

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## ENSAYOS DE DETECCIÓN ANTICIPADA Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE ENVEJECIMIENTO DEL HORMIGÓN

Miguel Ángel Bermúdez Odriozola<sup>1</sup>  
Pilar Alaejos Gutiérrez<sup>1</sup>

*RESUMEN: Los procesos de envejecimiento del hormigón de presas ligados a comportamientos expansivos del material son difícilmente detectables y cuantificables hasta que la evolución de la patología está muy avanzada. Sin embargo, existen diversas técnicas no destructivas que pueden aportar una información añadida que permita detectar el proceso expansivo en un estado inicial o que permita cuantificar el deterioro de las propiedades mecánicas del hormigón. Así, mediante la medida de la velocidad de transmisión de ultrasonidos se puede detectar in situ el comienzo del proceso expansivo, incluso antes de que visualmente se observen fisuras en las superficies vistas del hormigón. En la ponencia, se presentarán ejemplos de casos reales de presas donde la aplicación de esta técnica permite evaluar las zonas más afectadas por los procesos expansivos. Por otro lado, una vez detectada una patología expansiva en el hormigón, para determinar en qué modo se está viendo afectado el hormigón, es necesario extraer testigos para su estudio detallado en laboratorio. En la ponencia se expondrán casos reales donde la pérdida de rigidez del hormigón debida al proceso expansivo se detecta y cuantifica mediante la medida del módulo de elasticidad y no a través de la resistencia a compresión.*

---

<sup>1</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio Central de Estr. y Mat. (CEDEX). M. Fomento

# 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de envejecimiento del hormigón de presas ligados a comportamientos expansivos del material son difícilmente detectables y cuantificables hasta que la evolución de la patología está muy avanzada. Habitualmente se detecta el problema macroestructural de la presa mediante los sistemas de auscultación y las inspecciones visuales.

Sin embargo, existen diversas técnicas no destructivas que pueden aportar una información añadida que permita detectar el proceso expansivo en un estado inicial o que permita cuantificar el deterioro de las propiedades mecánicas del hormigón. Los principales son la medición de ultrasonidos y del módulo dinámico de elasticidad; sin embargo, no hay una relación única entre la expansión y los resultados de los ensayos, ya que éstos dependen del tipo y cantidad de árido reactivo y de las condiciones ambientales<sup>1</sup>.

Así, la medida de la velocidad de transmisión indirecta de ultrasonidos es un método no destructivo que puede emplearse para detectar in situ el comienzo del proceso expansivo, incluso antes de que visualmente se observen fisuras en las superficies vistas del hormigón. Esto es debido a que la medida de los ultrasonidos es capaz de detectar la microfisuración interna del hormigón que se produce en un estadio inicial del deterioro, antes de que el natural desarrollo de la reacción expansiva transforme estas microfisuras en macrofisuras que se puedan distinguir a simple vista.

La medición de ultrasonidos puede detectar los cambios que se producen en el hormigón afectado por la reacción álcali-sílice antes de que se origine la primera fisura, al originarse ésta y durante la posterior evolución del deterioro. También pueden controlarse los cambios en las condiciones ambientales que activan o detienen las reacciones álcali-sílice<sup>1</sup>.

También se ha comprobado que los ensayos del módulo dinámico son más sensibles que la medición de ultrasonidos para determinar si un hormigón está deteriorado<sup>1</sup>, demostrando así que los efectos de la reacción sobre la rigidez son más críticos que los efectos de la microfisuración<sup>2</sup>. Sin embargo, la cuantía y orientación de la microfisuración del hormigón es el factor que más influye en la reducción del módulo de Young<sup>3</sup>.

Un hormigón sometido a restricciones a su expansión, no desarrollará toda la microfisuración que tendría en esa dirección. Al liberar esa restricción (por ejemplo, al extraer un testigo), rápidamente se desarrolla esta microfisuración y se reduce por tanto el módulo de Young. Por eso, el valor obtenido de la velocidad de ultrasonidos de testigos medida antes y después de ser extraídos de la estructura, puede diferir hasta en un 11%<sup>3</sup>.

