

INFLUENCIA DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS EN EL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN DEL RECUBRIMIENTO

Peralta, María H.⁽¹⁾; Rivas, Irene E.⁽¹⁾; Ortega, Néstor Francisco⁽²⁾

Area Estructuras. Depto. Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería UNCPBA. Avda. Del Valle 5737.
(7400) Olavarría. Argentina. E-mail: mperalta@fio.edu.ar

Area Hormigón. Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. Av. Alem 1253.
(8000) Bahía Blanca, Argentina. Fax (0054-291) 4595110. E-mail: nfortega@criba.edu.ar

Palabras clave: hormigón, durabilidad, corrosión, modelos numéricos.

Resumen: *El proceso de corrosión de armaduras, ubicadas dentro del hormigón, da origen a la aparición de fisuras que afectan a la durabilidad de las estructuras. La fisuración del recubrimiento de hormigón se produce cuando se supera la resistencia a tracción del mismo, por acción de la presión que ejercen los productos generados durante el proceso corrosivo. Estas fisuras, normalmente se desarrollan paralelamente a las armaduras, transformándose en una vía rápida de llegada de agentes agresivos desde el exterior, que aceleran el proceso de degradación, dando origen a una disminución de la capacidad portante y de la vida útil de la estructura afectada.*

En este trabajo se analiza la influencia de la corrosión de armaduras en elementos de hormigón armado, durante el proceso de fisuración del recubrimiento, mediante el empleo de una técnica numérico-computacional. Se analizan modelos espaciales, mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos, utilizando en esta primera etapa, predicciones del tipo elástico lineales. Se focaliza el estudio en la distribución que presentan las tensiones máximas y mínimas principales, y en las deformaciones del sistema, a efectos de identificar las áreas más solicitadas que darán lugar a zonas donde se localicen las fisuras.

En particular, se analiza la influencia de la relación adimensional recubrimiento de hormigón / diámetro de barras (C/D), comparándose los resultados con los disponibles en la bibliografía.

1 INTRODUCCIÓN

La corrosión de armaduras deteriora las estructuras de hormigón, reduciendo su vida útil. Los productos de corrosión, en la medida que se generan, van ocupando los espacios vacíos de la estructura de poros del hormigón, y una vez que los poros se van rellorando se originan presiones sobre el hormigón adyacente que, en la mayoría de los casos, provocan la fisuración longitudinal del recubrimiento. Este tipo de fisuras, que se desarrollan paralelamente a las armaduras, se transforma en una vía rápida de llegada de los agentes agresivos hasta la armadura, lo que acelera el proceso de deterioro.

Este fenómeno, que está influenciado por diversas causas, ha sido y es motivo de estudio por parte de numerosos autores, los cuales en su mayoría, lo han analizado de forma experimental. Dada la complejidad del fenómeno y la multiplicidad de factores involucrados en él resulta muy difícil, en estos estudios, poder aislar los efectos de todos estos factores.

El análisis numérico constituye una interesante metodología que, como complemento de los análisis experimentales, contribuye a la comprensión del fenómeno descrito. Esta metodología permite adoptar diversas alternativas, tales como la dilatación de la barra, y la consecuente presión que la misma origina sobre el hormigón que la circunda, entre otras, para simular la acción que ejercen los productos de corrosión. Cabe acotar que el volumen de los óxidos de hierro es superior al del material base y, dependiendo del tipo de óxido, puede ser hasta cinco veces superior.

El objetivo de este trabajo, consiste en estudiar la influencia de la corrosión de las armaduras de vigas de hormigón armado, en el proceso previo a la generación de fisuras, que la misma origina. A tal fin, se considera que la fisura se genera cuando se visualiza en la superficie exterior. Para ello se aborda el problema mediante un análisis numérico-computacional, utilizando el Método de los Elemento Finitos^{1,2}, considerando que los óxidos generados en la corrosión de las armaduras provocan una presión sobre el hormigón adyacente.

