

Modelación con elementos finitos del agrietamiento en el hormigón por corrosión localizada en la armadura

Finite element modeling of cracking in concrete due to localized corrosion in the reinforcement

José Castorena* **, Adán Borunda*, Citlalli Gaona*, Alberto Martínez* y Facundo Almeraya*

* Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Chihuahua, MÉXICO

** Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), MÉXICO
facundo.almeraya@cimav.edu.mx

Fecha de recepción: 18/ 09/ 2006
Fecha de aceptación: 15/ 03/ 2007
PAG. 35 - 42

Resumen

En base a estudios con elemento finito, en el presente trabajo se obtiene un modelo capaz de predecir la cantidad de acero corroído (r_{crit}) en la armadura necesaria para que aparezca la primera grieta visible en la superficie del recubrimiento del hormigón. Para el análisis con elemento finito se utiliza el software ANSYS, el cual dispone del elemento SOLID65, con el que es posible modelar el hormigón simple, ya que tiene la capacidad de sufrir aplastamiento en compresión y agrietarse a tracción. El caso de la capa de óxido es modelado mediante elementos de contacto CONTA174, y la armadura con SOLID65, pero sin las opciones de aplastamiento y agrietamiento. El modelo obtenido está en función del recubrimiento libre, diámetro del refuerzo, tipo de hormigón y la longitud corroída, denominada ésta longitud anódica. Los resultados muestran la gran influencia que tiene la corrosión localizada (longitud anódica pequeña-longitud catódica grande) sobre el cálculo de r_{crit} , y que dicho efecto sólo es posible analizarlo de manera tridimensional. Así mismo, se muestra la eficiencia de utilizar los elementos de contacto CONTA174 para representar el crecimiento de óxidos. El modelo obtenido explica en un 92% el fenómeno y se compara con resultados experimentales encontrados en la literatura.

Palabras Clave: Elemento finito, hormigón, agrietamiento, corrosión, corrosión localizada

Abstract

Based on studies with finite element method, a model able to predict the quantity of steel corrosion (r_{crit}) necessary for the first visible crack appearance in the surface of the concrete cover was obtained. For the finite element analysis the software ANSYS was used, which has the element SOLID65, with which is possible to model plain concrete, since has the capacity to show crushing in compression and to cracking in tension. The case of the oxide layer is modeled by means of contact elements CONTA174 and the steel with SOLID65, but without the crushing and cracking options. The obtained model is in function of the free cover, diameter of the reinforcement, and concrete type and the longitude of corrosion, known as anodic longitude. The results show the great influence that has the localized corrosion (small-size anode vs large-size cathode) on the prediction of r_{crit} , and that effect is only possible to analyze it in a three-dimensional way. Likewise, the efficiency of using the contact elements CONTA174 to represent the growth of oxide is shown. The obtained model explains in 92% the phenomenon and which is compared with experimental results found in literature.

Keywords: Finite element, concrete, cracking, corrosion, localized corrosion

1. Introducción

El hormigón armado es uno de los materiales de construcción que más se ha empleado, ya que es versátil, económico y durable. Sin embargo, la durabilidad del hormigón armado puede verse comprometida debido a la corrosión en la armadura de refuerzo (Piltner y Monteiro, 2000), siendo esta la causa principal de que se requieran reparaciones en dichas estructuras (Andrade e Izquierdo, 2005). La corrosión, en forma de óxido y/o

pérdida de sección transversal de la armadura, se lleva a cabo en presencia de oxígeno y agua, y en sí es un proceso electroquímico, en donde se presenta una oxidación (iones de Fe pasan al electrolito –hormigón), una reducción, donde el oxígeno es reducido a iones OH⁻, y un flujo de electrones en el refuerzo (Ahmad, 2003). Por lo general, una vez que los iones Fe se liberan del acero, reaccionan con el oxígeno circundante, y

forman óxidos más estables químicamente, y se van depositando en la superficie del acero. El vacío dejado por el acero consumido no es suficiente para acomodar estos óxidos, ya que son de menor densidad con volumen de 1.7 hasta 6.15 veces el del acero original. Estos óxidos al ir creciendo ejercen presión sobre el hormigón circundante, y si esos esfuerzos sobrepasan el límite a tracción del hormigón producen el agrietamiento, y en casos severos, desprendimiento (Pantazopoulou y Papoulia, 2001).

