

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

Peralta, María H. *, Rivas, Irene E. *, Ortega, Néstor F. †

* Facultad de Ingeniería UNCPBA. Avda. Del Valle 5737. (7400) Olavarría. Argentina.
(mperalta@fio.unicen.edu.ar) (irivas@fio.unicen.edu.ar)

† Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. Avda. Alem 1253.
(8000) Bahía Blanca. Argentina (nfortega@criba.edu.ar)

Palabras Claves: Estructuras, Corrosión, Fisuración, Simulación Numérica, MEF

Resumen. *El proceso de corrosión de armaduras ubicadas dentro del hormigón da origen a la aparición de fisuras, provocando una reducción de la capacidad portante, aumentando las Deformaciones de los elementos afectados. Los productos generados por la corrosión en estructuras de hormigón armado originan presiones sobre el hormigón adyacente que, en la mayoría de los casos, provocan la fisuración longitudinal del recubrimiento. Estudios experimentales de otros autores muestran la influencia de la disposición de armaduras, en el proceso de degradación. En este trabajo se analiza la mencionada influencia a partir de la simulación numérica, mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos. A tal fin, se trabaja con modelos planos, utilizando predicciones del tipo elástico lineales. La acción sobre el hormigón, provocada por la corrosión de las barras, se considera aplicando una presión circunferencial sobre el mismo. El proceso de fisuración esta asociado con la evolución de las tensiones y deformaciones que se originan en el hormigón. La metodología utilizada permite el seguimiento de la propagación de fisuras hasta que se produce la aparición de las mismas en la superficie.*

Los resultados obtenidos complementan a los determinados experimentalmente. Los mismos permiten corroborar el comportamiento diferenciado, según la disposición de armaduras considerada, a través de las distintas posiciones de las fisuras producidas.

1 INTRODUCCIÓN

El diseño de las estructuras de hormigón, debe cumplir con los principios básicos de la mecánica estructural: equilibrio, resistencia y rigidez. Además de los mencionados, en las últimas décadas se agregan 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 tal, que la misma mantiene una serviciabilidad satisfactoria, para 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 conocido 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 la serviciabilidad 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.

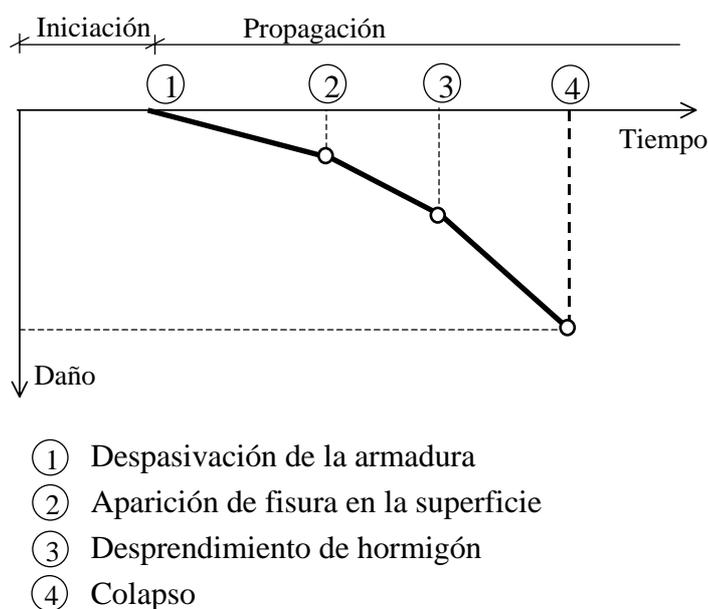


Figura 1: Etapas del proceso corrosivo en el hormigón armado.

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 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 se fisura, a consecuencia de las tracciones en su masa, se acelera 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 etapa se extiende hasta que la fisura alcanza los valores admisibles, definidos por los códigos. Zona comprendida 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, no necesariamente conduce al colapso de una estructura y podría, por lo tanto, ser asumido como 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, llegan a disminuir notablemente la capacidad de carga del elemento, agotándose la seguridad prevista por las normas.

La cantidad de productos generados por la corrosión es función directa de la pérdida de radio de la barra, y las presiones que se generan dependen 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. Dicha presión da origen al desarrollo de las Etapas 2 y 3 mencionadas. Hasta ahora no se ha podido entender de una manera clara el proceso de fisuración y, consecuentemente, no se dispone de suficiente conocimiento como para predecir su magnitud y consecuencias, dada la complejidad que entraña en este fenómeno la presencia de numerosos factores, físicos y químicos, todos ellos de comportamiento poco homogéneo².

