

## Análisis numérico de la fisuración superficial de estructuras de hormigón armado por efecto de la corrosión

### *Numerical analysis of the superficial fissuration of concrete structures for corrosion effect*

M. H. Peralta<sup>(\*)</sup>, I. E. Rivas<sup>(\*)</sup>, N. F. Ortega<sup>(\*\*)</sup>

#### RESUMEN

El proceso de corrosión de armaduras ubicadas dentro del hormigón da origen a la aparición de fisuras lo que reduce la capacidad portante y aumenta las deformaciones de los elementos afectados. Esto tiene directa relación con los estados límites últimos y de servicio, afectando la durabilidad de las estructuras.

Diversas variables influyen sobre dicho proceso corrosivo y sobre la generación y propagación de fisuras longitudinales en la superficie del elemento. Existen numerosos estudios experimentales y numéricos que abordan el tema, efectuando el seguimiento de dichas fisuras.

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la relación adimensional recubrimiento de hormigón / diámetro de barra (C/D) en función de la posición de la barra, y estimar la presión necesaria para generar la fisura. Al efecto se emplea el Método de los Elementos Finitos utilizando un modelo elástico lineal, para simular el proceso de fisuración del recubrimiento en elementos de hormigón armado. La acción sobre el hormigón, provocada por los productos de corrosión, se materializa mediante una presión actuando radialmente sobre el hormigón adyacente a la barra. Se considera que las zonas en que la tensión alcanza la resistencia característica de tracción del hormigón permiten establecer la ubicación de las fisuras y la presión que las origina. Esta última se ha podido relacionar con la pérdida de radio determinada empíricamente por otros autores basados en resultados experimentales, permitiendo llegar a una expresión para estimar dicha presión en función de la relación C/D y de la calidad del hormigón.

689-17

**Palabras clave:** Método Elementos Finitos, fisuras, hormigón.

#### SUMMARY

*In this work the mechanical behavior of the covering is analyzed, using the finite element method, when the same one is put under a circumferential pressure in the zone of contact with the reinforcement. This pressure simulates the effect generated by the corrosion products and is valued from experimental studies of other authors.*

*The crack process is associate with the evolution of the originated stresses. The zones that reach the permissible tension stresses, allow to locate the appearance of the cracks.*

*In this work the covering/diameter (C/D) ratio and bar position influence is analyzed. The pressure necessary to generate cracks is obtained relating it to lost of reinforcement radius, obtained experimentally by other authors. This interrelation let to arrive to an expression that allow to consider this pressure as a function of the relation cover/reinforcement diameter and of the concrete quality.*

**Keywords:** Finite Element Method, cracks, concrete.

<sup>(\*)</sup> Ms. Ing. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bs.As.

<sup>(\*\*)</sup> Dr. Ing. Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (ARGENTINA)

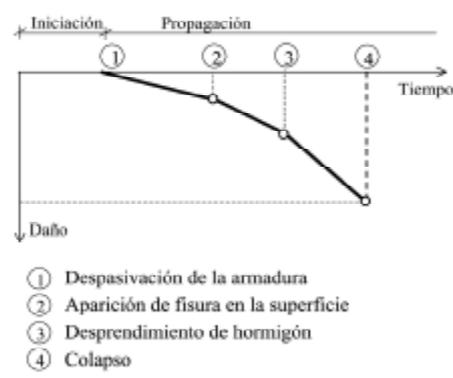


Figura 1. Etapas del proceso corrosivo en el hormigón armado.

### 1. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento y el deterioro es un proceso natural e inevitable para los materiales de construcción. En particular, el hormigón armado es el más empleado de los materiales disponibles en la industria de la construcción, debido a su versatilidad, lo que justifica su estudio a efectos de desarrollar procedimientos de evaluación de las estructuras existentes y mejorar los nuevos diseños.

El proyecto de las estructuras de hormigón, debe cumplir con los principios básicos de la mecánica estructural: equilibrio, resistencia y rigidez. Además de los cuales, en las últimas décadas se le suman el minimizar el impacto ambiental y la durabilidad. Esta última suele estar contemplada en los respectivos códigos y debe ser acorde a la vida útil del proyecto en su conjunto y se relaciona directamente con los requerimientos mecánicos y de servicio. La situación ideal para la vida útil de una estructura se da cuando el envejecimiento es tan lento, que la misma mantiene unas condiciones satisfactorias durante la vida útil de servicio prevista, sin la necesidad de realizar importantes inversiones para su mantenimiento.

La Figura 1 muestra el comportamiento de una estructura de hormigón, basado en el modelo de Tuutti, donde se aprecian los hechos que delimitan diferentes etapas del proceso corrosivo de las armaduras (1). Los puntos 1 y 2 representan hechos relacionados con las condiciones de servicio de la estructura, el punto 3 se relaciona con esta última y con los estados límites, y el 4 con el colapso de la estructura.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

Etapa 1: hasta que se produce la despasivación de las armaduras.

Los agentes agresivos que normalmente ingresan a través de la estructura de poros del hormigón, mediante los fenómenos de difusión, absorción y/o permeabilidad, al tomar contacto con las armaduras las *despasivan*. Esta etapa finaliza con el inicio de la corrosión de las mismas.

