

MODELACIÓN DE LA FISURACION DEL RECUBRIMIENTO DE HORMIGÓN DE ARMADURAS EN PROCESO DE CORROSIÓN

Néstor F. Ortega*, Claudio J. Orbanich ** y Rafael Fontao***

* Departamento de Ingeniería
Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253
8000 Bahía Blanca, Argentina
e-mail: nfortega@criba.edu.ar

** Becario de la Comisión de Investigación Científica (CIC) de la Pcia. de Buenos Aires

*** Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadora
Universidad Nacional del Sur

Palabras clave: Durabilidad, Hormigón Armado, Modelación Sistémica

Resumen. *En las estructuras de hormigón armado, que se encuentran expuestas a la acción de ambientes agresivos, se produce la corrosión de sus armaduras. Estos productos de corrosión provocan presiones sobre el hormigón adyacente, que da lugar a la fisuración del recubrimiento. Estas fisuras abren un camino más rápido para la llegada desde el exterior de los productos, que intervienen en la corrosión de las armaduras. Esta situación afecta a la capacidad portante de la estructura, acortando su vida útil.*

En este trabajo se modeló sistémicamente, la variación del ancho de las fisuras del recubrimiento de hormigón, en función de la pérdida producida por corrosión, de la sección transversal de la barra, con el avance del tiempo. La simulación se efectuó mediante un programa en Ambiente STELLA⁽⁹⁾. Para analizar el ajuste del modelo propuesto, se lo compara con resultados obtenidos experimentalmente.

El modelo desarrollado analiza la variación del ancho de las fisuras, teniendo en cuenta distintas situaciones reales, considerándose los parámetros más importantes que regulan la marcha de este proceso: la relación de agua / cemento del hormigón, la relación recubrimiento de hormigón / diámetro de las barras y la pérdida de radio de la armadura. En todos los modelos propuestos se estudia la influencia de la intensidad de la corriente que origina la corrosión de las barras, debido a que este es un factor clave, que controla la evolución de las fisuras.

1 INTRODUCCIÓN

El óxido generado por la corrosión de la armadura ubicada dentro, de una estructura de hormigón, provoca una presión sobre el hormigón adyacente que termina originando fisuras, que se originan desde adentro hacia fuera, de la masa de hormigón. Estas fisuras, que se desarrollan paralelamente a las armaduras, pueden afectar a la capacidad portante y a la serviciabilidad de la estructura. En consecuencia acortan la vida útil de la misma, facilitando la llegada de los productos que intervienen en la corrosión de las armaduras (oxígeno, agua y en determinados casos cloruros).

La velocidad de corrosión (medida a través de la intensidad de corriente, se origina en la barra afectado por la corrosión) es el factor clave que controla la evolución de las fisuras, y por lo tanto está vinculada con la posibilidad de predicción de la seguridad y la serviciabilidad residual de las estructuras de hormigón en proceso de degradación.

En estas investigaciones se desarrolló un modelo que permite aproximar la variación del ancho de fisura, en función de las principales variables que intervienen en este proceso⁽¹⁾⁽²⁾, relación agua / cemento (a/c), relación recubrimiento / diámetro de la armadura (c/ϕ) y pérdida de radio de la armadura (Δr), dependiendo la evolución de esta última de la velocidad de corrosión, mediante una aplicación de la modelación sistémica⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

2 CONDICIONES EXPERIMENTALES

Para realizar la modelación sistémica se debió partir de datos obtenidos experimentalmente. En el trabajo presentado en la referencia (1) se fabricaron dos tipos de probetas de hormigón armado, cuyas dimensiones eran de 15 x 15 x 38 cm, con barras de 8, 10, 12, 16 y 20 mm de diámetro y otras probetas de 20 x 20 x 20 cm, con barras de 25 mm de diámetro.