Al principio de la reacción la resistencia a compresión del hormigón apenas se ve afectada, pero sí disminuyen mucho el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción<sup>4,5</sup>. En ensayos realizados<sup>6</sup> sobre probetas (lo que no es aplicable a estructuras de hormigón, en las que el material adyacente supone una restricción a la libre expansión del hormigón), se ha llegado a reducciones de la resistencia a compresión hasta en un 25%, de la resistencia a tracción hasta en un 50% y del módulo de elasticidad hasta en un 60%. El efecto de la reacción sobre la resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño) es prácticamente despreciable según algunos autores, aunque otros han registrado re-

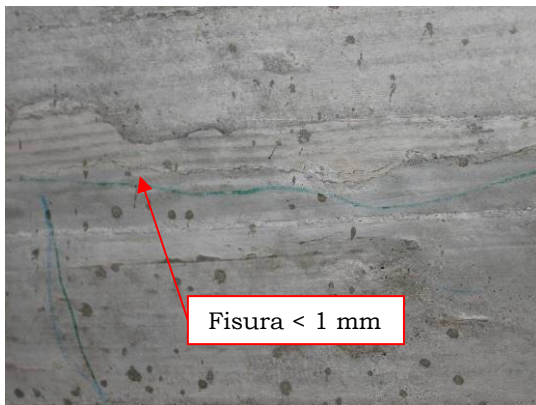
ducciones del 30 al 87%, en función del tipo de árido y la forma de realizar el ensayo<sup>7</sup>.

En todo caso, aunque inicialmente no se vea significativamente afectada, la resistencia a compresión del hormigón nos dará una idea del nivel de seguridad estructural que mantiene la presa, aún cuando se haya producido la reacción, por lo que siempre es un dato necesario para la evaluación del estado del hormigón de la presa.

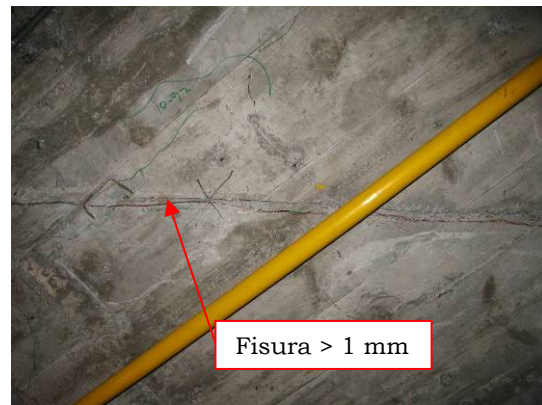
## 2. METODOLOGÍA

Para realizar una detección anticipada de la reacción álcali-sílice, se ha realizado la medida de la velocidad de transmisión de ultrasonidos a lo largo de varias galerías de una presa y en un acueducto afectados por una reacción álcali-sílice. Mediante la aplicación de esta técnica se pueden evaluar las zonas más afectadas por los procesos expansivos, incluso antes de que éstos se manifiesten fisurando la superficie del hormigón.

En el caso de la presa, en el hormigón de la galería 5 se pueden observar fisuras no muy anchas, cuya apertura no supera el milímetro (fotografía 1, resaltado en verde), a lo largo de toda su longitud. En cambio, en la galería 4 se observa una fisuración similar (en cuanto a anchura y extensión) en la zona del estribo izquierdo, pero que progresivamente se va haciendo más extensa y ancha (superior al milímetro, resaltado en rojo), según nos acercamos al estribo derecho (fotografía 2).



Fotografía 1: Fisuras en Galería 5.



Fotografía 2: Fisuras en Galería 4.