Dependiendo de la localización del ánodo y cátodo, la corrosión del refuerzo puede ocurrir ya sea en una microcelda, donde las reacciones anódica y catódica prácticamente se dan en el mismo lugar, o bien en una macrocelda, en donde se distinguen perfectamente al área corroída del refuerzo (ánodo) y la parte no corroída (cátodo) (Elsener, 2002). La Figura 1 muestra estos casos.

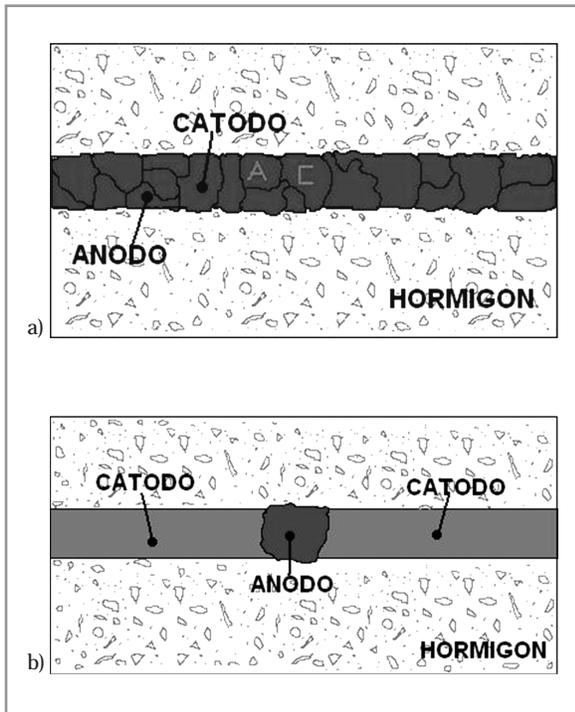


Figura 1. Según la relación entre las áreas corroídas (ánodo) y sanas (cátodo) del refuerzo, el proceso de corrosión puede darse como una microcelda a), o macrocelda b).

El caso de la macrocelda es de gran importancia ya que la reducción de la sección del refuerzo puede acelerarse debido a la relación tan grande entre áreas catódica y anódica, produciendo tasas de corrosión muy altas (Raupach, 1996).

En la actualidad, gran parte de los trabajos de investigación han tratado sobre la determinación de la cantidad de acero corroído necesaria para inducir agrietamiento, r_{crit} , considerando corrosión aproximadamente uniforme (microcelda), y los pocos casos de estudio en que se considera una fracción del acero corroída (macrocelda) se han realizado de manera experimental (Torres-Acosta y Sagüés, 2004). De estos estudios se ha concluido la importancia que reviste considerar la longitud anódica en la determinación de r_{crit} .

Puesto que en todo programa de mantenimiento y reparación de estructuras de hormigón armado la identificación y medida del agrietamiento por corrosión es de suma importancia, se desarrolla el presente trabajo, a fin de proporcionar información adicional mediante un modelo el cual pueda ser utilizado en la determinación de r_{crit} .

2. Planteamiento del problema y su modelación

El problema se modela con referencia a la Figura 2, donde la barra de refuerzo con radio inicial r_0 , es embebida en el hormigón con R_c medida desde el centro de la barra a la superficie libre más cercana del hormigón, esto es, $R_c=C+r_0$, donde C es denominado el recubrimiento libre.

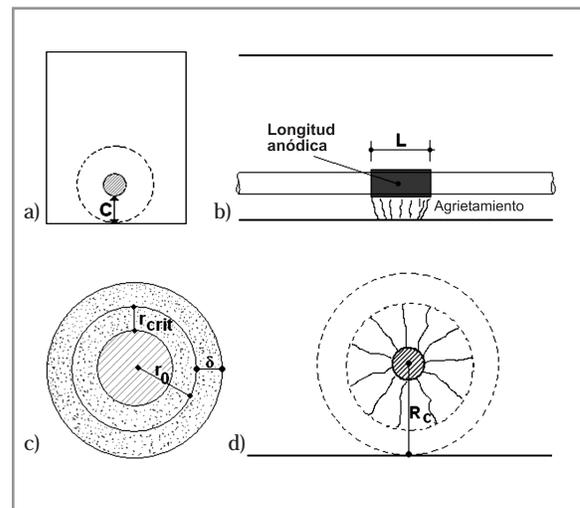


Figura 2. Modelo utilizado para la estimación de esfuerzos durante el proceso de corrosión: a) expansión y contracción cilíndrica, b) sección longitudinal, c) y d) definición de términos.