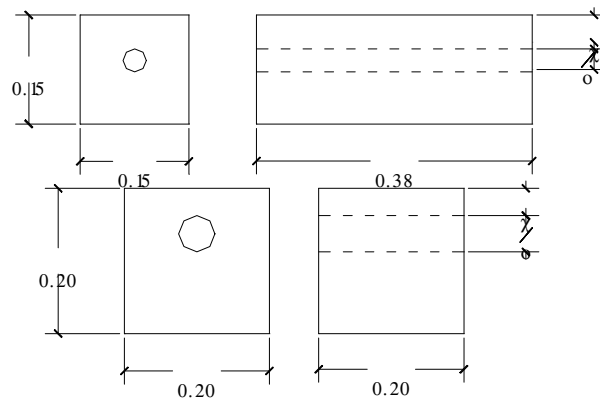


Figura 1: Probetas

Las probetas se fabricaron con cemento Tipo I 45 A y áridos silicios de machaqueo, cuyo tamaño máximo fue de 12 mm. La proporción de cemento utilizada fue de 370 y 270 kg/m³, con relaciones agua / cemento variando entre 0.52 y 0.65, estas relaciones están dentro del rango que son de uso frecuente en la construcción⁽¹⁾⁽²⁾.

Para facilitar la corrosión de la armadura se añadió un 3% de cloruro de calcio en peso de cemento, al agua de amasado. Además, para acelerar el proceso electroquímico de corrosión se le aplicó, mediante un galvanostato, una corriente externa a las armaduras. Estas armaduras actúan como ánodo y el cátodo se materializó mediante una malla metálica, ubicada sobre el hormigón en la zona a corroer.

Se aplicaron corrientes cuya intensidad es constante y con una magnitud de 10 y 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Cabe acotar que este último valor corresponde a unas 10 veces, el máximo valor detectado en estructuras muy corroídas y en contacto con el agua de mar⁽⁶⁾.

El crecimiento de las fisuras se midió con una sensibilidad de 0.01, mediante un microscopio portátil (con 8 a 10 aumentos),

3 PARÁMETROS ANALIZADOS EN ESTE TRABAJO

A continuación se detalla la incorporación de los distintos parámetros en el modelo propuesto.

3.1 Efectos de la relación recubrimiento / diámetro

Este es uno de los parámetros más estudiados en la bibliografía⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾, debido a que la determinación de la mayoría de los ensayos efectuados, se han dedicado a la determinación de la influencia de esta relación, en la fisuración del recubrimiento. Cabe destacar que esta relación es una variable, que una vez realizada la probeta no hay manera de modificarla, como ocurre con la velocidad de corrosión.

Mediante un Análisis de Regresión Múltiple⁽⁷⁾⁽⁸⁾, empleando los resultados obtenidos experimentalmente en (1), para una velocidad de corrosión de 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y una relación agua / cemento de 0.52, se obtuvo una ecuación que relaciona al ancho de fisuración con la relación recubrimiento / diámetro (c/ϕ) y la disminución del radio de la barra debido a la corrosión (Δr).

$$\begin{aligned}
 w = & \left(-2 \times e^{-6} \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^2 + 2 \times e^{-5} \times \left(\frac{c}{\phi} \right) - 5 \times e^{-5} \right) \times \Delta r^2 + \\
 & + \left(-0.0001 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^3 + 0.0018 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^2 - 0.0098 \times \left(\frac{c}{\phi} \right) + 0.0178 \right) \times \Delta r + \\
 & + \left(0.0034 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^3 - 0.0496 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^2 + 0.2158 \times \left(\frac{c}{\phi} \right) - 0.3001 \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

3.2 Efectos de la corriente aplicada

Como ya se había indicado anteriormente, la velocidad de corrosión es un parámetro fundamental. En los estudios experimentales⁽¹⁾ se ha determinado que, con pequeños cambios de ésta, se producen modificaciones importantes en los anchos de fisuración.

Desde el punto de vista de los efectos mecánicos, y realizando una analogía con lo que ocurre en los ensayos de los modelos físicos, se puede considerar la disminución de la velocidad de corrosión, como una merma en la velocidad de aplicación de las "carga externas". Se ha demostrado experimentalmente que la aplicación de cargas con velocidades lentas, produce una menor resistencia en las estructuras afectadas y mayores deformaciones, lo que se traduciría, en el presente caso, en un adelanto en la aparición de las primeras fisuras. Por ello el ancho de las fisuras crece más, con una velocidad de corrosión de 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, que con 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, para una misma pérdida de la sección transversal de las barra.

