

**MODELACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE
CONCRETO REFORZADO POR PENETRACIÓN DE CLORUROS**

MARTHA JOHANNA SANTOS ARDILA



**Universidad
de los Andes**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
SANTA FE DE BOGOTÁ**

2006

**MODELACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE
CONCRETO REFORZADO POR PENETRACIÓN DE CLORUROS**

MARTHA JOHANNA SANTOS ARDILA

Tesis para optar al título de
Magíster en Ingeniería Civil

Director:

MAURICIO SÁNCHEZ-SILVA
Ingeniero Civil - PhD

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
SANTA FE DE BOGOTÁ**

2006

MODELACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO POR PENETRACIÓN DE CLORUROS

RESUMEN

Las estructuras de Concreto Reforzado localizadas en ambientes agresivos están expuestas a ataques biológicos. Una consecuencia importante de estas agresiones es la corrosión del acero de refuerzo. Esta corrosión afecta directamente la confiabilidad y durabilidad de las estructuras. El proceso corrosivo es progresivo e irreversible e inicia con la despasivación del concreto, seguido de una etapa de propagación, luego de la cual los daños empiezan a ser visibles: el acero de refuerzo empieza a rodearse de productos de corrosión y el concreto pronto muestra fisuras y grietas. En algunos casos, el acero de refuerzo termina sin protección alguna debido al agrietamiento del concreto. Este deterioro avanza rápidamente por causa del continuo ataque biológico. Un modelo que describe la evolución de la sección de acero corroída y el agrietamiento del concreto es propuesto. A través de un análisis por Elementos Finitos la corrosión de estructuras de concreto reforzado puede ser simulada.

ABSTRACT

Reinforced Concrete (RC) structures localized in aggressive environments are exposed to biological attacks. An important consequence of those aggressions is corrosion of civil structures. Corrosion affects directly reliability and durability of structures. Corrosive process is progressive and irreversible. After depassivation of concrete, a propagation stage begins and damages become visible. Steel starts expanding and concrete shows cracks and fissures. In some cases reinforcement steel ends unprotected due concrete cracking. This deterioration progresses quickly because of a continuous biological attack. A model that describes evolution of steel expansion and concrete cracking is proposed. Applying a Finite Elements analysis could be simulated corrosion of RC structures is provided.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	I
LISTA DE SIMBOLOS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VII
1 INTRODUCCION.....	1
1.1 Antecedentes y conceptos básicos	1
1.2 Objetivos	6
1.3 Contenido.....	6
2 MECANISMO DE CORROSIÓN DEL ACERO Y AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO.....	8
2.1 Aspectos Generales.....	8
2.2 Corrosión del acero de refuerzo.....	9
2.3 Agrietamiento del concreto.....	12
3 MODELO DE CORROSIÓN	15
3.1 Corrosión del acero inducida por el ingreso de cloruros	15
3.2 Modelo de agrietamiento por acumulación de productos de corrosión	18
4 MODELACIÓN DEL PROCESO DE DETERIORO POR PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	21

4.1	Modelación del concreto	22
4.2	Modelación de los productos de corrosión	23
4.3	Implementación del ambiente físico	28
5	APLICACIÓN NUMÉRICA	30
6	CONCLUSIONES	41
7	REFERENCIAS	43

LISTA DE SIMBOLOS

$A_a(\tau)$	Área de la superficie de la barra corroída en el tiempo τ
$A_{loss}(\tau)$	Área de acero que se reduce en un tiempo τ
A_0	Área inicial de la barra de acero
$a(\tau)$	Coefficiente que define ecuación de la parábola en un tiempo τ
$b(\tau)$	Coefficiente que define ecuación de la parábola en un tiempo τ
$C(x, \tau)$	Concentración de iones de cloruro a la profundidad x en el tiempo τ
C_{O_2}	Concentración de oxígeno en la superficie del concreto
C_s	Concentración de cloruros en la superficie del concreto
C_{st}	Concentración de oxígeno en una distancia $D_{th}(\tau)$
C_{th}	Concentración de cloruros para la cual es destruida la capa de corrosión pasiva que protege al refuerzo
c	Recubrimiento del refuerzo
d	Diámetro inicial del refuerzo
D_{cl}	Coefficiente de difusión de cloruros en el concreto
D_{O_2}	Coefficiente de difusión del oxígeno en el concreto sin considerar agrietamiento
D_{th}	Profundidad de penetración del frente agresivo de corrosión
dW_τ	Cantidad de productos de corrosión en gramos para un periodo de tiempo $d\tau$

E	Energía de activación del proceso de difusión del cloruros igual a 44.6 kJ/mol ,
E_r	Módulo de elasticidad de los productos de corrosión
E_c	Módulo de elasticidad del concreto
erf	Función de error
F	Constante de Faraday
F_1	Factor modificador de acuerdo a la edad del concreto
F_2	Factor modificador de acuerdo al contenido local de cloruros
F_3	Factor modificador de acuerdo a la edad del concreto
i_{corr}	Densidad de corrosión en el tiempo τ
J_c	Flujo de oxígeno en la superficie de concreto en el tiempo τ
κ	Parámetro empírico que toma el valor de 8.3
k_n	Rigidez normal equivalente de la capa de interfase
k_t	Rigidez transversal equivalente de la capa de interfase
M	Peso atómico del hierro Fe
m	Parámetro empírico que toma el valor de 0.04
n	Parámetro empírico que toma el valor de 0.5
n_a	Carga eléctrica del ión del hierro
n_{O_2}	Número de oxidación del oxígeno
ρ_{acero}	Densidad del acero
ρ_{rust}	Densidad de los productos de corrosión
R	Radio de la barra de acero
th	Espesor de la capa de corrosión
t_{por}	Espesor de los productos de corrosión necesarios para generar el esfuerzo de tensión que fisura el concreto
t_{crit}	Espesor de la zona equivalente con porosidad uno alrededor de la barra

t_{ref}	Edad de referencia (asumida como un año)
τ	Tiempo
τ_{crit}	Tiempo de inicio del agrietamiento
τ_{ini}	Tiempo de iniciación de la corrosión
τ_w	Tiempo de corrosión del área superficial total de la barra
W_{crit}	Cantidad de productos de corrosión para la cual los espacios libres entre la barra de acero y el concreto están llenos y se produce el agrietamiento
$W(\tau)$	Cantidad de productos de corrosión en gramos que se produce tiempo τ determinado
W_{poros}	Cantidad de productos de corrosión necesarios para llenar el espacio generado por la expansión del concreto alrededor del refuerzo
W_{expans}	Cantidad de productos de corrosión para la cual los espacios libres entre la barra de acero y el concreto están llenos y se produce agrietamiento
W_0	Peso inicial de la barra de refuerzo
ν_c	Relación de Poisson de los productos de corrosión

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Efecto de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado.....	2
Figura 1-2. Agrietamiento del concreto reforzado	4
Figura 1-3. Proceso de corrosión por ingreso de cloruros.....	5
Figura 2-1. Comparación de varias pérdidas por corrosión.....	9
Figura 2-2. Mecanismo de corrosión del acero de refuerzo	10
Figura 2-3. Patrón de agrietamiento por corrosión	13
Figura 3-1. Variación en el tiempo del diámetro de barra y la cantidad de productos de corrosión.....	20
Figura 4-1. Tipos de corrosión según su forma	24
Figura 4-2. Relación geométrica del acero y los productos de corrosión acumulados.....	26
Figura 5-1. Aplicación numérica y sección transversal.....	30
Figura 5-2. Crecimiento de la capa de interfase en función del tiempo.....	32
Figura 5-3. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero	33
Figura 5-4. Patrón de grietas particular debido a corrosión del acero de refuerzo identificado en pruebas de laboratorio	34
Figura 5-5. Ejemplo típico de delaminación de concreto	34
Figura 5-6. Patrón de grietas obtenido experimentalmente.....	35
Figura 5-7. Probabilidad de falla en función del tiempo.....	36
Figura 5-8. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero $f'_c=21\text{MPa}$	37

Figura 5-9. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero $f'_c=24\text{MPa}$	38
Figura 5-10. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero $f'_c=31\text{MPa}$	39
Figura 5-11. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero $f'_c=35\text{MPa}$	40

1 INTRODUCCION

1.1 *Antecedentes y conceptos básicos*

El concreto reforzado es el material de construcción más utilizado en edificios y estructuras civiles a lo largo del mundo. Por esta razón los estudios e investigaciones en el campo de materiales se encuentran en constante búsqueda de técnicas que mejoren su desempeño, prolonguen su vida y faciliten su mantenimiento. Algunas de estas investigaciones han considerado la corrosión del acero de refuerzo como la causa predominante del deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado y por esto se han aunado esfuerzos para profundizar sobre las posibles causas, efectos mecánicos y físicos y métodos de reparación y prevención. Los resultados recogidos de procesos empíricos y analíticos han suministrado la base para que, con la ayuda de herramientas computacionales, la modelación del comportamiento estructural y del material sea posible y de esta manera lograr la predicción de los efectos de diferentes niveles de deterioro sobre las estructuras.

Las estructuras de concreto expuestas a ambientes agresivos son consideradas blancos indiscutibles de procesos corrosivos. En este tipo de ambientes, la presencia de cloruros y de organismos vivos afecta directamente las propiedades mecánicas del concreto y del acero y por consiguiente la integridad de la estructura. Los efectos biológicos pueden convertirse en amenazas inminentes sobre la vida de servicio y la confiabilidad de las estructuras.

La vida de servicio abarca parámetros de seguridad, funcionalidad y estética y está directamente relacionada con la protección que el concreto ofrece al acero de refuerzo contra agentes que causan corrosión. De la misma forma, la confiabilidad de la estructura se modifica porque, aunque la corrosión no representa un colapso inmediato, a medida que aumenta el proceso corrosivo las probabilidades de falla aumentan.



Figura 1-1. Efecto de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado
(Imagen tomada de Takewaka, K. 1991)

La corrosión del acero de refuerzo por causa del ingreso de cloruros es uno de los mecanismos de deterioro más importantes sobre las estructuras de concreto reforzado ubicadas en ambientes marinos. Este mecanismo conduce a una progresiva degradación estructural, procesos de reducción de la sección del acero de refuerzo, el agrietamiento y descascaramiento del recubrimiento de concreto, la pérdida de adherencia entre concreto y acero, además de que reduce considerablemente la capacidad de carga. Debido a la importancia de los efectos nombrados, las investigaciones se han enfocado en la simulación del proceso de penetración de los cloruros en el concreto como base para la predicción del comportamiento estructural futuro.

El proceso de corrosión empieza con el ingreso de agentes corrosivos como cloruros y dióxido de carbono en el recubrimiento de concreto. Sin embargo, la concentración de estas sustancias alrededor del acero de refuerzo no es suficiente para iniciar la corrosión. Esta se conoce como la etapa de iniciación o despasivación del proceso de corrosión. En la siguiente etapa, conocida como etapa de propagación, empieza la corrosión. En esta etapa los sulfatos atacan el concreto y causan fisuras. Estas fisuras hacen más fácil la penetración de cloruros y, por tanto, la corrosión del acero. Los productos de corrosión causan pérdida de adhesión y también agrietamiento.

El proceso de corrosión es acelerado y el deterioro estructural comienza a ser visible. Mientras la corrosión avanza y los productos de corrosión se localizan en la superficie de la barra, la presión interna genera agrietamiento del recubrimiento de concreto desde adentro hacia fuera. Además de las grietas visibles, la corrosión causa descascaramiento. El agrietamiento puede alcanzar una etapa donde el acero de refuerzo quede sin protección y toda la estructura reforzada se encuentre en riesgo.