El agrietamiento del hormigón se debe a la expansión de los productos de corrosión, δ , y se han desarrollado algunos modelos para su determinación (Bhargava et al., 2005), sin embargo, dichos modelos no describen eficientemente el fenómeno, en donde algunas de las limitantes pudieran ser las condiciones de frontera alrededor del orificio ocupado por el acero corroído, ya que se considera al hormigón que rodea al refuerzo como si fuera un cilindro de pared gruesa sometido a presión interna, producto ésta de los óxidos expansivos. Además, se desprecia la resistencia residual del hormigón agrietado en el recubrimiento. En el presente trabajo, se propone representar el acero corroído como un elemento estructural que es forzado a ocupar el volumen dentro de un cilindro hueco (el hormigón), cuyo diámetro δ interior es menor que el diámetro de la barra corroída, y que una vez que las dos partes se han acoplado, se puede obtener la presión ejercida entre ellas. El desplazamiento relativo entre los diámetros, d , representa la capa de óxido necesaria para producir esfuerzos tangenciales iguales a la resistencia máxima a tracción del hormigón e iniciar el agrietamiento en la interfase acero-hormigón. Resolviendo entonces el problema mediante Teoría de Elasticidad (Wang, 1953) se obtiene el valor de δ el cual es dado por la ecuación 1.

$$\delta = 2r_0 P_g \left[\frac{1 - \nu_a}{E_a} + \frac{(1 + \nu_h) \frac{R_c^2}{r_0^2} + (1 - \nu_h) r_0^2}{E_h (\frac{R_c^2}{r_0^2} - r_0^2)} \right] \quad (1)$$

E_a y ν_a son los módulos de elasticidad y poisson del acero de refuerzo, E_h y ν_h los correspondientes al hormigón. Los demás términos se definieron en la Figura 2. P_g es la presión radial en la interfase acero-hormigón, y se obtiene mediante la ecuación 2, donde f_t es la resistencia a tracción del hormigón, en unidades de esfuerzo.

$$f_t = \left[\frac{R_c^2 + r_0^2}{R_c^2 - r_0^2} + \nu_h \right] P_g \quad (2)$$

En los cálculos de δ y P_g con las ecuaciones anteriores, se asume que el hormigón esta sano, esto es, se consideran sus propiedades elásticas al no estar agrietado. Una vez que los óxidos alcancen el valor de δ , entonces el hormigón empezará a agrietarse en la interfase acero corroído-hormigón, por lo que para valores mayores que δ ya no es aplicable teoría de elasticidad; en su lugar, dicho proceso será modelado con elemento

finito mediante el paquete ANSYS, donde el proceso de agrietamiento será bajo el concepto de "smeared crack", esto es, en lugar de asumir grietas discretas, se propone modificar las propiedades mecánicas del hormigón de acuerdo a relaciones esfuerzo-deformación dadas para éste conforme se vaya dañando a tracción. La Figura 3 muestra el concepto de "smeared crack" y las relaciones esfuerzo-deformación para el hormigón, tanto a tracción como a compresión.