Por otro lado, una vez detectada una patología expansiva en el hormigón, para determinar en qué modo se está viendo afectado el hormigón, es necesario extraer testigos para su estudio detallado en laboratorio. Sobre estos testigos se pueden realizar diferentes ensayos normalizados, aunque en gran parte de los casos únicamente se evalúa la resistencia a compresión. Debido a que ésta permanece inalterada, suele concluirse que el hormigón no se ha visto afectado. Sin embargo, esto no es así ya que se ha comprobado que, si bien el módulo de elasticidad rápidamente sufre una reducción motivada por la pérdida de rigidez del hormigón causada por el proceso expansivo, en cambio la resistencia a compresión no varía significativamente hasta que la patología ha

progresado hasta un estadio en el que visualmente es sencillo apreciar el deterioro.

Por lo tanto, se han extraído testigos de esa misma presa y del acueducto y, en laboratorio, se ha vuelto a medir la velocidad de transmisión de ultrasonidos (para estimar el módulo de elasticidad dinámico) y la resistencia a compresión. Con el resultado del ensayo de resistencia a compresión, se ha estimado (mediante la expresión incluida en la Instrucción EHE<sup>8</sup>) el módulo de elasticidad dinámico teórico, que al ser comparado con el obtenido en el ensayo de transmisión de ultrasonidos, nos da una referencia de la afección de la reacción álcali-sílice a las propiedades mecánicas del hormigón.

Por consiguiente, los ensayos realizados sobre el hormigón han sido los siguientes:

- Resistencia a compresión sobre testigos de hormigón, siguiendo el procedimiento de ensayo de la norma UNE-EN 12390-3:2003.
- Medida de la velocidad de transmisión de ultrasonidos in situ y sobre testigos de hormigón, siguiendo el procedimiento de ensayo de la norma UNE-EN 12504-4:2006.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. DETECCIÓN ANTICIPADA DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE**

##### **3.1.1. PRESA A**

Se ha realizado la medida in situ de la velocidad de propagación de ultrasonidos en las galerías 4 y 5 de la presa A, partiendo de la entrada por el estribo derecho en cada una de ellas y tomando puntos de medida cada 10 m. Los resultados se muestran en el Gráfico 1, en el que además se ha ajustado una regresión lineal para los datos correspondientes a cada galería. Se observa que prácticamente todos los puntos de medida califican al hormigón como de calidad buena<sup>9</sup> (velocidad entre 3.600 y 4.500 m/s), salvo dos puntos, uno en cada galería, que indican un hormigón de calidad aceptable (velocidad en torno a 3.200 m/s). Estos puntos podrían representar bloques de peor calidad o bien puntos localizados de hormigón más deteriorado.

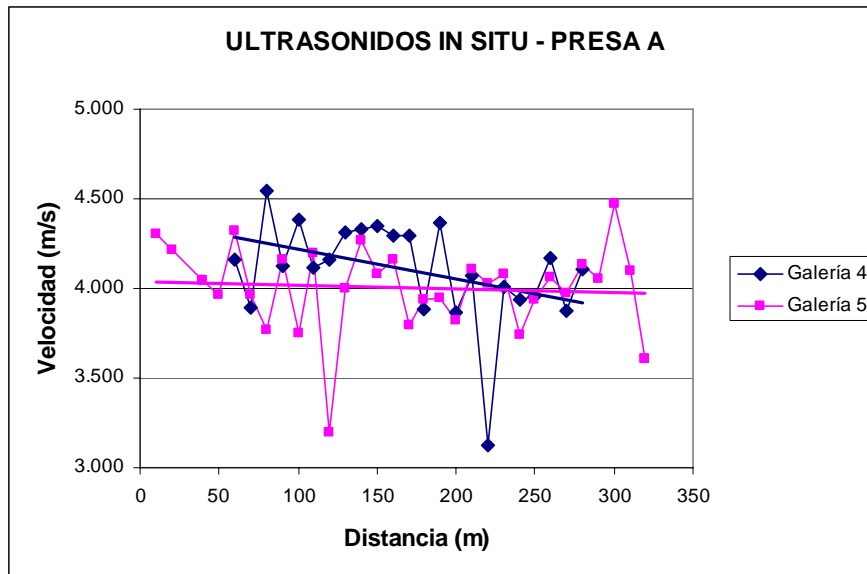


Gráfico 1: Resultados de la medida de la velocidad de ultrasonidos en dos galerías de la Presa A.