En la siguiente figura se observa una estructura en proceso de corrosión avanzado, donde el concreto se ha ido agrietando y el refuerzo ha empezado a quedar a la intemperie.



Figura 1-2. Agrietamiento del concreto reforzado
(Imagen tomada de Takewaka, K. 1991)

El proceso de corrosión por causa del ingreso de cloruros presentado por Xi, Y. y Ababneh, A. (Xi & Ababneh, 2000) puede dividirse aproximadamente en tres etapas como muestra la figura 1-3.

- En la primera fase ocurre el proceso de penetración de cloruros, donde los cloruros pasan de la superficie del concreto a través del recubrimiento y hasta alcanzar el refuerzo de acero. Cuando el contenido de cloruros alcanza un valor umbral empieza el proceso de corrosión, esto ocurre en el tiempo de iniciación $T_{iniciacion}$ y la segunda fase comienza.

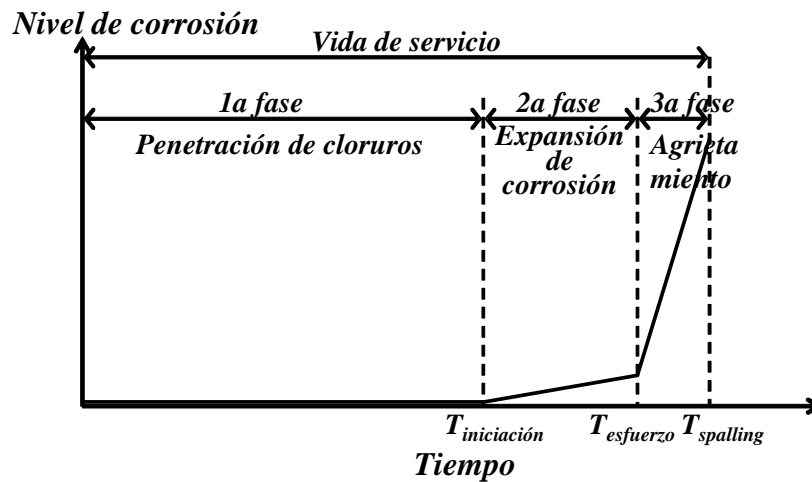


Figura 1-3. Proceso de corrosión por ingreso de cloruros

- La segunda fase se caracteriza por el proceso de expansión de los productos de corrosión que empiezan a acumularse alrededor del refuerzo. Esta fase continúa hasta que los productos de corrosión acumulados provocan esfuerzos de expansión en el concreto y comienza un proceso de agrietamiento en el área de concreto cercana al acero iniciándose la etapa tres.
- Durante la tercera etapa, la expansión del área de refuerzo causa grietas que se propagan progresivamente hasta que causan resquebrajamiento o delaminación del recubrimiento del concreto; cuando se alcanza este modo de falla crítico del concreto se supone que la etapa tres ha terminado.

La vida útil de la estructura de concreto reforzado puede considerarse como la suma de las tres fases. Sin embargo, en muchos estudios se ignora la tercera o la segunda fase para simplificar el análisis y debido a la dificultad de modelar el agrietamiento del concreto y el proceso de resquebrajamiento y delaminación.

1.2 Objetivos

- Definir las etapas en que puede dividirse el proceso de corrosión por causa del ingreso de cloruros presentado
- Definir los mecanismos de corrosión y proceso de agrietamiento de concreto esperado en las estructuras de concreto reforzado sometidas al ingreso de cloruros
- Reconocer los principios que rigen el proceso de difusión de cloruros en el concreto y las variables a considerar para la modelación de la formación de productos de corrosión y el agrietamiento del concreto
- Establecer elementos de simulación apropiados que representen de manera cercana el comportamiento de los materiales involucrados en el proceso corrosivo
- Integrar los elementos simulados a los procesos de formación de productos de corrosión y de agrietamiento del concreto en un modelo de elementos finitos que simule estos comportamientos.
- Aplicar el modelo propuesto a una situación estructural donde pueda observarse el patrón de agrietamiento del concreto originado por la corrosión del acero de refuerzo.

1.3 Contenido

Este trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos que presentan los conceptos básicos, modelos numéricos existentes en la literatura y la modelación con elementos finitos de una estructura de concreto reforzado

sometida al ingreso y ataque de cloruros por encontrarse ubicada en ambientes agresivos. En el primer capítulo se presentan los antecedentes y conceptos relacionados con el proceso de ingreso de cloruros en el concreto. En el segundo capítulo se revisan los mecanismos de corrosión del acero de refuerzo y el proceso de agrietamiento del concreto. A continuación, en el capítulo tres se encuentra una revisión de los modelos que investigadores a lo largo del mundo, han propuesto para deducir la producción de productos de corrosión en función del tiempo. En el capítulo cuatro se hace una presentación del tipo de elementos utilizados en la modelación para simular las propiedades de los materiales que intervienen en el proceso corrosivo y la implementación de los ambientes físicos adecuados para modelar los procesos de corrosión y agrietamiento. Finalmente, en el capítulo cinco se encuentra una aplicación numérica del modelo propuesto en un caso particular y de la misma forma los resultados obtenidos.

2 MECANISMO DE CORROSIÓN DEL ACERO Y AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO

2.1 Aspectos Generales

La modelación del deterioro estructural inducido por el ingreso de agentes corrosivos y por el proceso conocido como biodeterioro precisa el estudio de los procesos que causan esta degradación, principalmente la corrosión del acero de refuerzo y el agrietamiento del concreto. Estos procesos físicos y químicos alteran las propiedades de los materiales involucrados y se originan por la interacción de la estructuras con el medio circundante.

Las estructuras de concreto reforzado no presentan corrosión en su estado natural esto debido a que el cemento forma una solución alcalina que protege al acero de refuerzo. Esta solución reacciona con los agentes corrosivos que ingresan y forman un producto neutral que origina una capa pasiva alrededor del acero. Esta capa pasiva está compuesta de hidróxidos con minerales provenientes del cemento. Este proceso natural crea un ánodo y un cátodo para establecer un balance eléctrico. El ánodo es la zona que se corroe y el cátodo es el área del recubrimiento de protección. La reacción entre estos elementos es la encargada de que los productos de corrosión empiecen a formarse alrededor del refuerzo.

Los productos de corrosión, aunque con una densidad relativamente más baja, ocupan más volumen que el acero original. A medida que el proceso de corrosión avanza, los productos de corrosión se acumulan en la interfase del acero y el concreto y generan presiones de expansión en el concreto. Esta presión aumenta gradualmente hasta que ocasiona la iniciación del proceso de agrietamiento y su respectiva etapa de propagación.

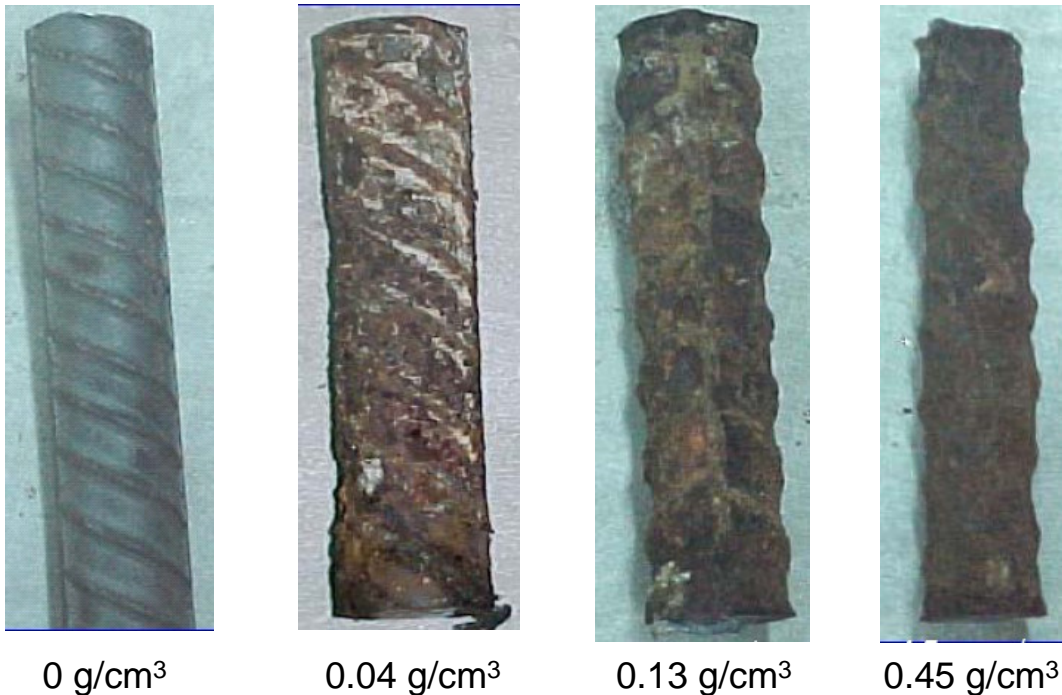


Figura 2-1. Comparación de varias pérdidas por corrosión.

(Imagen tomada de Takewaka, K. 1991)

2.2 Corrosión del acero de refuerzo

Corrosión es el término que se utiliza para referirse al deterioro de las propiedades intrínsecas de un material a causa de reacciones con su ambiente. La corrosión de metales ocurre por procesos electroquímicos en los que se presenta intercambio de electrones. Para que el proceso de corrosión ocurra deben presentarse ciertos parámetros como oxígeno y humedad. Si alguno de

estos falta la corrosión no se produce. De la misma forma, la rata de corrosión depende de la cantidad de agua u oxígeno presentes.

Según la teoría electroquímica de la corrosión de metales, el proceso corrosivo se presenta por la combinación de dos mecanismos:

- Oxidación anódica. Los átomos superficiales del metal pierden un número n de electrones y pasan en forma de cationes metálicos. Representa la oxidación del metal.
- Reducción catódica. Es una ganancia de electrones y ocurre simultáneamente con la reacción anódica. Depende de la disponibilidad de oxígeno y del pH.