Con el fin de considerar en la modelación sistémica este efecto, se realizó una aproximación lineal de los resultados obtenidos experimentalmente para una relación recubrimiento/diámetro de 4.38 y una relación agua / cemento de 0.52, obteniéndose una ecuación que relaciona la variación del ancho de fisuración (w), con la velocidad de corrosión (i_{corr}) y la pérdida del radio de la barra debida a la corrosión (Δr). La ecuación obtenida por la aplicación del Análisis de Regresión⁽⁷⁾⁽⁸⁾, es la siguiente:

$$w = (-0.0001 \times i_{corr} + 0.0147) \times \Delta r + (0.0005 \times i_{corr} - 0.2124) \quad (2)$$

A partir de la Ley de Faraday⁽¹⁾ se puede obtener una correlación que vincula la disminución del radio de las barras (Δr), producido por la corrosión, con el tiempo transcurrido durante el proceso (t) y la velocidad de corrosión (i_{corr}), la expresión de esta relación es la siguiente:

$$\Delta r_{(\mu m)} = 0.032 \times i_{corr(\mu A/cm^2)} \times t(días) \times 365 \quad (3)$$

3.3 Efectos de la relación agua / cemento.

El efecto que posee la relación agua / cemento se analizó manteniendo constante la velocidad de corrosión en 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y con una relación recubrimiento / diámetro de 2. Se observó que a medida que disminuye la relación agua / cemento (a/c), manteniendo constante el valor de la pérdida de radio (Δr), disminuye el ancho de las fisuras del recubrimiento (w). Con el fin de cuantificar este efecto, se realizó con datos extraídos de la referencia (1) un Análisis de Regresión⁽⁷⁾⁽⁸⁾, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$w = \left(-0.0069 \times \left(\frac{a}{c} \right) + 0.0071 \right) \times \Delta r + \left(0.0185 \times \left(\frac{a}{c} \right) - 0.1187 \right) \quad (4)$$

4 MODELACIÓN SISTÉMICA

La modelación sistémica es una metodología para estudiar modelos de un sistema, basados en la opinión de expertos, en la observación y en la simulación con fines inteligentes.

En esta investigación se modeló sistémicamente⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ la variación del ancho de fisura del recubrimiento de hormigón (w), en función de la variación del radio de la barra, con respecto al tiempo transcurrido desde que se despasivó la barra que está corroída. Con el fin de simplificar el análisis se denominó al primer término de la Ecuación (1), donde $w = f(c/\phi, \Delta r)$ como *Cte.1*, que se encuentra en función de la relación recubrimiento / diámetro (c/ϕ); de la misma manera llamamos a *Cte.2*, al segundo término de dicha ecuación, que está en función de la relación recubrimiento / diámetro (c/ϕ), y *Cte.3* al término independiente de la misma.

$$Cte.1 = \left(-2 \times e^{-6} \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^2 + 2 \times e^{-5} \times \left(\frac{c}{\phi} \right) - 5 \times e^{-5} \right) \quad (5)$$

$$Cte.2 = \left(-0.0001 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^3 + 0.0018 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^2 - 0.0098 \times \left(\frac{c}{\phi} \right) + 0.0178 \right) \quad (6)$$

$$Cte.3 = \left(0.0034 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^3 - 0.0496 \times \left(\frac{c}{\phi} \right)^2 + 0.2158 \times \left(\frac{c}{\phi} \right) - 0.3001 \right) \quad (7)$$

Para generalizar los resultados y así poder modelar con distintas velocidades de corrosión y cualquier relación agua / cemento, se efectuó lo siguiente:

1) se interpolaron los resultado de la publicación (1), determinándose una relación entre el ancho de fisura y la velocidad de corrosión (i_{corr}), teniendo como variable la perdida de radio (Δ_r), obteniéndose la Ecuación (2).

2) se interpolaron los resultado de la publicación (1), hallándose una relación entre el ancho de fisura y la relación agua / cemento, teniendo como variable la perdida del radio de la barra (Δ_r) estableciéndose la Ecuación (4).

3) Con el fin de corregir el ancho de fisuras ($w(c/\phi)$) obtenido de la Ecuación (1), se incorporan dos factores de corrección, que permiten tener en cuenta los distintos valores de la velocidad de corrosión (i_{corr}) y las posibles relaciones de agua / cemento, debido a que esta ecuación fue determinada para una $i_{corr} = 100 \mu A/cm^2$ y una relación agua / cemento, $a/c = 0.52$; en ambos casos se consideró que estas variables varían proporcionalmente. De esta manera se obtiene:

$$F = w(c / \phi) \times \left(\frac{w(i_{corr})}{w(i = 100 \mu A / cm^2)} \right) \times \left(\frac{w(a / c)}{w(a / c = 0.52)} \right) \quad (8)$$

Cabe acotar que el término independiente de w en la Ecuación (1) se lo consideró como el valor inicial del nivel w .