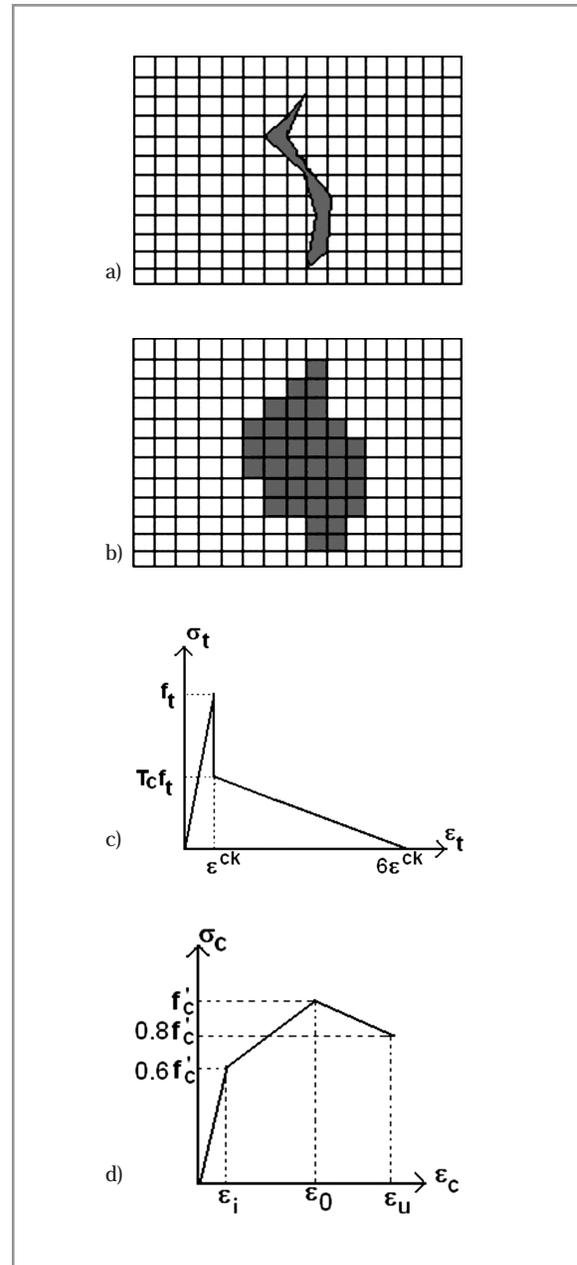


Figura 3. a) grieta discreta, b) "smeared crack", c) y d) son curvas esfuerzo-deformación idealizadas para el hormigón, a tracción y compresión respectivamente.

La nomenclatura de la Figura 3 c) corresponde a la de ANSYS, donde Tc es un factor que toma en cuenta la relajación del esfuerzo. Para la selección de un valor apropiado de éste parámetro, se modelan resultados experimentales reportados anteriormente, (Torres-Acosta y Sagüés, 2000). Dicho experimento consiste en medir indirectamente la presión ejercida por la expansión de los óxidos en la interfase acero-hormigón mediante la colocación de extensómetros en el interior del refuerzo, que en este caso se utilizó tubería de acero. Parte del arreglo experimental se muestra en la Figura 4. Para calibrar nuestro modelo de elementos finitos (Castorena

et. al, 2005), el espécimen seleccionado de la referencia es el PC2, el cual tiene las siguientes características: D=152 mm, H=406 mm, L=64 mm, resistencia a compresión del hormigón de 53 MPa, resistencia a tracción de 4.5 MPa y módulo de elasticidad de 34420 MPa. El acero es tubular, con radio externo de 21 mm y espesor de 3 mm. La Figura 5 del apéndice muestra curvas para resultados experimentales y con elementos finitos (ANSYS) para la presión de contacto en la interfase acero-hormigón, en donde los parámetros encontrados para la curva 3-c) son Tc=0.90, así como los coeficientes de transferencia de cortante 0.25 y 0.35.

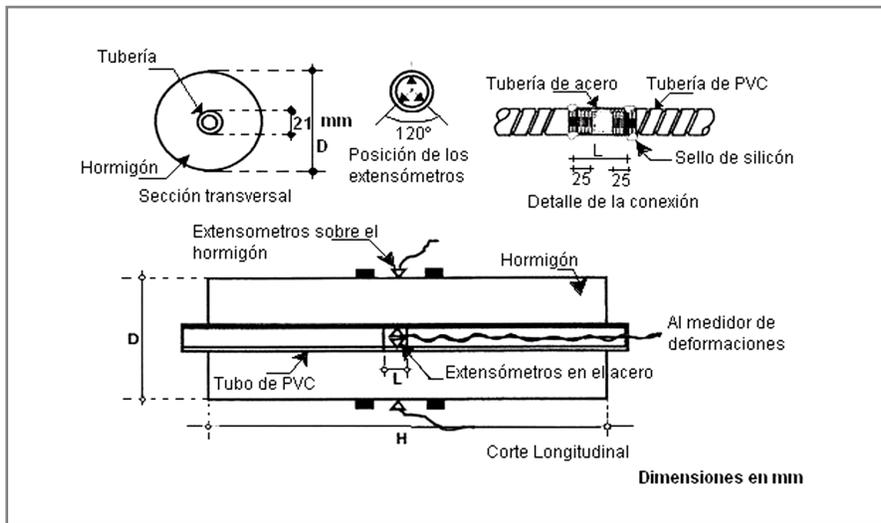


Figura 4. Arreglo experimental para los especímenes utilizados en la referencia (Torres-Acosta y Sagüés, 2000).

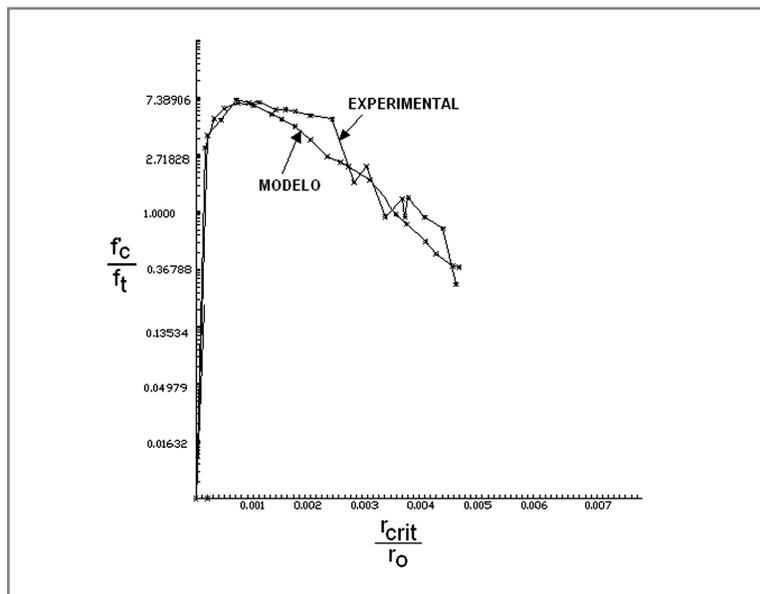


Figura 5. Relación entre esfuerzos por expansión de óxidos y cantidad de penetración del refuerzo, en la interfase acero-hormigón

La Figura 6 muestra un script indicando la manera de introducir estos datos para que tome en cuenta las curvas esfuerzo-deformación dadas en la Figura 3.c) y 3.d).

```

ET,1,SOLID65
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,1
KEYOPT,1,6,3
KEYOPT,1,7,1

MP,EX,1,28801 !37 MPa
MP,NUXY,1,0.24

!criterio de falla
TB,CONCR,1
TBMODIF,2,1,0.25
TBMODIF,3,1,0.35
TBMODIF,4,1,ft
TBMODIF,5,1,-1
TBMODIF,10,1,Tc

TBMISO,1,1,3
TBPT,,epsi,0.65*fc
TBPT,,eps0,fc
TBPT,,epsu,0.8*fc
    
```

Figura 6. Datos suministrados para que se tome en consideración la relajación de esfuerzos en ANSYS y pueda utilizarse el modelo se “smeared crack”, donde f_c , T_c y f_t son definidos previamente.

Para el caso de modelar con elemento finito la capa de óxido en la interfase acero-hormigón, se utiliza el elemento de contacto CONTA174. En un problema de contacto, la principal dificultad radica en que no se conoce de antemano la superficie de contacto entre dos cuerpos. Para el caso estudiado aquí, el problema de contacto queda resuelto, ya que la geometría circular del acero de refuerzo predispone a utilizar un crecimiento u expansión perimetral uniforme de los productos de corrosión, de manera que es posible conocer en todo momento la superficie de contacto entre el acero corroído y el hormigón. El acero de refuerzo es modelado como SOLID65, pero sin las opciones de la Figura 6.

3. Resultados y discusiones

El análisis con elemento finito es un análisis numérico aproximado y cuyos resultados, en cierta medida, dependen del tamaño de la malla de elementos finitos utilizada, por ello es que en cada aplicación se tiene que realizar un modelo calibrado, esto es, un modelo con el número determinado de elementos en donde, por más que se incrementen ya no cambia algún valor de interés (esfuerzo, desplazamiento, deformación, etc.) en cierto punto. En este trabajo, para calibrar los modelos de elemento finito, se utiliza la solución teórica dada por la ecuación 1. La Figura 7 muestra los resultados obtenidos, para una sección transversal cilíndrica y otra rectangular, a la que se le denomina viga, a efecto de mostrar que la ecuación 1 también puede ser utilizada para secciones

rectangulares como se deduce de la gráfica de la Figura 8. Para esta primera etapa, se asume que no tiene influencia el valor de L , y que se obtuvieron los mismos resultados para distintos valores.

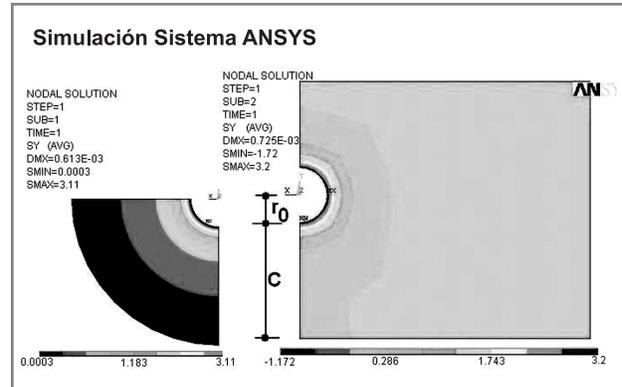


Figura 7. Esfuerzos tangenciales para un cilindro y una viga. Los esfuerzos son en el hormigón, no se muestran los esfuerzos en el acero a efectos de ilustración.

Los datos para la obtención de los valores de las Figuras 7 y 8 son: radio del refuerzo, $r_0=4.75$ mm, recubrimiento libre $C=20$ mm, modulo de elasticidad del hormigón $E_h=28863$ MPa, modulo de elasticidad para el acero $E_a=210000$ MPa, modulo de Poisson del acero $\nu_a=0.3$ y del hormigón $\nu_h=0.24$. La importancia de los resultados mostrados en la Figura 8 radica, para el presente trabajo, en que se utilizarán cilindros en la modelación con elemento finito para el cálculo de r_{crit} , por la simplicidad y además por las consideraciones de simetría.

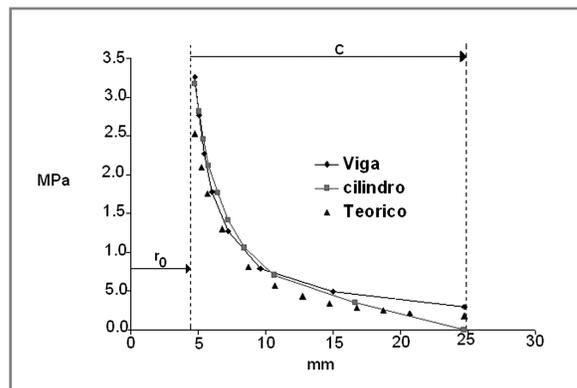


Figura 8. Gráfica comparativa que muestra los valores numéricos de los esfuerzos tangenciales en el hormigón, para condiciones de frontera distintas (viga, cilindro).

Las Figuras 9 y 10 muestran los resultados obtenidos para los especímenes denominados CPG1 y CPG2 en la referencia (Torres-Acosta y Sagüés, 2004).

Para CPG1 se tiene que $D=102$ mm, $H=406$ mm, $L=92$ mm, $C/d=0.9$ y $C/L=0.4$; en el caso de CPG2 la longitud de acero corroída es $L=42$ mm y $C/L=1.0$, siendo los mismos valores de $D,H,C/d$ del espécimen CPG1, incluyendo el módulo de elasticidad de 34420 MPa. En 9-a) se muestra el patrón de grietas para el modelo "smeared crack" y en 9-b) se muestran los esfuerzos tangenciales (tensiones) para corrosión localizada, L . Por simetría se utiliza sólo un cuarto de los cilindros. Haciendo un análisis de los resultados mostrados en la Figura 10, se puede observar la influencia que la longitud anódica,

L , tiene sobre la determinación de r_{crit} . Desde el punto de vista teórico, este hecho sólo es posible observarse a través de un análisis tridimensional.

El estudio numérico con elemento finito se llevó a cabo de la siguiente manera: para una relación dada del recubrimiento a diámetro, así como propiedades del hormigón (resistencia a compresión, tracción y módulo de elasticidad), se calibra el modelo de acuerdo al valor de δ y P_g calculados con las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