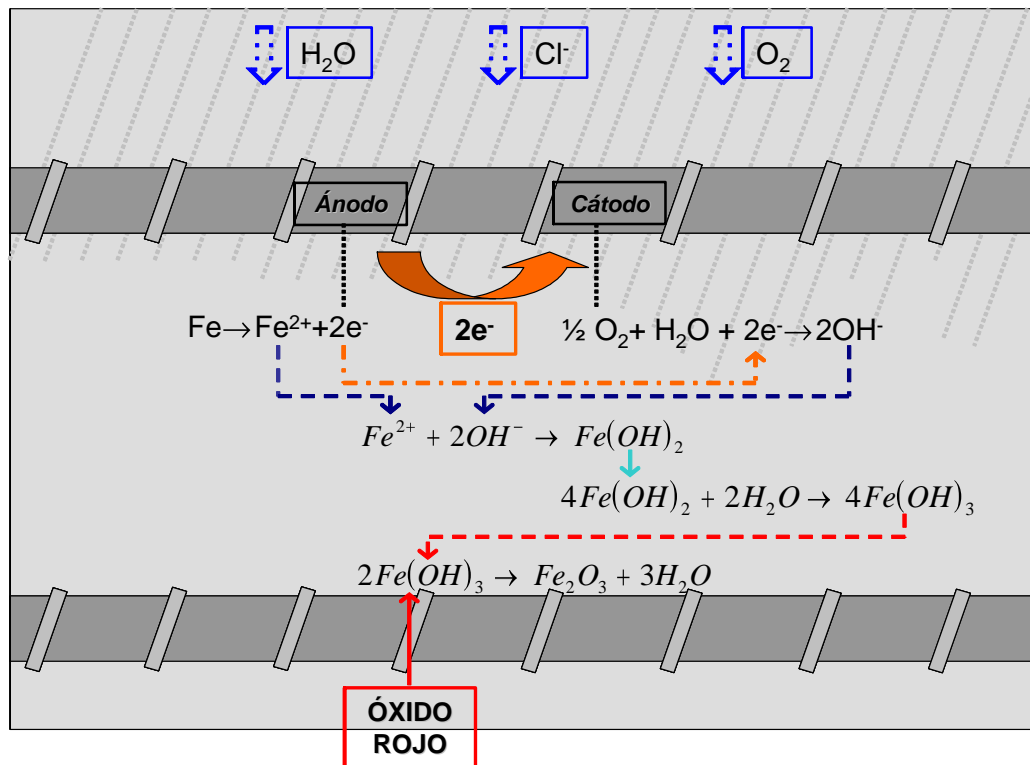
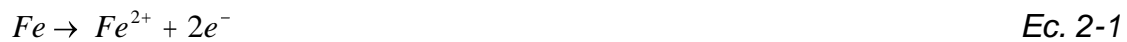


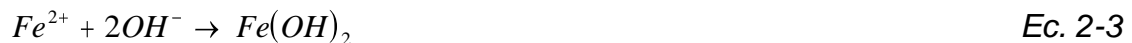
Figura 2-2. Mecanismo de corrosión del acero de refuerzo

Las reacciones de oxidación y reducción se presentan a continuación. En el ánodo se produce la disolución del Fe, los cationes Fe^{2+} llegan a la solución de poros del concreto, los electrones llegan al cátodo, según la ecuación 2-1.

Simultáneamente los electrones generados en la reacción anódica son capturados y se combinan con el oxígeno y el agua para formar iones OH^- , como lo muestra la ecuación 2-2



Los iones OH^- viajan a través del electrolito y se combinan con iones Fe^{2+} para formar hidróxido ferroso, como se presenta en la ecuación



Para obtener $Fe(OH)_2$ se requiere movilidad de los iones en el electrolito para que se pongan en contacto y reaccionen. Los iones Fe^{2+} se difunden más rápido que los iones OH^- y por cada ion Fe^{2+} deben moverse hacia el cátodo dos iones OH^- . Por estas dos razones, la corrosión se produce en el ánodo mientras que los productos de corrosión se acumulan en el cátodo.

Los productos de corrosión se forman cuando el hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$ se oxida en presencia de agua para formar óxidos férrico, tal como se muestra en las ecuaciones 2-4 y 2-5.



Óxido rojo Fe_2O_3 no es el único producto de corrosión del acero en el concreto. Compuestos como el óxido negro Fe_3O_4 , óxido verde $FeCl_2$ y otros óxidos ferrosos y férricos también se forman. Su composición depende de la disponibilidad de agua, pH y oxígeno.

Los productos de corrosión empiezan a acumularse y ocupan un volumen mayor al inicialmente ocupado por el acero de refuerzo. Sin embargo, este volumen puede variar de acuerdo al tipo de producto de corrosión que se forme. Algunos investigadores como Nielsen (Nielsen, 1997) han estudiado las diferencias entre cada tipo de corrosión formada. En la siguiente tabla se muestra el color y el volumen correspondiente a 1 cm^3 de Fe de los productos de corrosión más comunes.

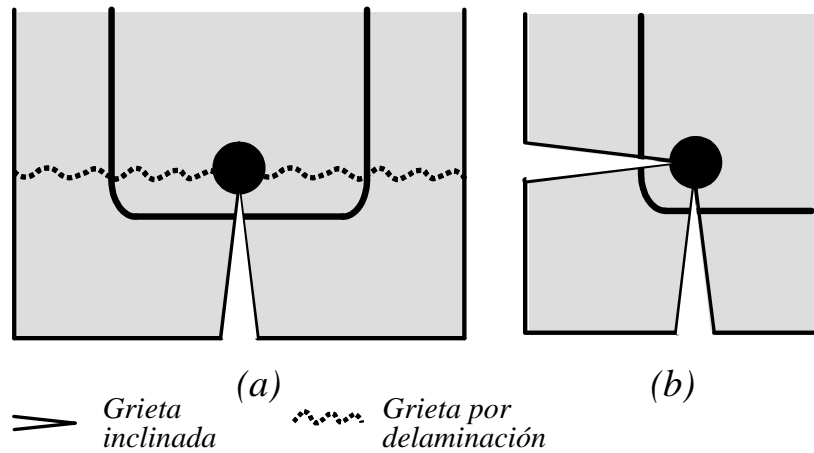
Tabla 2-1. Volumen de productos de corrosión.

Producto de corrosión	Color	Volumen cm^3
Fe_3O_4	Negro	2.1
$Fe_3(OH)_2$	Blanco	3.8
$Fe_3(OH)_3$	Marrón	3.2
$Fe_3(OH)_3, 3H_2$	Amarillo	6.4

2.3 Agrietamiento del concreto

Los procesos de deterioro logran alterar las propiedades físicas del concreto, provocando el inicio del crecimiento de grietas y amenazando la integridad de la estructura. Los productos de corrosión acumulados ocupan mucho más volumen que el acero y causan el agrietamiento del recubrimiento protector del concreto. La forma de las grietas puede variar de acuerdo al diámetro de la barra de refuerzo, el espaciado entre barras y el espesor del recubrimiento

de concreto. Las grietas pueden presentarse en forma de delaminación o como grietas inclinadas, como se observa en la figura 2-3.



*Figura 2-3. Patrón de agrietamiento por corrosión
(Coronelli, D., 2002)*

El agrietamiento por delaminación se caracteriza por grietas horizontales que se extienden desde una barra hasta la barra adyacente. Las grietas inclinadas se propagan hacia la superficie en ángulo de aproximadamente 45 grados.

El efecto del agrietamiento en el análisis con elementos finitos fue considerado inicialmente por Ngo y Scordelis (Ngo & Scordelis, 1967). Desde ese entonces se han hecho diversas contribuciones en ese campo y se han obtenido modelos de simulación del concreto reforzado. Existen dos formas de modelar con elementos finitos el agrietamiento del concreto: una aproximación discreta y una aproximación dispersa (smeared). Tanto el modelo discreto como el disperso son métodos que consideran la fractura a tensión del concreto en el análisis numérico (Uchida et al., 1993). Sin embargo, la implementación numérica del modelo discreto no es sencilla comparada con la dispersa.

El modelo discreto considera la propagación de grietas como el resultado de una singularidad de esfuerzos o un escape de energía en el extremo de la

grieta. Las grietas son consideradas como discontinuidades geométricas, asumiendo comportamiento elástico en la porción de concreto intacta y modelando la propagación de la grieta mediante la transformación de la topología del modelo de elementos finitos. La separación de las dos caras de la grieta debe simularse mediante la duplicación de nodos y la posibilidad de enmallar de nuevo alrededor de la grieta. Considerando que el proceso de deterioro generalmente causa micro-grietas densamente distribuidas es complicado utilizar este tipo de aproximación para simular este proceso.

En el modelo disperso, el concreto agrietado se considera un material continuo mientras que las grietas se distribuyen espacialmente sobre el volumen completo. Para efectos de análisis, esta aproximación es más simple porque necesita modificar sólo la relación esfuerzo - deformación mientras que el proceso de propagación de grietas avanza.

3 MODELO DE CORROSIÓN

En la primera parte de esta sección es presentado el modelo de corrosión de acero por causa del ingreso de cloruros (Sección 3.1). En la siguiente sección un modelo de elementos finitos es propuesto para estimar la expansión del área de acero a causa de la acumulación de productos de corrosión y el proceso de agrietamiento del concreto. De esta forma, se busca simular el deterioro de las estructuras de concreto reforzado

3.1 Corrosión del acero inducida por el ingreso de cloruros

Algunos modelos numéricos basados en el mecanismo físico del ingreso de cloruros en el concreto han sido propuestos, adoptando parámetros físicos como el contenido de cloruros en la superficie del concreto y asumiendo un proceso de difusión. La segunda ley de difusión de Fick puede ser usada para estimar la concentración de cloruros, como lo propone Crank (Crank,1975) en la ecuación 3-1,

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_{cl} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec. 3-1}$$

donde C es la concentración de cloruros, D_{cl} es el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto, τ es el tiempo y x es la profundidad en la dirección de difusión. Una solución para la ecuación 3-1 puede obtenerse para un medio semi-infinito y homogéneo como el concreto, en una dimensión de difusión, como se presenta en la ecuación 3-2

$$C(x, \tau) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}\tau}} \right) \right] \quad \text{Ec. 3-2}$$

donde C_s es la concentración de cloruros en la superficie y erf es la función de error.

Para un contenido crítico de cloruros en la superficie del acero C_{th} , el tiempo de iniciación τ_{ini} puede ser determinado inversamente de la ecuación anterior. Haciendo $C(x, \tau)$ igual a C_{th} y tomando x como el recubrimiento c , τ_{ini} puede calcularse con la ecuación 3-3. De la misma forma, puede calcularse el frente de corrosión $D_{th}(\tau)$ (Liang & Yang, 2005) haciendo x igual a $D_{th}(\tau)$, como se presenta en la ecuación 3-4

$$\tau_{ini} = \frac{c^2 \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{th}}{C_s} \right) \right]^2}{4D_{cl}} \quad \text{Ec. 3-3}$$

$$D_{th}(\tau) = 2\sqrt{D_{cl}\tau} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{th}}{C_s} \right) \quad \text{Ec. 3-4}$$

Para calcular el volumen de corrosión que se produce en función del tiempo, se han establecido relaciones empíricas entre la densidad de corrosión $i_{corr}(\tau)$ y parámetros como n_{O_2} o número de oxidación del oxígeno ($n_{O_2} = 4$) y $J_c(\tau)$ que es el flujo de oxígeno en el concreto en el tiempo τ . Esta relación se expresa, adoptando a la ley de Faraday (Fontana, 1986 y NACE, 1984) en la ecuación 3-5

$$i_{corr}(\tau) = J_c(\tau) n_{O_2} F \quad \text{Ec. 3-5}$$

donde F es la constante de Faraday y $J_c(\tau)$ puede expresarse como (Liang et al, 2004):

$$J_c(\tau) = D_{O_2} \frac{\partial C(x)}{\partial x} \quad \text{Ec. 3-6}$$

donde D_{O_2} es el coeficiente de difusión de O_2 en el concreto [$\text{mm}^2/\text{año}$] definida en función del esfuerzo a la compresión del concreto f'_{cu} de acuerdo a (Niu et al, 1996):

$$D_{O_2} = 3.1536 \times 10^5 \left(\frac{32.15}{f'_{cu}} - 0.44 \right) \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{año}} \right] \quad \text{Ec. 3-7}$$

La concentración de oxígeno varía linealmente de $C_{O_2} = 8.93 \times 10^{-9}$ [mol/mm^3] en la superficie a $C_{st} = 0$ a una distancia $D_{th}(\tau)$ (Liang et al, 2004) de acuerdo con la ley de Fick, así:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{C_{O_2} - C_{st}}{D_{th}(\tau)} \quad \text{Ec. 3-8}$$

De las tres ecuaciones anteriores se obtiene que la densidad de corrosión en función del tiempo puede expresarse con la ecuación 3-9

$$i_{corr}(\tau) = \frac{n_{O_2} F D_{O_2} C_{O_2}}{D_{th}(\tau)} \quad \text{Ec. 3-9}$$