Etapa 2: hasta la aparición de la fisura en la superficie del hormigón del recubrimiento.

Se extiende entre los puntos 1 y 2 de la Figura 1. En este caso, la vida de servicio incluye un cierto período de propagación de la actividad corrosiva, durante la cual el área de la sección transversal de la armadura se reduce progresivamente. Simultáneamente, se van llenando los poros con los productos de corrosión; una vez saturados se produce una acción expansiva que provoca una presión sobre el hormigón adyacente a la barra.

Etapa 3: hasta que se produce el desprendimiento del recubrimiento de hormigón.

Una vez que el hormigón rompe a tracción se *origina la fisuración* del mismo, acelerándose el proceso corrosivo. Se considera que esta etapa comprende dos instancias diferenciadas de estudio. En primer lugar la fisura aparece sobre la superficie del hormigón (*generación*) y posteriormente incrementa su ancho (*propagación*). Esta segunda etapa se extiende hasta que la fisura alcanza los valores admisibles, definidos por los códigos. Se extiende entre los puntos 2 y 3 de la Figura 1.

Etapa 4: hasta el colapso.

Cuando la corrosión continúa, después de la generación y propagación de la fisura, puede conducir al desprendimiento del recubrimiento de hormigón. Se extiende entre los puntos 3 y 4 de la Figura 1. La pérdida de la sección transversal de la armadura y, hasta cierto punto, también la pérdida de sección del hormigón, pueden conducir a una reducción de la capacidad portante de la estructura.

El desprendimiento de hormigón se considera como un estado inaceptable. Sin embargo, el desprendimiento no necesariamente conduce al colapso de una estructura y podría, por lo tanto, ser considerado un estado límite de servicio. El colapso de la estructura de hormigón se producirá cuando las pérdidas: de sección transversal del hormigón y/o acero y/o la adherencia lleguen

a disminuir notablemente la capacidad de carga del elemento, agotándose la seguridad prevista por las normas.

El fenómeno descrito explica claramente la incidencia que determinadas variables tienen en el mismo. Al respecto, se destaca la influencia que pueden tener una serie de parámetros sobre los mecanismos de transporte en el interior del hormigón, tales como: granulometría, tipo y forma de los áridos, tipo de curado (2), y otros parámetros que intervienen en la calidad del hormigón. Asimismo, las estructuras están sometidas a distintos tipos de acciones (retracciones, sobrecargas, etc.), que pueden originar la aparición de fisuras que facilitan el transporte.

La cantidad de productos generados por la corrosión es función directa de la pérdida de sección de la barra, y la presión que producen depende de la calidad del hormigón adyacente a la barra, ya que si éste posee una estructura de poros abierta, la misma puede facilitar la difusión de los productos de corrosión hacia el exterior.

Como se ha mencionado, durante el proceso de corrosión se produce la pérdida de sección de las armaduras, que contribuye a la disminución de la capacidad portante; ésta será función del diámetro remanente de la barra, del porcentaje de pérdida de adherencia, de la fisuración del hormigón y de las alteraciones en las propiedades mecánicas del acero (fragilización). Por otro lado, el espesor del recubrimiento influye en la velocidad de desarrollo del proceso de degradación de la estructura. Estudios experimentales han demostrado la incidencia de la relación recubrimiento de hormigón / diámetro de barra (C/D), en la generación y propagación de fisuras. La incidencia es mayor mientras el espesor de las fisuras sea menor a 1mm, a partir de allí la evolución de las mismas es muy errática pues el óxido ya puede difundirse libremente por la propia fisura, disminuyendo por lo tanto la presión que dio origen a las mismas (3).

Una de las posibles razones por las que hasta ahora no se ha podido entender de una manera clara el proceso de fisuración y, consecuentemente, no se disponga del suficiente conocimiento como para predecir su magnitud y consecuencias es la complejidad que entraña en él la presencia de numerosos factores, físicos y químicos, todos ellos de comportamiento poco homogéneo (4).

Por un lado, existen numerosos estudios experimentales abocados al tratamiento de la etapa 3 (generación y propagación de fisuras) (5, 6, 7). Por otro lado, el análisis numérico-computacional facilita el estudio del proceso previo a

la generación de fisuras posibilitando el análisis de la influencia de las variables que intervienen en forma aislada.

En el presente trabajo se realiza la simulación del proceso de deterioro, a través de la aplicación del Método de los Elementos Finitos, a efectos de estudiar la influencia de la relación recubrimiento de hormigón / diámetro de barra en dicho proceso, para barras centradas y en esquina. La metodología de análisis propuesta permite aislar los efectos mecánicos (tensiones, deformaciones) del proceso, de manera que puedan ser estudiados sin interferencias del tipo físico.

Se considera que los elementos estructurales analizados se encuentran en la denominada etapa 2 del proceso corrosivo. A tal fin, se ha simulado la acción expansiva de los óxidos mediante una presión actuando radialmente en el hormigón adyacente a la barra afectada. Esta acción produce un estado tensional, que es el responsable de la evolución de las fisuras internas, de la generación y de la posterior evolución de las mismas en la superficie de la estructura.