5 MODELACIÓN SISTÉMICA EN AMBIENTE STELLA

Para analizar el ajuste del modelo propuesto, se realizó un programa en Ambiente STELLA⁽⁹⁾, en el que se tomó como "nivel" al ancho de fisura del recubrimiento (w), y en este caso el flujo, es la variación del ancho de fisura, con respecto a la pérdida del radio de la barra. Este problema presentado en términos matemáticos, tiene la siguiente forma:

$$\frac{dw}{dr} = (Cte.1 \times 2\Delta r + Cte.2) \times \frac{dr}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{dr}{dt} = 0.032 \times 365 \times i_{corr} \quad (10)$$

$$\frac{dw}{dr} = (Cte.1 \times 2\Delta r + Cte.2) \times 0.032 \times 365 \times i_{corr} \quad (11)$$

Cabe acotar que en la Ecuación del flujo dw/dr , Ecuación (9), no aparece la Cte.3, no obstante esta se tuvo en cuenta como valor inicial del nivel w .

En este problema las variables de entrada son la velocidad de corrosión (intensidad de corriente: i_{corr}), la relación agua / cemento y el recubrimiento de hormigón / diámetro de la barras.

5.1 Parámetros ingresados en el modelo

A continuación se detallan la lista de parámetros que se deben ingresar en el modelo:

$i_c = i_{\text{corr}}$ inicial: velocidad de corrosión

agua / cemento: relación agua / cemento del hormigón del recubrimiento

recubrim / diámetro: recubrimiento del hormigón / diámetro de las barras

En la Figura 2 se puede observar el diagrama de flujo del modelo propuesto, según los principios de la modelación sistémica.

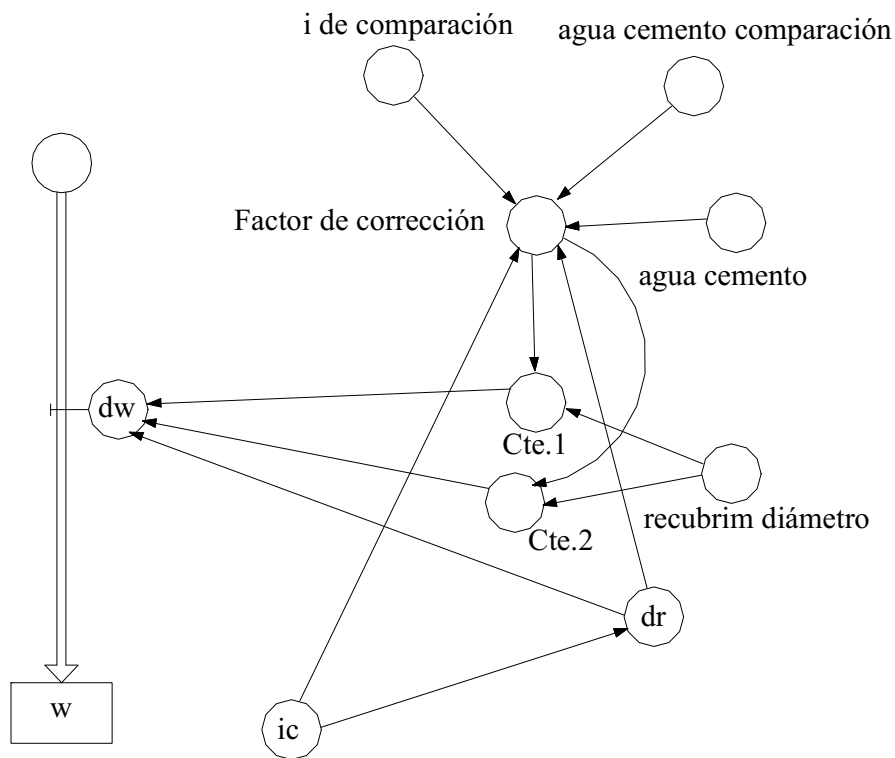


Figura 2: Diagrama de flujo

6 ANÁLISIS DE LOS EJEMPLOS DESARROLLADOS

En la Figura 3 se ha graficado el comportamiento del ancho de las fisuras de probetas de hormigón armado, en las que se ha mantenido constante la relación agua / cemento y recubrimiento / diámetro, variando la velocidad de corrosión. Como se puede apreciar, cuanto mayor es la velocidad de corrosión se obtienen anchos de fisuras más importantes, como era de esperar. En el caso de una velocidad de corrosión de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a partir de los 5 años aproximadamente, son inaceptables para cualquier estructura.