Finalmente, la cantidad de productos de corrosión del acero acumulada en un tiempo $d\tau$, $dW(\tau)$, puede obtenerse gracias a la relación anterior y se expresa como:

$$dW_\tau = \frac{i_{corr}(\tau) M A_a(\tau)}{n_a F} d\tau \quad \text{Ec. 3-10}$$

donde M es el peso atómico del hierro $Fe = 55.85$ [g/mol], n_a es la carga eléctrica del ión de hierro ($n_a = 2.8$) y $A_a(\tau)$ es el área de la superficie de la barra corroída en el tiempo τ y se expresa en función del diámetro inicial de la barra d en [mm] y c es el recubrimiento en [mm] así:

$$A_a(\tau) = d \cos^{-1} \left(\frac{d + 2c - 2D_{th}(\tau)}{d} \right) \quad \text{Ec. 3-11}$$

Integrando con respecto al tiempo la ecuación 3-10 puede calcularse la cantidad de productos de corrosión $W(\tau)$ en un tiempo τ y se obtiene (Bastidas, E & Sánchez-Silva, M, 2006)

$$W(\tau) = \begin{cases} 0 \text{ gramos} & \text{si } \tau_{ini} \geq \tau \\ kD_{O_2} \int_{\tau_{ini}}^{\tau} \frac{A_a(\tau)}{D_{th}(\tau)} d\tau & \text{si } \tau_w \geq \tau \geq \tau_{ini} \\ kD_{O_2} \left[\int_{\tau_{ini}}^{\tau} \frac{A_a(\tau)}{D_{th}(\tau)} d\tau + \frac{\pi}{c+d} \int_{\tau_w}^{\tau} d\tau \right] & \text{si } \tau > \tau_w \end{cases} \quad \text{Ec. 3-12}$$

donde $k = n_{O_2} C_{O_2} M / n_a = 7.125 \times 10^{-7}$ g/mm³. Los productos de corrosión empiezan a acumularse después de que se alcance el tiempo de iniciación τ_{ini} y el tiempo de corrosión total τ_w se logra cuando el área del acero de refuerzo corroída alcanza $A_a(\tau) = \pi d$.

3.2 Modelo de agrietamiento por acumulación de productos de corrosión

Liu and Weyers (Liu & Weyer, 1998) han propuesto un modelo para estimar el tiempo necesario para el inicio del agrietamiento por corrosión τ_{cr} que es el tiempo en el que $W(\tau)$ es igual a W_{crit} . Este parámetro puede ser calculado así:

$$W_{crit} = \frac{\rho_{acero}}{\rho_{acero} - 0.57 \rho_{rust}} (W_{poros} + W_{expans}) \quad \text{Ec. 3-13}$$

donde ρ_{acero} es la densidad del acero de refuerzo en g/mm^3 y ρ_{rust} es la densidad de los productos de corrosión. W_{poros} representa la cantidad de productos de corrosión necesaria para llenar la zona porosa y W_{expans} es la cantidad de productos de corrosión necesaria para llenar el espacio causado por la expansión del acero; estos parámetros están definidos en las ecuaciones 3-14 y 3-15:

$$W_{poros} = \pi \rho_{rust} t_{por} d \quad \text{Ec. 3-14}$$

$$W_{expans} = \pi \rho_{rust} (d + 2t_{por}) t_{crit} \quad \text{Ec. 3-15}$$

donde t_{por} es una zona equivalente alrededor de la barra con porosidad igual a uno, d es el diámetro de la barra de acero y t_{crit} es el espesor de los productos de corrosión necesario para generar esfuerzos de tensión (Liu & Weyers, 1998) y puede calcularse con la ecuación 3-16:

$$t_{crit} = \frac{c f'_t}{E_c} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right) \quad \text{Ec. 3-16}$$

donde f'_t es la resistencia a la tensión del concreto, E_c es el módulo de elasticidad del concreto, $a=(d+2t_{por})/2$, $b=c+(d+2t_{por})/2$ y ν_c es la relación de Poisson del concreto.

La variación del diámetro de la barra en función del tiempo puede obtenerse de la ecuación 3-17:

$$d_{bar} = d \left(1 - \frac{W(\tau)}{W_0} \right) \quad \text{Ec. 3-17}$$

donde $d_{bar}(\tau)$ es el diámetro de la barra en el tiempo τ , d es el diámetro original de la barra, $W(\tau)$ es la cantidad de productos de corrosión acumulado en el tiempo τ y W_0 es el peso inicial de la barra de refuerzo.

En la figura 3-1 se observa la variación en el tiempo del diámetro de la barra de refuerzo siguiendo la ecuación 3-17 así como varía la cantidad de productos de corrosión $W(\tau)$ a lo largo del tiempo. (Bastidas, E & Sánchez-Silva, M, 2006)

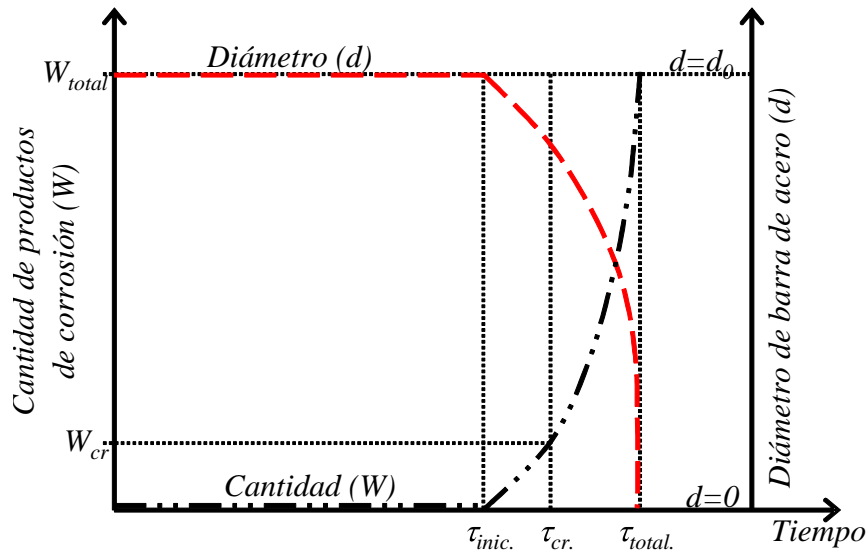


Figura 3-1. Variación en el tiempo del diámetro de barra y la cantidad de productos de corrosión

4 MODELACIÓN DEL PROCESO DE DETERIORO POR PENETRACIÓN DE CLORUROS

Las consecuencias mecánicas de la corrosión en el refuerzo de las estructuras de concreto incluyen la reducción de la sección de la barra, el crecimiento del agrietamiento del recubrimiento y la degradación de la adhesión entre el acero y el concreto. Una investigación concienzuda de estos aspectos puede dar una idea más realista acerca del comportamiento de las estructuras de concreto reforzado bajo los efectos corrosivos. A través de herramientas analíticas y numéricas, como análisis de elementos finitos, puede realizarse un seguimiento de ese comportamiento. En esta sección se desarrollará un modelo de elementos finitos para estimar la ocurrencia del agrietamiento de concreto y el deterioro estructural usando el software comercial ANSYS.

Como se presentó en la primera sección el proceso de deterioro del concreto por penetración de cloruros puede dividirse en tres etapas (Figura 1-3): penetración de cloruros, expansión del acero de refuerzo y agrietamiento del concreto. Cada etapa del proceso puede modelarse en ANSYS como un ambiente físico independiente. Un ambiente físico funciona como un módulo independiente, donde el tipo de elemento, geometría, cargas, condiciones iniciales y demás características pueden ser definidos para cada módulo.

Después de esto, un análisis multifísico acoplado se utiliza para traer cada ambiente físico, aplicar las cargas en función del tiempo y ejecutar el módulo de penetración de cloruros, la expansión del acero y el agrietamiento del concreto

iterativamente con cada intervalo de tiempo. Cada intervalo de tiempo se divide en un número de “substeps” que puede variar con cada ambiente físico y cada intervalo de tiempo. Una apropiada subdivisión del tiempo puede facilitar la convergencia deseada.

Como el proceso de penetración de cloruros en el concreto y la conducción térmica a través del concreto están regidas por ecuaciones diferenciales análogas (Cheng, 2006) puede proponerse una aproximación y simular el proceso de penetración del concreto mediante un análisis térmico transitorio.

Para simular los efectos mecánicos de la expansión del acero un modelo de expansión se presentará en las siguientes secciones. Finalmente, el agrietamiento del concreto será modelado utilizando una aproximación dispersa, de la que se habló en la sección 2.2. Esta aproximación puede realizarse de dos formas: utilizando elementos especiales de interfase entre el concreto y el acero de refuerzo o usando nodos acoplados en la interfase que cumplan la compatibilidad de deformación. La primera opción es utilizada en este estudio. En las siguientes secciones se presentarán las propiedades utilizadas en cada ambiente físico.

4.1 *Modelación del concreto*

El concreto se considera un material frágil con un comportamiento a tensión y a compresión característico. Para determinar la respuesta mecánica del concreto, ANSYS requiere la relación uniaxial esfuerzo - deformación de este material. Diversos modelos esfuerzo - deformación han sido propuestos para el concreto. En este caso, se utilizará el modelo de concreto de Kent y Park

Se utilizará el elemento térmico de 8 nodos SOLID 70 con un grado de libertad de temperatura en cada nodo para el análisis térmico transitorio y para los

subsecuentes análisis mecánicos se trabajará con el elemento SOLID 65. Este tipo de elementos es especialmente utilizado para simular el comportamiento del concreto reforzado. Es un elemento de 8 nodos con tres grados de libertad en cada nodo: traslación en x, y y z. Estos elementos permiten deformaciones plásticas, agrietamiento en tensión y deformación en compresión. Las propiedades utilizadas para el concreto se encuentran en la tabla 1.

Tabla 4-1. Propiedades del concreto.

Variable	Media	Fuente
f'_c	28 MPa	Melchers, 1999
f_y	420 MPa	Melchers, 1999
f'_t	4 MPa	Melchers, 1999
E_c	30 GPa	Mehta, 1993
ν_c	0.2	Mehta, 1993
κ	2.0 W/m-K	Mehta, 1993
c	1000 J/kg-K	Mehta, 1993
α	$1.0 \times 10^{-5} /K$	Mehta, 1993
β	$9.96 \times 10^{-3} m^3$	Mehta, 1993

Donde k es la conductividad térmica, c es la capacidad de calor específico, α es coeficiente de expansión térmica y β es el coeficiente de contracción.

4.2 Modelación de los productos de corrosión

El modelo de elementos finitos es propuesto en tres dimensiones, asumiendo comportamiento uniforme a lo largo del eje de la viga. Los resultados están enfocados a la sección transversal de la viga, bajo la teoría de esfuerzos planos. El modelo considera el concreto y los productos de corrosión como capas independientes. A cada material se le asigna una serie de propiedades que describe su comportamiento mecánico. La corrosión puede clasificarse morfológicamente como homogénea o localizada. En la corrosión homogénea, el ataque cubre toda el área de la barra y la reducción de la sección de acero es

considerada uniforme. Este tipo de corrosión es considerada como la menos peligrosa porque la vida del material corroído es estimada con relativa facilidad. Por otra parte, en la corrosión localizada la reducción de la sección de acero no es considerada uniforme alrededor de la barra de acero. En la figura 4-1 se observan los dos tipos de corrosión.

Para lograr resultados más cercanos a la realidad y teniendo en cuenta que en esta situación la corrosión homogénea es poco probable, este modelo asume corrosión localizada. Por lo tanto, la sección de acero de refuerzo es considerada constante y los productos de corrosión son simulados mediante elementos de interfase particulares. Los elementos de interfase se localizan entre el concreto y el acero de refuerzo. En este modelo, el acero y los productos de corrosión se simulan como materiales diferentes. Además, los productos de corrosión son simulados como una capa independiente entre las capas de concreto y acero.