En cuanto a la interpretación global de los resultados, así como la galería 5 parece presentar una calidad más homogénea (la regresión es una recta prácticamente horizontal), en la galería 4 se observa (según la regresión lineal ajustada) que la velocidad de ultrasonidos se reduce desde el origen (en el estribo derecho) hacia el final de dicha galería (estribo izquierdo). Estos resultados concuerdan con la inspección visual realizada en las galerías, que muestra una mayor concentración de fisuras y de mayor anchura en las zonas en las que se han medido menores velocidades de transmisión de ultrasonidos (estribo derecho de la galería 4, correspondiente a la zona más deteriorada).

Realizando inspecciones periódicas (por ejemplo, anuales) en las que se midiera la velocidad de transmisión de ultrasonidos en estos mismos puntos, sería posible seguir la evolución de la reacción, de modo que un incremento del deterioro del hormigón se traduciría en una reducción de los valores de la velocidad de transmisión de ultrasonidos medidos.

### 3.1.2. ACUEDUCTO

Se ha realizado la medida in situ de la velocidad de propagación de ultrasonidos en diferentes elementos estructurales del acueducto: en las pilas, en los cabeceros y en los encepados de cimentación (ver Gráfico 2). Se observa que cada elemento estructural presenta un rango de velocidades de ultrasonidos diferente, como corresponde al empleo de hormigones de diferente calidad. A su vez, dentro de cada grupo estructural (pila, cabecero, encepado), se observan algunos puntos en particular con una menor velocidad de ultrasonidos, que son los puntos donde sería aconsejable extraer testigos para su estudio detallado en laboratorio.

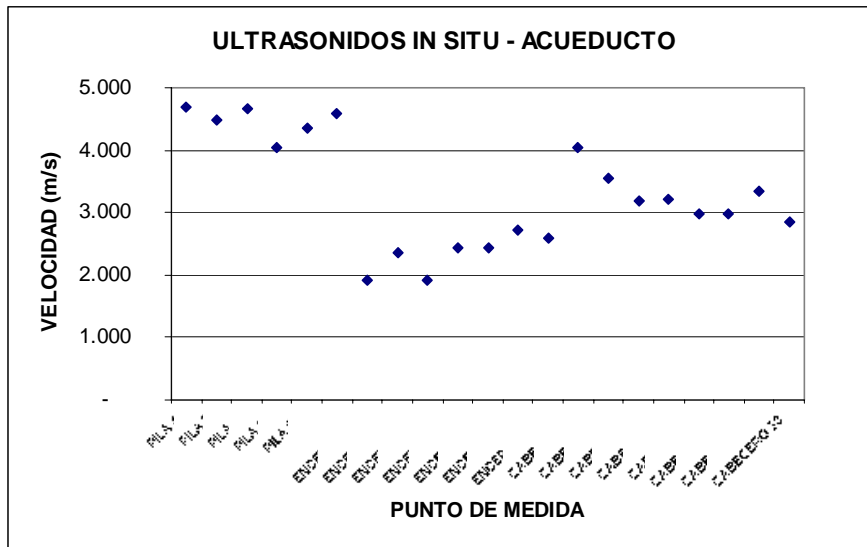


Gráfico 2: Resultados de la medida de la velocidad de ultrasonidos en el Acueducto.