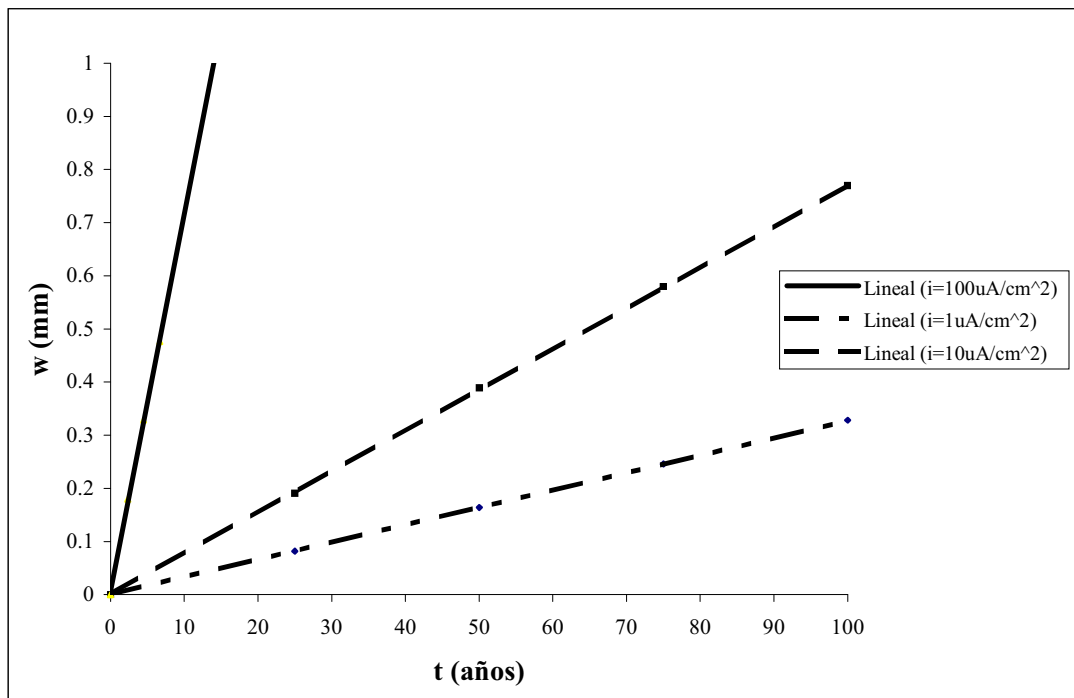


Figura 3: Variación del ancho de fisura en el tiempo, para distintos valores de la velocidad de corrosión, considerando $a/c=0.52$ y $r/d=2.5$

Por su parte, en la Figura 4 se mantuvo constante la relación recubrimiento / diámetro y la velocidad de corrosión, habiéndose variado la relación agua / cemento. Como se puede apreciar para una relación agua / cemento menor, se obtiene un mayor cuadro de fisuración, obteniéndose una estructura de poros más cerrada y por ende un menor lugar para que se ubiquen los productos de corrosión, lo que genera mayores presiones sobre el hormigón. No obstante, es importante destacar que el hormigón que posee menor relación agua / cemento es menos impermeable y por ende tardaría más tiempo en despasivarse la armadura que se encuentra dentro de su masa, en este trabajo se analiza el proceso a partir de la despasivación.

