

1er. SIMPOSIO TÉCNICO IBEROAMERICANO SOBRE ESTRUCTURAS Y MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN CORROIDAS

Carmen Andrade

Centro de Seguridad y Durabilidad de Estructuras y Materiales, CISDEM-CSIC
Serrano Galvache s/n 28033 Madrid (España), Tlf.: 34 91 3020440, Fax: 34 91 3020700, e-mail: andrade@ietcc.csic.es

1. LA CORROSION DE LAS ARMADURAS EN EL HORMIGON

El hormigón ha resultado ser un material que se puede utilizar en múltiples aplicaciones con unas prestaciones muy eficientes y una buena durabilidad. Sin embargo es necesario reconocer el creciente número de estructuras que presentan corrosión de la armadura debido al creciente envejecimiento del parque construido. La corrosión está causada principalmente por la carbonatación del recubrimiento y por la penetración de cloruros que provocan la despasicación del acero de la armadura.

Los efectos que se producen en la estructura cuando la armadura se empieza a corroer se muestran en la Figura 1 y son: a) Fisuración del recubrimiento, b) Pérdida de adherencia c) Pérdida de sección efectiva de acero y d) Pérdida de sección efectiva de hormigón. La consecuencia de la evolución progresiva de todos estos factores produce una pérdida de la capacidad portante del elemento estructural con el tiempo.

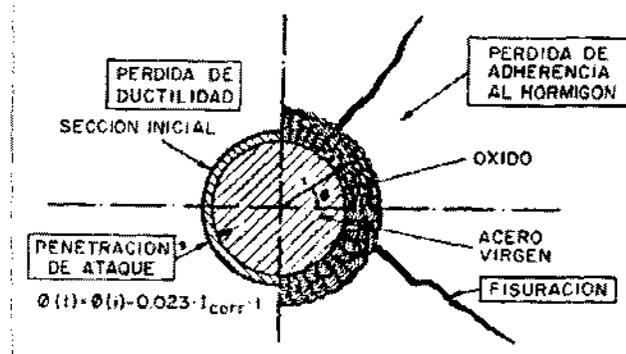


Figura 1 Consecuencias estructurales de la corrosión

Cuando se acomete la inspección y evaluación de una estructura es necesario tener en cuenta por tanto la fase en la que se encuentra la estructura para predecir su comportamiento y vida útil de la forma más rigurosa posible

En la presente comunicación se van a resumir dos tipos de evaluación que se han desarrollado dentro de un proyecto europeo de innovación IN309002I CONTECVET [1]. Estas evaluaciones se han denominado *Simplificada* y *Detallada*. La *Detallada* trata de aportar formulas y métodos para el recálculo estructural en elementos corroídos proponiendo modelos básicos de comportamiento y comprobación

seccional mediante la formulación clásica de la normativa comprobados mediante ensayos [2], [3], [4]. Sin embargo, la aplicación del concepto de recálculo a la evaluación de una estructura es siempre difícil debido a: a) La cantidad de estructuras a inspeccionar, b) La ausencia de planos *as built* de todas y cada una de ellas c) El coste del levantamiento estructural, y d) El número de ensayos *in situ* necesarios para poder aplicar la metodología correctamente.

La metodología que se ha denominado *Simplificada* se basa en el empleo de Indicadores e Índices que pretenden clasificar el estado de la estructura de una forma más global teniendo en cuenta los factores esenciales del comportamiento del elemento frente a la corrosión.

2. EVALUACION DE ESTRUCTURAS CORROÍDAS

2.1 Fases de la evaluación

Las fases de una evaluación son fundamentalmente tres: Inspección, Diagnósis y Predicción de la evolución del deterioro. El objetivo principal de estas tres fases se describe en la Tabla 1.

Tabla 1.- Objetivos de las tres fases principales de una evaluación

INSPECCION	DIAGNOSIS	PREDICCIÓN
Recogida de datos en base a la agrupación en lotes	Establecer la causa o causas del deterioro y su grado de gravedad	Estimar la velocidad de avance de la degradación

Dado que la toma de datos es una actividad relativamente costosa es necesario cuidar con detalle una correcta selección previa de las zonas donde realizar las medidas. Durante la fase de Inspección se debe pues acometer la tarea de agrupar en lotes homogéneos los elementos estructurales con el fin de que la evaluación de aplique a cada lote en su conjunto. Los tres criterios fundamentales para la primera selección de los lotes son:

1. El grado de deterioro
2. La agresividad del ambiente
3. La tipología estructural

En cuanto al *grado de deterioro*, en el caso de la corrosión de armaduras es claro que tanto el nivel de fisuración como la probable pérdida de sección de la armadura se deben graduar en 3-4 niveles para efectuar la clasificación (sin corrosión, leve, moderada y grave). Se debe incluir siempre como obligada referencia si existen, zonas donde no haya signos de corrosión (sin corrosión) o se espere que la armadura esté pasiva.

La agresividad del ambiente, puede graduarse ateniéndose a las clasificaciones de agresividad ambiental de los Códigos correspondientes, que lo hacen en función del grado de humedad o exposición a un determinado contaminante (direcciones preferentes de los vientos o de llegada del elemento agresivo).

En cuanto a la *tipología estructural*, se deben agrupar los elementos por su función estructural o funcional.

En la Figura 2 se pone un ejemplo simple de una pasarela situada al borde del mar, donde se han marcado las zonas por "tipología estructural" (3 Lotes) . De ellas las zonas hacia el mar están más corroídas que las que dan cara hacia el interior (2 lotes) y en cuanto a los daños, sólo la pila en contacto con el mar está corroída (2 lotes – con y sin corrosión). Por tanto el máximo de lotes resulta $3 \times 2 \times 2 = 12$ medidas de las que se pueden realizar 10 si el lote de "no corrosión" coincide con las zonas "cara al interior" quedaría entonces $3 \times 1 \times 2 = 6$ medidas).

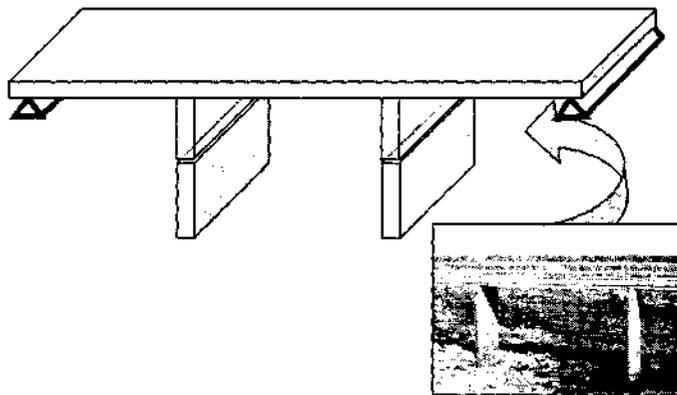


Figura 2. Clasificación en lotes de una pasarela

Una vez realizadas las agrupaciones ateniéndose a cada uno de estos criterios, es necesario cruzarlos para proceder a la identificación de las zonas a medir. Para ello es necesario utilizar un criterio final que se atenga:

1. bien a la superficie total a medir en m^2 y, la acotación por tanto del área de los que la medida será representativa
2. bien a utilizar el número de medidas que se pueden realizar en un determinado número de horas de trabajo como el patrón. A este respecto no se puede generalizar cuantas es posible realizar en una jornada diaria pues dependerá mucho de los medios de acceso con los que se cuente.