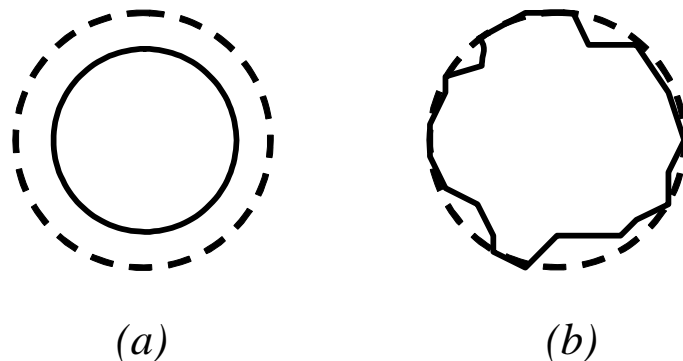


Figura 4-1. Tipos de corrosión según su forma

(a) Corrosión homogénea (b) Corrosión localizada. La línea punteada representa la sección de barra original.

Por estas razones, una gran responsabilidad del modelo recae sobre la capa de interfase. Esta capa es la principal responsable del desarrollo del proceso de corrosión. Uno de los principales problemas recae en las propiedades

características de esta capa. Debido a la escasa información sobre las propiedades elásticas de los productos de corrosión, éstas pueden asumirse como relaciones proporcionales a su módulo de Young. De acuerdo con Millard et al (Millard et al., 2001), dos rigideces equivalentes son calculadas para la capa de corrosión, como se presentan en las ecuaciones 4-1 y 4-2

$$k_n = \frac{E}{th} \quad \text{Ec. 4-1}$$

$$k_t = \frac{E}{2(1-\nu)th} \quad \text{Ec. 4-2}$$

donde k_n es la rigidez normal, k_t es la rigidez transversal, th es el espesor de la capa de corrosión y ν es la relación de Poisson.

El modelo propuesto utiliza un elemento de 8 nodos como capa de interfase. Este tipo de elementos de interfase se conoce como elemento Gasket en el código de ANSYS. El comportamiento de estos elementos se caracteriza por una relación de presión vs. cierre, donde cierre se refiere al desplazamiento relativo entre la superficie y el fondo del elemento.

La curva de compresión (presión vs. cierre) provee el comportamiento del material gasket y éste se utiliza para simular los productos de corrosión, es de gran importancia la acertada caracterización del material. La curva de compresión puede ser determinada experimentalmente, pero en este caso no se cuentan con datos empíricos. Sin embargo, la curva puede ser determinada analíticamente mediante un modelo de elementos finitos separado con elementos continuos. Una vez caracterizada la capa de interfase, debe trabajarse en la forma que tomará alrededor de la barra de acero de refuerzo.

Una relación geométrica entre el acero de refuerzo y la capa de productos de corrosión que empieza a acumularse es presentada. Los productos de corrosión, en un tiempo τ , alcanzan un estado como se muestra en la figura 4-2. Usando relaciones geométricas, el área de productos de corrosión puede ser relacionada, por medio de la ecuación de la parábola de la forma $x=-ay^2+b$, con parámetros conocidos como el diámetro inicial de la barra de refuerzo.

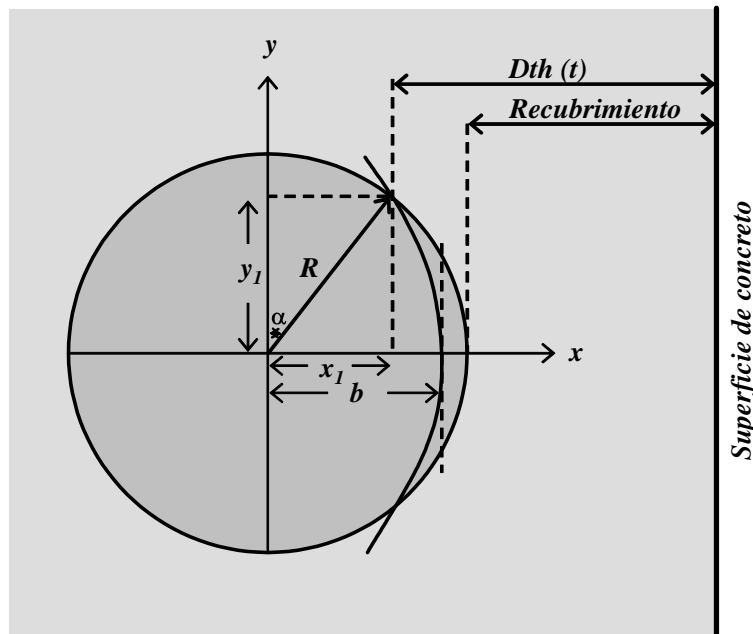


Figura 4-2. Relación geométrica del acero y los productos de corrosión acumulados.

El área de acero que se reduce A_{loss} puede calcularse geoméricamente mediante la ecuación 4-3 y a la vez puede relacionarse con la cantidad de productos de corrosión $W(\tau)$ de la ecuación 3-12.

$$\frac{A_{loss}(\tau)}{2} = \frac{\pi R^2}{4} - \int_0^{y_1} (-ay^2 + b) dy - \frac{R^2 \alpha - x(\tau) \cdot y(\tau)}{2} \quad \text{Ec. 4-3}$$

donde R es el radio de la barra de acero, a y b son parámetros que describen la ecuación de la parábola, $x(\tau)$ y $y(\tau)$ son las coordenadas del frente agresivo en

función del tiempo y que depende directamente de la profundidad $D_{th}(\tau)$ y α es calculado mediante la ecuación 4-4.

$$\alpha = a \sin\left(\frac{x(\tau)}{R}\right) \quad \text{Ec. 4-4}$$

El área de acero que se reduce A_{loss} es proporcional a parámetros conocidos de la barra de refuerzo presentados anteriormente y puede ser estimado mediante la ecuación 4-5

$$A_{loss}(\tau) = A_0 \left(1 - \frac{W_b(\tau)}{W_0}\right) \quad \text{Ec. 4-5}$$

donde A_0 es el área inicial de la barra de acero, W_0 es el peso inicial de la barra de acero y $W_b(\tau)$ es equivalente a $W_0 - W(\tau)$, la diferencia entre la cantidad de productos de corrosión $W(\tau)$ y el peso inicial.

Igualando la ecuación 4-3 con la ecuación 4-5, los parámetros a y b de la ecuación parabólica en función del tiempo pueden ser calculados. Las relaciones para a y b se presentan en las ecuaciones 4-6 y 4-7.

$$a(\tau) = \frac{3}{4y_1^3} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) R^2 - x_1 y_1 - A_{loss} \right] \quad \text{Ec. 4-6}$$

$$b(\tau) = x_1 + ay_1^2 \quad \text{Ec. 4-7}$$

La forma del área de acero corroída puede ser simulada mediante una curva parabólica. Una vez definidos los parámetros a y b , la curva de los productos de corrosión puede ser modelada mediante elementos finitos.

4.3 Implementación del ambiente físico

El primer ambiente físico implementado simula el proceso de difusión de cloruros en el concreto como una transferencia de calor mediante un análisis térmico transitorio. De esta forma los parámetros que intervienen en la difusión de cloruros se relacionan con los parámetros disponibles en el análisis térmico así: la concentración de cloruros C como la variable temperatura y el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto D_{cl} como la conductividad térmica.

Es importante considerar que las condiciones ambientales pueden ejercer cierta influencia sobre la difusión de los cloruros en el concreto D_{cl} . El modelo de elementos finitos integra ciertos factores de influencia como la edad del concreto, el contenido local de cloruros y la temperatura.

De acuerdo con Martin-Pérez et al, 2001, la edad del concreto influye de la forma:

$$F_1 = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad \text{Ec. 4-8}$$

donde t_{ref} es la edad de referencia (asumida como un año), t es la edad actual del concreto y m es un parámetro empírico que toma el valor de 0.04.

El contenido local de concreto C_{cl} puede seguir la relación propuesta por Xi y Bazant, presentada en la ecuación 4-9:

$$F_2 = 1 - \kappa (C_{cl})^n \quad \text{Ec. 4-9}$$

donde κ y n son parámetros empíricos que toman valores de 8.3 y 0.5 respectivamente.

La variación debido a la temperatura puede representarse mediante la ecuación 4-10, según Martin-Perez et al.,2001:

$$F_3 = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad \text{Ec. 4-10}$$

donde E es la energía de activación del proceso de difusión del cloruros igual a 44.6 kJ/mol , R es la constante del gas, T_{ref} es la temperatura de referencia y T es la temperatura absoluta actual en el concreto.

Estos factores se incluyen en el ambiente físico modificando directamente el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto de la forma:

$$D_{cl}^* = D_{cl} \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \quad \text{Ec. 4-11}$$

En el segundo ambiente se simula el agrietamiento del concreto debido a la expansión del acero de refuerzo. Para esto se aplica en la capa de interfase la densidad de corrosión en función del tiempo $i_{corr}(\tau)$. Después de simular el ambiente térmico, se aplica el ambiente de agrietamiento y esfuerzos. El tiempo de inicio del agrietamiento de concreto puede obtenerse de la ecuación 3-3. Después de éste tiempo, considerado el inicial, empieza a simularse el agrietamiento del modelo. El agrietamiento del concreto es representado gráficamente por ANSYS.

5 APLICACIÓN NUMÉRICA

El desarrollo del proceso de corrosión, la reducción de la barra de acero de refuerzo y sus efectos en el deterioro de estructuras de concreto reforzado son ilustrados en esta sección. La aplicación muestra el patrón que sigue el agrietamiento del concreto y la probabilidad de falla en función del tiempo de una viga localizada en un ambiente susceptible a la penetración de cloruros. La viga mostrada en la figura 5-1 está simplemente apoyada y está sujeta a una carga central.

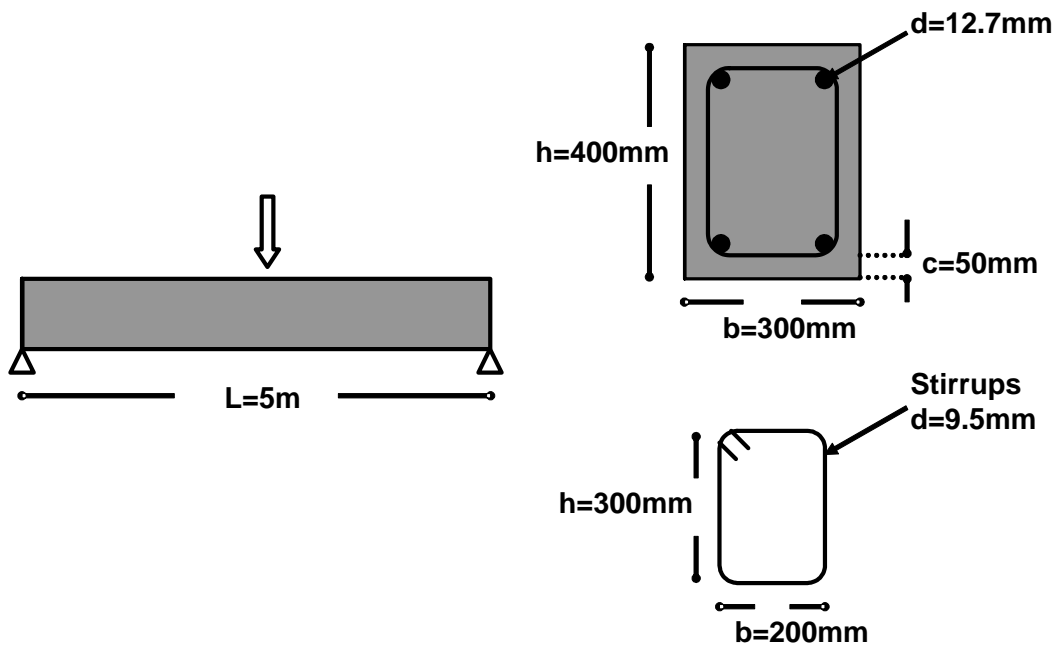


Figura 5-1. Aplicación numérica y sección transversal

Las propiedades de los materiales, concentración de cloruros y otros parámetros requeridos se presentan en la tabla 5-1.

