

# Supervisión a la construcción del viaducto de Almonte

## *Construction supervision of the Almonte Viaduct*

Guillermo Capellán Miguel<sup>a</sup>, Javier Martínez Aparicio<sup>b</sup>,  
 Emilio Merino Rasillo<sup>b</sup> y Pascual García Arias<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Santander, España

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Madrid, España

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Idom Consulting, Engineering, Architecture, Madrid, España

Recibido el 18 de diciembre de 2017; aceptado el 8 de octubre de 2018

### RESUMEN

La nueva línea ferroviaria de Alta Velocidad Madrid-Extremadura/Talayuela-Cáceres salva, en el subtramo Embalse de Alcántara-Garro villas, el río Almonte a su llegada al embalse de Alcántara mediante un arco de hormigón de tablero superior, con una luz de 384 m. Esta gran estructura constituye un reto constructivo de primera magnitud para los trabajos de supervisión de obra, dada la necesaria calidad en la ejecución que se requiere para el éxito de la obra.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Arco, hormigón, supervisión, control, geometría, monitorización, gestión de datos.

### ABSTRACT

The new Madrid-Extremadura/Talayuela-Cáceres high-speed rail line, in its reservoir of Alcántara-Garro villas sub-section, saves River Almonte on its arrival to the reservoir by means of a concrete arch with a 384-m span. This great structure is a first-rate construction challenge for site control works, given the necessary quality required in its execution for the success of the work.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Arch, concrete, site control, geometry, monitoring, data management.

## 1. INTRODUCCIÓN

El subtramo Embalse de Alcántara-Garro villas de la nueva línea ferroviaria de Alta Velocidad Madrid-Extremadura/Talayuela-Cáceres, con tráfico mixto para pasajeros y mercancías, y una velocidad máxima de 350 km/hora comprende, además de tres viaductos de tipología y luces estándar y varias estructuras de paso menores, el paso sobre el río Almonte a su llegada al embalse de Alcántara. Este viaducto de hormigón incluye un gran arco de tablero superior, con una luz de 384 m, el cual es objeto de esta monografía.

Para la construcción de esta estructura tan singular, ADIF ha considerado la complejidad y trascendencia de una supervisión que comprenda, tanto las actividades habituales en la ejecución de un viaducto de alta velocidad, como todas aquellas a las que obligan las peculiaridades del puente.

En este artículo se exponen genéricamente las actividades de supervisión más normales que han de realizarse en un viaducto, desde los puntos 2 al 3.

Posteriormente, se entra en detalles en aquellos apartados que han resultado ser más específicos de esta estructura. Estos puntos son:

- En el punto 4, se trata de la gestión de la enorme cantidad de información recogida en los diversos sistemas de auscultación y en su explotación productiva para la obra.
- En el punto 5, se muestra cómo se ha hecho el control geométrico del arco durante su evolución constructiva.
- En el punto 6, se exponen todas las actividades especiales para el control del hormigón de altas prestaciones HA-80.

Se entresacan esos tres puntos por ser los que, de forma sobresaliente, han constituido el núcleo de las preocupaciones

\* Persona de contacto / Corresponding author.  
 Correo-e / email: [jmartinez@arenasing.com](mailto:jmartinez@arenasing.com) (Javier Martínez Aparicio)

principales de supervisión a la construcción del viaducto de Almonte.

## 2. MISIÓN DE LA SUPERVISIÓN

El objetivo mínimo de la supervisión y control de esta obra incluye todas las actuaciones necesarias para asegurar la correcta ejecución del contrato, de acuerdo con la normativa de ADIF recogida en el Sistema de Gestión de la Dirección General de grandes proyectos de Alta Velocidad, así como el cumplimiento de las condiciones impuestas en el proyecto y demás normativa vigente. El núcleo de dicho trabajo fue contratado por ADIF a la Asistencia al Control de Obra (ACO) constituida por la UTE de Arenas & Asociados e Idom Consulting, Engineering, Architecture.

Esta supervisión de la ejecución cubría no solo la vigilancia durante la construcción, sino también las actuaciones previas e inmediatamente posteriores.

Las actividades desarrolladas en esas fases fueron genéricamente las especificadas en los párrafos siguientes.

Antes de la construcción el control consistía en:

- Confirmación de la calidad de los elementos a poner en obra de acuerdo con las especificaciones.
- Adecuación a normas de todos los medios y elementos auxiliares previstos para la ejecución.
- Datos para el control y la medición posterior.

Durante la construcción el control se centraba en:

- Asegurar que la puesta en obra se realizase con arreglo a las especificaciones aprobadas en el Plan de Aseguramiento de la Calidad (PAC).
- Que el elemento recién ejecutado se encontrase protegido de cualquier fenómeno que alterase sus características finales.