Tanto el tipo de medidas a tomar in situ como la extensión de la inspección depende mucho del tipo de evaluación Simplificada o detallada que se vaya a acometer, por lo que a continuación se pasa ya a describir las bases de la evaluación Detallada primero y luego de la Simplificada.

3. EVALUACION DETALLADA

En el esquema siguiente se muestra el proceso general a seguir en la evaluación detallada.

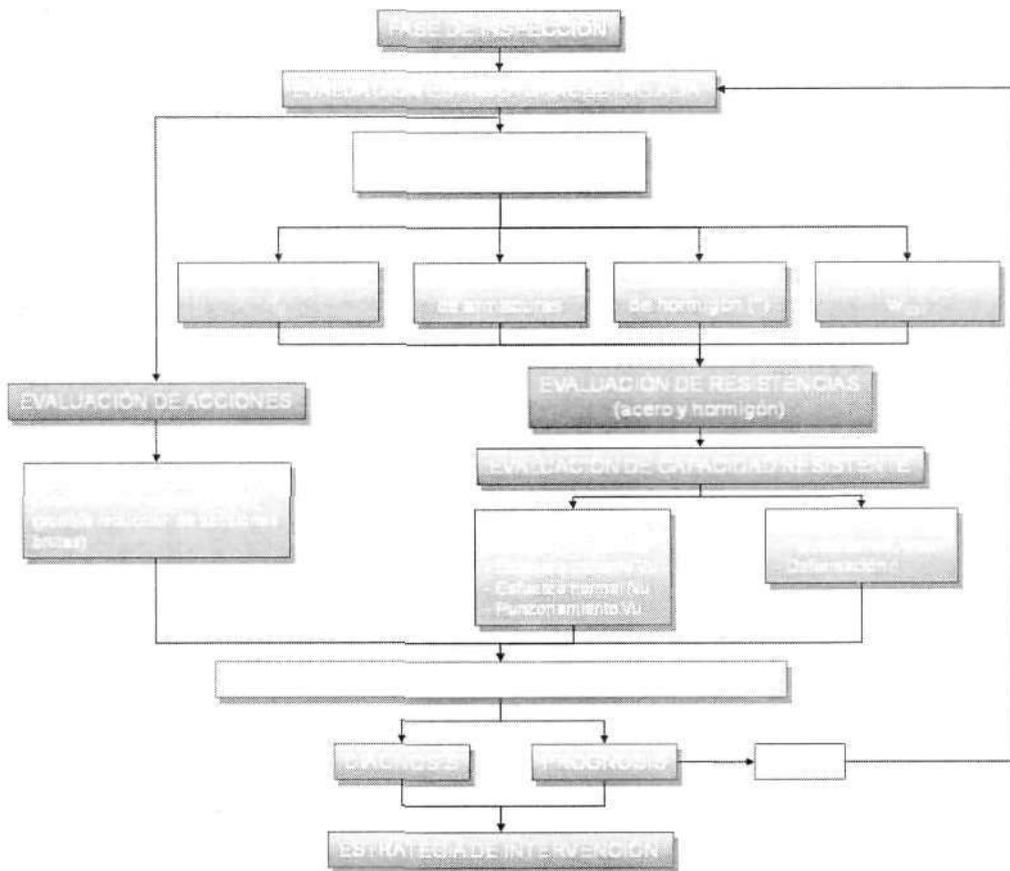


Figura 3.- Esquema para una evaluación detallada

En él pueden distinguirse cinco etapas principales:

- Fase de inspección que permite recopilar todos aquellos aspectos relevantes concernientes a la estructura y su entorno.
- Determinación de los efectos de la corrosión sobre el hormigón y el acero, y en concreto cómo afecta el deterioro a la adherencia, a la sección de las armaduras, a la geometría de la sección de hormigón y a la fisuración del recubrimiento.
- Evaluación de acciones y análisis, considerando las posibles reducciones de las secciones brutas.
- Determinación de la capacidad resistente teniendo en cuenta las modificaciones en las propiedades mecánicas y en la geometría tanto del acero como del hormigón producidas por el efecto de la corrosión.
- Verificación del comportamiento estructural tanto en el estado actual (diagnóstico) como en el futuro (prognosis) a partir de la aplicación de la Teoría de los Estados Límite.

3.1 Fase de Inspección

La información puede clasificarse de distintas formas, dependiendo del ambiente, de los materiales o de las características de la estructura. En la tabla 2 se muestra la clasificación propuesta, y que contiene los siguientes aspectos:

- Caracterización del ambiente mediante la clase de exposición.
- Características del hormigón que deben tenerse en cuenta en los modelos de deterioro.
- Identificación de las causas del daño.
- Inventario de daños y nivel de los mismos, principalmente referidos a fisuración, deformaciones, pérdida de recubrimiento, etc.
- Edad de la estructura e identificación del periodo de iniciación t_i .
- Las cargas permanentes y variables que actúan sobre la estructura. Aunque teóricamente podría ser posible, considerar la variabilidad e incertidumbre de todos los factores que afectan al comportamiento de una estructura, únicamente está justificado en un número muy concreto de casos debido principalmente a la complejidad del proceso y los costes que lleva aparejados. Sin embargo, la evaluación de las cargas actuantes es un paso necesario a la hora de realizar una evaluación detallada, y con el mayor detalle posible en el caso de las cargas permanentes. Las cargas variables deberían determinarse en aquellos casos en que variaciones en las condiciones para las que fue diseñada la estructura (cambio de uso, etc.) así lo aconsejen.
- Caracterización estructural. Para lograr un adecuado conocimiento de la estructura, es necesario considerar por una parte la globalidad de la misma y por otra sus diferentes componentes, incluyendo geometría, detalle de armado y las propiedades de los materiales.

Tabla 2. Etapas durante la fase de inspección

	Objetivo	Información necesaria
Inspección visual preliminar	Identificación del mecanismo de deterioro	- Cloruros / carbonatación - Corrosión bajo tensión
	Levantamiento de daños	- Localización - Frente del agresivo - Mapa de fisuración, desprendimientos, etc. - Pérdida de sección
	Formación de lotes	- Tipología estructural - Agresividad ambiental - Nivel de daño
	Localizaciones para ensayos	- Lotes - Mecanismo de deterioro

	Objetivo	Información necesaria
Trabajo de oficina	Recopilación de información	- Cálculos, modelos estructurales - Histórico de actuaciones - Edad de la estructura
	Clasificación ambiental	- Datos de clima - Fenómenos ambientales: lluvia, humedad, contenido de cloruros
	Formación de lotes	- Tipología estructural - Agresividad ambiental - Nivel de daño
Ensayos in situ	Ensayos	- Carbonatación y contenido de cloruros - Microestructura del hormigón - Resistencia mecánica - Intensidad de corrosión - Resistividad - Susceptibilidad a corrosión bajo tensión
	Medidas	- Geometría y dimensiones de los elementos - Cargas actuantes - Detalle de armado - Espesor de recubrimientos - Pérdida de sección

3.2 Fase de diagnóstico

El objetivo de la fase de diagnosis es determinar el comportamiento actual de la estructura de tal forma que pueda determinarse en qué punto de la curva de deterioro de la misma se encuentra.