Tabla 5-1. Variables y parámetros probabilísticos utilizados.

Variable	Distribución, media y desviación estándar	Fuente
f'_c	(N, 28, 2.8) MPa	Melchers, 1999
f_y	(N, 420, 42) MPa	Melchers, 1999
f'_t	(N, 4, 0.6) MPa	Melchers, 1999
C_{th}	(LN, 0.37, 0.04)	Hong, 2000
C_s	(LN, 2, 0.6)	Luping y Andersen, 2000
D_{cl}	(LN, 1.62, 0.5) 10^{-8} cm ² /s	Hong, 2000
ρ_{acero}	(N, 8000, 800) kg/m ³	Thoft-Christensen, 2000
ρ_{rust}	(N, 3600, 360) kg/m ³	Thoft-Christensen, 2000
t_{por}	(N, 12.5, 2.54) 10^{-6} m	Thoft-Christensen, 2000

Debido a la simetría transversal, un cuarto de la viga ha sido discretizada y modelada. La capa de interfase es simulada para el tiempo de iniciación del proceso de corrosión y también crece en intervalos de tiempo de 0.2 años como se muestra en la figura 5-2.

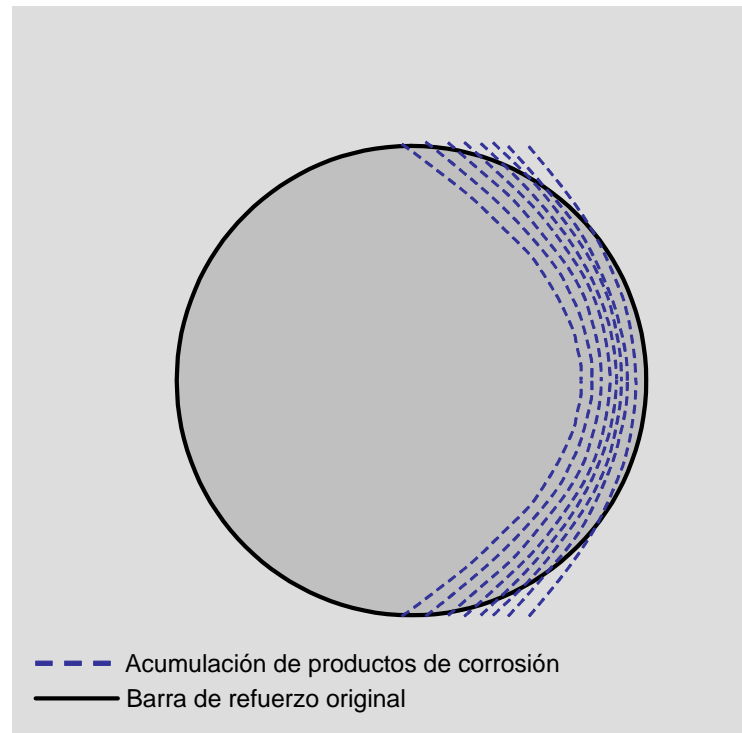


Figura 5-2. Crecimiento de la capa de interfase en función del tiempo

La reducción del diámetro de la barra de acero de refuerzo es fácilmente notable. El patrón de propagación de las grietas por la expansión del acero de refuerzo se observa en la figura 5-3.

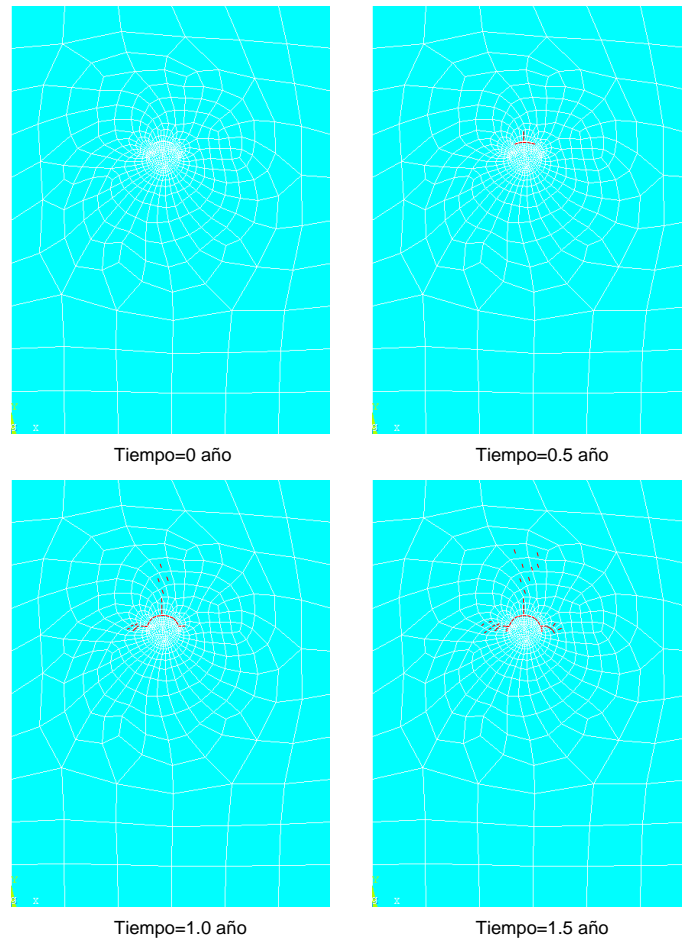


Figura 5-3. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero

Los resultados obtenidos por el modelo propuesto muestra el patrón de agrietamiento por causa de la corrosión del acero de refuerzo debido al ingreso de cloruros. Este patrón concuerda con el comportamiento esperado de las grietas que ha sido observado en la realidad, obtenido experimentalmente de otros estudios y presentado en la literatura.

En las siguientes figuras se muestran patrones de grietas presentados por estudios realizados anteriormente por diversos investigadores y donde se

observa el agrietamiento esperado para estructuras de concreto reforzado sometidas a la corrosión del acero de refuerzo.

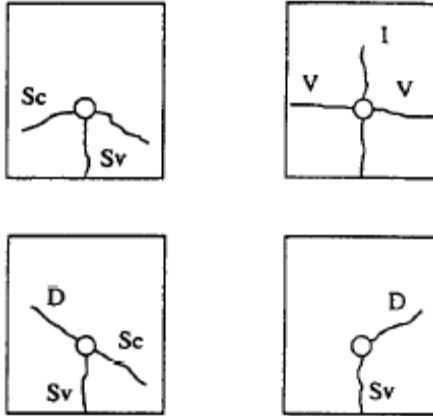


Figura 5-4. Patrón de grietas particular debido a corrosión del acero de refuerzo identificado en pruebas de laboratorio

(Ohtsu, M. & Yosimura, S., 1997)

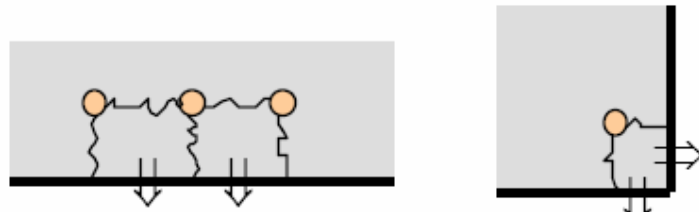


Figure 11. Typical examples of concrete spalling.

Figura 5-5. Ejemplo típico de delaminación de concreto

(Thoft-Christensen P., 2002)

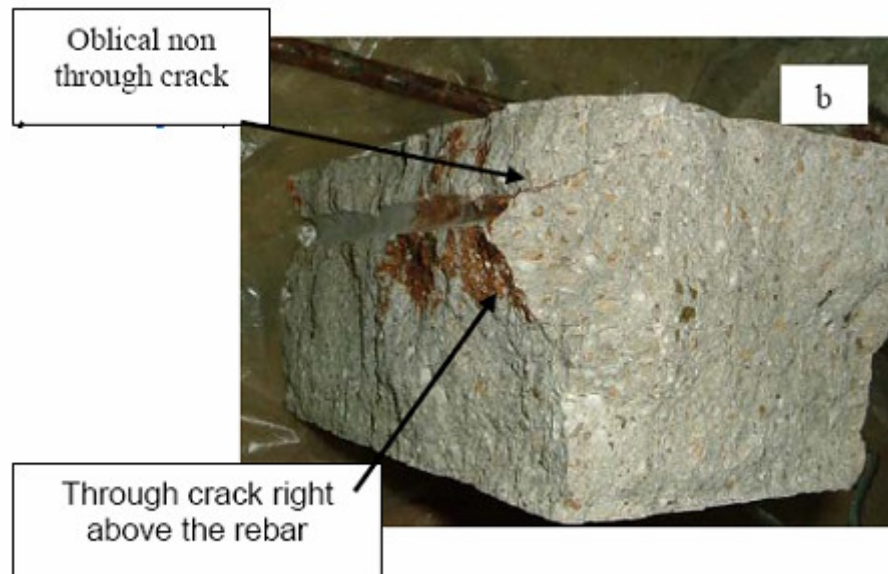


Figura 5-6. Patrón de grietas obtenido experimentalmente
(Millard, A et. Al., 2001)

La probabilidad de falla indica la probabilidad que la resistencia R es excedida por la demanda S , (así, $p_f = p(R < S)$). Para esta aplicación, la probabilidad de falla fue calculada basándose en que el momento resistente exceda el momento último.

La figura 5-7 muestra que el comportamiento de la probabilidad de falla de la estructura en función del tiempo. Después que el proceso de corrosión inicia y el diámetro de la barra se reduce, la probabilidad de falla se incrementa notablemente. En un período de 10 años, la probabilidad de falla puede cambiar de cero a uno y afectar la confiabilidad y la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

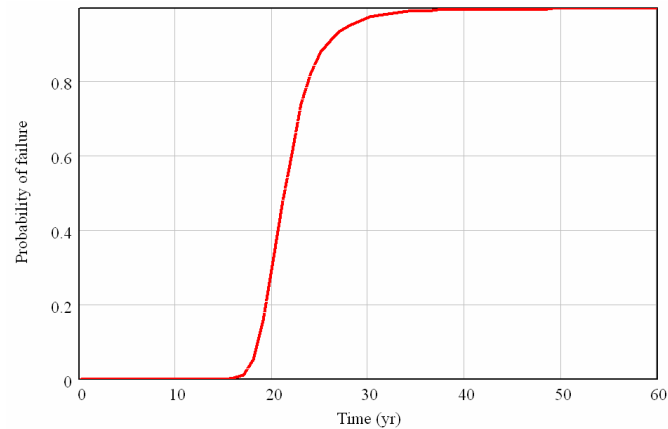


Figura 5-7. Probabilidad de falla en función del tiempo

Con la intención de mostrar la sensibilidad del modelo propuesto, se hicieron cuatro pruebas adicionales sobre el ejemplo mostrado, variando el parámetro de la resistencia a la compresión f'_c del concreto que para la prueba inicial tomó el valor de 28 MPa.