## 2. MODELOS ANALIZADOS

A efectos de lograr el objetivo planteado anteriormente, se analizan modelos planos y espaciales utilizando, en esta primera etapa de la investigación, predicciones elástico lineales, a través de la aplicación del Método de los Elementos Finitos, utilizando el programa ALGOR FEMS (Finite element modeling software) (8).

Se analizan modelos cuya geometría responde a las relaciones  $C/D = 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.5$  y  $3$ , considerándose disposiciones de armadura centrada y en esquina. A los efectos de obtener las relaciones mencionadas, se utilizaron barras de diámetros de uso habitual, surgiendo recubrimientos que, si bien en algunos casos no se corresponden con los de la práctica habitual, se consideran válidos para el presente análisis numérico.

Dado el alcance del modelo utilizado, se focaliza el estudio en la distribución de tensiones y deformaciones máximas principales, y en la deformada del sistema, con la finalidad de identificar las zonas más solicitadas, donde pueden localizarse las fisuras, considerando la influencia de los parámetros objeto del presente estudio. Para la discretización de los modelos, en correspondencia con lo antes mencionado, se ha densificado el mallado en las proximidades de las barras y en el espesor del recubrimiento, por ser éstas las zonas más solicitadas mecánicamente. Se utiliza el elemento sólido elástico 2D,

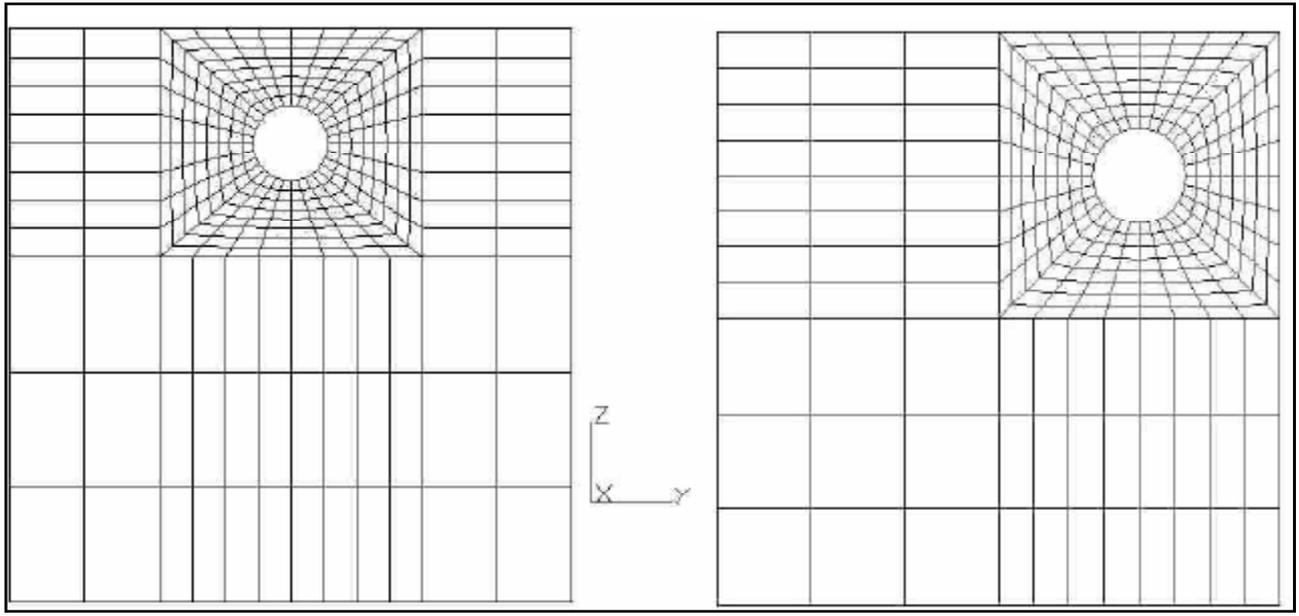


Figura 2. Discretización de modelos con barra centrada y en esquina.

de 4 u 8 nodos con dos grados de libertad traslacionales por nodo, en el caso de los modelos planos, y el elemento sólido espacial tipo Brick, en el caso de los modelos espaciales. En la Figura 2 se indica el mallado utilizado para los modelos, con la posición de barra centrada y de barra en esquina.

A fin de validar los resultados obtenidos, en el presente trabajo, se compararon los mismos con las determinaciones experimentales y numéricas publicadas en los trabajos de Molina y otros (3), Andrade y otros (5), y Alonso y otros (6), quienes analizaron modelos de 15 cm x 15 cm x 38 cm, sometidos a una corrosión uniforme y acelerada, empleando una intensidad de corriente constante (velocidad de corrosión).

Las principales características del hormigón empleado son: Tipo H-30, Módulo de Elasticidad Longitudinal  $E = 36.000 \text{ MPa}$ , Coeficiente de Poisson = 0.2, Resistencia Característica de Tracción = 3.55 MPa y Resistencia Característica de Compresión = 30 MPa.

Las condiciones de vínculo de los modelos simulan el apoyo continuo de los mismos en la superficie de apoyo.

