

ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP  
Lisboa – 2 e 3 de Julho 2009

## Estudio de viaductos existentes: criterios para llevar a cabo la investigación estructural

### **Pedro Silva**

Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, Área de Rehabilitación y Patología.

### **Eduardo Díaz-Pavón**

Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, Área de Rehabilitación y Patología

### **Miguel Morais**

Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil

### **Humberto Varum**

Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil

## RESUMEN

El objeto de la presente comunicación es destacar la importancia de plantear correctamente el estudio del estado actual de un viaducto existente de cara a analizar sus condiciones de durabilidad. Para ello, partiendo de su inspección, deberemos establecer los criterios para la localización y tipología de las calas a realizar sobre la estructura, definir los ensayos complementarios necesarios en cada caso según se deduzca de los aspectos observados en las inspecciones realizadas (tanto de los daños existentes como de las calas que se practiquen), y así poder establecer un juicio técnico fundamentado sobre el origen de las anomalías que se observen, valorar su trascendencia estructural, y poder determinar las medidas de reparación y/ o refuerzo más adecuadas en cada caso. La propuesta de actuación expuesta en el artículo destaca la importancia de los trabajos de inspección (daños y calas) y de Laboratorio, sin entrar a valorar otros ensayos (resistividad, medidas de potenciales de corrosión, etc.), que podrían resultar oportunos en algunos casos.

## PALABRAS-CLAVE

Inspección

Ensayos

Agentes agresivos

Durabilidad

## 1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad y conservación de las estructuras es, en la actualidad, un reto técnico y económico muy importante, sobretodo en lo que a estructuras de hormigón armado y/o pretensado se refiere, al haber sido consideradas durante mucho tiempo como *duraderas*, exigiéndose para las mismas un mantenimiento mínimo. Así, la carencia de un mantenimiento adecuado unido a unas exposiciones ambientales muy desfavorables en algunas ocasiones (por los altos grados de humedad y exposición, por el uso de sales para garantizar la vialidad invernal, por su localización en ambientes marinos, etc.) hacen que en estas estructuras no sean suficientes reparaciones superficiales propias de un ambiente rutinario, sino que sean necesarias actuaciones más profundas con objeto de valorar la merma en la seguridad estructural y la evolución previsible de los procesos de

degradación. La presente comunicación tiene como objetivo principal establecer un procedimiento y criterios para realizar un diagnóstico sobre el estado actual de aquellos viaductos que presenten indicios de defectos en su durabilidad, a partir de los resultados de las inspecciones de daños y calas que se realicen y los ensayos de laboratorio que se deduzcan más oportunos a partir de ellos (véase la figura nº 1). Queda fuera del alcance del presente artículo el análisis de aquellas estructuras en los que la rehabilitación esté condicionada por aspectos estructurales (cambios de uso, aumento de las cargas de tráfico, anómalo comportamiento estructural, etc.) o de su cimentación (asientos diferenciales de pilas, socavación de la cimentación, etc.).



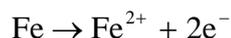
Vista del aspecto que presenta un viaducto con defectos de corrosión de las armaduras  
Figura nº 1

## 2. LA CORROSIÓN COMO PRINCIPAL CAUSANTE DE LA MERMA DE VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS

Como hemos señalado en la *Introducción*, las estructuras de hormigón armado y/o pretensado han sido consideradas durante mucho tiempo como *duraderas*, exigiéndose para las mismas un mantenimiento mínimo. Sin embargo, muchas de estas estructuras presentan anomalías cuyo origen reside en la degradación por corrosión de las armaduras de la misma, la cual es el proceso causante del deterioro y pérdida de vida útil de muchas de ellas.

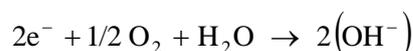
De forma simplificada, el proceso de corrosión del acero de las armaduras puede separarse en dos procesos individuales:

- El proceso anódico, en el que se produce la disolución del hierro a través de la reacción química



pasando los iones  $\text{Fe}^{2+}$  a la disolución.

- El proceso catódico, en el que el agua y el oxígeno junto con los electrones procedentes del proceso anódico, se combinan para formar iones hidróxido, según la reacción química



Tras sucesivas etapas, los iones hierro e hidróxilo se combinan para formar teóricamente óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), aunque en la práctica los productos de la oxidación están más o menos hidratados.