### 3.2. CONTROL DEL PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL HORMIGÓN

#### 3.2.1. PRESA A

En el laboratorio se recibieron 5 testigos de hormigón procedentes de la Presa A, extraídos de cinco localizaciones diferentes de las galerías 4 y 5. Los resultados de los diferentes ensayos realizados sobre cada uno de los testigos se resumen en el siguiente cuadro:

Probeta	Velocidad Ultrasonidos (m/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Compresión (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo Dinámico Estimado (N/mm <sup>2</sup> )
PA-H1	4.466	2.481	39,7	22.992
PA -H2	4.873	2.433		27.610
PA -H3	4.600	2.392	-	21.601
PA -H4	4.954	2.426	31,4	19.317
PA -H5	4.324	2.440	26,2	21.514
PA -H6	4.400	2.399	33,9	23.950
PA -H7	4.286	2.413	38,9	23.426
PA -H8	4.960	2.460	47,2	24.203

Si calculamos teóricamente el módulo de elasticidad a partir de la resistencia a compresión obtenida, siguiendo el modelo recogido en el artículo 39.6 de la EHE, se obtendría el siguiente valor teórico:

$$E = \alpha * 10000 * \sqrt[3]{f_c}, \text{ donde } \alpha = 1,1 \text{ (árido granítico);}$$

En el siguiente gráfico se representa la relación entre el módulo de elasticidad (estático y dinámico) y la resistencia a compresión de las probetas. Se observa que, aunque hay bastante dispersión de resultados, las regresiones obtenidas a partir de los resultados del módulo dinámico son muy semejantes, y con una tendencia creciente con el nivel de resistencia del hormigón. Los módulos dinámicos calculados a partir de la medida de velocidad de ultrasonidos son además inferiores a los teóricos correspondientes a las resistencias obtenidas (aproximadamente un 40%, comparando ambas regresiones).

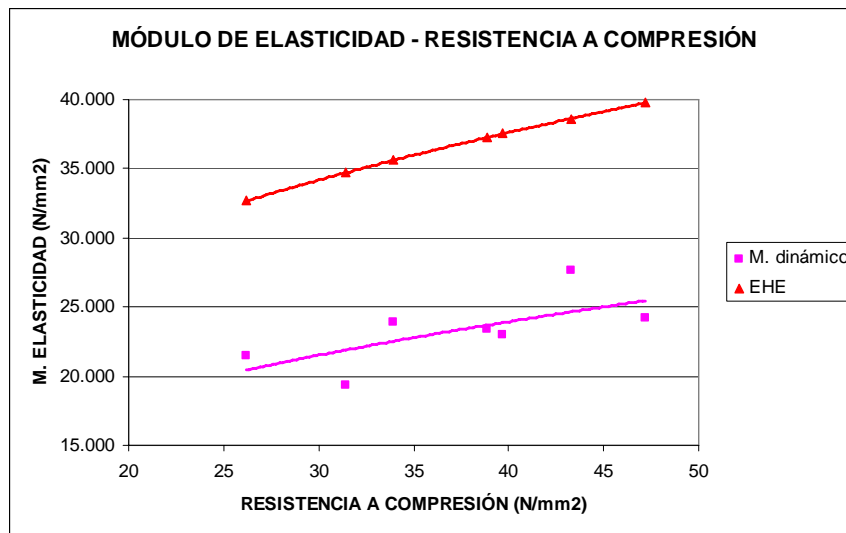


Gráfico 3: Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión para las probetas extraídas de la Presa A.

Se observa en todo caso que los valores de la resistencia a compresión son aún suficientemente elevados en los casos más desfavorables, e incluso son realmente buenos en algunas probetas (hasta 39 N/mm²).