En particular, se analiza la influencia de la relación adimensional: espesor del recubrimiento/diámetro de barra (C/D), en el proceso de fisuración del hormigón para los casos de barra centrada y de barra de esquina. Los resultados obtenidos se contrastan con los disponibles en la bibliografía.

2 MODELOS ANALIZADOS

A efectos de lograr el objetivo planteado, se analizan modelos planos y espaciales, utilizando en esta primera etapa predicciones elástico lineales, a través de la aplicación del Método de los Elementos Finitos. Se analizan modelos cuya geometría responde a las relaciones $C/D = 1, 1.25, 1.5$ y 1.75 , considerándose las disposiciones de armadura centrada y en esquina. A los efectos de llegar a las relaciones mencionadas se utilizaron barras de diámetros de uso habitual, surgiendo recubrimientos que, si bien algunos no se corresponden con los de la práctica habitual, se consideran válidos a los efectos del presente análisis numérico. El cual tiene por objeto comparar el comportamiento que se presenta, manteniendo constante la relación C/D , y variando los valores del recubrimiento de hormigón y del

diámetro de las barras.

Dado el alcance del modelo utilizado, se focaliza el estudio en la distribución de Tensiones y Deformaciones Máximas Principales, y en las deformaciones del sistema, a efectos de identificar los lugares más solicitados, 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 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, de 4 u 8 nodos con dos grados de libertad traslacionales por nodo, formulado en el plano yz en el caso de los modelos planos, y el elemento sólido espacial Brick en el caso de los modelos espaciales. En la Figura 1 se indica el mallado correspondiente al caso particular de barra centrada, utilizándose similar malla para el caso de barras en esquina.

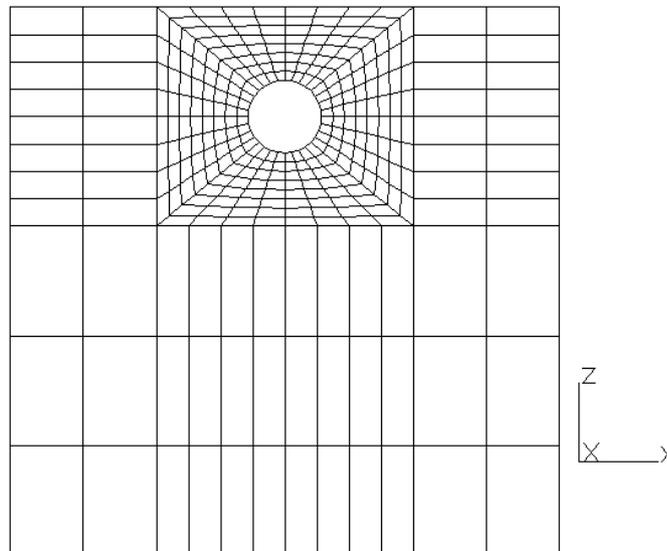


Figura 1: Discretización de Modelo con barra centrada.

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 Andrade y otros³, Molina y otros⁴ y de Alonso y otros⁵, quienes analizaron modelos de 15cm x 15cm x 38cm, sometidos a una corrosión uniforme y acelerada, con una intensidad de corriente constante.

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 la corrosión se simula a través de una presión circunferencial, producida por el aumento del volumen del acero virgen, debido a la generación de los productos de la corrosión. La cuantificación de esta acción, se realizó correlacionando con los valores de Tensiones y Deformaciones Máximas presentados en la

referencia [4], y obtenidos en el momento en que se genera la primera fisura. De acuerdo al modelo de análisis de dicha referencia, la Tensión Máxima de Tracción considerada es de 3.55 MPa. Se observa que dicho valor de tensión se alcanza con presiones radiales debidas a la corrosión que superan los 12.5 MPa. Para el desarrollo del presente trabajo se adoptó una presión de 15 MPa, para asegurar que se supere la instancia de generación de la fisura. Las características del hormigón empleado son: Tipo H-30, $E = 36000$ MPa, $\mu = 0.2$, Resistencia Característica de Tracción = 3.55 MPa y Resistencia Característica de Compresión = 30 MPa.

3 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Figura 2 se indican las zonas del espesor de recubrimiento, donde se toman las lecturas de Tensiones Máximas Principales y 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.

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores de dichas tensiones y deformaciones respectivamente para las distintas relaciones C/D, analizadas en los casos de barra en esquina y centrada.

En la Tabla 3 y su correspondiente Figura 3 se analizan los resultados, considerando la relación C/D cuya influencia en el proceso de fisuración del elemento se analiza en el presente trabajo.1

En las Figuras 4 a 8 se presentan las distribuciones de Tensiones Máximas Principales y Deformaciones del sistema para algunos de los modelos analizados, observándose que las distribuciones en los restantes modelos son cualitativamente comparables a éstos.

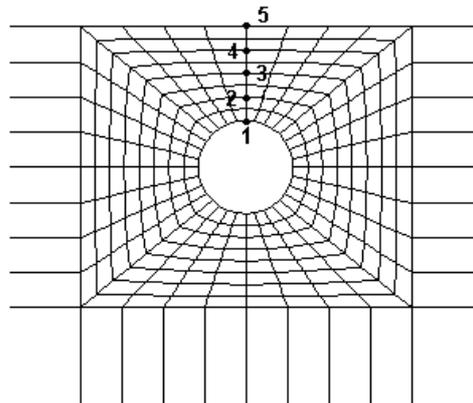


Figura 2: Identificación de zonas de registro de tensiones y deformaciones.

Tabla 1: Tensiones Máximas Principales.

Relación C/D	Ubicación Barra	Parámetro	Zona					
			1	2	3	4	5	
1	20/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	5	10	15	20
			Tensión (MPa)	16.73	8.46	6.26	5.98	7.33
		ESQUINA	Tensión (MPa)	17.78	8.60	5.92	5.22	6.16
	25/25	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6.25	12.50	18.75	25.00
			Tensión (MPa)	16.70	8.49	6.32	6.11	7.57
		ESQUINA	Tensión (MPa)	17.80	8.62	5.94	5.24	6.18
	30/30	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	7.5	15	22.5	30
			Tensión (MPa)	16.77	8.49	6.28	6.03	7.45
		ESQUINA	Tensión (MPa)	17.8	8.64	5.96	5.28	6.22
1.25	20/16	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	5	10	15	20
			Tensión (MPa)	15.28	7.00	5.00	4.65	5.95
		ESQUINA	Tensión (MPa)	16.35	7.13	4.54	3.90	4.81
	25/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6.25	12.50	18.75	25.00
			Tensión (MPa)	16.25	6.80	4.67	4.35	5.39
		ESQUINA	Tensión (MPa)	17.13	6.90	4.40	3.74	4.40
	31.25/25	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	7.813	15.63	23.44	31.25
			Tensión (MPa)	16.31	6.81	4.65	4.32	5.34
		ESQUINA	Tensión (MPa)	17.14	6.92	4.42	3.76	4.42
1.50	15/10	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	3.75	7.50	11.25	15.00
			Tensión (MPa)	15.84	5.53	3.49	3.14	3.89
		ESQUINA	Tensión (MPa)	16.63	5.68	3.40	2.80	3.29
	24/16	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6	12	18	24
			Tensión (MPa)	15.97	5.61	3.596	3.26	4.05
		ESQUINA	Tensión (MPa)	16.64	5.69	3.41	2.81	3.30
	30/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	7.50	15.00	22.50	30.00
			Tensión (MPa)	15.15	5.83	3.73	3.42	4.32
		ESQUINA	Tensión (MPa)	16.63	5.70	3.42	2.82	3.31
1.75	17.5/10	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	4.375	8.75	13.125	17.50
			Tensión (MPa)	15.65	4.70	2.81	2.47	3.05
		ESQUINA	Tensión (MPa)	16.23	4.79	2.72	2.19	2.56
	35/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	8.75	17.5	26.25	35
			Tensión (MPa)	15.75	4.75	2.86	2.51	3.09
		ESQUINA	Tensión (MPa)	16.24	4.81	2.75	2.21	2.59

Tabla 2: Deformaciones Máximas Principales x 10⁻⁴.

