993.
- [2] Fontana, MG, *Corrosion engineering*, New York, New York, USA, McGraw-Hill, tercera edición, pp. 556, 1986.
- [3] Sagoe-Crentsil, KK; Glasser, FO, "Steel in concrete: Part I. A review of the electrochemical and thermodynamic aspects", en *Magazine of Concrete Research*, 41 (149), pp. 205-212, 1989.
- [4] Sagoe-Crentsil, KK; Glasser, FO, "Steel in concrete: Part II. Electron microscopy Analysis", *Magazine of Concrete Research*, 41 (149), pp. 213-220, 1989.
- [5] Sagoe-Crentsil, KK; Glasser, FO, "Constitution of green rust and its significance to the corrosion of steel in Portland cement", en *Corrosion*, 49 (6), pp. 457-463.
- [6] Tuutti, K, "Corrosion of steel in concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1982.

- [7] Atimatay, E; Ferguson, M, "Early corrosion of reinforced concrete—A test report", en *ACI Structural Journal*, 70 (9), pp. 606-611, 1973.
- [8] Bazant, ZP, "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—theory", en *Journal Structural Division*, ST6, American Society of Civil Engineering, 105, pp. 1137-1153, 1979.
- [9] Bazant, Z. P., "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—application", en *Journal Structural Division*, ST6, American Society of Civil Engineering, 105, pp. 1155-1166, 1979.
- [10] Beeby, AW, "Cracking, cover and corrosion of reinforcement", en *Concrete International*, 5 (2), pp. 35-40, 1983.
- [11] Andrade, C; Alonso, C; Molina, FJ, "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I—Experimental test", en *Materials and Structures*, 26, pp. 453-464, 1993.
- [12] Andrade, C; Alonso, C; Molina, FJ, "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part II—Numerical model", en *Materials and Structures*, 26, pp. 532-548, 1993.
- [13] Andrade, C; Alonso, C; Rodríguez, J; García, M, "Cover cracking and amount of rebar corrosion: importance of the current applied accelerated tests", en *In concrete repair, Rehabilitation and protection*, RK Dhir and M R Jones editores, E&FN Spon, London, UK, pp. 263-273, 1996.
- [14] Alonso, C; Andrade, C; Rodríguez, J; Casal, J; García, M, "Rebar corrosion and time to cover cracking", *In concrete across borders*, International conference, Odense, Denmark, pp. 301-319, 1994.
- [15] Alonso, C; Andrade, C; Rodríguez, J; Diez, JM, "Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion" en *Materials and Structures*, 31, pp. 435-441, 1998.
- [16] Reinhardt, HW, "Fracture mechanics of an elastic softening material like concrete", en *Heron*, 29 (2), 1984).
- [17] Torres Acosta, AA; Sagués, AA, "Concrete cover cracking and corrosion expansion of embedded reinforcing steel", en *Proceedings of the third NACE Latin American region corrosion congress on rehabilitation of corrosion damaged infrastructures*, Castro, P; Troconis, O; Andrade, C editores, pp. 215-229 1998.
- [18] Pantazopoulou, SJ; Papoulia, KD, "Modeling cover cracking due to reinforcement corrosion in RC structures", en *Journal of Engineering Mechanics*, abril, 2001.
- [19] Liu, Y; Weyers, RE, "Modeling the time to corrosion cracking in chloride contaminated reinforcement concrete structures", en *ACI Materials Journal*, 95 (6), pp. 675-681, 1998.
- [20] B. Martín-Perez, "Service life modeling of RC highway structures exposed to chlorides", *Ph.D. dissertation*, Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, 1998.
- [21] Leung, KY, "Modeling of concrete cracking induced by steel expansion", en *Journal of Materials in Civil Engineering*, may-june, 2001.
- [22] Padovan, J; Jae, J, "FE modeling of expansive oxide induced fracture of rebar reinforced concrete", en *Engineering Fracture Mechanics*, 56 (6), pp. 797-812, 1997.
- [23] Ohtsu, M; Yoshimura, S, "Analysis of crack propagation and crack initiation due to corrosion reinforcement", en *Const. and Build. Mat.*, 11 (7-8), pp. 437-442, 1997.
- [24] Torres Acosta, A, "Cracking induced by localized corrosion of reinforcement in chloride contaminated concrete", *Ph.D. Thesis*, University of South Florida, Florida, USA, 1999.
- [25] Vidal, T; Castel, A; Francois, R, "Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete", en *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 165-174, 2004.
- [26] Andrade, C; Alonso, C; Rodríguez, J; Casal, J, "Relation between corrosion and concrete cracking", Reporte interno del proyecto Brite/Euram BE-4062. DG XII, C.E.C., Madrid, España, agosto de 1995.
- [27] Rasheeduzzafar, SS; Al-Saadoun; Al-Gahtani, AS, "Corrosion cracking in relation to bar diameter, cover and concrete quality", en *Journal of Material in Civil Engineering*, 4 (4), 1992.
- [28] Rodríguez, LM; Ortega, Casal, J; Diez, JM, "Corrosion reinforcement and service life of concrete structures", *Durab. Build. Mater. Compon.* 7 (1), pp. 117-126, 1996.
- [29] Muñoz, A; Andrade, C; Torres-Acosta, A; Rodríguez, J, "Relation between crack width and diameter of rebar loss due to corrosion of reinforced concrete members", *Electrochemical Society Symposium*, Cancun, Mexico, Oct 29<sup>th</sup>–Nov 3<sup>rd</sup>, 2006.
- [30] Muñoz, A; Andrade, C; Torres-Acosta, A, "Reinforced-concrete cover cracking due to the pressure of corrosion products", *FraMCoS 6*, Catania, Italy, June 17<sup>th</sup>–22<sup>nd</sup>, 2007.

[31] Rodríguez, J; Ortega, L; Casal, J; Vidal, MA, “Disminución de la adherencia entre hormigón y barras corrugadas debidas a la corrosión”, en *Hormigón y Acero*, 4º Trimestre, pp. 49-66, 1993.

[32] Rodríguez, J; Ortega, LM; Casal, J; “Load bearing capacity of concrete columns with corroded reinforcement”, en *Proceedings 4th SCI International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, Page, Bamforth and Figg editores, E&FN Spon, Cambridge, UK, pp.220-230, 1996.

[33] Cabrera, JG, “Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion”, *Cem. & Conc. Composites*, 18, pp. 47-59, 1996.

[34] Torres-Acosta, AA; Castro, P; Sagüés, AA, “Effect of corrosion rate in the cracking process of concrete”, en *Proceedings of XIV National Congress of the Mexican Electrochemical Society*, Merida, Mexico, pp. 24–28, 1999.

[35] Torres-Acosta, AA; Martínez-Madrid, M, “Residual life of corroding reinforced concrete structures in marine environment”, en *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (4), pp. 344-353, 2003.