En cambio, el control después de la ejecución consistía en:

- Verificación de que las características del elemento se ajustasen a las esperadas en el proyecto.
- Realización satisfactoria de todos los ensayos y pruebas finales exigidas en los pliegos.

Este planteamiento patrón se ha visto excedido en varios puntos, con el fin de lograr una respuesta proporcionada a los retos que añaden los pormenores de esta obra.

Como ejemplo más señalado de estos pasos se puede hacer mención del propio arco para el que ha sido necesario determinar, entre otras muchas cosas:

- La fórmula necesaria para el hormigón autocompactable de alta resistencia.
- Los carros de avance del arco (proyecto especial de construcción, pruebas de carga *in situ*, funcionamiento electromecánico).
- Posición del encofrado, es decir, del carro de avance, antes de hormigonar.
- Asegurar el completo relleno del espacio de cada dovela del arco desde las únicas ventanas de hormigonado que se

hallaban en la cara superior de la pieza.

- Verificación de que la evolución de las temperaturas de fraguado de la masa de hormigón de las dovelas no es perjudicial.
- Ensayos de resistencia del hormigón autocompactable de alta resistencia.
- Controles de fuerza en tirantes para que, limitando su exceso o defecto de forma efectiva, las dovelas previamente hormigonadas no se vean perjudicadas.

Se puede decir que debido a la luz del arco las comprobaciones se han debido multiplicar, no solamente porque la obra sea mayor y, por ejemplo, el número de muestras a recoger sea más grande, sino que la misma variedad de controles a poner en práctica es más numerosa y su grado de exigencia mucho más estricto. Un ejemplo es el control topográfico durante la ejecución de las dovelas del arco: se multiplican las tomas de datos ya que la situación del arco varía de forma muy rápida y, además, se requiere una alta precisión que permita verificar que los movimientos del puente se ajustan a los previstos en los cálculos teóricos.

Además, ha de señalarse que los equipos de control han debido responder con inmediatez suficiente para minimizar las alteraciones en el ritmo de ejecución, ya que la mayor parte de la obra transcurre por una especie de camino crítico (una dovela se ejecuta sobre la anterior) en donde los errores son de difícil corrección y donde la definición de tolerancias y su verificación juega un papel fundamental.

## 3. CONTEXTO DE LAS ACTIVIDADES DE SUPERVISIÓN

### 3.1. Características generales

El procedimiento de montaje se ha desarrollado con el objetivo de respetar al máximo el embalse de Alcántara, que en este punto tiene una profundidad de casi 60 m. El cumplimiento de este objetivo se logra con tramos de tablero, en ambos extremos del puente, con luces moderadas de 36 a 45 m. Estos vanos tienen la misma constitución y geometría en los tramos sobre el arco de forma que es posible utilizar el mismo sistema de cimbras autolanzables que en el resto. Además, todo el tablero se construye sin juntas a lo largo de sus 996 metros de desarrollo. Por tanto, el sistema de construcción es estándar como igualmente debe ser la supervisión que, para este tablero, tenía escasas particularidades.

Por otro lado, el arco se levanta con el método de los voladizos sucesivos. La longitud total del arco se divide en 65 segmentos ejecutados *in situ*, 32 en cada lado más un segmento clave.

Para asegurar que los segmentos se mantengan dentro de las tensiones admisibles y mantener la geometría óptima, los segmentos se cuelgan de un sistema de cables de atirantamiento durante la construcción. La familia de cables tiene 26 pares de cables de soporte. Los cables 1 a 8 están anclados a las pilas que se elevan en ambas márgenes del río. Los anclajes para los cables 9 a 26 se fijan en las torres provisionales que se prolongan en altura más allá del tablero. Las fuerzas de los cables se ajustan, paso a paso, durante la construcción, mientras que se



Figura 1. Célula de carga en anclaje al terreno.



Figura 2. Control geométrico de encofrado.

destesan algunos cables en las etapas intermedias de la construcción para evitar esfuerzos excesivos.

Una vez cerrado el arco y los pilares sobre el arco, se construyen los últimos tramos de tablero y finalmente se hormigona el pequeño tramo de cierre con uno de los sistemas de cimbra autolanzable. No existe apertura en clave, de forma que la única precompresión del arco es la proporcionada por los tirantes.

Existen algunas otras particularidades que conviene reseñar:

- Las cimentaciones del arco son enormes macizos de 7400 y 6300 m<sup>3</sup> de hormigón armado cada uno, que se empotran en el lecho rocoso. La roca circundante se inyecta con lechada de cemento para rellenar todas las fisuras y discontinuidades.
- El equilibrio global del voladizo de 192 m que constituye cada una de las mitades del arco, se logra anclándolo a las cimentaciones de las pilas adyacentes. Para ello se anclan al subsuelo con unidades de 22-26 metros de longitud pretensadas a 2000 kN (figura 1). Cada cimentación dispone de 60 de estas unidades más una pequeña reserva.
- El hormigonado del arco se hace a través de dovelas, segmento a segmento, por medio de un encofrado en voladizo que se ajusta a todas las posibles geometrías del arco: desde la dovela 1 a la 15 el arco está formado por una doble sección que varía en canto, y desde el 16 al 33 el arco es una pieza única que varía en anchura y canto (figura 2).
- Las torres de acero que conforman los pilonos auxiliares se izan desde la posición horizontal sobre el tablero, donde son construidos, hasta la vertical, gracias a una articulación.