Por un lado, existen numerosos estudios experimentales abocados al tratamiento de la Etapa 3 (generación y propagación de fisuras)^{3, 4, 5}. Por otro lado, el análisis numérico-computacional facilita el estudio del proceso previo a la generación de fisuras, Etapa 2, posibilitando el análisis de la influencia de las variables que intervienen en forma aislada.

Estudios previos experimentales y numéricos⁶ 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 1 mm, 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 las presiones que dieron origen a las mismas ⁷. Asimismo, en la actualidad, estudios experimentales apuntan al estudio de la influencia de la disposición de las armaduras en el proceso corrosivo.

En el presente trabajo se realiza la simulación del inicio del proceso de deterioro, a través de la aplicación del Método de los Elementos Finitos, a efectos de estudiar la influencia de la disposición de las armaduras, en el proceso de fisuración del recubrimiento de hormigón. Los resultados se contrastan con los obtenidos experimentalmente, sobre especímenes de hormigón armado según referencia ⁸.

Se considera que los elementos estructurales analizados, se encuentran sometidos a una corrosión uniforme, en la denominada Etapa 2, del proceso corrosivo. A tal fin, se ha simulado la acción expansiva de los óxidos, mediante una presión actuando circunferencialmente en el hormigón adyacente a la barra afectada. Esta acción produce un estado tensional, que es el responsable de la propagación 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 mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos, utilizando el Programa ALGOR FEMS (Finite Element Modeling Software) ⁹.

2.1 Modelos geométricos

Se estudiaron los modelos indicados en Figura 2, considerando diferentes disposiciones de las armaduras, de acuerdo a los análisis experimentales tomados de referencia ⁸. Se trata de vigas de hormigón armado de sección rectangular (8 cm x 16 cm). El área total de acero de la armadura en cada viga es *aproximadamente igual para todos los casos, pero difiere en el número de barras y en el diámetro de las mismas*. Las vigas permanecen apoyadas, sobre una superficie plana, en toda su longitud, por lo que se despreció la acción del peso propio.

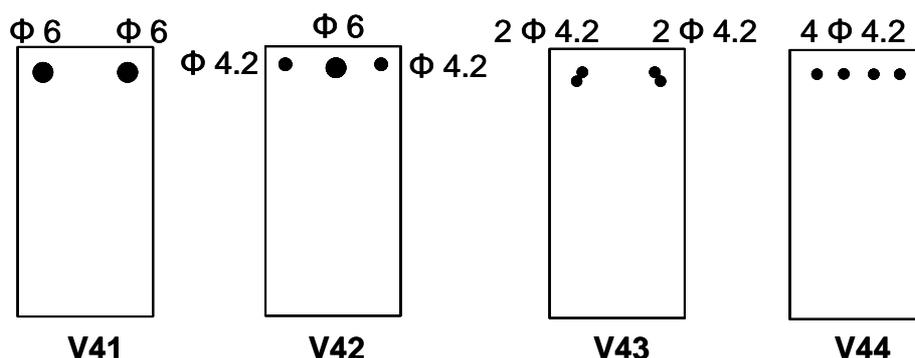


Figura 2: Identificación de las vigas con su correspondiente distribución de armadura.

Para los modelos numéricos-computacionales se ha considerado una discretización que contempla una densificación 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, con dos grados de libertad traslacionales por nodo. En la Figura 3 se indica el mallado utilizado, para los diferentes modelos analizados. Las condiciones de vínculo de los modelos, simulan el apoyo continuo de los mismos sobre la superficie inferior.