Relación C/D	Ubicación Barra	Parámetro	Zona					
			1	2	3	4	5	
1	20/20	CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	5	10	15	20
			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
		CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6.25	12.50	18.75	25.00
	25/25		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	7.5	15	22.5	30	
		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	10	15	20
			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
		CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6.25	12.50	18.75	25.00
	25/20		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
		CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	6	12	18	24
	24/16		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
		CENTRO	Dist. a la barra (cm)	0	8.75	17.5	26.25	35
	35/30		Deformaciones (m)	4.92	1.54	0.87	0.72	0.86
ESQUINA		Deformaciones (m)	5.05	1.56	0.84	0.63	0.72	

Tabla 3: Comparación de Tensiones Máximas Principales, para Barra en Centro y C/D = 1.

Zona	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

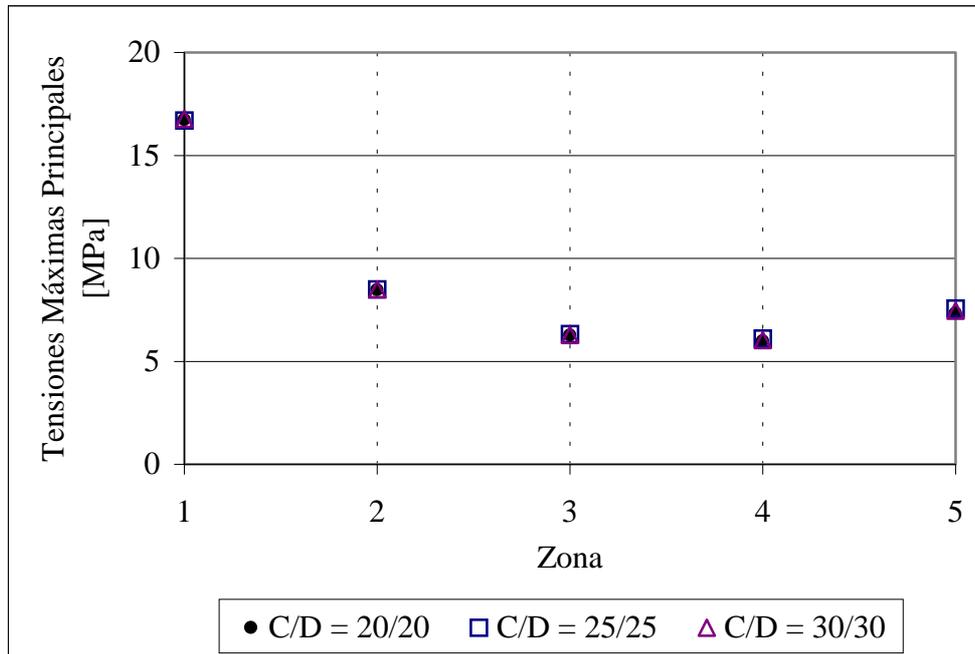


Figura 3: Comparación de tensiones en las diferentes zonas para Barra en Esquina y C/D = 1.

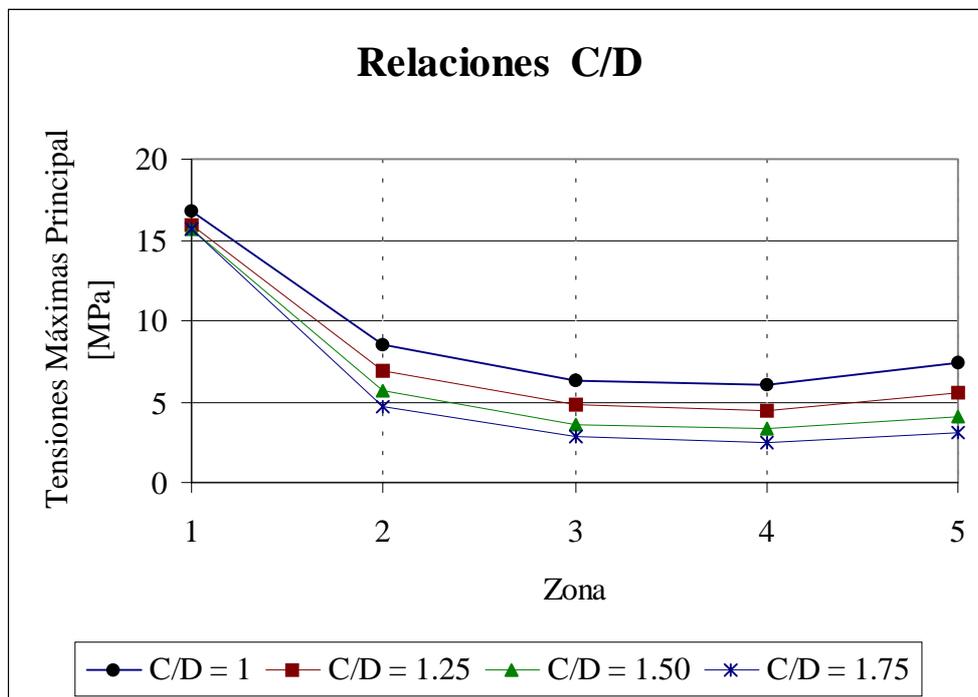


Figura 4: Comparación de tensiones en las diferentes zonas para Barra en Esquina, en función de C/D.

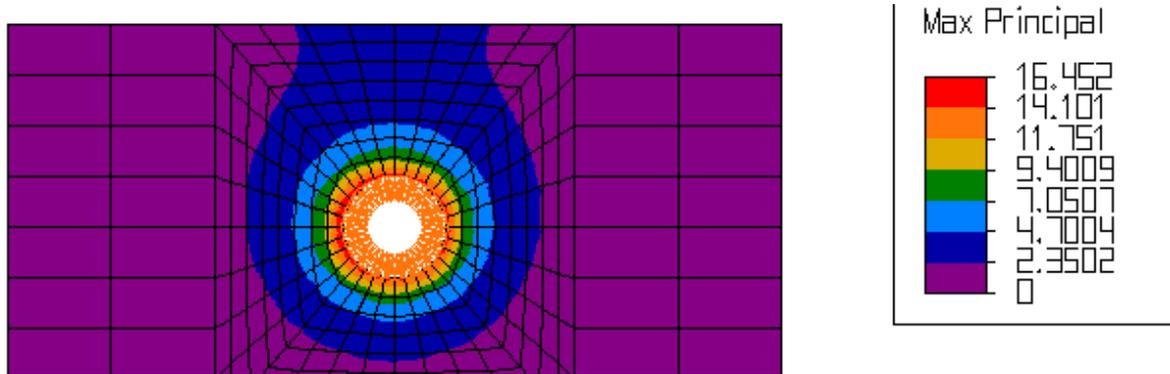


Figura 5: Distribución de Tensiones Máximas Principales. Barra Centrada.
Diámetro de barra 20mm, recubrimiento 30mm.