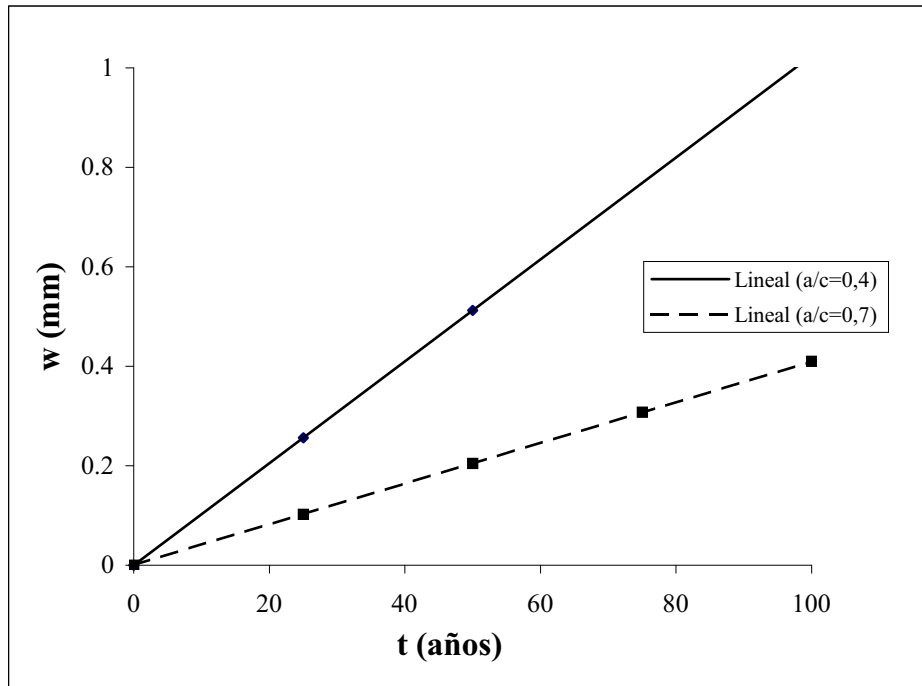


Figura 4: Variación del ancho de fisuras con el transcurso del tiempo para distintos valores de la relación agua / cemento, para $i_{\text{corr}} = 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $r/d = 2.5$

Con relación a la Figura 5, en las que se mantuvo constante la relación agua / cemento y la velocidad de corrosión, habiéndose variado solo la relación recubrimiento / diámetro. Aquí se aprecia que el comportamiento es muy similar, no obstante como era de esperar, la probeta con menor relación recubrimiento / diámetro, presentó una fisuración un poco superior a la otra, que poseía una mayor relación recubrimiento / diámetro.

Por último, en la Figura 6 se gráfica el comportamiento de un modelo con una velocidad de corrosión relativamente baja, como ocurre en las estructuras no expuestas a ambientes agresivos. Aquí se observa que se llegó a un ancho de fisura de 0.30 mm a los casi 100 años de vida de la estructura, considerándose éste como un resultado probable de presentarse en construcciones reales.

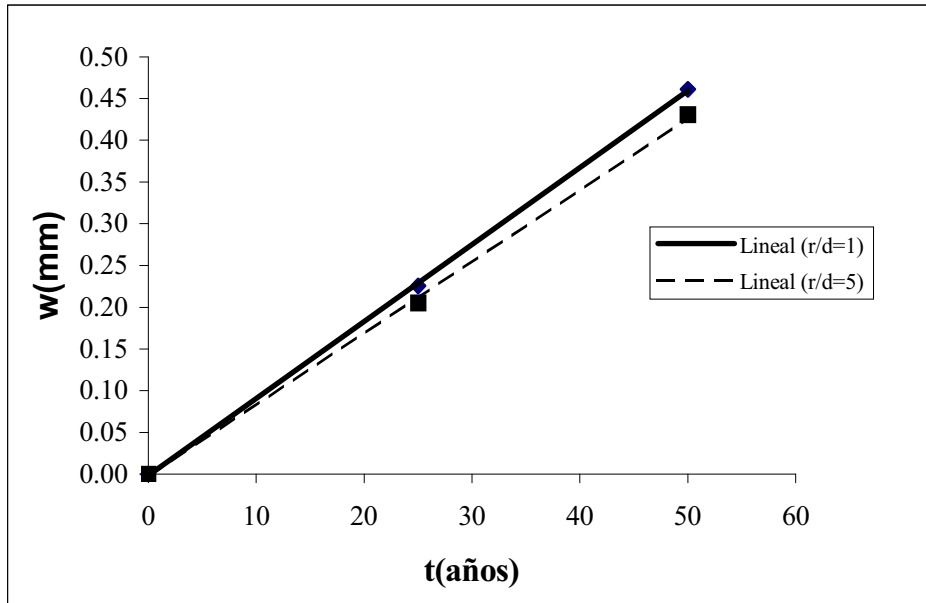


Figura 5: Variación del ancho de fisuras en el tiempo para distintos valores de la relación recubrimiento diámetro, para $i = 10 i_{\text{corr}} = 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $a/c = 0.52$