### 3.2.2. ACUEDUCTO

En el laboratorio se recibieron 6 testigos de hormigón procedentes del Acueducto, extraídos de diferentes localizaciones (4 pilas, 1 cabecero (testigo AC-H6) y 1 encepado (testigo AC-H5)). Los resultados de los diferentes ensayos realizados sobre cada uno de los testigos se resumen en el siguiente cuadro:

Probeta	Velocidad Ultrasonidos (m/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Compresión (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo Dinámico Estimado (N/mm <sup>2</sup> )
AC-H1	4.818	2.401	54,8	34.709
AC -H2	4.279	2.422	32,2	23.972
AC -H3	4.187	2.381	45,2	26.163
AC -H4	4.639	2.350	37,0	28.308
AC -H5	3.989	2.340	35,7	20.303
AC -H6	4.563	2.410	46,0	32.798
	4.648	2.420	-	28.788

Utilizando la misma expresión anterior obtenida de la Instrucción EHE, pero ahora con  $\alpha = 1$  (árido cuarcítico), se obtiene el siguiente gráfico para los testigos extraídos de las pilas (AC-H1 a AC-H4):

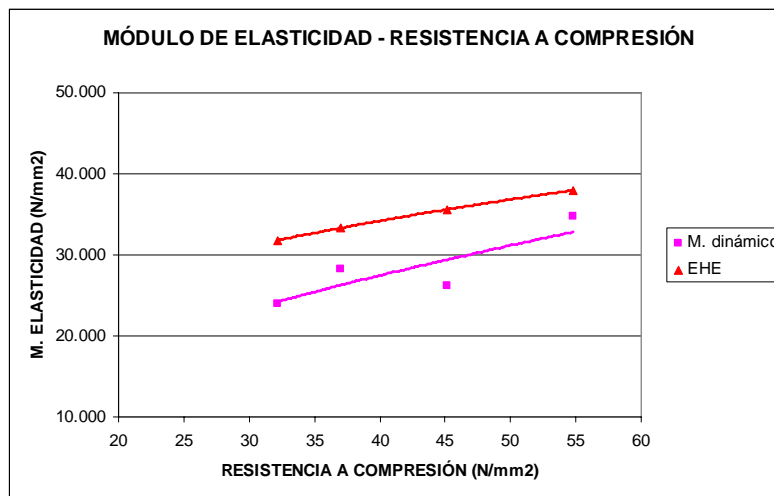


Gráfico 4: Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión para las probetas extraídas del Acueducto.

En este caso se comprueba que, aunque igualmente con cierta dispersión de resultados del ensayo del módulo dinámico, las propiedades mecánicas del hormigón de las pilas del Acueducto también se han visto afectadas por la reacción álcali-sílice, aunque en menor cuantía que en el caso anterior (reducción del módulo dinámico en torno a un 20%).

Al igual que en el caso de la presa, la resistencia a compresión ensayada en las probetas es suficientemente elevada actualmente.



## 4. CONCLUSIONES

- La medición de la velocidad de ultrasonidos es una técnica no destructiva apropiada para la detección rápida in situ de zonas más afectadas por la reacción álcali-sílice.
- Mediante la combinación de la medida de la velocidad de ultrasonidos en laboratorio y de la determinación de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad dinámico, se puede determinar cuantitativamente la afección de la reacción álcali-sílice a las propiedades mecánicas del hormigón.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. SWAMY, R.N. (1992) *The alkali-silica reaction in concrete*. Blackie and Son Ltd.
2. SWAMY, R.N. (1997) Assessment and rehabilitation of AAR-affected structures. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, 1997, pp. 427 a 440.
3. JONES, A.E.K.; CLARK, L.A. (1998) The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment. *Engineering Structures*, Vol. 20, N° 9, pp. 785 a 791.
4. CNEGP (1991) *Reacción álcali-árido en presas de hormigón. Ideas generales y recomendaciones*. Boletín 79, 1991 (Monografías 17).
5. BRE (1999) *Alkali-silica reaction in concrete. Digest 330 (Parts 1 to 4)*. BRE Centre for Concrete Construction.
6. WEST, G. *Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges*. Thomas Telford Ltd., 1996.
7. MARZOUK, H.; LANGDON, S. (2003) The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pp 549-556.
8. MINISTERIO DE FOMENTO (1998). *Instrucción de Hormigón Estructural: EHE*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
9. FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1989). *Hormigón* (pp. 364-400). Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos