

FISURACIÓN DEL HORMIGÓN POR CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS PASIVAS INDUCIDA POR CLORUROS

Santiago Guzman¹, Jaime C. Gálvez¹, José M. Sancho², Jaime Planas³

¹Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos,
Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España
E-mail: jcgalvez@caminos.upm.es

²Escuela Politécnica Superior, Universidad San Pablo CEU.
Campus de Montepríncipe. Boadilla del Monte, 28668 Madrid.
jmsancho@ceu.es

³Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos,
Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España
E-mail: jplanas@mater.upm.es

RESUMEN

Este trabajo se centra en la difusión de iones de cloro en elementos de hormigón armado. Algunas de estas estructuras pueden estar expuestas a elevadas concentraciones superficiales de este ión (ambientes marinos, sales fundentes, etc.) Los modelos de estudio de corrosión inducida por cloruros contemplan dos etapas: penetración de los cloruros hasta alcanzar la armadura por difusión, y corrosión de la armadura, con posible fisuración del hormigón que la recubre. Este trabajo presenta un modelo de difusión de cloruros que tiene en cuenta la estructura porosa del hormigón, la humedad y la temperatura. Además, acopla la concentración de ión cloro, el gradiente de concentración, la temperatura y la humedad, como variables que gobiernan el proceso de difusión. El modelo permite incorporar grietas en el hormigón que favorecen la entrada de cloruros. Se ha incluido en un programa de elementos finitos mediante una subrutina de usuario. Los datos obtenidos son comparados con resultados experimentales y soluciones analíticas. A partir de los resultados de difusión de los cloruros se estima la corrosión de la armadura y su expansión radial. La posible fisuración alrededor de la armadura se estudia con un modelo de fisura cohesiva embebida.

ABSTRACT

This work is focused on the chloride diffusion in the reinforced concrete. These structures may be exposed to high concentrations of this ion in the surface (sea environment, deicing salts, etc.) The models for corrosion induced by chlorides include two main phases: the diffusion of the chloride ion until it comes up the rebar, and the corrosion of the rebar, even the cracking of the surrounding concrete. This work shows a model for the chloride diffusion. The model takes into account the porous structure, the humidity and the temperature. Moreover, the concentration of the chloride ion, the concentration gradient, the temperature and the humidity are managed as coupled variables in the model. The model allows including cracks as ways to facilitate the entry of the ions. The model has been incorporated in a finite element commercial code. The numerical results are compared with experimental results and analytical solutions. The potential cracking of the concrete that surrounds the bar is simulated with an embedded crack model.

PALABRAS CLAVE: Cloruros, Hormigón, Durabilidad.

1. TRANSPORTE EN MATERIALES POROSOS

Para describir los fenómenos termomecánicos asociados al transporte de iones dentro del hormigón se adopta la Teoría de los Materiales Porosos [1]. La composición local de la mezcla ϕ , viene dada por la expresión:

$$\phi^\alpha = \frac{dv^\alpha}{dv} \quad (1)$$

donde: α = fase constituyente; y v = volumen.

Los constituyentes de la microestructura del material

poroso parcialmente saturado son las fases: sólida ϕ^s , líquida ϕ^l y gaseosa ϕ^g . Resulta la siguiente condición (véase la Figura 1):

$$\phi^s + \phi^l + \phi^g = 1 \quad (2)$$

Los mecanismos básicos del movimiento de iones y fluidos a través de los poros en el hormigón son [2]: la absorción capilar, debida al fenómeno de capilaridad por la acción de la tensión superficial del líquido penetrante; la permeabilidad propiamente dicha, debida a gradientes de presión; la difusión, debida a gradientes de concentración; y la migración, debida a la acción de gradientes de potencial eléctrico.

En primera aproximación [3], si no se considera la transferencia de cargas eléctricas ni el estado tensional del material, los mecanismos que gobiernan el transporte de iones son la difusión y la absorción capilar.

Las ecuaciones de transporte de cloruros emplean tres variables: la concentración de cloruros C_c (kg/m^3); la fracción volumétrica de agua en los poros del sistema ω_e (ϕ en la Figura 1) y la temperatura T .

En la primera variable, se distingue entre la concentración de cloruros ligados al hormigón C_{bc} (expresada en kg/m^3 de hormigón) y la concentración de cloruros libres C_{fc} (expresada en kg/m^3 de solución acuosa). La concentración total de iones Cl^- , C_{tc} (kg/m^3 de hormigón), de acuerdo con [4] es:

$$C_{tc} = C_{bc} + \omega_e C_{fc} \quad (3)$$

donde: ω_e es el agua evaporable (m^3 de solución acuosa/ m^3 de hormigón).

El agua se adsorbe primero en la superficie de los poros capilares y, a medida que aumenta la humedad relativa del ambiente, se condensa y rellena los poros. Se establece, por tanto, el equilibrio entre el contenido ω_e de agua en el interior de los poros y la humedad relativa h del ambiente [2].

1.1. Difusión

En el hormigón parcialmente saturado, la concentración de cloruros libres varía de un punto a otro por el grado de combinación de los iones en el hormigón y por la humedad [5]. El proceso está influenciado por los gradientes de potencial eléctrico asociados a la presencia de aniones y cationes en disolución. Por ello la difusión de cloruros en el hormigón es compleja y difiere de la ley de Fick, que establece un flujo J_F ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$) proporcional al gradiente de concentración mediante un coeficiente D_F que se supone constante:

$$J_F = -D_F \nabla C \quad (4)$$

Sin embargo, a efectos prácticos, suele aceptarse la ecuación (4) con un valor aparente del coeficiente de difusión D_c :

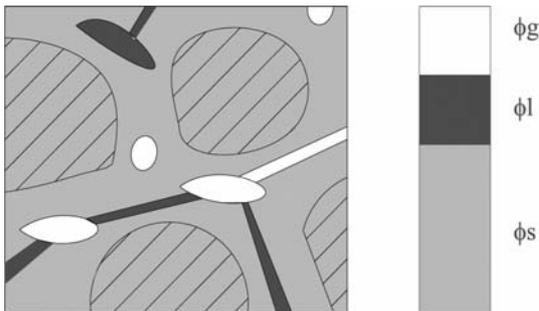


Figura 1. Constituyentes de un material poroso parcialmente saturado.

$$J_d = -\omega_e (D_c \nabla C_{fc}) \quad (5)$$

donde: J_d es el flujo por difusión de iones cloruro por ud. de superficie y tiempo ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$), y D_c (m^2/s) es un coeficiente aparente que puede depender de la concentración, humedad y temperatura [6].

1.2. Absorción capilar

A partir de la ley de Darcy como ecuación constitutiva:

$$q_\omega = -K \nabla \omega \quad (6)$$

donde: q_ω es el caudal unitario (m/s) y K es un coeficiente de difusión de humedad (m^2/s) constante (teoría lineal). Sin embargo, la difusión de la humedad en el hormigón es un fenómeno altamente no lineal [7]. Se adopta un coeficiente aparente de difusión D_h que tiene en cuenta la humedad, la temperatura y el tiempo equivalente de hidratación. La ecuación no se formula en términos de humedad absoluta ω sino relativa h (cociente de la presión de vapor existente en los poros y la de saturación a la temperatura considerada):

$$q_\omega = -D_h \nabla h \quad (7)$$

El movimiento de agua descrito es debido a gradientes de potencial capilar y no es, por tanto, un fenómeno de difusión propiamente dicho; utilizando la conservación de la masa y asumiendo que no hay reacción química entre el agua y la fase sólida del hormigón y que la densidad de la solución permanece constante:

$$\frac{\partial \omega_e}{\partial t} = \text{div}(D_h \nabla h) \quad (8)$$

Asimismo, debería contemplarse el ratio de vaporización por unidad de volumen en la interfase líquido/gas [8], circunstancia no considerada aquí de cara a la simplificación del problema.

1.3. Transferencia de calor

La tercera variable del sistema es la temperatura T . La ecuación del calor es (para el caso de que no haya fuentes ni sumideros de calor, [9]):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) = \text{div}(\lambda \nabla T) \quad (9)$$

donde ρ es la densidad, c el calor específico y λ la conductividad térmica del material. Si estas tres variables se asumen constantes, la ecuación es lineal. La no linealidad de los problemas asociados a la humedad y la concentración de cloruros proviene de la dependencia de los coeficientes de difusión respecto de dichas variables.

La ecuación del calor está desacoplada respecto a las otras ecuaciones: concentración de cloruros y difusión de la humedad. Los parámetros que intervienen en el

sistema de ecuaciones son, en general, fuertemente dependientes de la temperatura.

1.4. Transporte de cloruros

El flujo total de cloruros libres en el hormigón J_{fc} (kg/m²·s) es la suma de los flujos debidos a la difusión por concentración y al arrastre asociado a la humedad:

$$J_{fc} = -\omega_e D_c \nabla C_{fc} - C_{fc} D_h \nabla h \tag{10}$$

Sea un elemento diferencial de volumen dV , la fracción de cloruros libres que entran en dV en el tiempo dt modifica la concentración de iones cloruros totales:

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial t} = -div(J_{fc}) \tag{11}$$

Resultando finalmente:

$$\left(\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} + \omega_e \right) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} + C_{fc} \frac{\partial \omega_e}{\partial t} = div(\omega_e D_c \nabla C_{fc}) + div(C_{fc} D_h \nabla h) \tag{12}$$

2. FORMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS

El análisis previo conduce a un sistema de tres ecuaciones en derivadas parciales, expresiones (8, 9 y 12) con tres incógnitas: la concentración C_{fc} , la humedad relativa h y la temperatura T . Además, las variables C_{bc} (cloruros ligados) y ω_e (cantidad de agua en los poros del material) deben conocerse a partir de los valores de C_{fc} y de h , respectivamente.

Dado que las tres ecuaciones tienen una estructura similar, se desarrollará únicamente el caso de la ecuación del transporte de cloruros, que simplificada resulta:

$$\left(\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} + \omega_e \right) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = div(\omega_e D_c \nabla C_{fc}) + \nabla C_{fc} \cdot D_h \nabla h \tag{13}$$

Utilizando el método de Galerkin para la formulación de elementos finitos, mediante la función de peso W , e integrando en el dominio Ω del problema, se obtiene:

$$\int_{\Omega} W \left(\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} + \omega_e \right) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} d\Omega = \int_{\Omega} W (div(\omega_e D_c \nabla C_{fc}) + \nabla C_{fc} \cdot D_h \nabla h) d\Omega \tag{14}$$

Haciendo ahora uso de la 1ª fórmula de Green, las segundas derivadas son reemplazadas por términos de primer orden:

$$\int_{\Omega} W \left(\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} + \omega_e \right) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} d\Omega = \int_{\partial\Omega} W \omega_e D_c \frac{\partial C_{fc}}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Omega} (-\nabla W \cdot \omega_e D_c \nabla C_{fc} + W \cdot \nabla C_{fc} \cdot D_h \nabla h) d\Omega \tag{15}$$

Discretizando el dominio Ω en suma de recintos elementales Ω_e y empleando las funciones de forma nodales se obtiene:

$$\int_{\Omega_e} N_I \left(\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} + \omega_e \right) \dot{C}_{fc} N_J d\Omega_e = \int_{\partial\Omega_e} N_I \omega_e D_c \frac{C_{fc}^J \partial N^J}{\partial n} d\Gamma_e + \int_{\Omega_e} (-\nabla N_I \cdot \omega_e D_c C_{fc}^J \nabla N_J + N_I C_{fc}^J \nabla N_J \cdot D_h \nabla h) d\Omega_e \tag{16}$$

que se puede expresar matricialmente:

$$c_{c(e)} \dot{C}_{fc}^{(e)} + k_{c(e)} C_{fc}^{(e)} + f_{c(e)} = 0 \tag{17}$$

La no linealidad proviene de la dependencia de las matrices de capacitancia c_c y rigidez k_c respecto a las variables incógnita: concentración, humedad y temperatura.

Ensamblando las matrices elementales para completar la malla del dominio del problema, se obtiene la un sistema linealizado de ecuaciones diferenciales de primer orden en el dominio del tiempo:

$$[C_c] \left\{ \dot{C}_{fc} \right\} + [K_c] \{C_{fc}\} = \{F_c\} \tag{18}$$

Análogamente se desarrollan los casos de la humedad y de la temperatura. Establecido el sistema de ecuaciones no lineales que gobierna el transporte de cloruros en el hormigón, en función de las variables concentración, humedad y temperatura, se utiliza el programa de elementos finitos FEAP [10] para abordar su resolución. Se emplea partir un elemento de usuario en el que se incorporan las matrices anteriormente descritas.

3. CONTRASTE DEL MODELO

Para contrastar los resultados, se utiliza un modelo bidimensional de 3 cm de ancho por 6 cm de alto, que intenta reproducir la zona más próxima a la superficie de una losa del tablero de un puente de hormigón armado. El problema simula una aplicación repentina en la superficie libre de una determinada concentración de cloruros, un cambio en la humedad relativa del ambiente y/o un incremento de temperatura, bajo el supuesto de que dicha variación en la superficie permanece constante en el tiempo. En el resto del contorno del modelo se imponen condiciones nulas de flujo.

Se evalúa cada una de las variables por separado (manteniendo las otras dos constantes) de manera que puedan compararse los resultados con la solución analítica para el caso unidimensional de un medio semi-indefinido con coeficientes constantes de difusión [11]:

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad (19)$$

donde C representa la variable concentración regida por la ecuación de la difusión, C_s es el valor superficial instantáneo, C_i el valor inicial, D el coeficiente de difusión supuesto constante, t el tiempo y x la distancia a la superficie libre. La solución es fácilmente extrapolable a los campos de humedad y de temperatura.

La Figura 2 muestra la malla de elementos finitos (1230 nodos y 1289 elementos), con un tamaño característico de 0.8 mm en la superficie libre (allí donde se imponen las condiciones de contorno) y de 2 mm en el interior. En la superficie se prevé una concentración máxima de 90 kg/m^3 de solución acuosa debido al empleo de las sales fundentes en épocas de hielo (2.5M NaCl).

El coeficiente de difusión adoptado es [4]:

$$D_c = D_{c,ref} F_1(T) F_3(h) = D_{c,ref} \exp \left[\frac{U_c}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4} \right]^{-1} \quad (20)$$

donde: U_c es la energía de activación del proceso de difusión de cloruros, R la constante de los gases y h_c el nivel de humedad (se toma igual a 0.75) para el cual el coeficiente de difusión D_c se sitúa en su valor promedio.

En cuanto al proceso de difusión de humedad:

$$D_h = D_{h,ref} G_2(T) G_1(h) = D_{h,ref} \exp \left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[0.05 + \frac{0.95}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \right] \quad (21)$$

aquí n es un parámetro que caracteriza la caída en el valor del coeficiente de difusión D_h , y que se toma igual a 10 como valor medio.

Los parámetros adoptados se encuentran en las ref. [3, 6 y 12]. Se emplea la hipótesis de relación lineal para la combinación de cloruros $C_{bf} = \alpha_L C_{fc}$ y también para la relación de volumen de agua en los poros frente a la humedad relativa del ambiente $\omega_e = \omega_{sat} h$, siendo ω_{sat} el porcentaje de huecos del material poroso y h la humedad en tanto por uno (término de desorción, [12]).

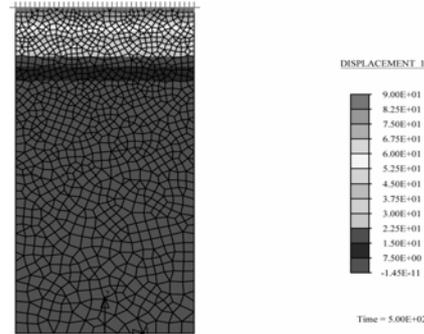


Figura 2. Modelización de la geometría por elementos finitos (perfil de cloruros).

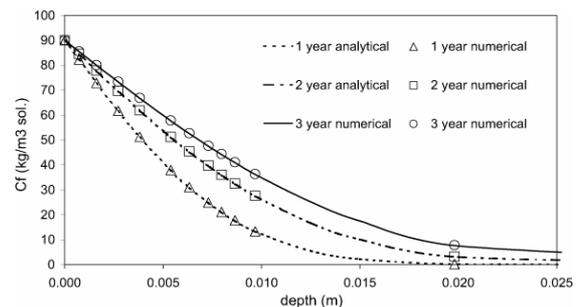


Figura 3. Perfiles de concentración de cloruros libres ($C_{superficial} = 90 \text{ kg/m}^3$; $C_{inicial} = 0$; $T = 25^\circ\text{C}$).

La Figura 3 pone de manifiesto la bondad del ajuste para los casos analizados, sirviendo como justificación al tamaño de elemento finito, paso de tiempo (1 día) y espesor de la zona de recubrimiento (necesario para garantizar la condición de flujo nulo), considerados.

4. INFLUENCIA DE UNA FISURA

El elemento de usuario se emplea para analizar el caso particular de la existencia de una fisura en la zona de recubrimiento de la losa superior del tablero de un puente de hormigón armado.

La Figura 4 muestra la malla de elementos finitos (5755 nodos y 6127 elementos), con un tamaño característico de 0.4 mm en la fisura y 2 mm en las zonas más alejadas a aquélla. La abertura de fisura es de 0.2 mm.

De nuevo se prevé en la superficie una concentración máxima de 90 kg/m^3 de solución acuosa con el empleo de las sales fundentes en épocas de hielo, una temperatura media entre 10°C y 30°C y una humedad relativa entre el 60% y el 90%.

En la zona de la fisura se emplea un material ficticio con los parámetros propios del agua y aumentando en dos órdenes de magnitud el coeficiente de difusión de la humedad, como primera aproximación.

La Figura 5 reproduce el perfil de humedad para $t = 1100$ días, marcándose claramente la presencia de la fisura.

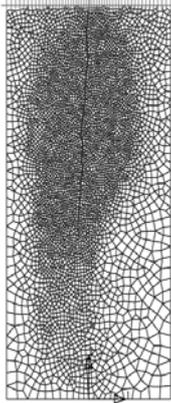


Figura 4. Modelización de una fisura en la zona de recubrimiento.

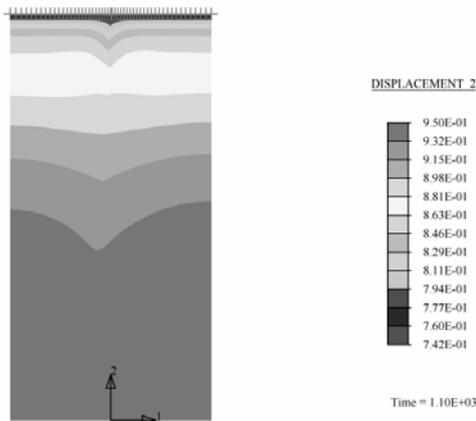


Figura 5. Perfil de humedad en la zona de recubrimiento debida a la presencia de una fisura y humedad relativa exterior cíclica entre 60 % y 90 % (tiempo = 1100 días).

5. FISURACIÓN DEL HORMIGÓN EN TORNO A LA BARRA

Una vez que los cloruros alcanzan la barra, ésta se puede corroer. Los productos de óxido de la barra tienen un volumen mayor, lo que provoca presiones en el hormigón, pudiendo fisurarlo. Aquí se propone un modelo simplificado basado en la dilatación térmica de la barra y la incorporación en el hormigón de elementos finitos con fisura embebida, de acuerdo a un modelo cohesivo [13].

La Figura 6 muestra la malla de elementos finitos adoptada. Reproduce una barra de 16 mm de diámetro, con un recubrimiento de 48 mm y una distancia entre barras de 96 mm. Las Figuras 7 y 8 muestran sucesivos estados de fisuración que conducen a la rotura del recubrimiento de hormigón que protege la barra. Los valores de los incrementos de temperatura equivalentes en el acero están relacionados con el volumen de óxido producido.

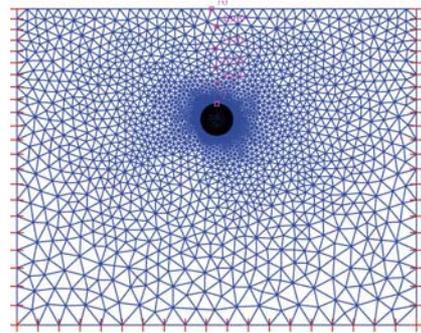


Figura 6. Modelización de la barra embebida con la porción de hormigón que la rodea.

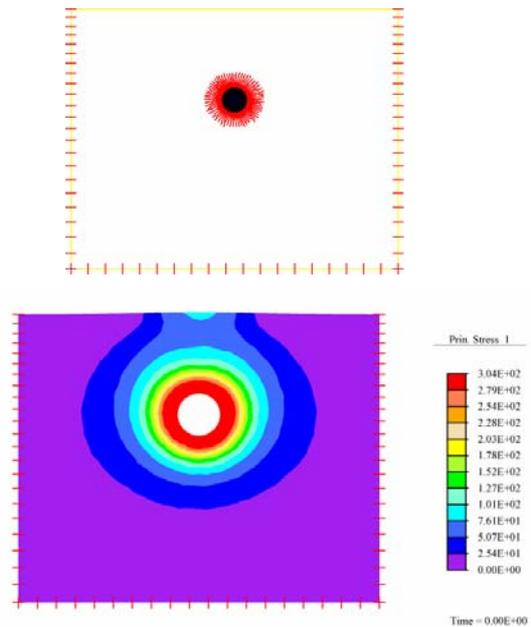


Figura 7. Esquema de fisuración y tensión principal en el hormigón para una temperatura equivalente en el acero de 50 °C.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo de difusión de cloruros en el hormigón. El modelo propuesto tiene en cuenta la estructura porosa del material, acoplado los campos de concentración de cloruros, humedad relativa y temperatura; al considerar tanto los flujos de la difusión de iones propiamente dicha como los flujos de humedad y de calor.

El modelo se desarrolló a partir de un elemento de usuario implementado en un código de elementos finitos, comparándose de manera satisfactoria los resultados numéricos con soluciones analíticas.

Una posible aplicación es determinar los tiempos necesarios para se alcance el umbral de concentración de cloruros necesario para la corrosión de armaduras en tableros de puentes, con la consideración de condiciones de contorno estacionales (temperatura,

humedad y aplicación de sales fundentes en los meses fríos, por ejemplo).

El problema se enriqueció con la presencia de fisuras en el recubrimiento de hormigón, si bien la caracterización de los fenómenos de transporte en la propia fisura se posponen para trabajos futuros.

Finalmente se estudió el posible agrietamiento del hormigón en torno a la barra por la expansión del óxido. Para ello se emplearon elementos finitos con fisura cohesiva embebida.

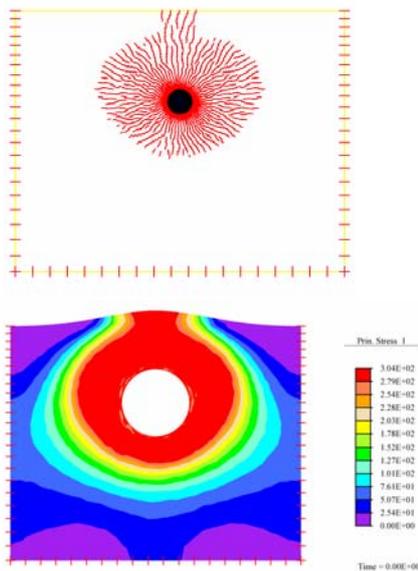


Figura 8. Esquema de fisuración y tensión principal en el hormigón para una temperatura equivalente en el acero de 200 °C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Ministerios de Educación y Ciencia y de Fomento las ayudas económicas concedidas a través de los proyectos BIA2005-09250-C03-02 y MFOM 2004/9.

REFERENCIAS

- [1] Bangert, F.; Kuhl, D. & Meschke, G. 2004. Chemo-hygro-mechanical modelling and numerical simulation of concrete deterioration caused by alkali-silica reaction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28: 689-714.
- [2] Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedferri, P. & Polder, R.P. 2004. *Corrosion of steel in concrete*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [3] Johannesson, B.F. 1997. Non linear transient phenomena in porous media with special regard to

concrete and durability. *Advanced Cement Based Material*, 6: 71-75.

- [4] Martín-Pérez, B.; Pantazopoulou, S.J. & Thomas, M.D.A. 2001. Numerical solution of mass transport equations in concrete structures. *Computers and Structures*, 79: 1251-1264.
- [5] Nagesh, M. & Bishwajit, B. 1998. Modeling of Chloride Diffusion in Concrete and Determination of Diffusion Coefficients. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 2.
- [6] Martín-Pérez, B.; Zibara, H.; Hooton, R.D. & Thomas, M. D. A. 2000. A study of the effect of chloride binding on service life predictions. *Cement and Concrete Research*, 30: 1215-1223.
- [7] Fernández Ruiz, M. 2004. Modelos de difusión de humedad en el hormigón. *Ingeniería Civil*, No. 133.
- [8] Samson, E.; Marchand, J.; Snyder, K.A. & Beaudoin, J.J. 2005. Modeling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions. *Cement and Concrete Research*, 35: 141-153.
- [9] De la Rosa, E. 1989. *Ecuaciones en derivadas parciales. Introducción al Método de los Elementos Finitos*. ETS de Ingenieros de Caminos de Madrid.
- [10] Taylor, R.L. 2005. *FEAP- A Finite Element Analysis Program*. Version 7.5 Programmer Manual.
- [11] ASTM International: C 1556-04. Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion.
- [12] Saetta, A.V.; Scotta, R.V. & Vitaliani, R.V. 1993. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. *ACI Materials Journal*, V. 90, No. 5.
- [13] Sancho, J.M.; Planas, J.; Cendón, D.A.; Reyes, E. & Gálvez, J.C. 2007. An embedded crack model for finite element analysis of concrete fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, V. 74: 75-86.