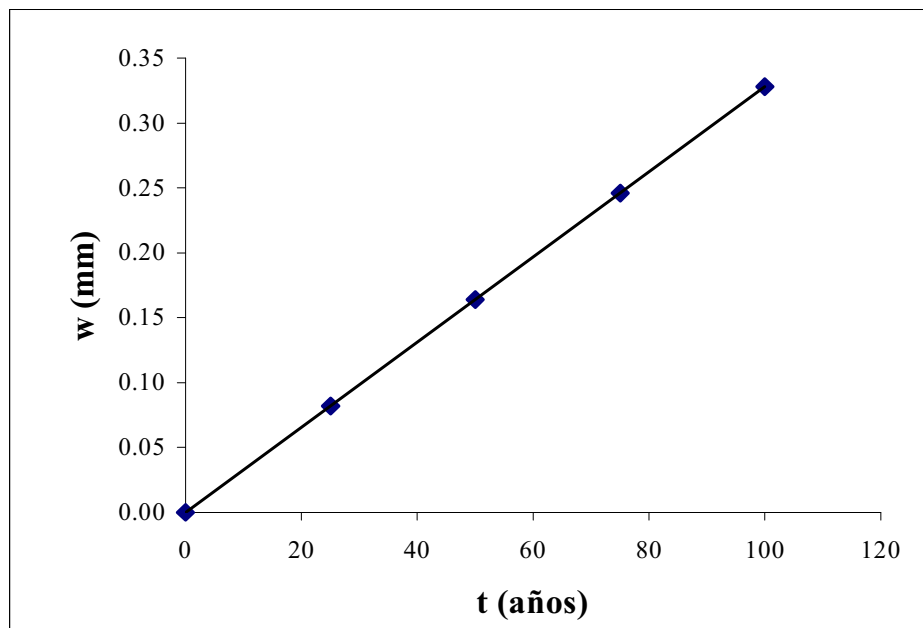


Figura 6: Variación del ancho de fisuras en el tiempo para $i_{\text{corr}} = 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, para $a/c=0.52$ y $r/d=2.5$

7 CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos con la Modelación Sistémica propuesta, se puede decir que el modelo propuesto aproxima con una diferencia aceptable, respecto de los resultados obtenidos experimentalmente. Por ello, se considera que este modelo puede ser muy útil, a los efectos de anticipar el deterioro de una estructura de Hormigón Armado, con sus armaduras afectadas por la corrosión, en ambientes con distintos grados de agresividad, habiéndose determinado ciertas relaciones geométricas y medida la velocidad de corrosión en la estructura afectada.

8 REFERENCIA

- [1] C. Alonso, C. Andrade, J. Rodriguez, J.M. Diez “Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion”, *Materials and Structures*, volume 31, August - September, 435–411, (1998).
- [2] M. I. Schierloh, N.F. Ortega, L. Señas, “Relación entre algunas propiedades del Hormigón del recubrimiento y una degradación, producida por los productos de corrosión de las armaduras”, *14 Reunión Técnica de Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*, Tomo 1, 125-132, Olavarria (2001).
- [3] J. Aracil, *Introducción a la dinámica de sistemas*, Ed. Alianza, (1983).
- [4] J. O’Connor, I. McDermott, *Introducción al Pensamiento Sistémico*, Ed. Urano, (1998).
- [5] J. Forrester, *Principles of Systems*, Ed. Wright-Allen Press, (1968).
- [6] J. Rodriguez, L.M Ortega, A.M. Garcia, “Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de Hormigón, mediante un ejemplo desarrollado dentro del proyecto Eureka EU 401”, *Hormigón y Acero N° 189*, 79-91, (1993)
- [7] N. Draper, H. Smidt, “Applied Regression Analysis”, J. Willey, (1981)
- [8] Seder, G.A.F., “Linear Regression Analysis”, pp. 214-238, J. Willey, (1977)
- [9] Manual de Usuario “STELLA”, High Performance Systems, Hanover, <http://www.hps-inc.com>