

INDICADORES DE SEGURIDAD Y DURABILIDAD PARA EL SEGUIMIENTO DEL DETERIORO DE ESTRUCTURAS

Andrade, C.(1); Rebolledo, N.(1); Tavares, F.(1); Capacchione, M.(1); Sotorrio, G.(1)

(1) *Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, España*

Fernández, M.J.; Millán, J.; Navareño, A.; Sanjuan, M.A.; Criado, J.E.
Gómez, J.A.; Muñoz, J.J; Bartolomé, C.; Jiménez, J.; di Capua, D.
Núñez, I.; Cienfuegos, R.; Sbert, M.; Magdics, M.; García, R.

Dentro del Programa INNPACTO fue financiado el proyecto DYNACAR entre cuyos objetivos estaba el avanzar en la definición del concepto de Indicador de Seguridad y Durabilidad que se había planteado en un proyecto anterior aplicado a instalaciones portuarias (DYNAPORT). El concepto planteado se basa en la identificación de los parámetros clave que pueden ser indicadores del deterioro o de comportamientos anómalos en estructuras existentes y que puedan ser medidos en continuo con sensores para que la información registrada pueda llegar a ser sustitutiva de inspecciones visuales periódicas. En el trabajo se presentan algunos ejemplos de actuación en puentes de ferrocarril y de carretera.

Palabras clave: hormigón, corrosión, indicador, instrumentación, sensores.

INDICATORS OF SAFETY AND DURABILITY FOR THE MONITORING OF STRUCTURAL DETERIORATION

It has been funded by the Program INNPACTO the project DYNACAR which has among its objectives the further developing of the concept of Indicator of safety and Durability studied in a previous project (DYNAPORT) related to port infrastructures. The concept is based in the identification of the key parameters which can inform on the degree of damage or anomalous performance and that could be monitored through sensors placed on the structure in order that these measurements could save the need of visual periodic inspections. In the work several examples of actions in train and road bridges are presented.

Key words: concrete, corrosion, indicator, monitoring, sensors.

INDICADORES DE SEGURIDAD Y DURABILIDAD PARA EL SEGUIMIENTO DEL DETERIORO DE ESTRUCTURAS

C. Andrade, N. Rebolledo, F. Tavares, M. Capacchione, G. Sotorrio

(Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, España)

M. Jesus Fernandez, J. Millán, A. Navareño, Sanjuan, J.E. Criado, J.A. Gomez, J.J. Muñoz, C. Bartolome, M.A., J. Jimenez, D. di Capua, I. Núñez, R. Cienfuegos, M. Sbert M. Magdics, R. Garcia

Dentro del Programa INNPACTO fue financiado el proyecto DYNACAR entre cuyos objetivos estaba el avanzar en la definición del concepto de Indicador de Seguridad y Durabilidad que se había planteado en un proyecto anterior aplicado a instalaciones portuarias (DYNAPORT). El concepto planteado se basa en la identificación de los parámetros clave que pueden ser indicadores del deterioro o de comportamientos anómalos en estructuras existentes y que puedan ser medidos en continuo con sensores para que la información registrada pueda llegar a ser sustitutiva de inspecciones visuales periódicas. En el trabajo se presentan algunos ejemplos de actuación en puentes de ferrocarril y de carretera.

Palabras Clave: hormigón, corrosión, indicador, instrumentación, sensores.

INDICATORS OF SAFETY AND DURABILITY FOR THE MONITORING OF STRUCTURAL DETERIORATION

It has been funded by the Program INNPACTO the project DYNACAR which has among its objectives the further developing of the concept of Indicator of safety and Durability studied in a previous project (DYNAPORT) related to port infrastructures. The concept is based in the identification of the key parameters which can inform on the degree of damage or anomalous performance and that could be monitored through sensors placed on the structure in order that these measurements could save the need of visual periodic inspections. In the work several examples of actions in train and road bridges are presented.

Key words: concrete, corrosion, indicator, monitoring, sensors.