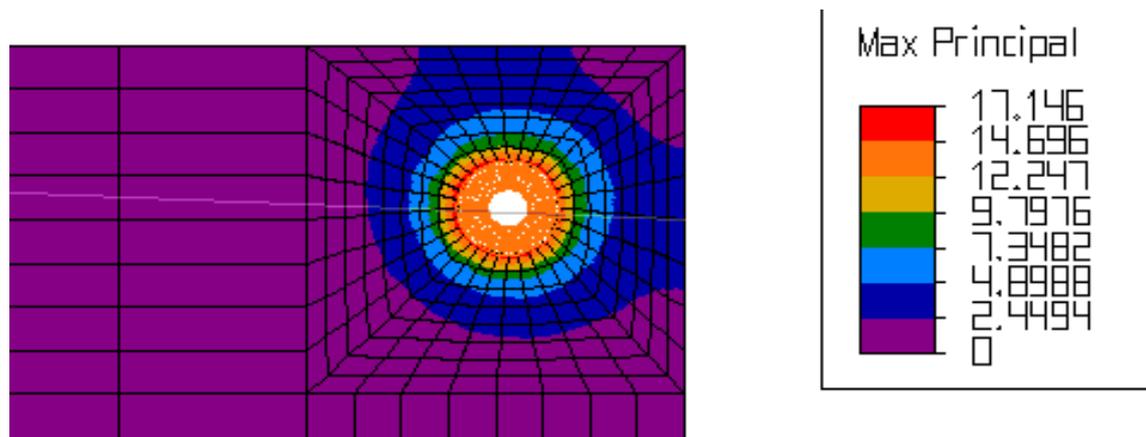


Figura 6: Distribución de Tensiones Máximas Principales. Barra en Esquina.
Diámetro de barra 16mm, recubrimiento 20mm.

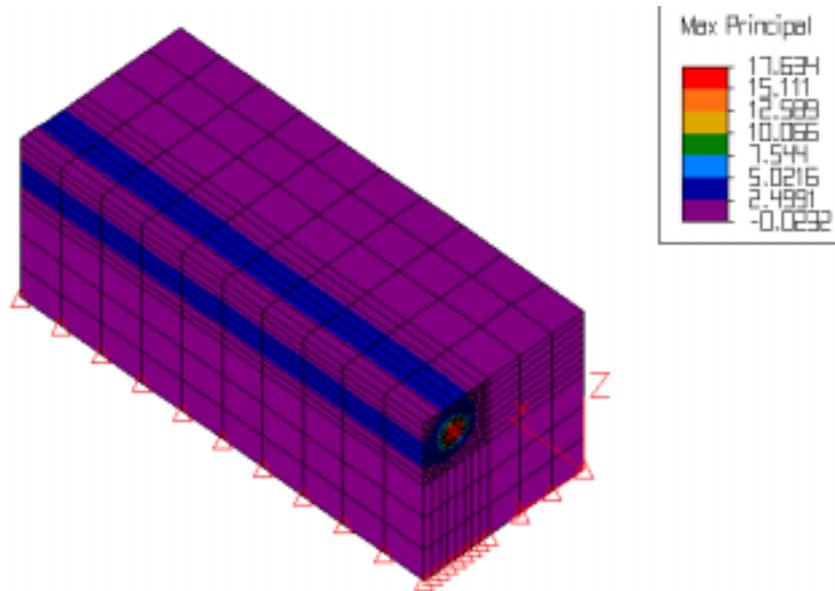


Figura 7: Tensiones Principales Máximas, en el caso de Barra en Esquina. Recubrimiento 20mm y diámetro de barra 16mm.

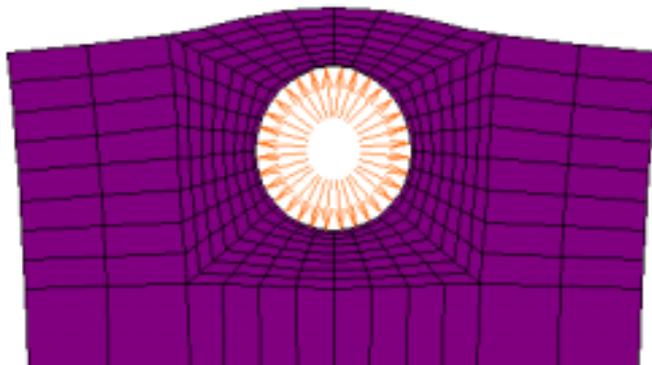


Figura 8: Deformada correspondiente al caso de Barra Centrada

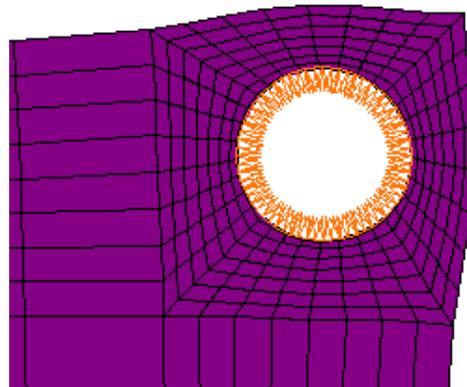


Figura 9: Deformada correspondiente al caso de Barra en Esquina.