Como se ha mencionado previamente, la acción de los productos de corrosión sobre el hormigón se simula a través de una presión radial, producida por el aumento del volumen del acero virgen, debido a la generación de los productos de la corrosión. Se utilizó la misma calidad de hormigón de la referencia (6), a los efectos de hacer válidas las comparaciones. Allí se observa que

el valor de presión que genera la fisura es de aproximadamente 12.5 MPa. Para el desarrollo del presente trabajo se adoptó una presión de 15 MPa, con la finalidad de superar la instancia de generación de la fisura.

La presión que originan los productos de corrosión tiene relación directa con la pérdida de sección de la barra. Para efectuar la correlación entre dichas variables, en el presente trabajo, se toman como base los resultados de los estudios experimentales desarrollados por Rodríguez y otros (9). Ellos han estudiado experimentalmente el comportamiento de estructuras corroídas, en diferentes fases. En particular, la fase correspondiente a la fisuración del recubrimiento de hormigón (etapa 3 de Figura 1) les ha permitido llegar a una expresión empírica, ecuación (1), que permite estimar el valor característico del ancho de fisura a partir de los resultados de ensayos en los que el contenido de humedad de las probetas de hormigón se mantuvo aproximadamente constante, durante el proceso de la corrosión. La variación del ancho de fisuras viene dada por:

$$w = 0.05 + \beta \cdot [x - x_0], w \leq 1.0\text{mm} \quad [1]$$

donde:

- $w$  : ancho de fisura [mm]
- $x$  : pérdida de radio [ $\mu\text{m}$ ]
- $x_0$  : pérdida de radio en el momento de iniciarse la fisuración [ $\mu\text{m}$ ]
- $\beta$  : coeficiente que depende de la posición de la armadura en el elemento estructural ( $\beta=0.01$  para posición superior, respecto a la dirección del hormigonado y  $\beta=0.0125$  para posición inferior)

La pérdida de radio necesaria para la iniciación de la fisuración (generación),  $x_o$ , puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$x_o = 83.8 + 7.4 \cdot C / D - 22.6 \cdot f_{c,sp} \quad [2]$$

donde:

C/D: es la relación recubrimiento / diámetro  
 $f_{c,sp}$ : resistencia a tracción en MPa

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Figura 3 se indica la ubicación de las zonas del espesor de recubrimiento, donde se toman las lecturas de las tensiones máximas principales y de las deformaciones del sistema. En el caso de barras en esquina, estas cinco zonas también se presentan en la dirección horizontal, a iguales distancias de la barra que las consideradas para la dirección vertical.

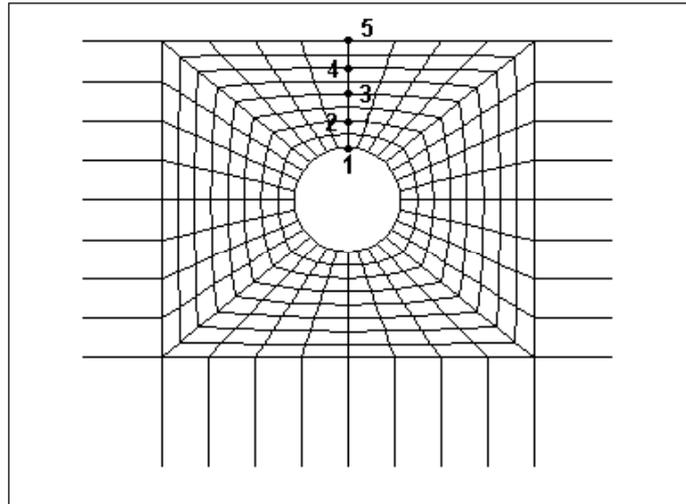


Figura 3. Identificación de zonas de registro de tensiones y deformaciones.

En la Tabla 1 se indican los valores de las tensiones principales en cada una de las zonas, del espesor del recubrimiento, para el caso correspondiente a la relación C/D = 1.

Tabla 1  
 Comparación de Tensiones Máximas Principales.  
 Barra centrada, con C/D = 1

Zona	C/D		
	20/20	25/25	30/30
1	16.73	16.70	16.77
2	8.46	8.49	8.49
3	6.26	6.32	6.28
4	5.98	6.11	6.03
5	7.33	7.57	7.45

En la Tabla 2 se presentan los valores de las deformaciones máximas principales, obtenidas en las mismas zonas en que se determinaron las tensiones.

En Figura 4 se observa la influencia de la relación C/D en la variación de las tensiones máximas principales, en correspondencia con cada una de las zonas.

En Figura 5 se indica la variación de la tensión alcanzada en la zona 5, en función de la relación C/D. El límite establecido por la resistencia a tracción de 3.55 MPa, permite determinar cuales son las relaciones C/D, de los modelos analizados, para las cuales se ha generado la fisura.