Introducción

El hormigón es el material de construcción más empleado a nivel mundial debido a su relativo bajo costo y su facilidad de puesta en obra con muy diversas formas. Su empleo se ha ido haciendo creciente después de la segunda guerra mundial y sus prestaciones mecánicas no han parado de mejorar para llegar en la actualidad a ser el material que se adapta mejor a multitud de aplicaciones estructurales o simplemente funcionales. Sin embargo, su durabilidad es un aspecto que preocupa ya que ahora que se tienen unos 100 años de empleo masivo, se ha podido constatar que en ambientes especialmente agresivos, el hormigón estructural presenta la debilidad de la corrosión de su armadura (1). Este problema no está aún resuelto y aunque hay métodos para prevenirla siguen resultando no económicamente competitivos. Además las construcciones existentes son muy numerosas y los países avanzados tienen la mayoría de sus infraestructuras ya construidas por lo que el interés se centra en alargar lo más posible la vida útil de las estructuras existentes. Para ello, las administraciones públicas que son los mayores propietarios de infraestructuras de transporte, realizan programas de inspecciones periódicas para la detección temprana de daños que puedan informar tempranamente de posibles daños para paliar el efecto en la seguridad estructural y ahorrar costes de mantenimiento y reparación. Estas inspecciones están basadas en visitas periódicas de especialistas para realizar observaciones visuales y solo cuando se detectan daños se realiza una inspección más detallada y un recalcu estructural. Muy pocas estructuras en el mundo están instrumentadas de tal manera que los sensores sirvan para alertar en fase temprana del estado de posible deterioro de las estructuras (2-4). A partir de estas alarmas se deberían iniciar inspecciones como las que ahora están previstas, en concreto, en los documentos de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

Dentro de los transportes, las vías de circulación y los puertos son instalaciones de gran tradición e impacto económico en nuestro país. Por su carácter de infraestructura emblemática y situada en medios marinos de gran agresividad el Puerto de Langosteira fue elegido para la realización del proyecto DYNAPORT en el que se planteaba desarrollar tecnologías avanzadas basadas en la gestión inteligente de infraestructuras civiles nuevas y existentes. En particular para introducir el concepto de Indicadores de Seguridad y Durabilidad que permitan un seguimiento en tiempo real, desde la etapa de fabricación y durante la explotación, de estos requisitos estructurales mediante el uso de sensores conectados a una "Plataforma" de gestión.

Posteriormente estos conceptos se han aplicado a infraestructuras viarias y de ferrocarril dentro del proyecto DYNACAR, también financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, eligiendo también diversas estructuras como demostradores.

El uso de sensores en estructuras singulares (2-4) para informar sobre su comportamiento mecánico o de durabilidad empieza a ser considerado una práctica no excepcional. La dificultad se plantea en elegir dónde situar estos sensores y como gestionar la inmensa cantidad de datos que aportan y que no está definido como integrar en la fase de explotación de la infraestructura. Resulta pues urgente tratar de minimizar el número de puntos de información haciendo un esfuerzo de selección previa en las zonas críticas y de parámetros a medir. Los Indicadores tratan de aportar una solución a este problema. Los Indicadores de Seguridad y Durabilidad, deben ser muy pocos y consisten en seleccionar parámetros o características de la estructura que aporten indicios vitales de su comportamiento.

En el presente trabajo se describen los Indicadores que se han seleccionado en el Proyecto DYNACAR y algunos resultados obtenidos en algunas de las estructuras instrumentadas.

EXPERIMENTAL

Identificación de Indicadores de seguridad y durabilidad. El uso de Indicadores es relativamente novedoso y está unido a la evaluación de prestaciones o predicción de comportamiento. Los Indicadores son aquellos parámetros, con capacidad de ser medidos en forma continua mediante sensores in situ, que representan ciertas propiedades y que son necesarios conocer para evaluar el grado de cumplimiento de ciertos requisitos predefinidos de una obra o de un tramo de ella. Así pues estos Indicadores deben responder a las siguientes condiciones: a) deben ser fácilmente cuantificables, b) deben representar propiedades de especial importancia para el cumplimiento de los requisitos establecidos, c) deben servir para establecer el seguimiento de las especificaciones prescriptivas de los materiales a lo largo del tiempo y d) el cumplimiento de los requisitos debe ser especialmente sensible a la variación del valor del indicador. Además, los indicadores elegidos tienen que guardar coherencia con el esquema de cálculo seguido en el proyecto en cuanto al establecimiento de los requisitos de seguridad (fiabilidad), servicio (funcionalidad) y explotación (operatividad).

Sensores utilizados. A continuación se resumen algunos de los sensores utilizados.

- Transductores de desplazamiento potenciométrico-Mide los desplazamientos (por ejemplo: del tablero respecto del estribo) producidos por acciones ambientales (temperatura y humedad) y las acciones reológicas del material, fluencia y retracción; permite conocer los movimientos reales y compararlos con los supuestos en proyecto (Figura 1). Son de disponibilidad comercial y se eligieron para conocer el comportamiento de los movimientos ménsula-tablero y ménsula-estribo.



Figura 1. Transductor de desplazamiento potenciométrico $\pm 250\text{mm}$; b) transductor de desplazamiento potenciométrico $\pm 50\text{mm}$.
A la derecha la estación meteorológica.

- Estación meteorológica- Son también comerciales. En la figura 2 se muestra la instalada en el Puente sobre el río Bernesga y en uno de los demostradores en el jardín del Instituto.
- Sensores de corrosión y resistividad- Se muestran en la figura 3 el grupo de sensores de corrosión para el hormigón: temperatura interior del hormigón, resistividad del hormigón, potencial de corrosión y velocidad de corrosión. Estos sensores son de fabricación propia y se hacen adaptados a cada estructura y los parámetros a medir específicos. Sirven para detectar la presencia de agua en el interior del hormigón a través de la medida de la resistividad mientras que el potencial y la resistencia de polarización indican el riesgo y la cuantía de la corrosión. Los sensores de corrosión se calibran comprobando que dan valores menores de $I_{\text{corr}} = 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ cuando se embeben en hormigón sin contaminar. Como se indicó en el entregable PT 5 los valores de I_{corr} registrados eran mayores lo que se ha atribuido a la naturaleza del mortero que era de rápido fraguado.



Figura 2. Sensores de corrosión del hormigón

- Sensor de tiempo de humectación de tableros metálicos- El diseño es original del proyecto. La medida de la corrosión de un metal desnudo o pintado no se puede realizar directamente ya que necesita una interfase humectada que cambia las condiciones superficiales respecto de la capa condensada de humedad a cada HR pero es la mejor aproximación posible. Por el sensor consiste en colocar una esponja sobre el metal y un. En la figura 4 se muestran alguno de los prototipos realizados para el proyecto.



Figura 3 Sensores de tiempo de humectación de tableros metálicos.

- Sensor de humedad relativa y temperatura. Son también comerciales de la marca VAISALA. Miden la humedad ambiental y consisten en un polímero que se satura diferentes grados en cada HR. En la figura 5 se muestran tres de ellos en el demostrador utilizado en el laboratorio y a la derecha uno de ellos insertado en un dispositivo para embeberlo en un orificio dentro del hormigón que se cierra estanco. Este dispositivo es original del proyecto.

- Video-cámara. El sensor es comercial pero su aplicación es completamente original del presente proyecto. Usando marcadores (figura 6), la video cámara (IP modelo APEXIS APM-J0233-WS-IR) puede registrar los desplazamientos, en este caso de los neoprenos de apoyo del puente de la Isla de Arosa y con ello computar el recorrido total, que permite calcular la vida residual de los neoprenos. Estas vidas suelen ser de unos 10 años.

Plataforma informática centralizada de diseño dinámico- El ciclo de vida de la estructura procede del concepto y diseño de construcción, operación y uso, reparación y finalmente la fase de demolición. La Plataforma informática gestiona los datos de los sensores para anticipar decisiones durante la vida de la estructura para optimizar costes futuros y soluciones técnicas de mejoras y reparaciones. Debe ser una herramienta de diseño “dinámico” en el sentido de rediseño-continuo, que cubra toda la vida de la estructura durante los procesos específicos de construcción, mantenimiento y reparación.

En el caso del proyecto DYNAPORT se eligieron varios viaductos en los que se identificaron en cada uno los parámetros a medir que se adoptarían como Indicadores de su grado de deterioro o riesgo de daño futuro.

RESULTADOS

A modo de ejemplo se presentan a continuación las actuaciones realizadas: 1) en unos demostradores piloto expuestos en el jardín del IETcc con el fin de mostrar el funcionamiento de diversos sensores de nuevo diseño, 2) en un viaducto ferroviario en el que se han medido desplazamientos y 3) un viaducto carretero en el que se han medido las humedades del tablero con el fin de comprobar si las sales se mantienen durante todo el año entre la capa asfáltica y la superficie del tablero de hormigón

En la figura 4 se representan datos de temperatura, humedad relativa ambiental y resistividad (en amarillo). Un ejemplo de la representación de los datos del Viaducto ferroviario para los sensores de desplazamiento se muestra en la figura 5. Se pudo comprobar el funcionamiento del sistema ménsula-tablero y ménsula-estribo a lo largo del ciclo anual de temperaturas.

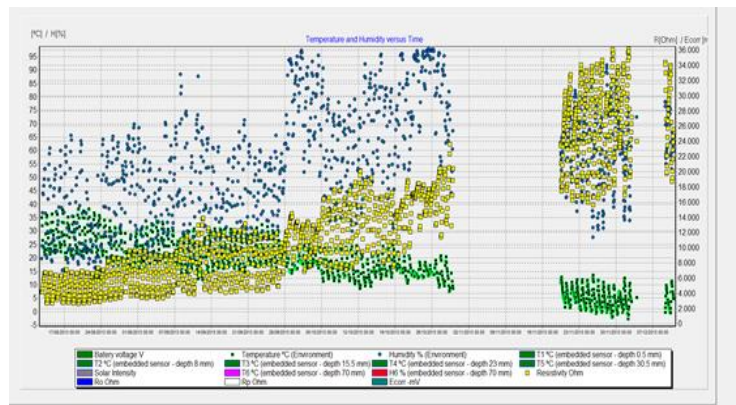


Figura 4 Representación de parámetros de sensores embebidos en una probeta en el jardín del IETcc. Temperatura, HR y resistividad.