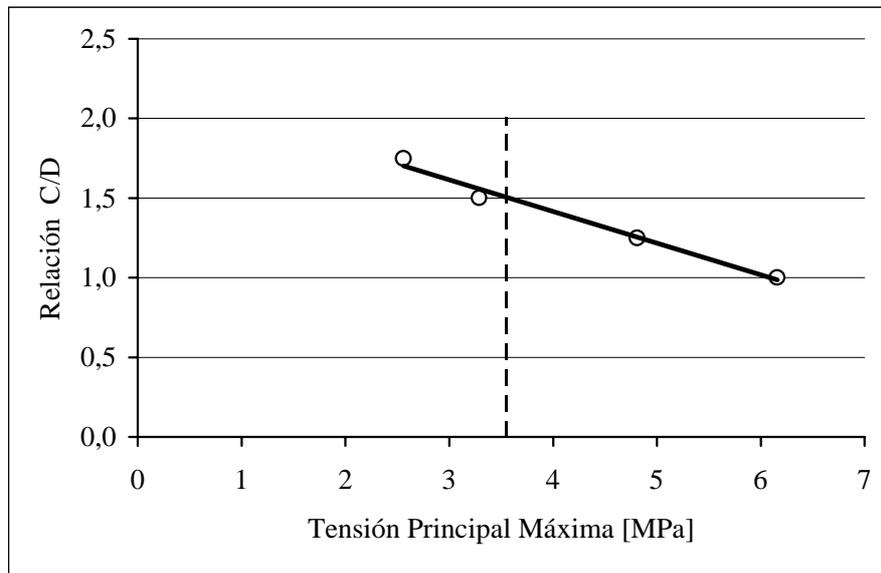


Figura 10: Variación de la Tensión Principal Máxima en la superficie del hormigón en función de la relación C/D, para Barra en Esquina.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis aquí presentado se efectúa considerando que todas las zonas que alcanzan o superan una Tensión Máxima Principal (tracción) igual a 3.55 MPa se fisuran. De acuerdo a lo anteriormente mencionado, la metodología aquí utilizada permite analizar, desde el punto de vista tensional, el proceso previo a la generación de las fisuras.

Se puede observar, según los resultados mostrados en la Tabla 1 y en la Figura 1, que para un mismo recubrimiento y diámetro de barra, el estado tensional que provocaría la generación de fisuras no presenta variaciones importantes, entre la situación en esquina y centrada. Para ambas ubicaciones 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, evidenciado esto por la disminución en los valores de tensiones y deformaciones obtenidas.

Por otro lado, se aprecia que al aumentar la relación C/D, los valores de tensiones y deformaciones disminuyen, en total concordancia con los resultados obtenidos por Alonso y Andrade⁵, lo que indica que el proceso de fisuración se retarda, con el aumento de la relación analizada. Esto se corrobora con la representación de los resultados indicada en la Figura 4.

La distribución de tensiones indicada en la Figura 5 permite vislumbrar la generación de la fisura en la cara superior. Por otro lado, la distribución de tensiones mostrada en Figura 6, indicaría 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 es concordante con los resultados cualitativos de los estudios realizados por Qi y Seki⁶, no pudiéndose realizar una comparación cuantitativa, debido a que dichos autores no presentan resultados numéricos.

En función de los valores de las tensiones, se aprecia que las fisuras comienzan en el hormigón que está en contacto con las barras (Zona 1) y se propagan hacia la superficie.

Los valores de las Tensiones Máximas Principales y de las Deformaciones afines, indicados en Tablas 1 y 2, correspondientes a las distintas zonas del recubrimiento según Figura 2, y a cada una de las relaciones C/D analizadas, muestran que no existe una diferencia sustancial en el comportamiento de los modelos para iguales relaciones C/D. Esto es válido tanto para las barras de esquina como para las barras centradas. La representación de los resultados en Figura 3, correspondiente a la relación C/D = 1 muestra más claramente lo indicado.