Dado el comportamiento lineal de los modelos analizados es posible obtener, a partir de las tensiones máximas principales en la

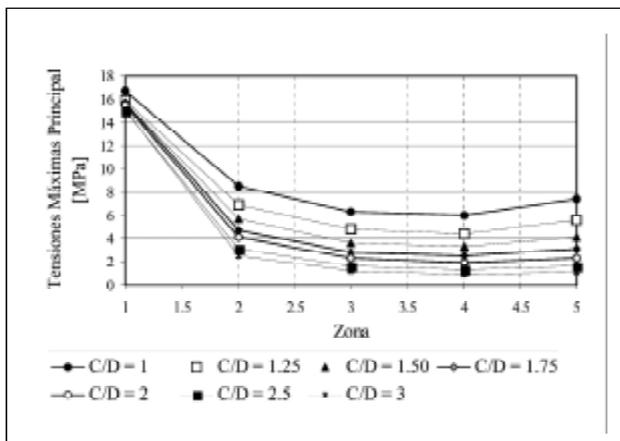


Figura 4. Comparación de tensiones en las diferentes zonas del recubrimiento.

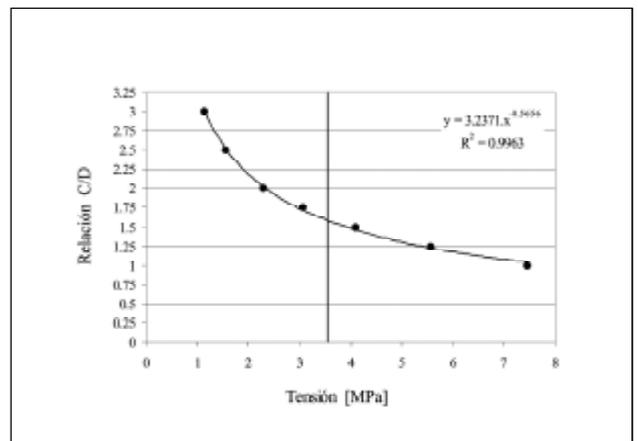


Figura 5. Relación C/D versus máxima tensión en la superficie (zona 5).

Tabla 2  
Deformaciones Máximas Principales x 10<sup>-4</sup>

Relación C/D	Ubicación Barra	Parámetro	Zona					
			1	2	3	4	5	
1.00	20/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	5.00	10.00	15.00	20.00
			Deformaciones (m)	5.27	2.68	1.87	1.70	2.04
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.57	2.71	1.77	1.49	1.71
	25/25	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6.25	12.50	18.75	25.00
			Deformaciones (m)	5.27	2.68	1.88	1.73	2.10
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.57	2.72	1.78	1.49	1.72
	30/30	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	7.50	15.00	22.50	30.00
			Deformaciones (m)	5.29	2.68	1.875	1.71	2.07
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.57	2.72	1.78	1.50	1.73
1.25	20/16	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	5.00	10.00	15.00	20.00
			Deformaciones (m)	4.97	2.09	1.32	1.14	1.40
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.30	2.16	1.29	1.03	1.19
	25/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6.25	12.50	18.75	25.00
			Deformaciones (m)	5.11	2.18	1.40	1.24	1.5
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.35	2.20	1.33	1.07	1.22
	31.25/25	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	7.813	15.625	23.438	31.25
			Deformaciones (m)	5.13	2.18	1.40	1.23	1.49
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.36	2.20	1.33	1.07	1.23
1.50	15/10	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	3.75	7.50	11.25	15.00
			Deformaciones (m)	4.97	1.79	1.06	0.89	1.09
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.18	1.83	1.03	0.801	0.92
	24/16	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6.00	12.00	18.00	24.00
			Deformaciones (m)	5.01	1.81	1.09	0.93	1.13
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.19	1.83	1.03	0.803	0.918
	30/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	7.50	15.00	22.50	30.00
			Deformaciones (m)	5.02	1.80	1.10	0.97	1.20
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.18	1.89	1.04	0.81	0.92
1.75	17.5/10	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	4.375	8.75	13.125	17.5
			Deformaciones (m)	4.89	1.53	0.86	0.70	0.85
		ESQUINA	Deformaciones (m)	5.04	1.55	0.83	0.63	0.71
	35/30	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	8.75	17.5	26.25	35
			Deformaciones (cm)	4.92	1.54	0.87	0.72	0.86
		ESQUINA	Deformaciones (cm)	5.05	1.56	0.84	0.63	0.72
2.00	20/10	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	5.00	10.00	15.00	20.00
			Deformaciones (cm)	4.75	1.33	0.70	0.55	0.64
	40/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	10.00	20.00	30.00	40.00
			Deformaciones (cm)	4.83	1.33	0.71	0.57	0.69
	50/25	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	12.50	25.00	37.50	50.00
			Deformaciones (cm)	4.88	1.34	0.69	0.51	0.59
2.50	50/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	12.50	25.00	37.50	50.00
			Deformaciones (cm)	4.60	1.04	0.49	0.36	0.41
	40/16	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	10.00	20.00	30.00	40.00
			Deformaciones (cm)	4.62	1.03	0.50	0.39	0.46
3.00	30/10	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	7.50	15.00	22.50	30.00
			Deformaciones (cm)	4.42	0.82	0.38	0.29	0.34
	60/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	15.00	30.00	45.00	60.00
			Deformaciones (cm)	4.95	0.86	0.38	0.26	0.29
	50/16	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	12.50	25.00	37.50	50.00
			Deformaciones (cm)	4.83	0.81	0.36	0.26	0.31

zona 5, el valor de la presión requerida para alcanzar la resistencia a tracción del hormigón considerada (3.55 MPa) para las distintas relaciones C/D (Figura 6).

Utilizando la ecuación (2) se obtuvieron las pérdidas de radio de la barra que, estimativamente, dan origen a la fisura. Las mismas se relacionan con la presión requerida para alcanzar la resistencia a tracción del hormigón, previamente calculada. En Figura 7 se puede observar la curva de tendencia adoptada para dicha relación.

La ecuación que la representa, expresada en términos de la relación C/D, queda de la forma:

$$P = 0.0309 \left( 83.8 + 7.4 \cdot \frac{C}{D} - 22.6 \cdot f_{c,sp} \right) [3]$$

La ecuación [3] permite encontrar la presión ( $P$ ) requerida, para alcanzar la resistencia a tracción del hormigón, en el instante de generarse la fisura.

En las Figuras 8 a 12 se presentan las distribuciones de tensiones máximas principales y deformaciones del sistema, obtenidas para algunos de los modelos analizados, observándose que las distribuciones en los restantes modelos son cualitativamente comparables a éstos.

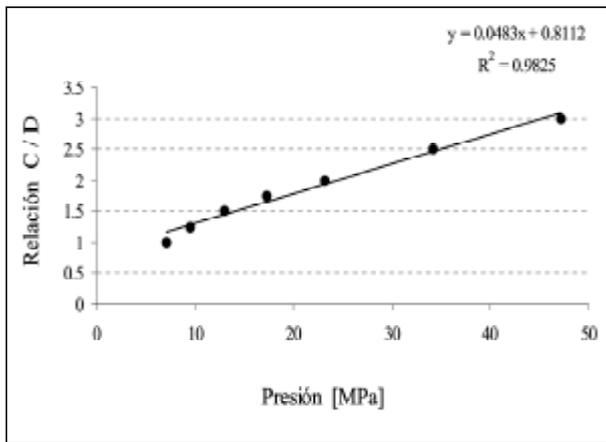


Figura 6. Presión necesaria para generar fisura en función de C/D.

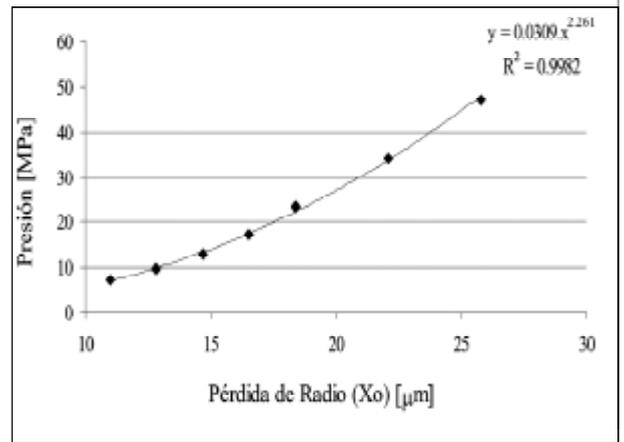


Figura 7. Presión en función de la pérdida de radio.

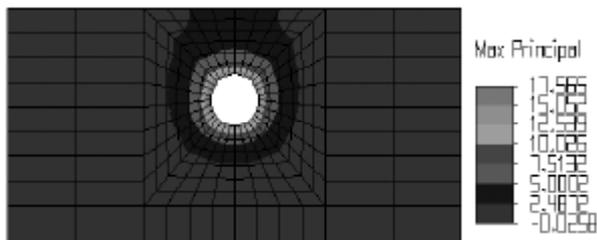


Figura 8. Distribución de tensiones máximas principales. Recubrimiento: 20 mm, diámetro de barra: 16 mm.

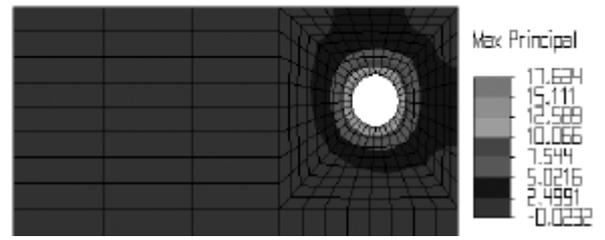


Figura 9. Distribución de tensiones máximas principales. Recubrimiento: 20 mm, diámetro de barra: 16 mm.

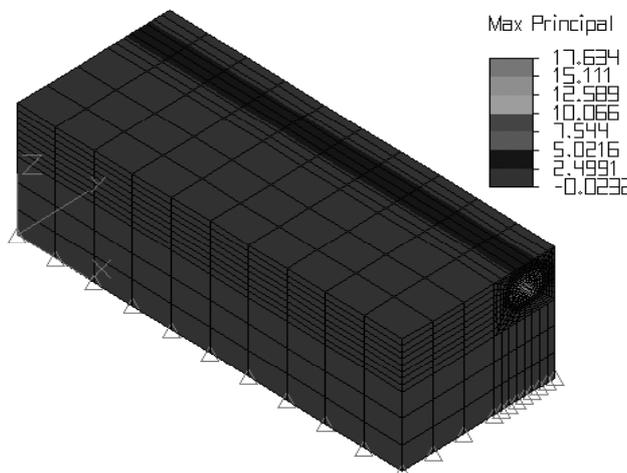


Figura 10. Tensiones principales máximas. Recubrimiento: 20 mm, diámetro de barra: 16 mm.

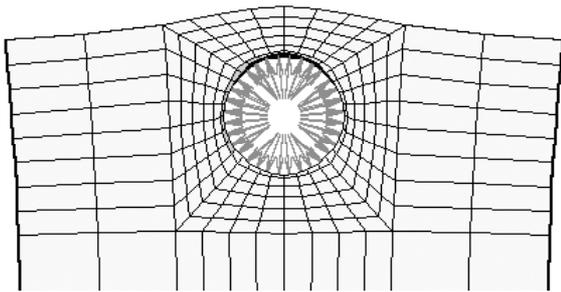


Figura 11. Deformada del sistema. Barra centrada.

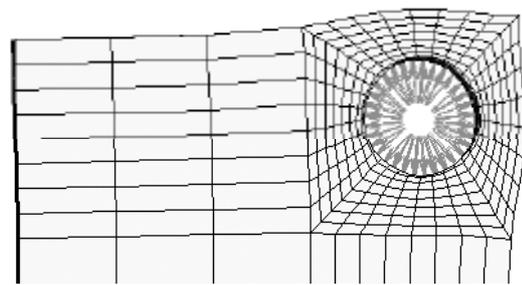


Figura 12. Deformada del sistema. Barra en esquina.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este análisis se efectúa considerando que todas las zonas que alcanzan o superan el valor de la resistencia a tracción se encuentran fisuradas. De acuerdo a lo anteriormente mencionado, la metodología aquí utilizada permite analizar, desde el punto de vista tensional, el proceso previo y la generación de las fisuras.

De los resultados obtenidos se observa que, para una misma relación recubrimiento de hormigón / diámetro de barra, el estado tensional que da lugar a la generación de fisuras no presenta variaciones importantes, para las situaciones en esquina y centrada analizadas. Para ambas posiciones y con un mismo diámetro de barra, como era de esperar, el espesor del recubrimiento tiene influencia en el proceso previo a la generación de fisuras, pues a mayor espesor se retarda la aparición de las mismas, requiriendo una mayor presión y por ende, una mayor profundidad de penetración de la corrosión en la barra afectada.

Los resultados mostrados en la Tabla 1 para  $C/D = 1$  indican que una vez que la barra se ha despasivado, el estado tensional originado por la presión que ejercen los productos de la corrosión, depende de la relación  $C/D$ . Esto se ha observado para las diferentes relaciones  $C/D$  analizadas.

Del análisis de los resultados de la Tabla 2 y considerando que la deformabilidad específica en tracción próxima a la rotura es del orden de 0.0001 (10), es posible establecer que en los modelos con un recubrimiento de 20 mm, este límite ha sido superado en todas las zonas analizadas, indicando que la fisura se hace visible en la superficie. En el caso de un recubrimiento de 30 mm, los valores demuestran que la fisura aún no se ha generado, dado que las deformaciones máximas principales, correspondientes a las zonas próximas a las superficies exteriores, no han superado la deformabilidad indicada. Los valores obtenidos para la zona 5 se corresponden con los mostrados en la referencia (6), para el momento de generación

de la fisura, encontrándose que los mismos se hallan aproximadamente en el rango de  $1 \times 10^{-4}$  a  $4 \times 10^{-4}$ .

En la Figura 4 se observa la influencia de la relación  $C/D$  en el comportamiento estructural, una vez que se ha despasivado la armadura.

Al aumentar la relación  $C/D$ , los valores de tensiones y deformaciones disminuyen, en coincidencia con los resultados obtenidos por Alonso y otros (6). Esto indica que el proceso de fisuración se retarda con el aumento de la relación analizada.

La representación de la Figura 5 indica que para los modelos analizados con relaciones  $C/D \leq 1.6$  se ha generado la fisura, por haberse superado la resistencia a tracción del hormigón. Asimismo, se observa que existe una relación exponencial entre la máxima tensión evaluada en zona 5 y la relación  $C/D$ .

En la Figura 6 se observa que la relación existente entre  $C/D$  y la presión en el momento en que aparece la fisura en la superficie (generación), puede aproximarse a una recta. Es posible establecer una concordancia de la misma, con la relación lineal que existe entre  $C/D$  y la pérdida de radio, presentada en la referencia (6) y que fue determinada experimentalmente.

A partir de la relación que existe entre la presión y la pérdida de radio, indicada en Figura 7, y representada por la ecuación (3) puede valorarse la acción estática (presión radial) que da origen a la fisura. Esta acción puede superponerse con otras acciones estáticas actuantes para evaluar el comportamiento estructural.

En la Figura 8, correspondiente a la distribución de tensiones máximas principales para armadura centrada, se observa que la fisura se inicia en el hormigón en contacto con la barra y se propaga hacia la superficie.