En este proceso el acero al oxidarse experimenta un incremento de volumen que llega a ser de hasta más de seis veces el inicial, lo que provoca empujes en el hormigón de recubrimiento que acaba por fisurarse y, finalmente, desprenderse, lo que ocasiona que una vez iniciado el daño su evolución sea desfavorable.

Como se puede observar, el desarrollo de estas reacciones exige la existencia de ciclos de humedad y secado en torno a las armaduras. Sin embargo, no es suficiente la presencia de agua para el desarrollo de los procesos de corrosión, ya que tanto la basicidad original del hormigón<sup>1</sup>, como la presencia de una capa pasiva<sup>2</sup> en las armaduras, impiden inicialmente el desarrollo de la corrosión. Por tanto, para el inicio de ésta es necesario un desencadenante, el cual puede ser en principio –en estructuras como las que nos ocupan– uno de los siguientes:

- Que el frente carbonatado alcance la posición de las armaduras. La carbonatación es un fenómeno que básicamente consiste en la reacción del dióxido de carbono atmosférico, que penetra en la masa del hormigón desde el ambiente a través de la estructura de poros, con la cal libre del propio hormigón, dando lugar a carbonato cálcico. En este proceso se produce una reducción en el pH del hormigón desde su valor inicial, del orden de 13, hasta valores por debajo de 9. Al descender el pH se pierde el efecto, propiciándose los procesos de oxidación del acero. En la figura nº 2 mostramos un caso típico de corrosión por carbonatación del hormigón de recubrimiento.
- Que los procesos de corrosión de las armaduras se desarrollen a partir de ataques de agentes agresivos (cloruros fundamentalmente) que destruyan la capa pasiva de las armaduras e inicien los procesos de corrosión. Estos agentes agresivos pueden proceder tanto del exterior (por ejemplo, arrastrados por las filtraciones desde la calzada tras el empleo de sal de deshielo) o estar presentes en la propia masa del hormigón desde el propio amasado. En la figura nº 3 mostramos una picadura, característica de los inicios de los procesos de corrosión de forma localizada por el ataque de cloruros.

Por lo tanto, en nuestras estructuras deberemos determinar, por un lado, cuáles son los puntos susceptibles de presentar mayores posibilidades de desarrollo de procesos de corrosión, y así intensificar allí las investigaciones; y por otro, conocer cuál es el origen de dichos procesos, ya que éstos definirán los procesos de reparación y/o refuerzo más adecuados en cada caso. Sobre estos puntos nos extenderemos en el siguiente apartado.

---

<sup>1</sup> El pH inicial del hormigón es del orden de 13. Con este valor del pH se produce un efecto de pasivado sobre la armadura que impide la corrosión.

<sup>2</sup> La *capa pasiva* es una película que se forma en torno a las barras en las condiciones de basicidad antes indicadas, la cual impide el acceso de aire y humedad a éstas, y por tanto la corrosión.



Inicio de la corrosión de las armaduras por carbonatación del hormigón de recubrimiento  
Figura nº 2



Obsérvense las *picaduras* en la barra por ataque de los cloruros  
Figura nº 3

### 3. PLANTEAMIENTO DE UN ESTUDIO DE DURABILIDAD

Centrándonos en el análisis de la durabilidad de las estructuras objeto de la presente comunicación, en este apartado definimos los puntos a los que se debe prestar especial atención en el planteamiento del estudio previamente a realizar otros ensayos complementarios así como los análisis de gabinete (comprobaciones de cálculo, análisis de la fisuración existente, etc.) oportunos en cada caso. Si bien el análisis de la estructura debe ser un estudio interactivo entre la documentación técnica existente, los resultados de las inspecciones que se realicen y los ensayos de caracterización de los materiales que se lleven a cabo, en una primera aproximación se podrían fijar las siguientes fases:

- Revisión y análisis de la documentación técnica existente relativa a la estructura objeto de estudio.

- Inspección detallada por un equipo técnico especializado de la estructura.
- Definición de un plan de calas en la propia estructura, supervisión e inspección de dichas calas.
- Definición de un plan de ensayos “in situ” y en Laboratorio.

A continuación expondremos de forma pormenorizada estas fases:

### **3. 1. Revisión de la documentación técnica existente**

Como primera fase para la elaboración de un estudio sobre una estructura se debe recabar toda la información posible relativa a la misma. Dicha información debe contemplar tanto el Proyecto original como, a ser posible, el Proyecto “as built”, partes de obras, informes de mantenimiento, etc.

En esta revisión se debe prestar la mayor atención a la detección de posibles puntos débiles (apoyos a media madera, juntas, anomalías históricas, reparaciones, etc.).

Paralelamente, se debe hacer un encuadramiento de la estructura en cuanto a su localización (altitud, tipo de ambiente al que está expuesta, etc.).

En aquellos casos en los que no se disponga de documentación relativa a la estructura (al menos en lo que a su definición estructural y actuaciones históricas se refiere) se deberá llevar a cabo una inspección de reconocimiento general que permita el enfoque de las siguientes fases.

### **3. 2. Inspección visual de la estructura**

Esta inspección tiene como objetivo principal recopilar todos aquellos datos no definidos a partir de la documentación técnica revisada, e identificar todos aquellos síntomas que sean indicativos de un anómalo comportamiento de la estructura o de degradación de sus materiales constituyentes. En esta inspección también se determinará si la estructura tiene otros indicios de anómalo comportamiento estructural o de su cimentación, los cuales, como ya hemos indicado, no son objeto del contenido de la presente comunicación.

De esta inspección se debe recabar toda la información necesaria para la elaboración de un plan de calas de inspección así como para el planteamiento de los ensayos a realizar.

A partir de la experiencia de los autores en la inspección de este tipo de estructuras, en las siguientes figuras detallamos algunos de los puntos más susceptibles de sufrir daños cuyo origen reside en la degradación por corrosión de las armaduras, coincidentes, como no puede ser de otra manera, con los puntos por los que se producen mayores escurrimientos de agua, y por tanto, mayores ciclos de humedad y secado que propician el desarrollo de dicha corrosión:



**Pilas y cargaderos con escurrimientos a través de las juntas de dilatación del tablero  
Figura nº 4**



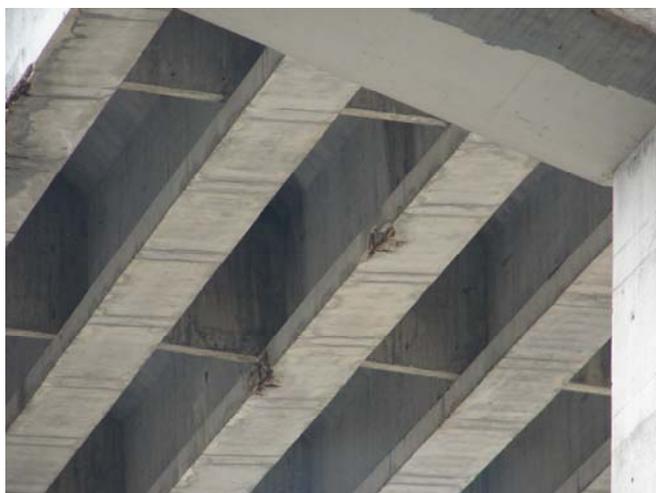
**Deterioro de una junta de dilatación de un apoyo a *media madera*, propiciando el escurrimiento del agua  
a través de la misma  
Figura nº 5**



**Deterioro de una junta de dilatación, propiciando el escurrimiento del agua a través de la misma  
Figura nº 6**



**Daños en vigas y pretilas asociados a escurrientos por los bordes del tablero  
Figura nº 7**



**Daños en vigas asociados a filtraciones a través de fisuras en el tablero  
Figura nº 8**



**Daños en vigas u otros elementos asociados a desagües no del todo adecuados  
Figura nº 9**

Aparte de los puntos indicados en los puntos anteriores, deberá prestarse especial atención a aquellos otros puntos no accesibles a la inspección visual, y que sin embargo son igualmente susceptibles de sufrir este tipo de daños (interior de vigas tipo artesa sin desagües intermedios o con éstos obturados, etc.). Estos puntos deberán ser analizados en una fase posterior mediante calas, o, en los casos que así lo precisen (como es el caso del interior de vigas cajón antes citado) mediante baroscopio.

En esta inspección deberá atenderse igualmente a la tendencia de localización de los daños en relación con las características de la estructura (presencia de juntas de dilatación, defectos en la evacuación de las aguas del tablero, posible influencia de la pendiente transversal y longitudinal de éste, etc.) con objeto de plantear las siguientes fases, tal y como hemos indicado.

### 3.3. Elaboración de un plan de calas. Apertura e inspección de calas

La realización de calas en estructura es una fase fundamental en la evaluación del estado de una estructura existente. Estas calas permiten determinar aquellos datos relativos a la configuración estructural del viaducto que pudieran no estar definidos en la documentación técnica disponible sobre la estructura; y al mismo tiempo, permiten comprobar otros aspectos relativos a la durabilidad de la misma que son básicos para establecer el alcance, trascendencia estructural y origen de los daños por corrosión en la misma. De esta manera, estas calas deben servir para realizar las siguientes mediciones:

- Determinación de los esquemas de armado y medición del diámetro residual de las armaduras

Para la determinación de los esquemas de armado, pueden emplearse sondas magnéticas en combinación con la apertura de calas, ya que en muchos casos las armaduras se encuentran dispuestas en diversas capas y dicha sonda sólo permite caracterizar la más superficial. En cuanto a la medición del diámetro nominal y residual de las barras, es conveniente el empleo de un pié de rey de al menos 0,1 mm de apreciación. En la figura nº 10 mostramos una vista de una cala realizada en estructura para la determinación del esquema de armado de una ménsula corta y para la medición de la pérdida de sección nominal de las armaduras.

Estas calas deben servir también para comprobar el estado de la armadura en puntos en los que la estructura no manifestaría daños externos, como por ejemplo en la armadura superior de las losas, oculta ésta por el pavimento, o en la conexión existente en muchos casos entre dicha losa y las vigas que conforman el vano. También servirán para obtener indicios del tipo de corrosión que afecta a la estructura (presencia de picaduras, etc.).

Especial atención debe realizarse al alcance de los procesos de corrosión a armaduras activas, por la desfavorable evolución de ésta por el conocido fenómeno de la *corrosión bajo tensión*. En la figura nº 11 mostramos una cala en la que los procesos de corrosión ya se han iniciado en la armadura activa. En la figura nº 12 recogemos una vista de una estructura que ha agotado su vida útil por corrosión de los tendones.

▪ Determinación del recubrimiento geométrico de las armaduras y de la profundidad del frente carbonatado

Los espesores de recubrimiento y del frente carbonatado de hormigón se pueden realizar mediante cinta metálica de 1 mm de apreciación. Para la determinación del frente carbonatado, previamente debe aplicarse sobre el hormigón una disolución de fenolftaleína<sup>3</sup> que produce la coloración del hormigón que se mantiene con su basicidad original (véase la figura nº 13).

Esta fase, aparte de permitir establecer la merma en las condiciones de seguridad nominales de la estructura mediante la medida de los diámetros residuales de las barras y por la pérdida de adherencia armadura-hormigón, puede servir en muchos casos para realizar un diagnóstico preliminar sobre el origen de los procesos de corrosión. Efectivamente, en casos como el de la figura nº 13 anterior en los que se observa corrosión de las armaduras sin haber alcanzado el frente carbonatado la posición de éstas, el origen más probable de los daños debe residir en la presencia de agentes agresivos como los cloruros, bien aportados desde el exterior, bien presentes en la masa de este desde la ejecución de dicho hormigón.

Por otro lado las calas en elementos estructurales también pueden servir –en aquellos casos que pudieran resultar oportunos– para valorar la eficacia de reparaciones históricas realizadas sobre la estructura.



**Vista de una cala realizada para determinar una configuración de armado y la pérdida de sección de las armaduras**

**Figura nº 10**

<sup>3</sup> Este ensayo puede realizarse con mayor precisión en laboratorio, previa extracción de testigos de hormigón endurecido y posterior rotura de éstos a tracción indirecta, si bien la determinación “in situ” correctamente realizada suele tener precisión suficiente.



Obsérvese el inicio de los procesos de corrosión en la armadura activa  
Figura nº 11



Obsérvese la rotura de los alambres de pretensado por corrosión  
Figura nº 12



Medida “in situ” de la profundidad del frente carbonatado de hormigón  
Figura nº 13

### 3.4 Realización de ensayos de Laboratorio

A partir de los resultados obtenidos en las inspecciones realizadas, será posible determinar los ensayos de Laboratorio necesarios con objeto de esclarecer las causas de los daños existentes en la estructura, así como para determinar las medidas de reparación más adecuadas. La localización de los puntos de extracción de muestras debe estar íntimamente relacionada con los puntos de realización de las calas. En la figura nº 14 mostramos el proceso de la extracción de testigos de un viaducto.

De forma esquemática algunos de los ensayos más representativos de la calidad del hormigón de cara a su durabilidad son los siguientes:

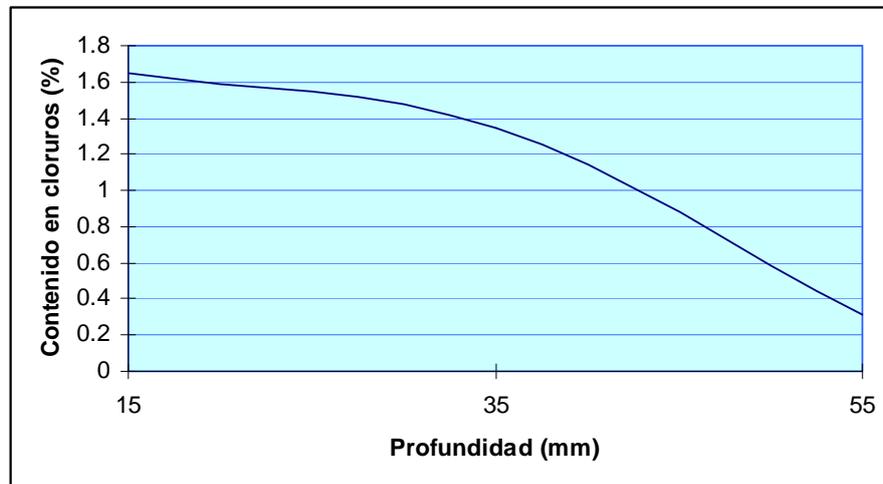
- Determinación de la resistencia a compresión simple del hormigón  
La resistencia a compresión del hormigón, más allá de la necesidad de conocimiento por motivos estructurales, es un índice general de la calidad de éste, por lo que este ensayo es siempre recomendable.
- Determinación de la porosidad, densidad, permeabilidad y contenido en cemento de dicho hormigón  
Estos índices son indicativos de la calidad de la ejecución del hormigón analizado, así como de su resistencia a la entrada de agentes agresivos. Así por ejemplo, un hormigón con porosidad y permeabilidad elevadas favorecerán el acceso de dióxido de carbono y agua a su interior, así como la entrada de aire y humedad hasta la posición de las armaduras.
- Determinación del perfil de cloruros  
En los casos en los que los daños por corrosión de las armaduras puedan tener su origen en la presencia de cloruros en torno a las barras, es determinante conocer la concentración en las distintas profundidades, de manera que se puedan establecer conclusiones sobre las condiciones de durabilidad de estas barras, así como de las medidas de reparación adecuadas. Así por ejemplo, en un perfil típico de cloruros (véase la figura nº 15) en los que el agente agresivo ha penetrado en el hormigón desde el exterior (por ejemplo, por el uso de sales fundentes), la concentración en el hormigón más superficial será muy elevada, disminuyendo de forma brusca hacia el interior del elemento. En función de los condicionantes de recubrimiento de las barras, así como de los valores establecidos por la Instrucción que sea de aplicación en cada caso con objeto de limitar el riesgo de corrosión de las armaduras, se podrá determinar la profundidad de la reparación a llevar a cabo.

Existen otros ensayos que dan información sobre la evolución previsible de los procesos de corrosión (determinación de los potenciales de corrosión, etc.), que en algunos casos podrán ser de utilidad y de aplicación.

En otros casos, la degradación de los materiales puede proceder de otras causas menos habituales en la práctica, como son por ejemplo los ataques por sulfatos o las reacciones de los álcalis del hormigón. En estos casos se deberán llevar a cabo los ensayos que resulten adecuados en cada caso, y que exceden el objeto de la presente comunicación.



Vista de los trabajos de extracción de testigos de un viaducto  
Figura nº 14



Ejemplo del perfil de cloruros obtenido en una muestra en la que el ataque procede del exterior  
Figura nº 15

#### 4. CONCLUSIONES

En la presente comunicación hemos definido los criterios que pueden seguir la inspección visual, la realización de calas y la realización de ensayos sobre los materiales constituyentes de la estructura de un viaducto con objeto de caracterizar el estado del mismo de cara a su durabilidad. Como principales conclusiones de lo anteriormente expuesto, cabría destacar lo siguiente:

- La inspección visual debe caracterizar la tipología y localización de los daños en la estructura, al ser la base de las investigaciones estructurales que se llevarán a cabo en fases posteriores.
- Las calas y ensayos a realizar sobre la estructura deben ser suficientemente representativos y completos para poder definir la trascendencia estructural de los daños que se observen, su origen y sus posibilidades de reparación y/o refuerzo.

- Dichas actuaciones de reparación están íntimamente relacionadas con el origen de los daños que se observen, por lo que no podrán ser definidas si no se ha llevado a cabo una investigación adecuada.