Si bien los análisis experimentales demuestran que, en los casos de barra ubicada en esquina, las fisuras no se generan simultáneamente en las caras lateral y superior, las distribuciones de tensiones obtenidas permiten vislumbrar que las fisuras se generarían en forma simultánea. En realidad, se ha determinado experimentalmente que, en la mayoría de los casos, la fisuración comienza en la cara lateral. Esta inexactitud del modelo planteado, se debe a que el modelo de análisis que aquí se utilizó, considera homogeneidad en el material y en realidad, debido a la segregación del hormigón, la estructura de poros varía, en función de los distintos niveles de la sección transversal. En futuros trabajos, se tendrá en cuenta esta situación, con el fin de mejorar los modelos propuestos.

Los resultados mostrados en Figura 7, donde se presenta la distribución de Tensiones Máximas Principales en el modelo espacial, permiten apreciar la similitud existente con los resultados obtenidos en el modelo plano, mostrado en Figura 6. Además, se puede observar que las tensiones que se originan en ambas caras, y en toda la longitud del modelo, son similares.

En las Figuras 8 y 9 se indican las configuraciones deformadas correspondientes a una barra centrada y a una de esquina, respectivamente. Las mismas resultan coincidentes con las presentadas en referencia [4], la cual está basada en análisis numéricos realizados utilizando una modelación del material, empleando Mecánica de Fractura.

Como se puede apreciar en la Figura 10, en la medida que aumenta la relación C/D disminuye la tensión en la fibra externa del recubrimiento de hormigón, observándose que esta variación es del tipo lineal, es decir que con el incremento de la relación C/D, se retarda el inicio de la fisuración. Este tipo de variación coincide con lo obtenido por Alonso y otros ⁵, cuando presentan la variación de la relación C/D, en función de la pérdida de radio de las barras, necesaria para la aparición de las primeras fisuras. Es importante observar que como el modelo de análisis es elástico lineal, el mismo no es capaz de limitar las tensiones a las correspondientes al inicio de la fisuración. No obstante, en este trabajo y de acuerdo a la referencia [5] se ha tomado como tensión de inicio de la fisuración a 3.55 MPa, esto indica que en los modelos de relaciones C/D = 1.5 y 1.75, aún no han aparecido las primeras fisuras, mientras que en los correspondientes a C/D = 1.25 y 1 sí se han generado, considerando en todos los casos la presión adoptada para este estudio. A los efectos de la comparación con la referencia mencionada debe asociarse a esta presión como equivalente a una pérdida de radio de las barras.

5 CONCLUSIONES

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 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 mismos puede considerarse adecuado, para el logro del objetivo planteado en este trabajo.

No obstante lo indicado, en futuros trabajos se irá mejorando el modelo de análisis simplificado utilizado considerando homogeneidad del material, ya que se sabe que en realidad el hormigón no posee dicha propiedad. Esto motivará futuros estudios con modelos tendientes a contemplar las características propias del material, considerando por ejemplo el Módulo de Elasticidad variable en la altura de la pieza analizada.

El análisis de los resultados, permite observar que el proceso de fisuración depende directamente de la relación recubrimiento/diámetro de las barras (C/D). En particular, se puede indicar que el proceso de fisuración se retarda con el aumento de la mencionada relación.

6 REFERENCIAS

- [1] Oñate, Eugenio, *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos*, CIMNE, Barcelona, (1992).
- [2] Spyarakos, C. and Raftoyiannis J., *Linear and non linear finite element analysis in engineering practice*, Algor, Inc. Publishing Division, Pittsburgh, (1997).
- [3] Andrade, C.; Alonso, C. and Molina, F.J., "Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 1 - Experimental test", *Materials and Structures*, 26, 453 – 464, (1993).
- [4] Molina, F. J.; Alonso, C. and Andrade, C., "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2 -Numerical model", *Materials and Structures*, 26, 532 - 548, (1993).
- [5] 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*, 194, 29 - 42, (1994).
- [6] 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, 317-328, (2000).
- [7] Giaccio, Zerbino, "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*, 6, 49-69, (1998).