En las siguientes figuras se observa el patrón de agrietamiento de concretos con resistencia a la compresión de $f'_c=21MPa$, $f'_c=24MPa$, $f'_c=31MPa$ y $f'_c=35MPa$, respectivamente. Aunque en todos los casos presentados el patrón de agrietamiento que sigue la viga analizada es similar, cuando se disminuye la resistencia del concreto f'_c el agrietamiento es aún más notable. Esta situación es comprensible ya que al disminuir la capacidad de resistencia del concreto es más fácil que la presión interna, ejercida por la cantidad de productos de corrosión acumulada, haga fallar más rápidamente los elementos de concreto circundantes. De la misma forma, cuando aumenta la resistencia del concreto f'_c de 28 MPa a 31 MPa el agrietamiento disminuye, esto debido a que el concreto es más resistente.

Para una resistencia del concreto $f'_c=35MPa$ el agrietamiento es similar que para el de resistencia $f'_c=31MPa$, notándose una disminución de la sensibilidad del modelo para valores de f'_c mayores de 31 MPa.

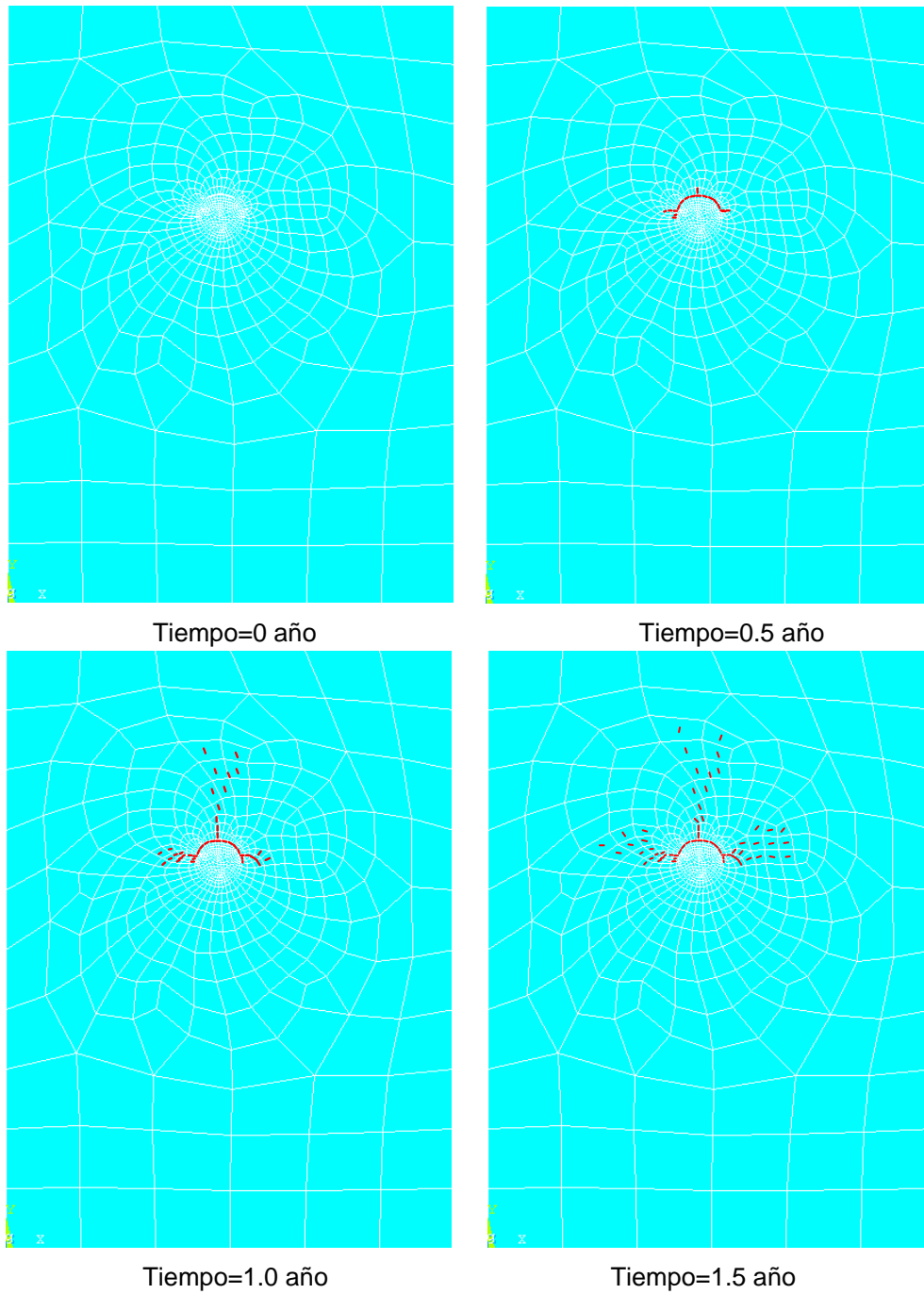


Figura 5-8. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero
 $f'_c=21\text{MPa}$

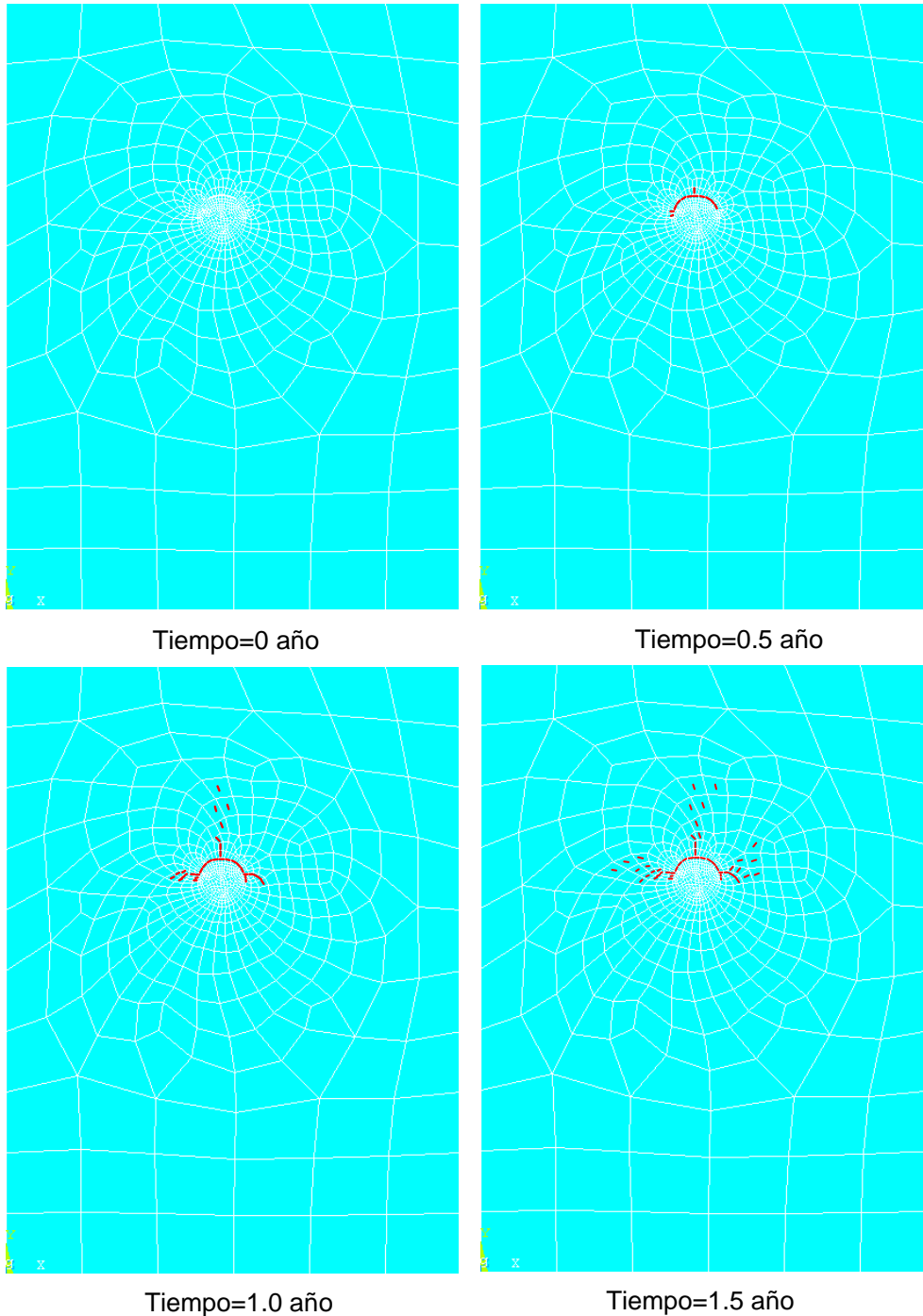


Figura 5-9. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero
 $f'_c=24\text{MPa}$

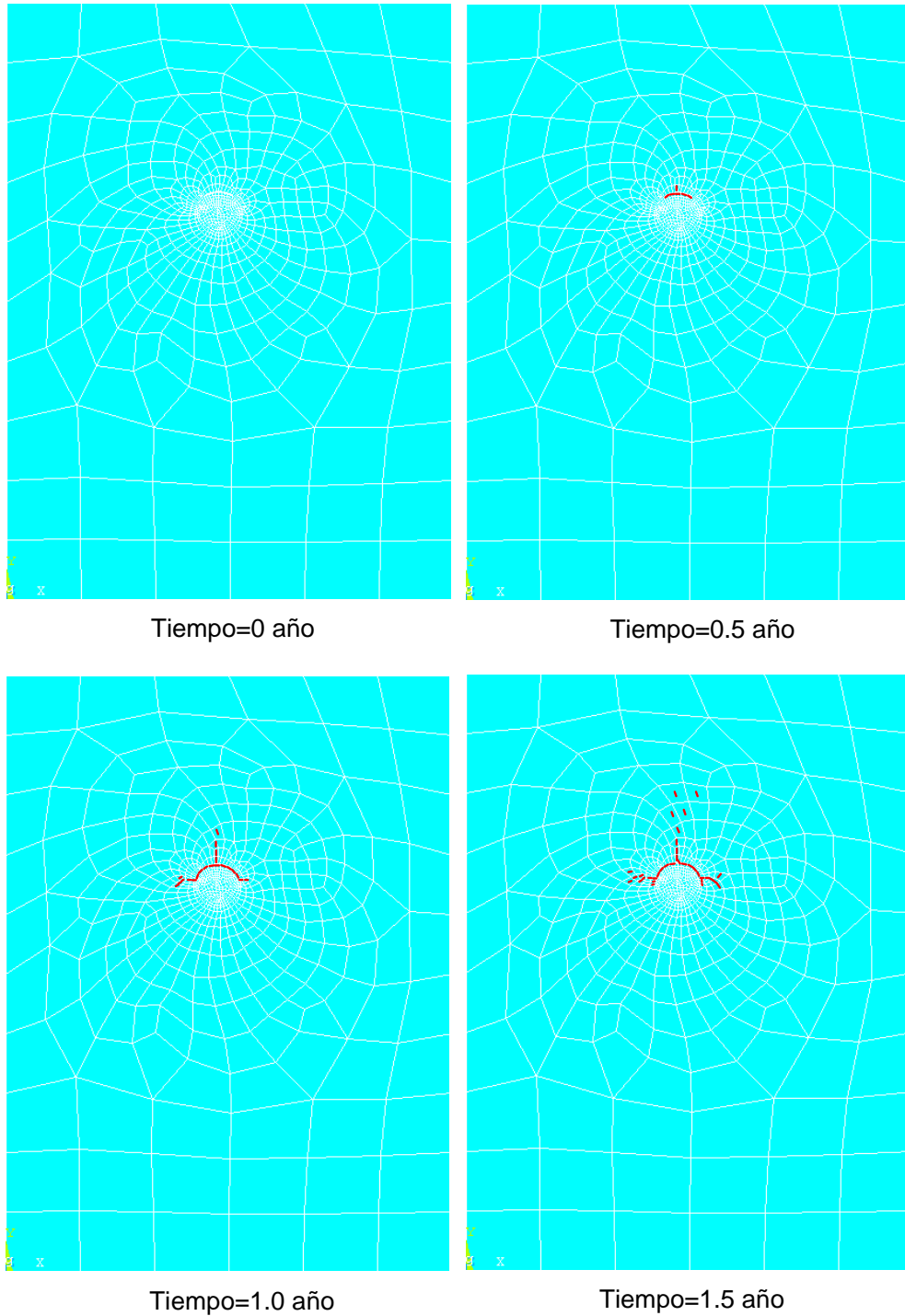
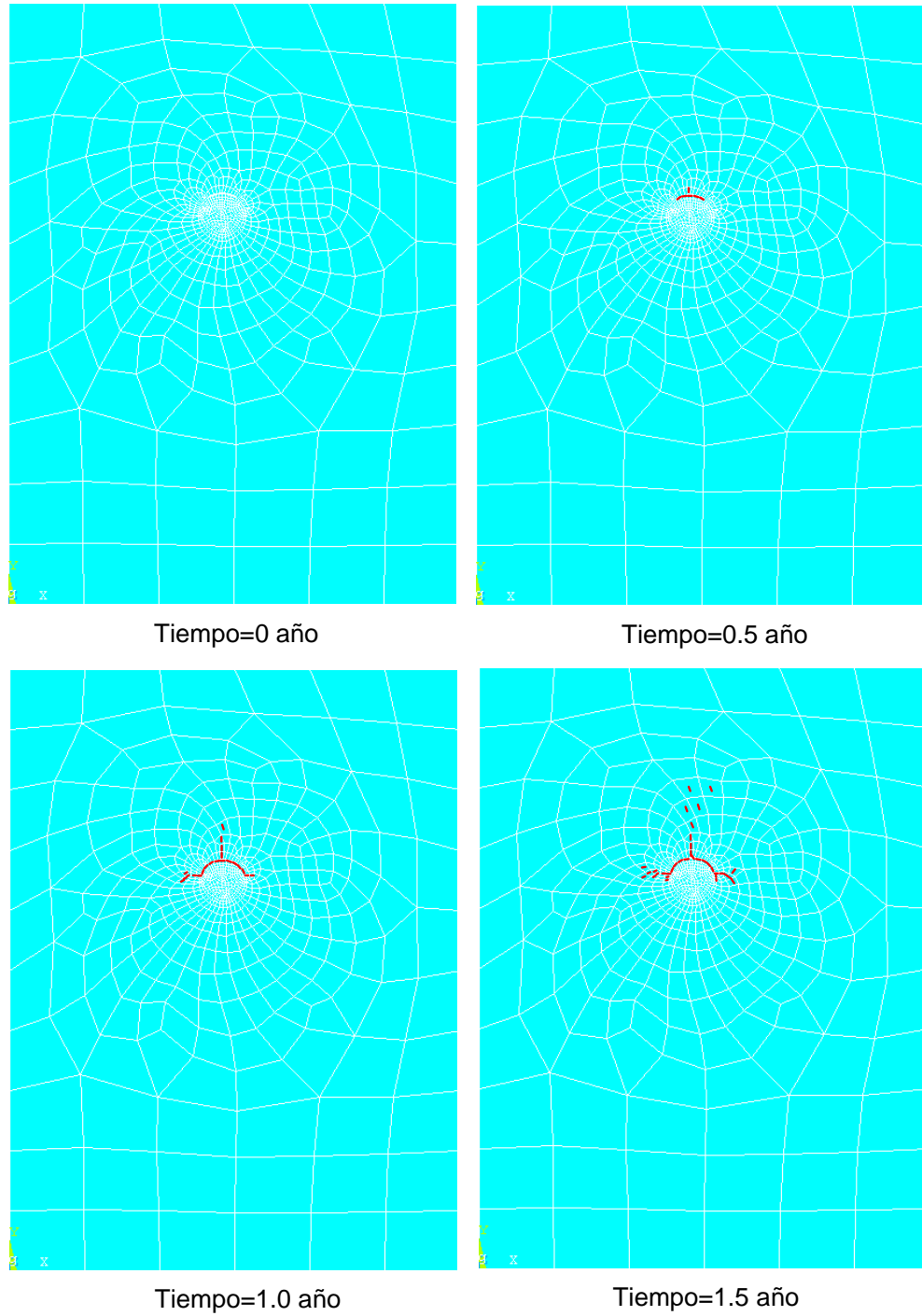


Figura 5-10. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero
 $f'_c=31\text{MPa}$



*Figura 5-11. Patrón de propagación de grietas por la expansión del acero
 $f'_c=35\text{MPa}$*

6 CONCLUSIONES

- El proceso de corrosión por causa del ingreso de cloruros puede dividirse en tres etapas como muestra la figura 1-2. La primera fase empieza con la penetración del cloruro hasta de alcanzar un valor umbral de concentración de cloruros en el tiempo de iniciación $T_{iniciacion}$. Aquí empieza la segunda fase donde ocurre la expansión del acero hasta que el concreto comienza a agrietarse. En la tercera etapa, las grietas se propagan progresivamente y causan resquebrajamiento o delaminación del recubrimiento del concreto; ésta etapa termina con la falla crítica del concreto.
- El mecanismo de corrosión se fundamenta en principios electroquímicos donde los componentes del acero y del concreto interactúan con los elementos del medio circundante originando reacciones químicas que empiezan el proceso corrosivo. Como consecuencia de la corrosión las presiones internas generan el proceso de agrietamiento del concreto que de acuerdo a estudios realizados puede aproximarse a patrones de grietas particulares.
- El proceso de ingreso de cloruros se rige por principios de difusión, propiamente es utilizada la segunda ley de difusión de Fick. Partiendo de este principio y aplicando aproximaciones puede calibrarse el modelo de ingreso de cloruros y a partir de este se obtienen variables importantes como el tiempo de iniciación del proceso corrosivo y la

cantidad de productos de corrosión que van acumulándose en función del tiempo.

- Las herramientas analíticas como los modelos de elementos finitos permiten una representación más cercana y realista del proceso de deterioro. Sin embargo, el principal obstáculo para los análisis de elementos finitos se encuentra en la caracterización de las propiedades de los materiales. Se utilizaron elementos que describen de forma cercana las propiedades intrínsecas de los materiales que intervienen en el proceso de agrietamiento y por tanto el comportamiento global de la estructura.
- Un modelo de elementos finitos que simula la expansión del acero de refuerzo y el agrietamiento del concreto es presentado. Usando el software Ansys, sus ambientes físicos independientes y una analogía térmica, la penetración de cloruros en el concreto es estimada. De la misma forma una capa de interfase especial para los productos de corrosión es desarrollada. El crecimiento de esta capa de interfase es estimado usando relaciones geométricas.
- El modelo propuesto es aplicado a un caso particular donde se obtiene el patrón de grietas esperado para una estructura de concreto reforzado sometida al ingreso de cloruros. De la misma forma, se observa que el incremento de la probabilidad de falla es considerable una vez que el proceso corrosivo empieza y que la sección de barra se reduce.

7 REFERENCIAS

- Bastidas, E y Sánchez-Silva, M. Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete structures. Universidad de los Andes, 2006.
- Chen, Dong. Computational Framework for durability assessment of reinforced concrete structures under coupled deterioration process. Vanderbilt University. 2006
- Coronelli, D. Corrosion Cracking and Bond Strength Modeling for Corroded Bars in Reinforced Concrete. ACI Structural Journal 2002; 99:267-276
- Crank, J. The Mathematics of Diffusion. Clarendon Press, Oxford.
- Fontana M. Corrosion Engineering. New York: Mc Graw Hill; 1986
- Hong HP. Assessment of reliability of aging reinforced concrete structures. Journal of Structural Engineering, ASCE 2000; 126:1458-65.
- Liang MT, Yang RJ. Theoretical elucidation on the on-site measurements of corrosion rate of reinforcements. Construction and building materials 2005; 19:175-80.
- Liang MT, Jin WL, Yang RJ, Huang NM. Predeterminate model of corrosion rate of steel in concrete. Cement and concrete research 2005; 35:1827-1833.

Liu Y. Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia; 1996.

Liu Y, Weyers RE. Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. ACI Materials Journal 1998; 95:675-81.

Luping T, Andersen A. Chloride ingress data from five years field exposed in a Swedish marine environment. In: 2nd International Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Paris 2000. p. 1-15.

Martin-Perez, B., Pantazopoulou, S. J., and Thomas, M. D. A. Numerical solution of mass transport equations in concrete structures, *Computers and Structures*, Vol. 79, No. 13, pp. 1251-1264. 2001

Mehta, P.K. Concrete structure, properties and materials, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1993

Melchers RE. Structural reliability-analysis and prediction. Chichester: Ellis Horwood Series in Civil Engineering; 1999.

Millar A, L 'Hostis V, Beddiar K, Berhaud Y, Care S. Modelling the cracking of a reinforced concrete structure submitted to corrosion of steels - First validation of a damage model based on experimental results. France

NACE, Corrosion Basics. Houston, Texas: National Association of Corrosion Engineers; 1984.

Ngo, D. y Scordelis, A.C. Finite Element Analysis of Reinforced-Concrete Beams, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 65, No. 9, 1967, pp.757-766.

Nielsen, A. Hvid, grøn og sort rust (en danés). *Nordisk Beton*, Nr. 2, 1976.

Niu DT, Wang LK, Wang QL. Determination of the diffusion coefficient of dioxidation in concrete. Journal Xian Constr. Univ. Sci. Tech. 1996; 28:6-9. In Chinese.

Ohtsu, M y Yosimura S. Análisis of crack propagation and crack initiation due to corrosion of reinforcement. In: Construction and Building Materials, Vol 11, Nos. 7-8, pp. 437-442. 1997

Takewaka, K. Estimation Method on Deterioration of Marine Concrete Structures due to Chloride attack. Kagoshima University. 1991

Thoft-Christensen P. Stochastic Modelling of the Crack Initiation Time for Reinforced Concrete Structures. In: ASCE 2000 Structures Congress, Philadelphia, USA 2000. p. 1-8.

Thoft-Christensen P. Modelling of the Deterioration of Reinforced Concrete Structures. In: Proceedings of IFIP WG7.5 Conference on 'Reliability and Optimization of Structural Systems', Ann Arbor, USA, 2000. p. 1-12. Thoft-Christensen P. Deterioration of concrete structures. In: Proceedings of the First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS '02, Barcelona, Spain, 2002. p. 1-8.

Uchida, Y, Rokugo, K. y Koyanagi, W. FE-Analysis of crack propagation in plain concrete using smeared crack model with concept of _ctitious crack model.

Journals of the Japan society of civil engineers, No. 466, Vol. 19, 1993. pp. 79-88

Xi, Y. y Ababneh, A. Prediction of the onset of steel corrosion in concrete by multiscale chloride diffusion, high performance concrete . workability, strength and durability. Proceedings of the international symposium, Hong Kong, pp. 181-186. In: 2nd International Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Paris 2000. p. 1-15

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.