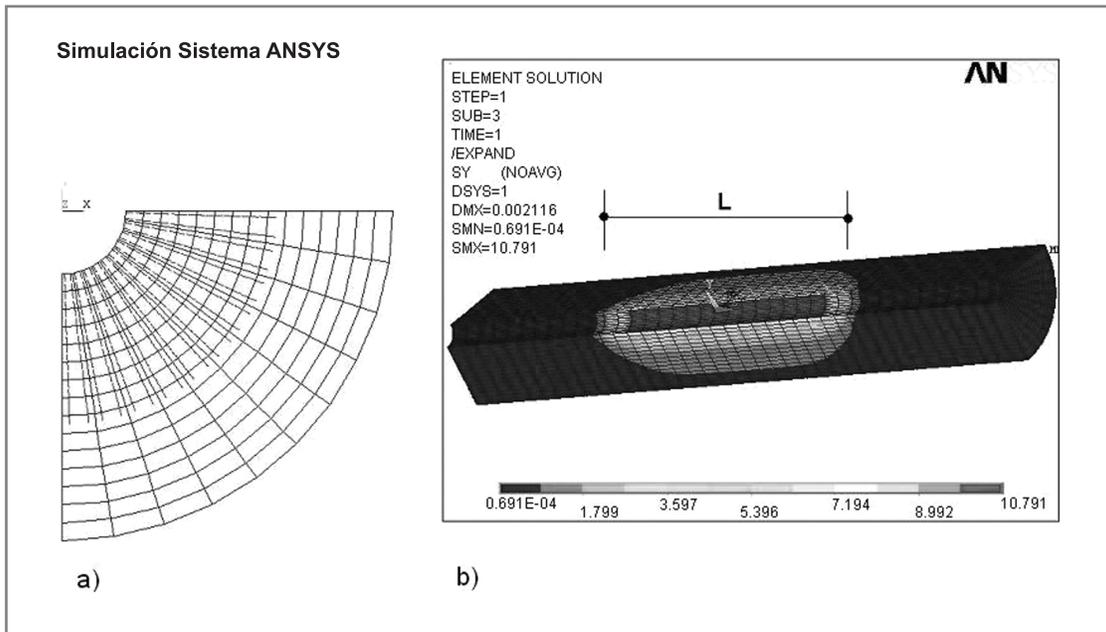


Figura 9. Patrón de agrietamiento producto de la presión ejercida por óxidos sobre el hormigón, a), y esfuerzos tangenciales debido a corrosión localizada, b).

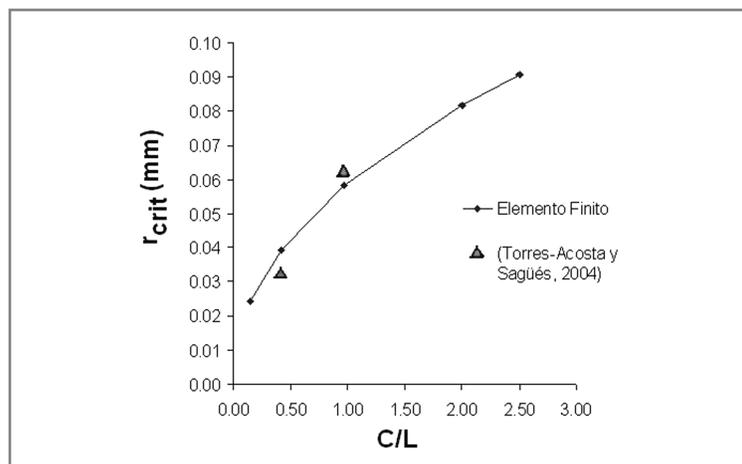


Figura 10. Influencia de la longitud anódica L sobre r_{crit} . Los resultados experimentales obtenidos de la referencia son para los especímenes denominados CPG1 y CPG2

Posteriormente se generan casos para distintas relaciones C/L . Se estudiaron con elemento finito un total de 100 casos diferentes y se realiza un análisis de regresión mediante el programa SAS (Statistical Analysis System). El modelo obtenido se muestra en las ecuaciones 3 y 4.

$$r_{crit}^{0.15} = 0.4553 \left(\frac{C}{d} \right) \delta^{-0.0653} \left(\frac{C}{L} \right)^{0.07} \quad (3)$$

$$R^2=0.92 \quad (4)$$

Donde (C/d) es la relación recubrimiento libre/diámetro del refuerzo, esto es, $d=2r_0$, δ se calcula con la ecuación 1 y (C/L) es la relación recubrimiento libre/longitud anódica. La influencia de las propiedades del hormigón queda implícita en el cálculo de δ . La aplicabilidad del modelo aquí desarrollado, ecuación 3, se muestra en la gráfica de la Figura 11, donde se observa una buena correlación entre resultados teóricos y experimentales. En algunos casos la diferencia es marcada, sobre todo aquellos valores sobreestimados, esto es, por arriba de la recta. Dicha diferencia pudiera ser debido a que en la referencia consultada no se especifica con claridad el valor de L (longitud anódica). Las unidades en la ecuación 3 son en mm para r_{crit} y δ .

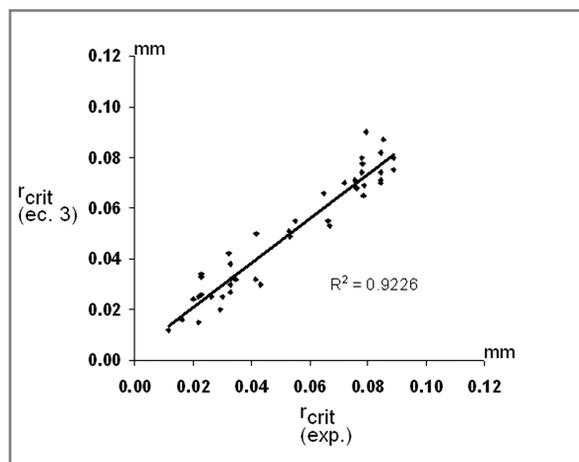


Figura 11. Comparación entre resultados teóricos, ecuación 3, y experimentales (Torres-Acosta y Sagüés, 2004).

4. Conclusiones

Mediante elemento finito y los elementos SOLID65 y CONTA174 propuestos en ANSYS, es posible

modelar el fenómeno de agrietamiento por corrosión en estructuras de hormigón armado.

En base a los resultados obtenidos, se propone un modelo para estimar la cantidad de acero corroído, r_{crit} , para el instante en que aparece la primera grieta visible por corrosión en las estructuras de hormigón armado, y donde dicho modelo está en función de la geometría (recubrimiento libre C , diámetro del refuerzo $2r_0$ y la porción corroída del refuerzo L) y de las propiedades mecánicas del hormigón (módulo de elasticidad, resistencia a compresión, módulo de Poisson y resistencia a tracción).

Se sugiere el desarrollo de nuevas tecnologías en el campo de los métodos no destructivos, con la finalidad de poder determinar con seguridad la longitud de acero corroída, ya que ésta es una variable de suma importancia en el modelo propuesto.

5. Referencias

- Andrade C., Izquierdo D. (2005), "Benchmarking through an algorithm of repair methods of reinforcement corrosion: The repair index method", *Cement & Concrete Composites*, 27, 727-733.
- Ahmad A. (2003), "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review". *Cement & Concrete Composites*, 25, 459-471.
- Bhargava K., Ghosh A., Mori Y. y Ramanujam S. (2005), "Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures". *Cement and Concrete Research*, 35, 2213-2218.
- Castorena J., Almeraya C., Velázquez I., Gaona C. y Villafañe A. (2005), "Modelación con elemento finito del agrietamiento por corrosión en vigas de concreto reforzado utilizando elementos de contacto mediante ANSYS", *Conpat 2005*, ed., VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y X Congreso de Control de Calidad en la Construcción, Asunción, Paraguay, 19-21 septiembre, Vol. I: Control de Calidad,
- Elsener B. (2002), "Macrocell corrosion of steel in concrete -implications for corrosion monitoring", *Cement & Concrete Composites*, 24, 65-75.
- Pantazopoulou J. y Papoulia D. (2001), "Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No.4, 342-351.
- Piltner R. y Monteiro M. (2000), "Stress analysis of

- expansive reactions in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 30, 843-848.
- Raupach M. (1996), “Chloride-Induced Macrocell Corrosion of steel in concrete – theoretical background and practical consequences”, *Construction and Building Materials*, V.10, No.5, 329-338.
- Torres-Acosta A. y Sagüés A. (2000), “Concrete Cover Cracking with Localized Corrosion of Reinforcing Steel”, p 591, in Proc. of the Fifth CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, SP-192, V.M Malhotra, Ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., U.S.A.
- Torres-Acosta A. y Sagüés A. (2004), “Concrete cracking by localized steel corrosion-Geometric effects”, *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No.6, 501-507.
- Wang C. (1953), *Applied Elasticity*, McGraw-Hill book company, New York, USA.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico al Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV), CONACYT y al Programa de Mejoramiento al Profesorado PROMEP de la Secretaría de Educación Pública SEP. De igual forma, se agradece las observaciones y comentarios que tuvieron a bien hacer los revisores a este trabajo.