En la Figura 9 se indica que las fisuras se generan en forma simultánea en dos zonas

(cara lateral y superior), dado que se presenta igual estado de tensiones de tracción. Esto se debe a las características del modelo material utilizado, el cual considera homogeneidad en todo el espécimen de hormigón analizado. Esto se presenta en consonancia con los resultados cualitativos de los estudios efectuados por Qi y Seki (11), no pudiéndose realizar una comparación cuantitativa, debido a que dichos autores no presentan resultados numéricos. No obstante, en investigaciones experimentales, se ha observado que en algunos casos la fisura apareció primero en las caras laterales (6), a pesar de ofrecer éstas un recubrimiento mayor que la cara superior.

Los resultados mostrados en la Figura 10, donde se presenta la distribución de tensiones máximas principales en el modelo espacial, permiten apreciar la similitud existente con los resultados correspondientes a modelos planos mostrados en la Figura 9. Además se puede observar que las tensiones que se originan en ambas caras, y en toda la longitud del modelo, son similares. Estos resultados justifican la validez del análisis sobre modelos planos, en el presente estudio.

En las Figuras 11 y 12 se indican los esquemas de deformaciones correspondientes a una barra centrada y una de esquina, respectivamente. Las mismas resultan coincidentes con las presentadas en la referencia (3), la cual está basada en análisis numéricos realizados utilizando una modelación, a nivel material, empleando mecánica de fractura.

## 5. CONSIDERACIONES FINALES

En el presente análisis numérico, se presentan los primeros resultados obtenidos por los autores, utilizando modelos sencillos basados en predicciones elástico lineales. Este análisis permite el seguimiento del proceso mecánico previo a la aparición de la fisura en la superficie del hormigón, a través del análisis tensional y de las deformaciones. Teniendo en cuenta los resultados experimentales y numéricos obtenidos por otros autores, el comportamiento de los modelos analizados puede considerarse adecuado, para el logro del objetivo planteado en este trabajo. El análisis de los resultados, permite observar que el proceso de fisuración depende directamente de la relación recubrimiento de hormigón / diámetro de barra ( $C/D$ ). En particular, se puede indicar que el proceso de fisuración se retarda con el aumento de la mencionada relación.

La correlación con resultados experimentales de otros autores, permitió encontrar una expresión de la presión necesaria para generar la fisura, para el tipo de hormigón utilizado en el presente trabajo. Esta expresión depende de la calidad del hormigón y de la relación  $C/D$ .

La valoración de la presión necesaria para generar la fisura se considera de importancia para la evaluación del comportamiento estructural a partir de la superposición con otras acciones actuantes. Esto permitirá llegar a esfuerzos que, considerados en el diseño, posibilitarán la atenuación del proceso de fisuración a efectos de incrementar la durabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Roostam, S.: "Vida Útil de las Estructuras de Hormigón. Cómo Satisfacer los requerimientos del Nuevo Milenio". Congreso de Ingeniería 2000. *Publicación de Conferencia*, 29 págs.
- (2) Ortega, N. F.: "Análisis de Algunos Aspectos Determinantes en el Proceso Corrosivo de las Armaduras Ubicadas Dentro del Hormigón", *Jornadas Técnicas sobre Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón*, Mar del Plata (2002), pp. 10, CD.
- (3) Molina, F. J.; Alonso, C. and Andrade, C.: «Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2 - Numerical model», *Materials and Structures*, 26 (1993), pp. 532-548.
- (4) Zapico Valle, J. L.; Molina Ruiz, F. J.; Casal Macías, J.; Rodríguez Santiago, J.: «Simulación mecánica de la corrosión de armaduras en elementos de hormigón» *Hormigón y Acero*, 4º trimestre (1993).
- (5) Andrade, C.; Alonso, C. and Molina, F. J.: "Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 1 - Experimental test", *Materials and Structures*, 26 (1993), pp. 453-464.
- (6) Alonso, C.; Andrade, C.; Rodríguez, J.; Casal, J. y García, A. M.: «Evaluación experimental de la fisuración del hormigón producida por la corrosión de las armaduras», *Hormigón y Acero*, núm. 194 (1994), pp. 29-42.
- (7) Schierloh, M. I.; Ortega, N. F.; Señas, L.: "Relación entre algunas propiedades del hormigón del recubrimiento y su degradación, producida por los productos de corrosión de las armaduras", *14 Reunión de AATH: tomo II* (2001), pp. 125-132
- (8) Algor12 Professional Mech/VE. Docutech, Linear Stress and Dynamics, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania. (1999)
- (9) Rodríguez Santiago, J.; Ortega Basagoiti, L.; Casal Macías, J. y Díez Arenas, J.: «La Corrosión de las Armaduras y la Vida residual de las Estructuras de Hormigón». *Hormigón y acero*, núm. 208, 2º trimestre (1998), 16 pp.
- (10) Zerbino, G.: «Estructura y Mecanismos de Deformación y Rotura del hormigón: Efecto de las alteraciones en las Zonas de Transición. Segunda Parte: Discusión de Conceptos Teóricos» *Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón* N 6 (1998), pp. 49-69.
- (11) Qi, L.; Seki, H.: «Relationship between width of concrete cracks and amount of reinforcing steel Due to Reinforcing Steel Corrosion». Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Suppl. papers (2000), pp. 317-328.