Los pasos a seguir para evaluar el estado actual de una estructura son los siguientes:

- Identificación del mecanismo de daño. La caracterización del mecanismo de ataque y de la calidad del hormigón son aspectos previos básicos para la diagnosis.
- Medida de la penetración de la carbonatación y de cloruros, y el cálculo de la velocidad de avance del agresivo V_{CO_2} y V_{Cl} .
- Durante el periodo de propagación, estimación del tiempo desde que comenzó la corrosión mediante la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo.

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} \sqrt{t} \text{ (Carbonatación)} ; X_{Cl} = K_{Cl} \sqrt{t} \text{ (Cloruros)}$$

donde X es la profundidad del agresivo y t es el tiempo desde que la estructura ha estado expuesta al agente agresivo.

- Determinación de la penetración P_x y la intensidad de corrosión [5,6].

- Determinación de la sección reducida de las barras de acero, la fisuración del recubrimiento de hormigón y el deterioro de la adherencia.
- Aplicación de la teoría de los Estados Límite teniendo en cuenta las características específicas de las estructuras corroídas

3.3 Fase de prognosis

Una vez determinado el estado actual de la estructura, el siguiente paso es tratar de predecir cómo va a evolucionar el proceso de deterioro y cuando la estructura va a alcanzar un nivel de comportamiento estructural no aceptable.

Los datos necesarios para realizar la prognosis son los siguientes:

- Características geométricas y mecánicas de los elementos
- Características del avance de los agresivos (K_{CO_2} , K_{Cl^-} , profundidad actual y periodo de propagación)
- Un valor representativo de la intensidad de corrosión I_{corr}^{rep}

Si la estructura se encuentra en el periodo de iniciación, el resultado de la fase de prognosis será el tiempo necesario para alcanzar la despasivación de las armaduras, esto es, el tiempo necesario para que el agresivo llegue a las armaduras. Este valor puede obtenerse mediante la aplicación de nuevo del modelo de la raíz cuadrada del tiempo, o de otro modelo similar.

Si la estructura se está corroyendo, el objeto de esta fase de la evaluación es determinar cuándo alcanzará la estructura un nivel de comportamiento mínimo prefijado. Los pasos necesarios para lograr este objetivo son los siguientes:

- Definir el nivel mínimo de comportamiento para estados últimos y de servicio.
- Determinar las características geométricas y mecánicas que hacen que la estructura alcance dicho nivel mínimo: diámetros de armaduras, fisuración del hormigón, etc.
- Determinar la penetración de ataque P_x que produce dichas características.
- Asumir un valor medio representativo de la intensidad de corrosión I_{corr}^{rep} que pueda emplearse en la estimación del deterioro futuro.
- Determinar el tiempo necesario para alcanzar la penetración de ataque P_x de acuerdo a las características ambientales y el valor de la intensidad de corrosión I_{corr}^{rep}

Dependiendo de las características del agresivo, la corrosión de las armaduras y su influencia en la sección transversal es muy diferente. Mientras la carbonatación del hormigón provoca una penetración de ataque homogénea, el ataque por cloruros produce ataques localizados que llevan a una reducción significativa de la sección transversal. Una vez que se ha determinado la profundidad de ataque P_x , es posible obtener el diámetro residual de la barra afectada a partir de la siguiente expresión:

$$\phi_t = \phi_0 - \alpha P_x \quad (1)$$

donde α es un coeficiente dependiente del tipo de ataque. Para el caso de corrosión homogénea, toma el valor de 2, mientras que en el caso de corrosión localizada puede alcanzar el valor de 10 (González et al. (1995)).

Por otra parte, la corrosión reduce la ductilidad del acero. Por ello, tanto los métodos de análisis no lineal como los métodos de análisis elástico con redistribuciones deben ser considerados con suma precaución.

Los óxidos generados durante la corrosión de las armaduras provocan un estado tensional en el hormigón que las recubre que en la mayoría de los casos lleva a su fisuración. Estas fisuras provocan la pérdida de integridad del hormigón, afectando por tanto a su contribución a la capacidad portante de la estructura y a su apariencia externa. La expresión desarrollada (Rodríguez 1993b, 1996) a partir de resultados experimentales para evaluar las condiciones de fisuración en estructuras corroídas y que proporciona el valor característico del ancho de fisura es la siguiente:

$$w = 0.05 + \beta [P_x - P_{x_0}] [w \leq 1.0 \text{ mm}] \quad (2)$$

donde w es el ancho de fisura estimado en mm, P_x es la penetración de ataque (disminución del radio de la barra) en mm, P_{x_0} es la penetración de ataque correspondiente al inicio de la fisuración y β es un coeficiente que depende de la posición de la barra [$\beta=10$ para superiores y 12.5 para inferiores]. La penetración de ataque P_{x_0} necesaria para el inicio de la fisuración puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$P_{x_0} = (83.8 + 7.4c/\phi - 22.6f_{ci}) \cdot 10^{-3} [P_{x_0} \geq 0] \quad (3)$$

donde P_{x_0} es a penetración de ataque en mm, c/ϕ es la relación recubrimiento/diámetro y f_{ci} es la resistencia a tracción indirecta del hormigón en MPa (ensayo brasileño).

La adherencia entre el hormigón y el acero es la responsable del anclaje de las barras en sus extremos y del comportamiento conjunto de los dos materiales en las zonas intermedias de las mismas. Sin embargo la corrosión provoca su deterioro debido al debilitamiento del confinamiento de la barra tanto por la fisuración del hormigón como por la corrosión de los cercos. En última instancia, puede llegarse al fallo del anclaje y la pérdida de interacción entre el hormigón y el acero. La formulación desarrollada para determinar la influencia de la penetración de ataque en la pérdida de adherencia es la siguiente (Rodríguez 1993b, 1996):

$$\text{Si } \rho > 0.25 \quad f_b = 4.75 - 4.64P_x \quad (4)$$

$$\text{Si } \rho < 0.25 \quad f_b = 10.04 + [-6.62 + 1.98 (\rho/0.25)] [1.14 + P_x] \quad (5)$$

$$\rho = n [(\phi_w - \alpha P_{xw}) / \phi]^2$$

siendo P_x la penetración de ataque medio en las barras principales, en mm.; P_{xw} la penetración de ataque medio en cercos, en mm; ϕ el diámetro de las barras principales, en mm; ϕ_w el diámetro de los cercos, en mm. y n el número de cercos en

la longitud de anclaje. Si no hay cercos, la adherencia residual puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$f_b = 2.50 - 6.62 P_x \quad (6)$$

En el caso de evaluar la adherencia en zonas de apoyos en los que se cuenta con una presión externa, que favorece el confinamiento de las barras y por tanto mejora la adherencia, se ha desarrollado la siguiente expresión (Rodríguez et al. (1998a)):

$$f_b = (4.75 - 4.64 P_x)/(1-0.08p) \quad (7)$$

donde p es la presión externa en MPa.

Estas expresiones son válidas para el caso de barras corrugadas. En el caso de evaluar estructuras con barras lisas, el criterio que se propone es la reducción de la adherencia obtenida de acuerdo con el Eurocódigo 2. En él se establece un ratio entre barras lisas y corrugadas de 1/2.25.

Mediante la aplicación de la teoría de los Estados Límite Últimos [7], en la que se consideren los efectos de la corrosión que se han mencionado anteriormente, es posible evaluar si la estructura es capaz de resistir las sollicitaciones a las que se encuentra sometida. Estas pueden obtenerse mediante el análisis elástico lineal pero modificando la sección de hormigón para tener en cuenta los procesos de fisuración y pérdida de recubrimiento que se dan en las estructuras deterioradas.

La estimación de los estados límite últimos puede realizarse mediante los Códigos existentes pero incluyendo algunas modificaciones propias de las estructuras afectadas por procesos de corrosión. Así, la geometría de la sección para la que se va a realizar el cálculo del momento último será la original con las modificaciones oportunas tanto para el acero como para el hormigón. Esto es, considerando la sección reducida de la armadura y la sección reducida del hormigón sin la contribución del recubrimiento en la cara comprimida. Asimismo, es necesario considerar la posible influencia de la pérdida de adherencia debida a la corrosión en elementos sin cercos (losas...), especialmente en aquellos en los que únicamente resulte atacada la armadura de la cara traccionada.

Cuando se lleva a cabo la prognosis, debe tenerse en cuenta la evolución de la fisuración del recubrimiento y su posible desprendimiento. El inicio de la pérdida de recubrimiento puede considerarse cuando la penetración de ataque en las barras comprimidas P_{x2} alcanza el valor necesario para el inicio de la fisuración P_{x0} . Una vez que se ha alcanzado este valor, no se conoce con exactitud la evolución de la capacidad portante hasta que se produce el desprendimiento del recubrimiento. Puede asumirse una interpolación lineal entre estos dos instantes, de forma que puedan cubrirse todos los casos intermedios comprendidos entre el inicio de la fisuración y el desprendimiento del recubrimiento. El mismo criterio se ha adoptado entre el desprendimiento del recubrimiento comprimido y el recubrimiento lateral.

4. EVALUACIÓN SIMPLIFICADA

Para desarrollar un método simple pero lo suficientemente preciso para la evaluación de estructuras afectadas por corrosión se ha considerado necesario tener en cuenta:

- La necesidad de minimizar el número de ensayos *in situ* en la estructura.
- El estado actual de daños que presenta la estructura.
- La posible velocidad de degradación de la estructura habida cuenta del ambiente de exposición en que ésta se encuentra.
- La posible sensibilidad de la estructura a los factores reductores de la capacidad portante anteriormente enunciados.
- El estado actual de sollicitación del elemento a estudiar.

Cada uno de estos factores, es tenido en cuenta mediante diversos índices. Así, la Figura 4 muestra el diagrama de flujo para la obtención de una clasificación de la estructura así como una propuesta de acción en el tiempo.

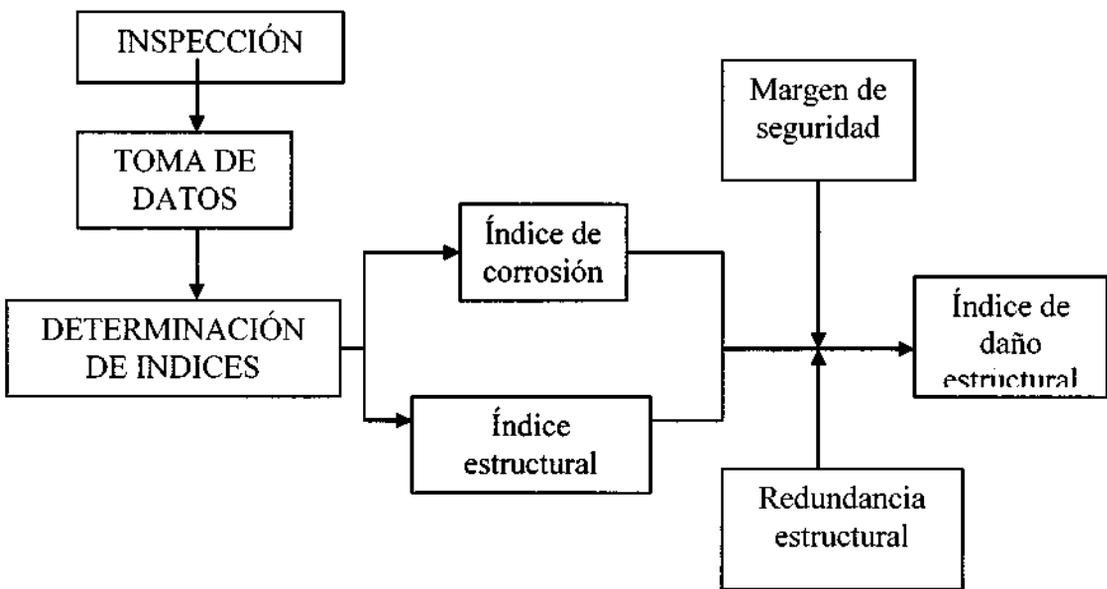


Figura 4. Cálculo general de índices

Por un lado, el *índice de corrosión* tiene en cuenta el estado actual de daños que presenta la estructura, siempre desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras, así como la posible evolución del daño en el futuro. Este índice debe combinarse, con el *índice estructural* que tiene en cuenta la posible sensibilidad del elemento considerado al proceso de corrosión de las armaduras. Como resultado de esta combinación se obtiene un tercer índice, *índice de daño estructural* que permite una clasificación directa del estado actual y de la posible evolución de éste en la estructura considerada. El *índice de daño estructural* dependerá también del hiperestatismo estructural y del margen de seguridad real del elemento.

Un índice de corrosión realmente efectivo, debe de tener en cuenta no solo el nivel de daño actual en la estructura sino también como evolucionará este daño con el tiempo. Para ello se ha considerado este índice como formado por otros dos índices, el *índice de daños por corrosión* y la *agresividad ambiental* (Figura 5).

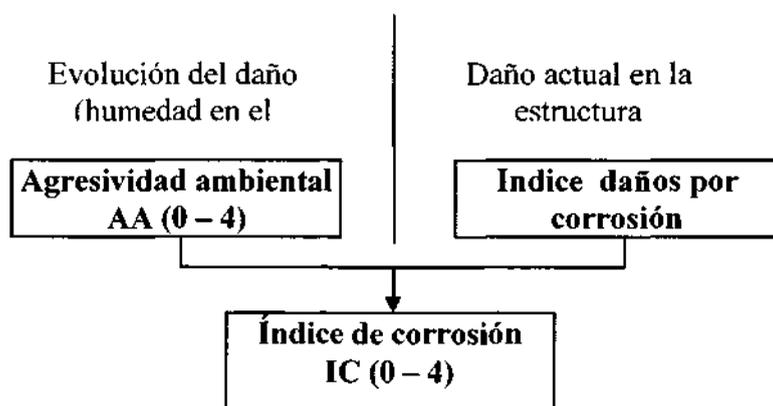


Figura 5. Cálculo del índice de corrosión

La tabla 3 muestra los indicadores de corrosión que deben ser obtenidos de la inspección estos indicadores proporcionan una información objetiva acerca del estado de daños actual de la estructura, esencialmente debido a problemas relacionados con la corrosión de las armaduras. Cada indicador es ponderado de 1 a 4 dependiendo de su nivel de intensidad sobre la estructura estudiada.

Tabla 3. Indicadores de daños por corrosión

Indicador	Símbolo
Profundidad de carbonatación	X_{CO_2}
Nivel de cloruros	X_{Cl^-}
Fisuración por corrosión en el recubrimiento	W
Resistividad (k Ω .cm)	Ω
Pérdida de sección	$\Delta\phi$
Intensidad de corrosión ($\mu A/cm^2$)	I_{corr}

$$IDC = \frac{\sum_{i=1}^6 \text{Nivel del indicador}_i}{6} \quad (8)$$

Sin embargo, el índice anterior solo recoge la información sobre los daños que presenta actualmente la estructura, por esta razón es necesario tener en cuenta también la posible evolución de dichos daños en el tiempo, es decir *la agresividad ambiental*. Esta es cuantificada en términos de ambientes de exposición, según la EHE [8], o bien según la EN206 [9]. A cada tipo de ambiente se le otorga una puntuación dependiendo de la velocidad de corrosión esperable en una estructura en estas condiciones.

Finalmente se propone una media entre los dos valores para el cálculo del *índice de corrosión*.

$$\text{Índice de corrosión} = \frac{AA + IDC}{2} \quad (9)$$

Para la determinación del índice estructural, se ha considerado necesario tener en cuenta las características del elemento y su comportamiento frente a una pérdida de capacidad portante por efecto de la corrosión de las armaduras. Para ello se han tenido en cuenta dos familias fundamentales, por un lado los elementos sometidos esencialmente a flexión (vigas y viguetas) y por otro lado los elementos sometidos a compresión (pilares).

La Figura 6 muestra los factores que influyen en el comportamiento estructural de elementos sometidos a flexión afectados por corrosión de las armaduras. Básicamente se estudia la geometría del elemento en cuanto a la capacidad a cortante (*índice de armado transversal*) y la capacidad a flexión (*índice de armado longitudinal*).

- Por lo que se refiere al comportamiento a cortante del elemento afectado por corrosión, se han considerado dos aspectos fundamentales: la existencia de armadura transversal y el diámetro de los cercos y su cuantía. En principio, aquellos elementos en los que no se haya dispuesto armadura transversal, la no existencia de cercos hace estas piezas menos sensibles a la disminución de resistencia a cortante por efecto de la corrosión, si bien la corrosión de las armaduras longitudinales genera una pérdida en la capacidad portante a cortante ya que:
 - o Se ve reducida el área efectiva de hormigón.
 - o Se reduce el efecto pasador de la armadura y el la retención por cortante de las fisuras, ambos factores pueden ser tenidos en cuenta disminuyendo la adherencia de las armaduras según el grado de corrosión.

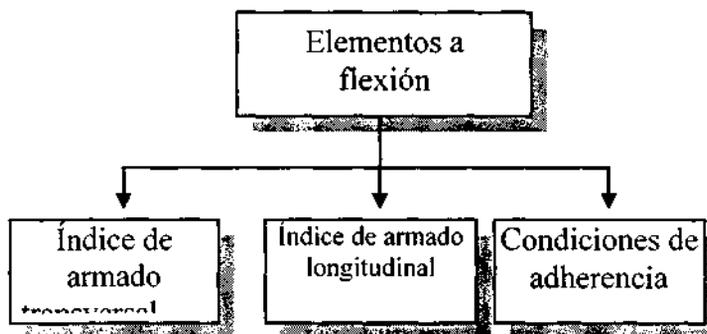


Figura 6. Cálculo del índice de corrosión (Vigas)

Por otro lado, se considerará una peor situación en aquellos elementos en los que disponiendo una cuantía de armado a cortante estricta, el diámetro de los cercos sea pequeño (en general de diámetro $\varnothing 6\text{mm}$) ya que la pérdida de sección en estos casos puede ser importante.

Una vez determinado el índice de armado transversal, se determina un índice que tiene en cuenta el comportamiento a flexión del elemento. De nuevo los factores fundamentales que definen este índice son:

- Diámetro de la armadura longitudinal: un diámetro pequeño será más sensible a una pérdida de material por corrosión.
- Cuantía de la armadura a flexión.
- Estado de la adherencia en la viga.

Para los casos en los que la determinación de los diámetros y cuantías de armado en los elementos requieran excesivos ensayos *in situ* o un coste desmesurado, se ha propuesto una versión simplificada para la obtención directa del índice estructural, en la que en función de la cuantía de armado transversal y la tipología de la viga (en términos algo subjetivos como son los de baja densidad de cercos o alta cuantía longitudinal), se puede determinar directamente el *índice estructural*.

En el caso de elementos sometidos a compresión el proceso de cálculo del índice estructural es análogo, la Figura 7 muestra los factores que se tienen en cuenta para valorar cualitativamente el comportamiento de elementos sometidos a corrosión de las armaduras. Al igual que en el caso de los elementos a flexión, el índice de armado transversal se genera teniendo en cuenta, el diámetro de armado de los cercos y el espaciado de éstos en el elemento.

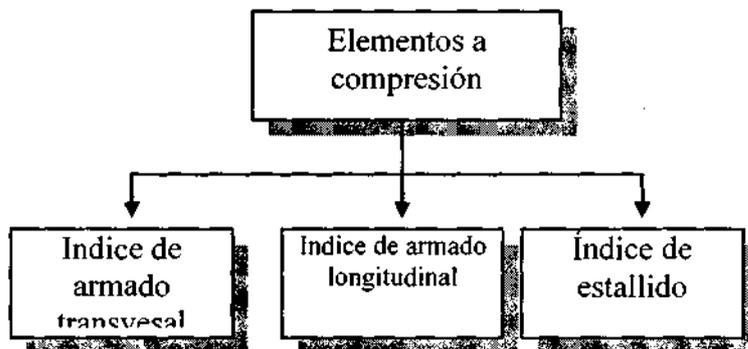


Figura 7. Cálculo del índice de corrosión

Por último, el índice estructural del elemento a compresión se determina, teniendo en cuenta el espaciado de las armaduras longitudinales y el índice de estallido η . El índice de estallido es la relación entre el área de la sección eliminando el recubrimiento y el área de la sección completa del elemento.

Finalmente, determinación del daño estructural, y en función de todos los índices determinados anteriormente se puede clasificar el estado de la estructura y su posible evolución. Esta clasificación se realiza mediante el *índice estructural* y el *índice de corrosión* en términos cualitativos, desde despreciable (D) hasta muy severo (MS).

Para tener en cuenta el posible hiperestatismo estructural del elemento, se permite la reducción de en la clasificación final, en una unidad. Así, para elementos

hiperestáticos un índice de daño estructural Severo (S) se puede reducir a Medio (M).

El margen de seguridad pretende tener en cuenta el posible sobredimensionamiento previo de la sección por motivos no estructurales, como dimensiones mínimas geométricas o cuantías mínimas. El margen de seguridad se define como la relación existente entre el esfuerzo último de la sección (según condiciones de proyecto) y el esfuerzo característico de sollicitación.

$$MS = \frac{M_U}{M_K} \text{ o } \frac{N_U}{N_K} \text{ o } \frac{V_U}{V_K} \quad (10)$$

El margen de seguridad se puede clasificar como, bajo, medio o alto. Por defecto y según está formulado el margen de seguridad los valores mínimos de éste deberán corresponder con los coeficientes parciales de las acciones (en torno a 1,4 – 1,6) dependiendo del tipo de estructura y norma de diseño. La tabla 4 muestra los rangos de los valores del margen de seguridad asociado.

Tabla 4. Clasificación del margen de seguridad

Margen de seguridad	BAJO	MEDIO	ALTO
MS	1,4 < MS < 2,0	2,0 < MS < 3,0	MS > 3,0

En función del margen de seguridad obtenido para el elemento: Bajo, Medio o Alto, se podrá reducir la clasificación final de la estructura en 0, 1 ó 2 niveles respectivamente.

Para finalizar estos aspectos estructurales es conveniente recordar que la evaluación de estructuras corroídas no está todavía contemplada en los códigos y no existen normas o recomendaciones suficientemente contrastadas para su recálculo. Las metodologías propuestas permiten la clasificación racional del estado estructural mediante un procedimiento objetivo y evitando posibles subjetividades en el inspector que realice la tarea. Además los costes necesarios para la toma de datos para la determinación de los distintos índices propuestos son relativamente bajos, permitiendo su aplicación en patrimonios considerablemente extensos.

Por otro lado, la incorporación de índices tal y como se contempla en la evaluación Simplificada que tengan en cuenta el tipo de ambiente de exposición, así como el nivel de carga actual de la estructura permite por un lado una extrapolación en el tiempo del comportamiento estructural y por otro un avance respecto de los criterios subjetivos del estado de seguridad estructural del elemento.

5. CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION REPRESENTATIVA

La velocidad de deterioro es controlada por la velocidad a la que se corroe la armadura. Por ello es esencial una correcta determinación de ésta y asegurar que los datos que se obtienen responden a una representación correcta de la estructura, es decir es necesario asegurar que son *representativos*.

Se va pues primero a abordar como realizar medidas in-situ de corrosión que puedan considerarse representativas. La obtención de un valor Representativo de la velocidad de corrosión, $I_{corr.Rep}$, se acomete abordando las siguientes etapas:

1. Selección de lotes para las medidas in situ (ya tratado anteriormente)
2. Realización de las medidas y extracción de testigos o colocación de sensores permanentes (que se aborda en otra ponencia de J. Fullera)
3. Calculo del valor representativo

6. CALCULO DEL VALOR REPRESENTATIVO DE LA I_{corr}

Para ello es necesario primero comentar cual es el efecto del clima en la velocidad de corrosión para luego describir como abordar el cálculo de un valor representativo.

6.1 Efecto del clima en los parámetros de corrosión

Los factores climáticos, principalmente, la lluvia, la temperatura y la humedad relativa, HR influyen decisivamente sobre el contenido en humedad de los poros del hormigón y por tanto controlan la evolución de la corrosión.

La respuesta de los poros del hormigón a la variación de los factores climáticos no es instantánea y puede resultar muy diferente según el hormigón esté expuesto directamente a la lluvia o protegido de ella. Si el hormigón está expuesto a la lluvia, esta penetra por capilaridad y se almacena en el interior del material y allí permanece (Figura 8) hasta que la ausencia de lluvia o el aumento de temperatura induzcan una evaporación. El hormigón protegido de la acción de la lluvia tendrá en su interior una cantidad de humedad que dependerá sólo de la HR y la temperatura exteriores.

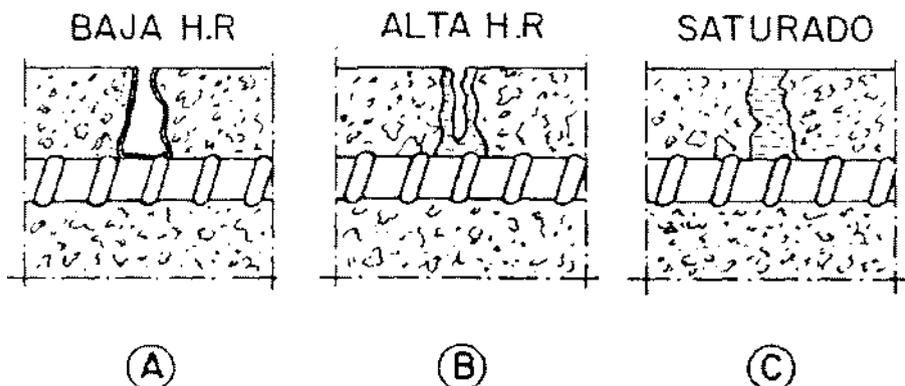


Figura 8. Estado esquemático del grado de saturación del hormigón en función de su grado de exposición a la lluvia y el sol.

En el equilibrio final las situaciones se representan en la Figura 9, donde se ha reproducido en su parte izquierda la relación entre la temperatura y la HR en la atmósfera (exterior) y la que se mide en un orificio (interior) practicado a la probeta, mientras que en la derecha de la figura se representa el caso de hormigones expuestos a la lluvia y el sol. En esta última se aprecia que la HR en el interior del hormigón es muy superior a la de la atmósfera, indicando que el hormigón actúa como una esponja que retiene el agua en estado líquido.

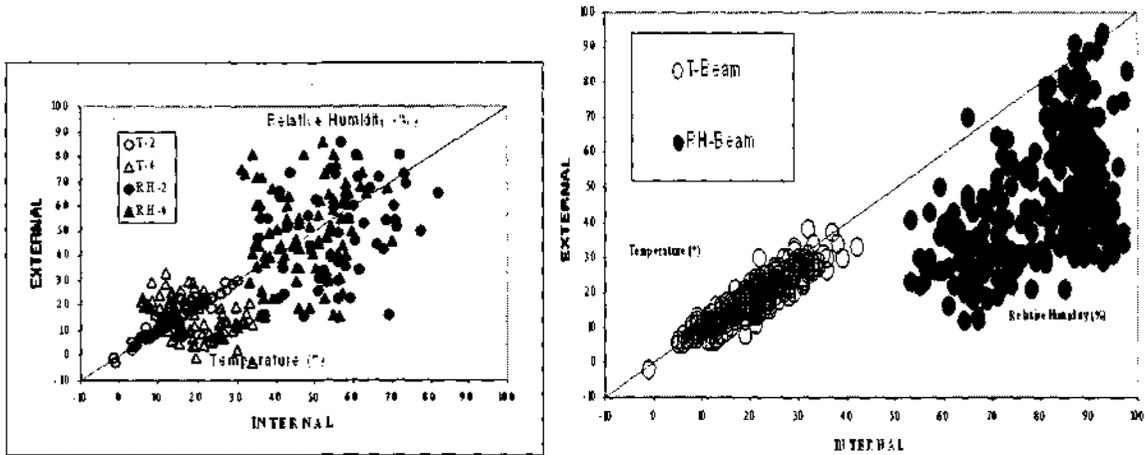


Figura 9. Relación entre las Humedades Relativas y temperaturas en la atmósfera (exterior) y en el interior del hormigón protegido de la lluvia (izquierda) y expuesto a la lluvia) derecha.

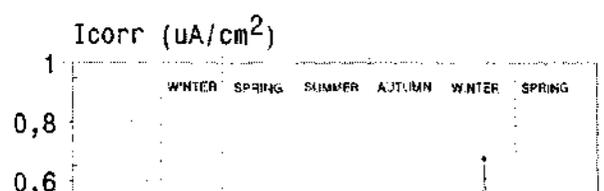
Estas observaciones indican que es de esperar muchas mayores velocidades de corrosión en las zonas expuestas a la lluvia o a otras fuentes de agua líquida y que temperaturas bajas evitan la evaporación, por lo que resultan tener un grado de saturación más elevado los hormigones situados en zonas frías y expuestas a la lluvia o la nieve, ya que en ellas la evaporación es mucho menor que en zonas de temperaturas más altas.

6.2 Evolución de la corrosión

Estas situaciones llevan a que los parámetros de corrosión (potencial de corrosión, resistividad del hormigón y velocidad de corrosión) varían con el clima de una forma no métrica ni fácilmente predecible. Así la Figura 10 muestra la evolución del potencial de corrosión de una viga de hormigón contaminada de cloruros y expuesta a la lluvia, mientras que la Figura 6 muestra la evolución de la I_{corr} .

Esta realidad lleva a recomendar diversas precauciones cuando se trata de medir corrosión en estructuras reales expuestas a la atmósfera, para obtener un valor representativo, que se ha propuesto que sea anual.

Existen para ello dos alternativas: a) realizar medidas periódicas, o en momentos precisos, a lo largo de al menos un año y promediar los valores, o b) realizar una medida única y complementarla con otras medidas en el laboratorio para obtener un valor promedio de la I_{corr} que se sitúe del lado conservador.



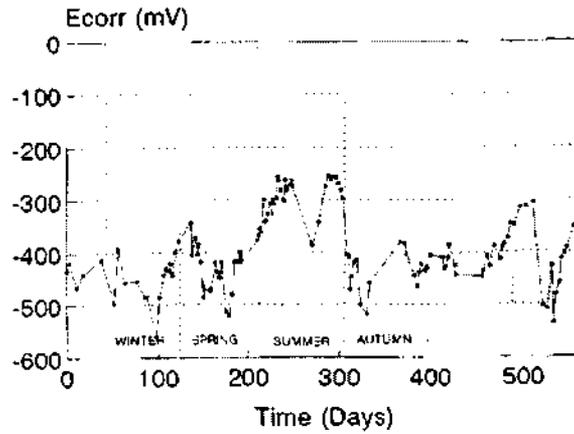


Figura 10. Evolución del potencial y de la velocidad de corrosión en un hormigón contaminado de cloruros y expuesto a la lluvia y el sol. Se aprecia que la evolución no tiene una tendencia predecible ni mimética con los parámetros climáticos.

a) Medidas periódicas

Control continuo

Cuando se han podido dejar instalados sensores que aportan medidas en continuo, el mínimo de toma de datos por día es el de dos, para captar los momentos de temperatura máxima (mediodía) y mínima (medianoche o madrugada). Más de 4 medidas diarias no se recomienda para no sobrecargar los registradores con datos a menos que sea necesaria una frecuencia menor (más de 4 medidas al día sean necesarias).

Varias medidas

Lo óptimo sería realizar al menos cuatro medidas durante un periodo de 12 meses teniendo en cuenta las estaciones anuales. Así, los eventos climáticos extremos que se deben considerar como los más adecuados para realizar las medidas son:

- Periodo seco con bajas temperaturas
- Periodo de bajas temperaturas después de lluvia continua o intermitente durante dos o tres días.
- Periodo seco con temperaturas altas
- Periodo de altas temperaturas después de periodos de lluvia continua o intermitente durante dos o tres días.

Medidas durante estos periodos permitirán captar los valores máximos y mínimos de la velocidad de corrosión. El valor representativo de $I_{corr,REP}$ tanto en este caso como en el del empleo de sensores, puede ser obtenido promediando los valores registrados:

$$i I_{corr}^{Rep} = \sum_0^n \frac{I_{corr}(t)}{n}$$

Esta integración o sumatorio permite el cálculo de la corrosión acumulada C_{ac} a partir de los datos de velocidad de corrosión tal y como se puede calcular de la formulas siguientes o gráficamente se muestra la Figura 11:

$$P_x = I_{corr} \cdot t \rightarrow P_x (\mu A / cm^2 \cdot year)$$

$$P_x = 0.0116 \cdot I_{corr} \cdot t = V_{corr} \cdot t \rightarrow P_x (mm / cm^2 \cdot year) = P_{xt} (mm)$$

$$P_{pit} = V_{corr} \cdot t_p \cdot \alpha$$

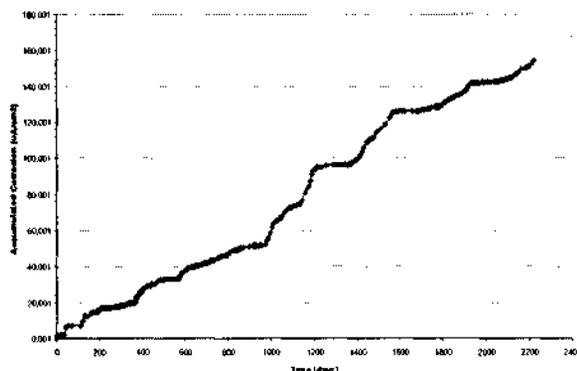


Figure 11: Izquierda: velocidad de corrosión y derecha: corrosión acumulada

Una alternativa, cuando no se va a proceder a un cálculo riguroso de la pérdida de capacidad portante, es clasificar la I_{corr} por niveles, tal y como muestra la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de rangos de importancia de la velocidad de corrosión.

Velocidad de corrosión		Nivel de Corrosión
($\mu A/cm^2$)	($\mu m/año$)	
< 0.1	< 1	Despreciable
0.1 - 0.5	1 - 5	Bajo
0.5 - 1	5 - 10	Moderado
> 1	> 10	Alto

b) Medidas aisladas

Cuando la única posibilidad es la realización de medidas aisladas, la incertidumbre de obtener un valor representativo es mucho mayor. Para interpretar las medidas de la forma más precisa posible, el método que se recomienda se basa en promediar los valores obtenidos in-situ con los medidos en testigos extraídos de la propia estructura. En estos testigos se puede medir la I_{corr} en armaduras que contengan los propios testigos, o la I_{corr} se puede obtener de la relación $I_{corr} \sim \rho$ medida en los testigos.

Testigos sin armadura

En el caso más corriente de que los testigos no contengan armaduras el procedimiento a seguir se muestra en la Figura 12. Esta Figura se basa en la relación existente entre I_{corr} y la resistividad. En ella la línea AB indica la relación

teórica promedio usual entre I_{corr} y ρ cuando se dibuja en un gráfico $\log - \log$ que resulta en una función lineal con una pendiente de -3 ($I_{corr} = 3 \cdot 10^4 / \rho$ cuando I_{corr} se mide en $\mu A/cm^2$ y la ρ en Ωcm). En consecuencia el procedimiento propuesto es el siguiente:

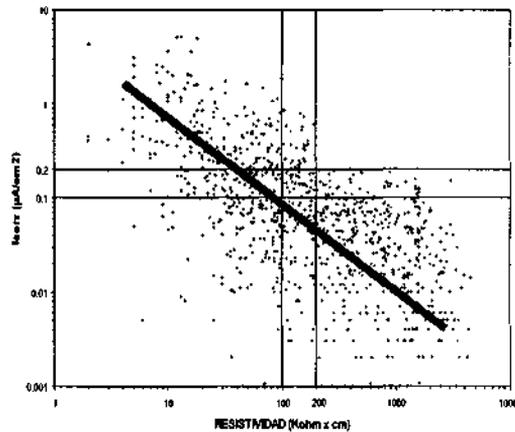


Figura 12. Grafico I_{corr} - ρ para la estimación del valor de I_{max}

- Después de efectuar las medidas de velocidad de corrosión y de resistividad en la estructura objeto de estudio, se extraen testigos de las zonas donde se han efectuado estas medidas. Estos testigos se sellan bien y se llevan al laboratorio. Al llegar se mide en ellos la resistividad para comprobar su coincidencia con las medidas en obra. Después se introducen en una cámara acondicionada al 85% de humedad relativa, HR (para simular las condiciones de un hormigón protegido de la lluvia) o se saturan completamente de agua bajo vacío (hormigones expuestos a la lluvia). Cuando el peso varía menos del 0,1 % se mide en estos testigos su resistividad mínima, ρ_{min} .
- Los testigos deben ser representativos del estado de la estructura. Hay que intentar, por tanto, extraerlos de zonas cercanas a donde se han realizado las medidas in-situ de I_{corr} y deben no tener más fisuración o deterioro
- La etapa final consiste en situar los valores de I_{corr} y de ρ medidos in situ en el grafico $I_{corr} - \rho$ (puntos P, Figura C.5).Luego se traza una recta paralela a la teórica AB. A continuación se sitúan los valores de ρ_{min} medidos en los testigos llevados al laboratorio (punto R) para luego obtener los valores de corriente de corrosión máxima, $I_{corr,max}$ (punto D) como extrapolación del punto de intersección, C, que viene de la línea de resistividad mínima, RC, Así se obtiene la I_{max} que se mediría in-situ en hormigones saturados o al 85% de HR.

Finalmente la I_{corr}^{REP} se obtiene promediando ambos grupos de valores, los obtenidos in situ $I_{corr, sing}$ con los obtenidos en el laboratorio $I_{corr, max}$.

$$I_{corr}^{rep} = \frac{I_{corr}^{sing} + I_{corr}^{max}}{2}$$

Testigos con armadura

Una alternativa al procedimiento anterior se muestra en la Figura 10 y consiste en extraer testigos conteniendo piezas de armadura. Estos testigos se acondicionan igualmente en el laboratorio a una humedad del 85% para reproducir unas condiciones de hormigón protegido de la lluvia, o bien saturando los testigos bajo agua a vacío, para reproducir un hormigón bajo la acción directa de la lluvia. Una vez que alcanzan peso constante se puede medir la velocidad de corrosión directamente en las barras de los testigos mediante un potenciostato normal y usando un contraelectrodo y un electrodo de referencia externos.

6.3 Calibración de las medidas electroquímicas con la medida directa de la pérdida de diámetro

Para realizar de los datos de medida de I_{corr} con los de la pérdida de diámetro (P_x) se puede proceder utilizando los trozos de armadura que se hayan extraído con los testigos como ya se indicó antes, o bien midiendo directamente el las armaduras, por ejemplo, en las zonas que se descubren para hacer contacto eléctrico.

En estas zonas se debe retirar con un cepillo de cerdas de plástico la herrumbre y restos de suciedad y con un calibre se procede a medir la pérdida de diámetro.

Cuando ésta sea imperceptible una posible alternativa es la pesada de trozos de armadura y se mide el volumen de un trozo de armadura no corroído. A través de la densidad del acero ($7,85 \text{ gr/cm}^3$) es posible deducir el peso inicial del trozo corroído.

7. AGRADECIMIENTOS

La autora desea agradecer a expresamente a los socios españoles J. Rodríguez, L. Ortega y J. Casal de Geocisa todo el trabajo desarrollado en el Proyecto financiado IN309302I CONTECVET por la Dirección General XII de la Unión Europea. Entre los socios españoles que han desarrollado el proyecto se encuentran GEOCISA, el Instituto Eduardo Torroja, IBERDROLA, ENRESA y la Dirección General de Arquitectura y Vivienda de la Generalitat Valenciana.

8. BIBLIOGRAFIA:

- (1) Unión Europea DG XII: *IN309002I A validate user's manual for the assessing of residual life of concrete structures CONTECVET.*
- (2) Rodríguez, J. Aragoncillo, J. Andrade, C. Izquierdo, D. *Comportamiento actual y futuro de estructuras de hormigón afectadas por corrosión: una metodología práctica para su evaluación.* COLLOQUIA 2001. IETcc. Madrid.
- (3) Rodríguez, J. Ortega, L. M. Casal J. Vidal M. A. *Disminución de la adherencia entre hormigón y barras corrugadas debida a la corrosión.* Hormigón y Acero nº 189, pp 49 – 66.
- (4) Rodríguez, J. Ortega, L. M. Casal J. Díez J. M. *La corrosión de las armaduras y la vida residual de las estructuras de hormigón.* Hormigón y Acero nº 208, pp 67 – 78.
- (5) Feliú S., González J.A., Feliú S. Jr. and Andrade C : *Confinement of the electrical signal for in situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete.* ACI Materials Journal, Sept-Oct. pp.457-460 (1990)
- (6) Andrade, C., Alonso, C., Rodríguez, J., "Remaining service life of corroding structures", IABSE Symposium on Durability, Lisboa, (Sep. 1989), pp. 359-363.
- (7) Tanner, P.; Ortega, L.: *Evaluación de la seguridad estructural futura de puentes del pasado.* Jornadas sobre Nuevas Técnicas de Evaluación Estructural, Rehabilitación y Refuerzo de Estructuras, Grupo Español de IABSE (Madrid, 16-27 de mayo de 1999), págs. 269-279

- (8) Comisión permanente del hormigón *Instrucción de hormigón estructural EHE* Ministerio de Fomento (1998).
- (9) CEN EN 206 *Hormigón, Parte 1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad* Borrador final (1999).