Figura 5 Ejemplo de representación de datos de sensores de desplazamiento

Finalmente, se presentan en la figura 6 los resultados de los sensores embebidos en el tablero de un viaducto de carretera en el que se posicionaron tres sensores de HR y temperatura de la forma indicada en el diagrama a la izquierda de la figura, es decir a tres distancias de la interfase capa asfáltica-tablero de hormigón. Pudo comprobarse que esa zona permanece muy húmeda todo el año no secándose en verano

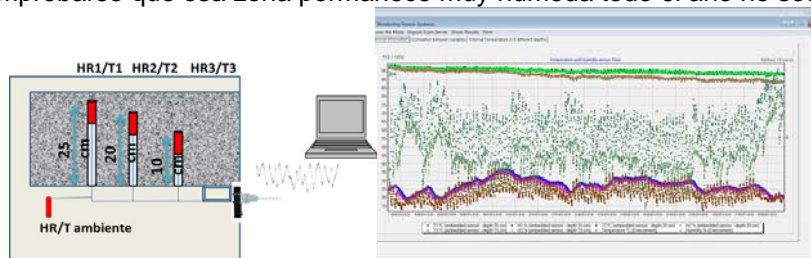


Figura 6 Representación y gestión de datos de HR/T^a desarrollado en el proyecto.

CONCLUSIONES

Se ha podido desarrollar una metodología para la actualización del cálculo dinámico o continuo de la vida útil con las siguientes fases:

1. Se han definido Indicadores de Seguridad y Durabilidad de las estructuras seleccionadas que pueden ser medidos en continuo y reflejan un comportamiento de una propiedad crítica de su durabilidad.
2. Se han adaptado sensores comerciales o se han desarrollado algunos específicos que permiten el seguimiento de los indicadores.
3. Se han desarrollado dos Plataformas de gestión informática que almacenan y visualizan los datos en tiempo real así como contiene valores-alarma y pueden incorporarse modelos que permiten actualizar y recalcular la vida útil.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ministerio de Economía y Competitividad la financiación aportada para la realización del presente Proyecto DYNACAR. Igualmente agradecen a la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento y a ADIF toda la colaboración prestada durante el proyecto.

REFERENCIAS

1. C. Andrade, I. Martínez, M. Castellote, P. Zuloaga, Some principles of service life calculation of reinforcements and in situ corrosion monitoring by sensors in the radioactive waste containers of El Cabril disposal (Spain). *Journal of Nuclear Materials*. 358 (2006) 82-95.
2. Ø. Vennesland, . – Electrochemical parameters of repaired and non repaired concrete at Gimsoystruman Bridge. *Ibidem ref (5) Solvaer-Norway*, May 1997, p.253-262.
3. Ø. Vennesland, M. Raupach, C. Andrade Recommendation of Rilem TC 154-EMC: "Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete- Measurements with embedded probes" *Materials and Structures* (2007) 40:745–758
4. Andrade, C., Sarría, J., Alonso, C. – Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere – *Cement and Concrete Composites* 24 (2002) 55-64.

Jornadas Internacionales Commemorativas del 80 aniversario del IETcc



12, 13 y 14 de noviembre de 2014
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
C/ Serrano Galvache, 4. Madrid 28033



Este CD contiene en formato PDF, las actas finales enviadas a las **Jornadas Internacionales Commemorativas del 80 Aniversario del IETcc – Conservar, Rehabilitar, Innovar.**

Las actas se pueden encontrar mediante el buscador del visor de PDF. Este le permite realizar búsquedas en base a cualquier palabra que introduzca, ya sea nombre, apellido, palabra clave, etc...

Nota: Todos los documentos que contiene este CD, se publican tal como fueron enviados, incluido los nombres de los autores. Los organizadores no asumen ninguna responsabilidad respecto a la exactitud de los textos.

jornadas internacionales Conmemorativas del 80 aniversario del IETcc



12, 13 y 14 de noviembre de 2014

SEDE

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
C/ Serrano Galvache, 4. Madrid 28033

EDITORES

Carmen Andrade
Virtudes Azorín
M^a Isabel Sánchez de Rojas
Ángela Sorli