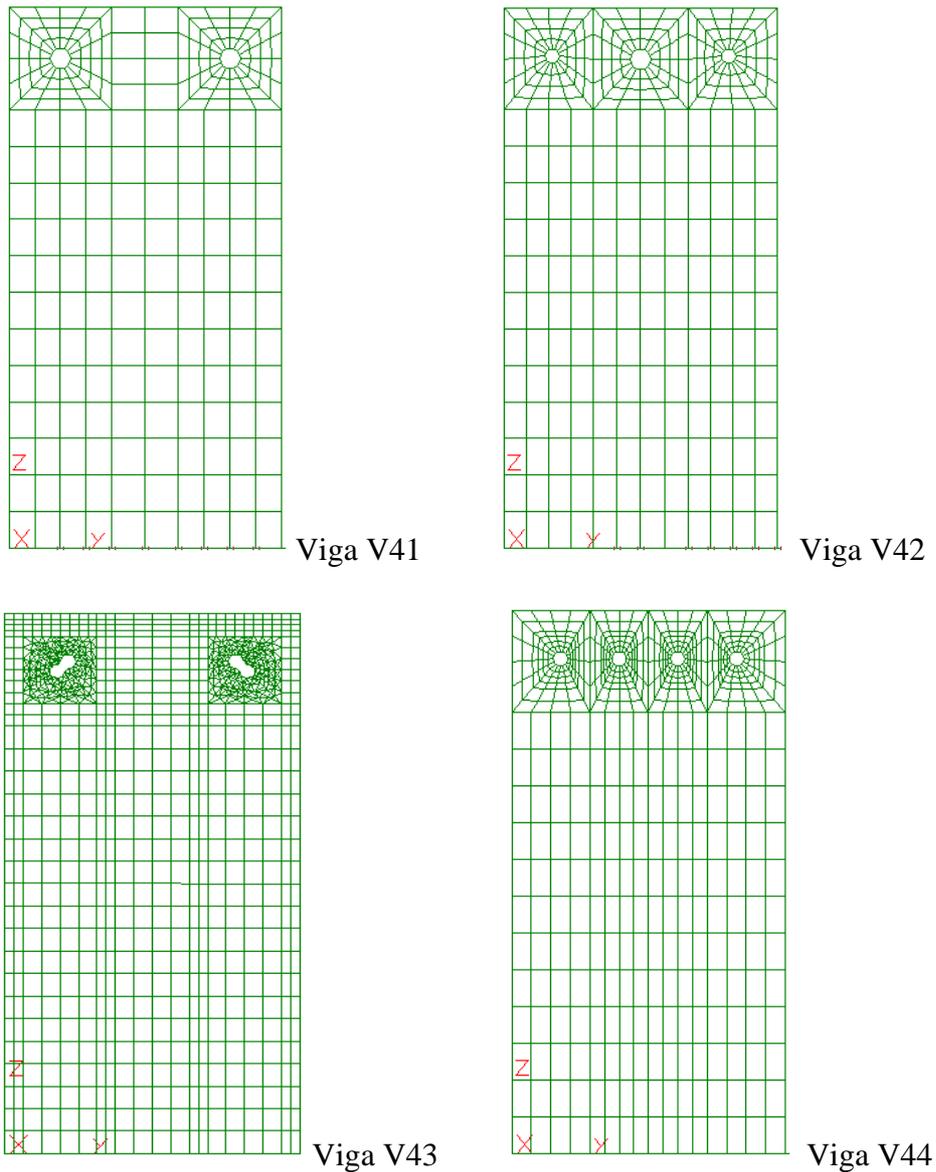


Figura 3: Discretización de los modelos.

2.2 Modelo constitutivo

Se utilizan para este análisis predicciones elástico lineales. Si bien las mismas no representan fielmente el comportamiento del hormigón, pues no permiten observar la redistribución de esfuerzos, cuando se llega al límite de resistencia a tracción (considerado el tipo de hormigón adoptado en el presente trabajo, se toma 2 MPa), sí permiten analizar comparativamente los comportamientos de los diferentes modelos. 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.

Las principales características del hormigón empleado son: Tipo H 17, Módulo de Elasticidad Longitudinal $E = 28000$ MPa, Coeficiente de Poisson $\mu = 0.2$, Resistencia Característica de Tracción = 2 MPa y Resistencia Característica de Compresión = 17 MPa.

2.3 Modelo de acciones

En el trabajo experimental de referencia ⁸ las armaduras fueron sometidas a un proceso de corrosión acelerada, aplicando una corriente galvanostática externa o también conocida como velocidad de corrosión de $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$, bajo humectación con una solución de Cloruro de Sodio. Si bien la presencia de cloruros indicaría una predisposición a la aparición de picaduras, no se encontró una correlación entre la ubicación de las mayores picaduras y la de los máximos anchos de fisura, por lo que ha existido una redistribución longitudinal de presiones.

Por lo indicado, se adoptó para la simulación de la acción de los productos de corrosión sobre el hormigón, una presión circunferencial, representativa de una corrosión uniforme. La misma es producida por el aumento del volumen del acero virgen, debido a la generación de los productos de la corrosión. Se supuso de igual magnitud, en los cuatro casos, debido a que se consideró, al igual que en el modelo experimental, que las armaduras estaban sujetas a una misma velocidad de corrosión y por ende, la penetración de la corrosión en la sección transversal, es la misma.

3 RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados experimentales ⁸ muestran la variación del espesor de las fisuras, en función del incremento de la corrosión, para las caras laterales de las vigas. En el presente trabajo se considera que la Tensión Máxima Principal indica la tendencia a fisurarse que tienen los modelos, mientras que el incremento de presión representa al avance del proceso corrosivo. A efectos de obtener resultados comparables a los resultados de obtenidos experimentalmente ⁸, se analiza la variación de la Tensión Máxima Principal, en la cara superior y en las caras laterales de los modelos, en función de la presión aplicada. Los valores obtenidos se presentan Figuras 4 y 5.

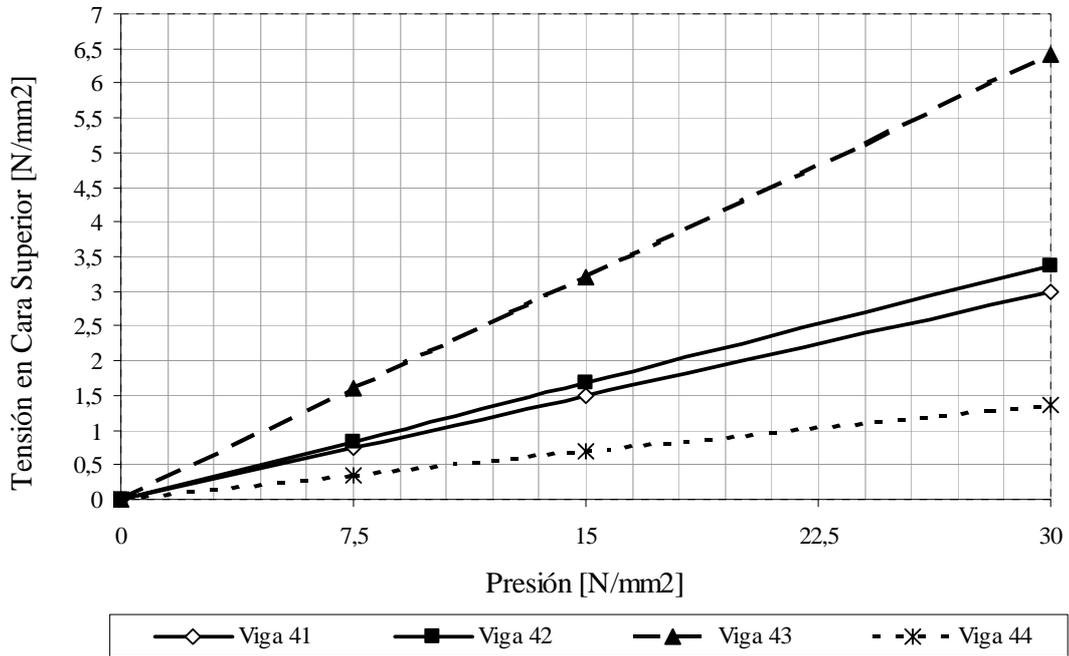


Figura 4: Variación de la Tensión Máxima Principal en función de la presión. Cara Superior.

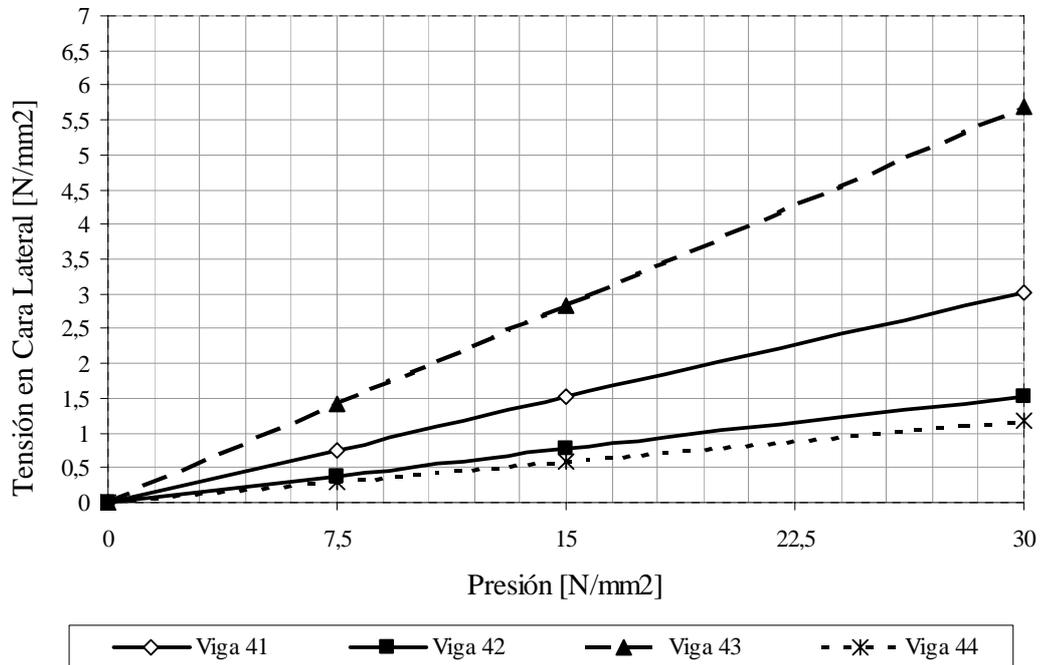


Figura 5: Variación de la Tensión Máxima Principal en función de la presión. Cara Lateral.

En Figuras 6, 7, 8 y 9 se muestra la distribución de Tensiones Máximas Principales para las diferentes disposiciones de armaduras analizadas.

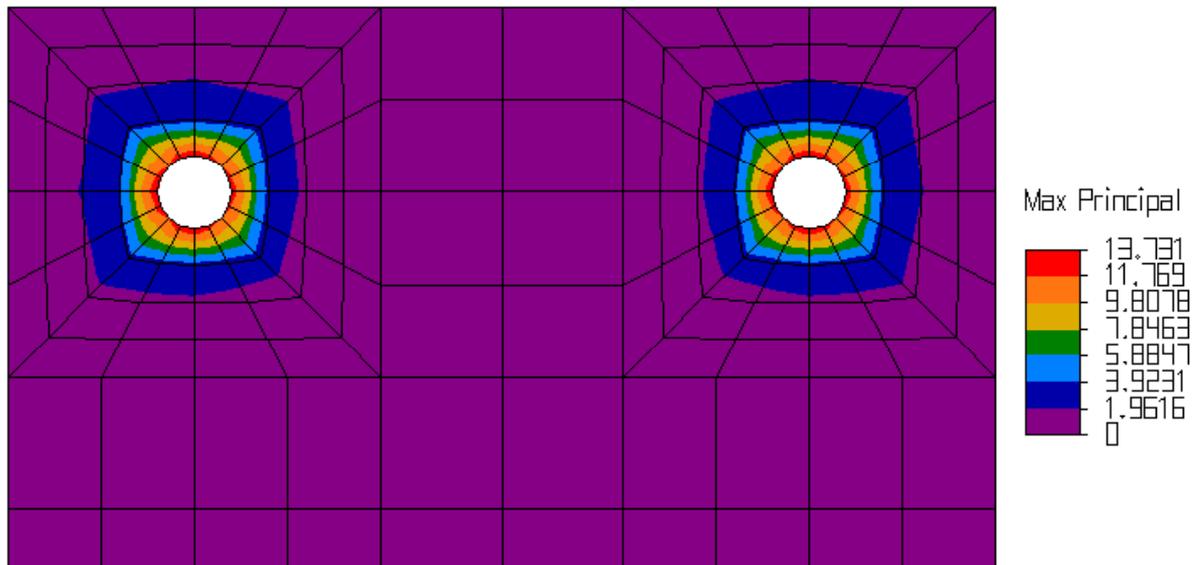


Figura 6: Distribución de Tensiones Máximas Principales. Viga V41.

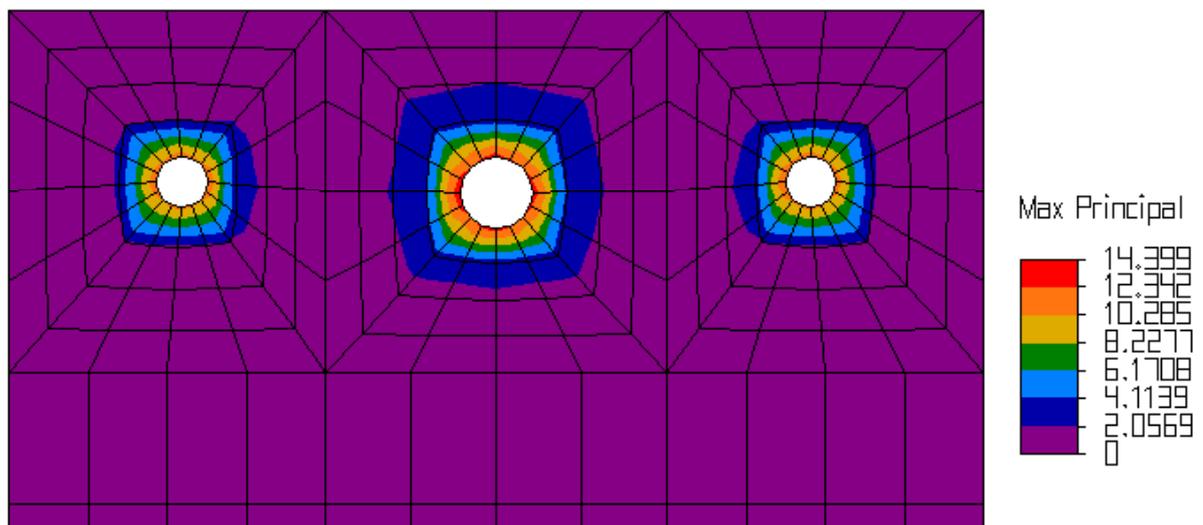


Figura 7: Distribución de Tensiones Máximas Principales. Viga V42.

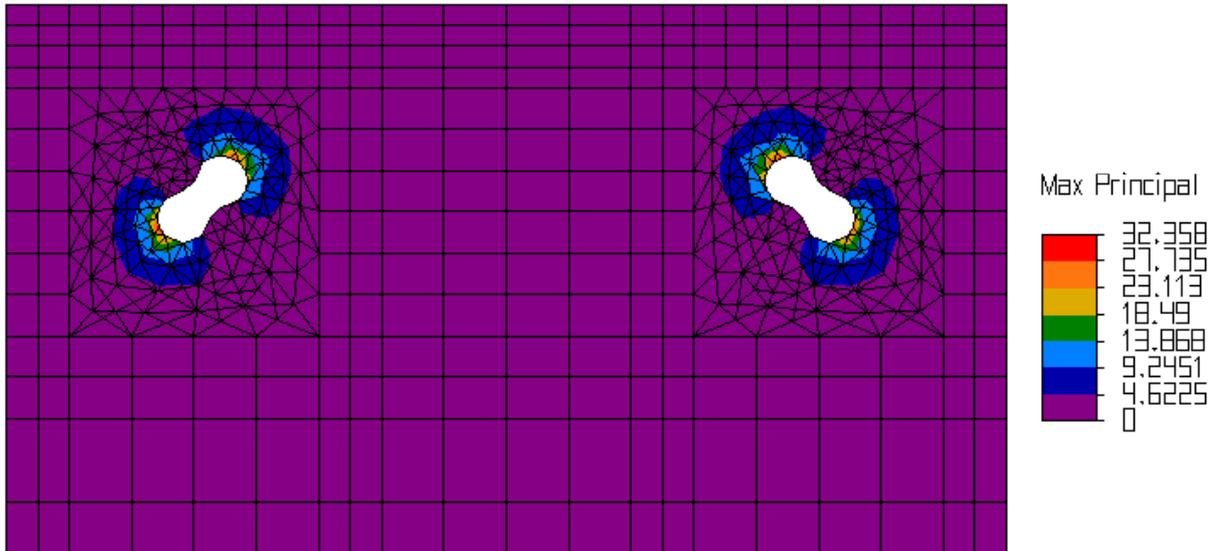


Figura 8: Distribución de Tensiones Máximas Principales. Viga V43.

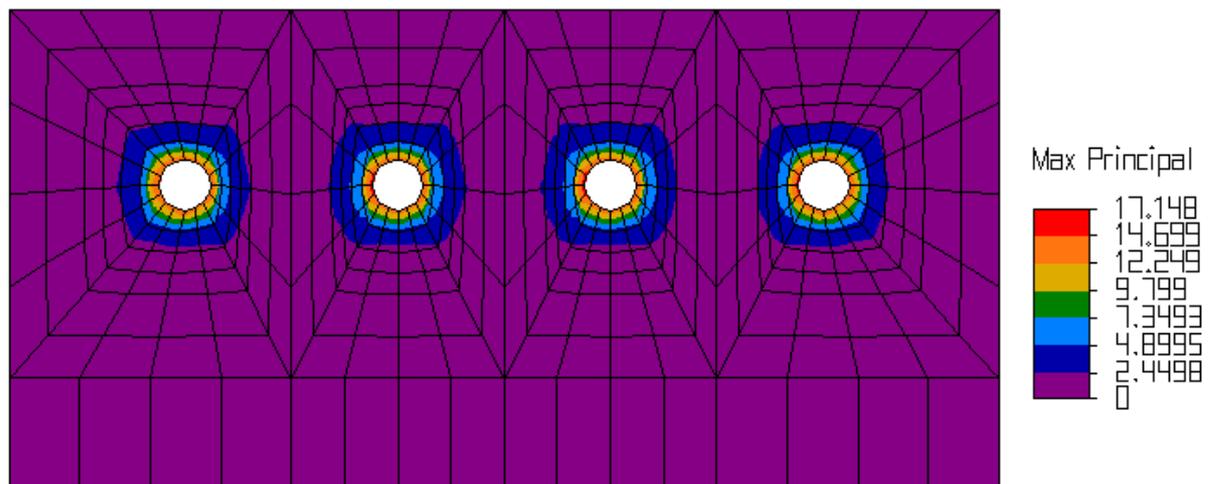


Figura 9: Distribución de Tensiones Máximas Principales Viga V44.

En Figura 10, 11, 12 y 13 se muestran las deformadas de los modelos para las diferentes disposiciones de armaduras analizadas.

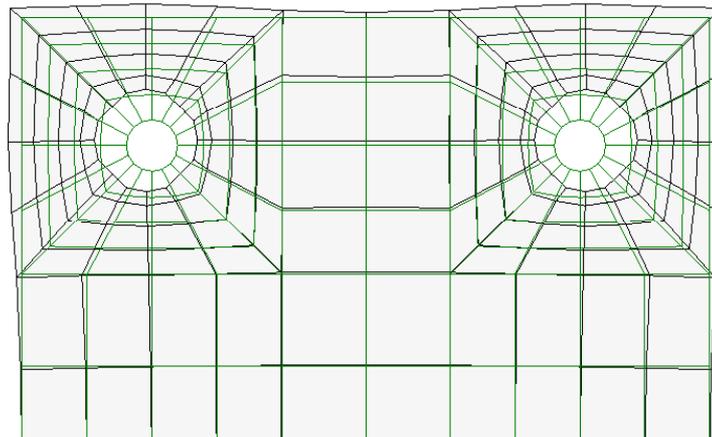


Figura 10: Deformadas del modelo. Viga V41.

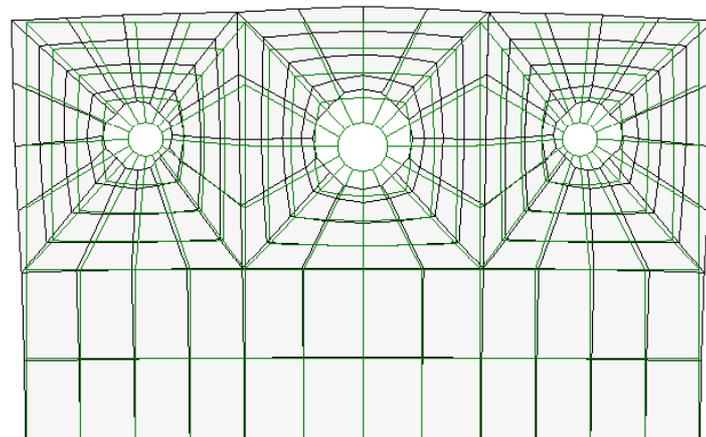


Figura 11: Deformadas del modelo. Viga V42.

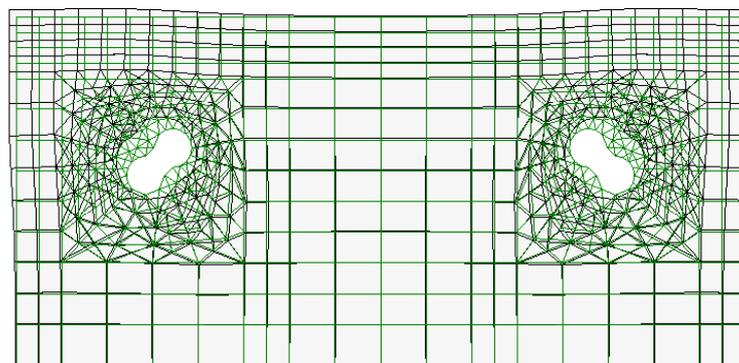


Figura 12: Deformadas del modelo. Viga V43.

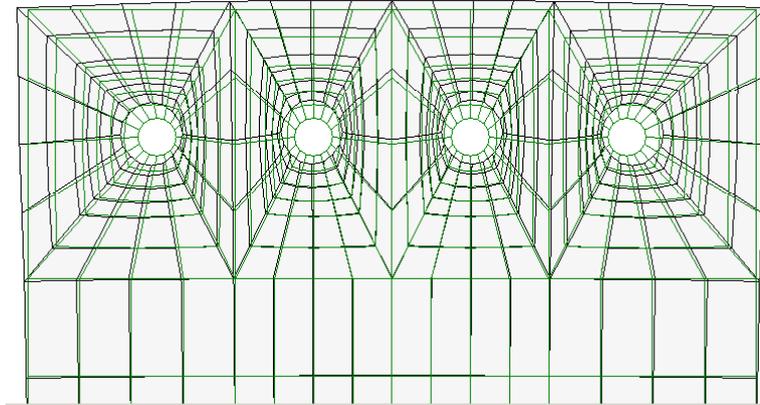


Figura 13: Deformadas del modelo. Viga V44.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados permite observar que, en los casos aquí analizados, donde se consideró una igualdad del área total de armaduras longitudinales, el adoptar una disposición que presente una mayor superficie perimetral de armaduras, que estarán expuestas a la corrosión y/o barras agrupadas en los vértices de la sección transversal, favorecen al proceso de fisuración que se produce. Esto se observa en Figuras 4 y 5 para el caso del Modelo V43, que es el que presenta mayor tensión y por lo tanto un mayor cuadro de fisuración.

El análisis numérico efectuado, permite el seguimiento del estado tensional (fisuración) en la cara superior de los modelos estudiados, a diferencia del análisis experimental que solo permite el seguimiento de la evolución de la fisura en la cara lateral.

Comparando las curvas de las Figuras 4 y 5, puede observarse la diferencia de los comportamientos, en las caras superior y laterales, entre los modelos V41 y V43 acorde a la disposición de las armaduras.

Las Figuras 6, 7, 8 y 9 muestran la distribución de Tensiones Máximas Principales, y las Figuras 10, 11, 12 y 13 presentan las deformaciones de los sistemas que permiten vislumbrar las zonas de formación de fisuras, que corresponden a las de tracción máxima.

El comportamiento mecánico, aquí expuesto, es análogo al determinado experimentalmente en la referencia ⁸.

5 CONSIDERACIONES FINALES

El análisis numérico-computacional efectuado en este trabajo permite, a través de la distribución de tensiones analizada, el seguimiento del proceso de fisuración del recubrimiento de hormigón, producido a consecuencia de la corrosión de las armaduras metálicas, que se encuentran dentro de la masa del hormigón.

Del análisis de los resultados, se evidencia que la disposición de armaduras longitudinales de la viga V44 es la más adecuada, ante la presencia de un proceso corrosivo. Es decir una disposición de barras de diámetro menor uniformemente distribuidas, en todo el ancho de la sección transversal.

De acuerdo a lo observado y ante eventuales problemas corrosivos, el uso de barras colocadas en grupos que reemplacen barras de mayor diámetro, no es recomendable pues provoca importantes localizaciones de tensiones. Esto se da por la mayor superficie expuesta al ataque corrosivo.

Dada la concordancia de los resultados numéricos, con los experimentales, puede destacarse la validez de uso de predicciones sencillas, como las Elásticas Lineales, para el logro de determinados objetivos, como el presentado en este trabajo.

6 REFERENCIAS

- [1] S. Roostam, *“Vida Útil de las Estructuras de Hormigón. Cómo Satisfacer los requerimientos del Nuevo Milenio”*, Publicación de Conferencia Congreso de Ingeniería AIE, 29 págs. (2000).
- [2] J. Zapico Valle, F. Molina Ruiz, J. Casal Macías y J. Rodríguez Santiago, "Simulación mecánica de la corrosión de armaduras en elementos de hormigón", *Hormigón y Acero*, 67-77, 4º trimestre (1993).
- [3] C. Andrade, C. Alonso, and F. Molina, “Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 1 - Experimental test”, *Materials and Structures*, 26, 453 – 464, (1993).
- [4] C. Alonso, C. Andrade, J. Rodríguez, J. Casal, y A. García, "Evaluación experimental de la fisuración del hormigón producida por la corrosión de las armaduras", *Hormigón y Acero*, 194, 29 - 42, (1994).
- [5] M. Schierloh, N. Ortega, y L. Señas, “Relación entre algunas propiedades del hormigón del recubrimiento y su degradación, producida por los productos de corrosión de las armaduras”, 14º Reunión de AATH, tomo II, 125-132, (2001).
- [6] M. Peralta, I. Rivas, y N. Ortega, “Influencia de la Corrosión de las Armaduras en el Comportamiento del Hormigón del Recubrimiento”, *ENIEF 2003*, Vol. XXII, 562-563, (2003).
- [7] F. Molina, C. Alonso and C. Andrade, “Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2 -Numerical mode”1, *Materials and Structures*, 26, 532 - 548, (1993).
- [8] N. Ortega y R. Aveldaño, “Influencia de la Distribución de la Armadura Longitudinal en la Fisuración de Vigas de Hormigón Armado Afectadas por Corrosión”, *Simposio fib*

2005 – El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo, Trabajo N° 105, (2005).

- [9] Algor12 Professional Mech/VE. Docutech, Linear Stress and Dynamics, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania (1999).