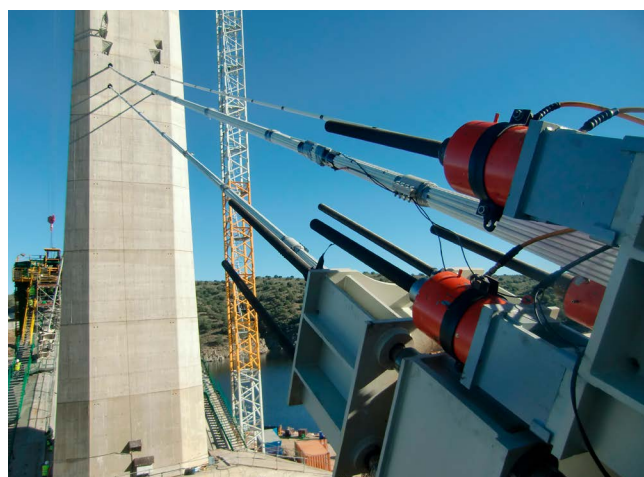


Figura 3. Doble control de fuerzas en tirantes: extensómetros y pesaje con gatos.

- Los tirantes son cables compuestos por cordones paralelos individualmente protegidos contra la corrosión. El número de cordones varía desde 15 a 53  $\Phi$  15.2 mm dependiendo del tirante. Se trata de cordones no galvanizados, ya que se logra suficiente protección con las fundas de polietileno extruido sobre ellos, más la cera de los intersticios. El anclaje de sus extremos se ejecutaba normalmente por medio de una articulación en dirección vertical para facilitar el montaje (figura 3).
- Existe una serie de operaciones de cambio del punto fijo del tablero. Al inicio de la obra se establece en ambos estribos

y, posteriormente, se debe trasladar a las pilas-pilono del sistema de atirantamiento. Finalmente, ese punto fijo se traslada a la posición definitiva, en la clave del arco.

#### 4. GESTIÓN DEL SEGUIMIENTO

La construcción de un puente con características constructivas tan particulares como el viaducto de Almonte requiere un control estructural permanente que comienza en la ejecución y debe comprender toda su vida útil. Por esta razón se implementó un programa de medición exhaustivo con casi 200 puntos de registro de datos (véanse los capítulos correspondientes de este monográfico). Estos datos tienen fundamentalmente tres orígenes:

- Sistema de instrumentación.
- Seguimiento topográfico clásico (figura 4).
- Registro de fuerzas por medio de gatos en tirantes.

Se trata de una enorme cantidad de datos que deben gestionarse adecuadamente para obtener resultados aptos para tomar, en cualquier momento, decisiones operativas correctas.

La organización global de todos estos equipos de trabajo en paralelo, el proceso de los datos, su interpretación y la inclusión de los mismos dentro de la información operativa de la obra, es compleja, debido tanto a la cantidad de los mismos como a su variedad.

##### 4.1. Necesidad de una gestión global del control

Generalmente, en las obras el uso de todos los datos registrados es difícil por exigir un trabajo intensivo. Por eso muchas veces, no se saca un aprovechamiento profundo, el cual, por otro lado, en general tampoco se necesita. Se suele hacer un uso más intenso, pero puntual de estos datos cuando se llega a operaciones críticas y limitadas en el tiempo, o cuando hay un problema real que se quiere identificar. Para ese proceder basta con disponer de uno o dos parámetros de seguimiento, que son los que se controlan de forma periódica. Las desviaciones de esos escasos parámetros respecto a las esperadas, al sobrepasar cierto nivel de alerta, obligan a la toma de decisiones operativas después de un proceso de análisis de mayor o menor complejidad.

Por ejemplo, en un puente construido por segmentos grandes de vano, habitualmente por medio de cimbra o autocimbra, el seguimiento normal es topográfico. Muchas veces el control se reduce a tomar coordenadas de la autocimbra antes de hormigonar y, si se desea verificar el acierto de lo ejecutado, comprobar después si el resultado es el esperado. Dado el caso, se propondrían correcciones para vanos siguientes, asumiendo lo ya construido, salvo que sea totalmente inaceptable. En este caso el éxito corresponde a la evaluación correcta de la rigidez de la autocimbra desde un primer momento. Al tratarse de elementos de muchos usos se suele conocer a la perfección como se han comportado con anterioridad y, si son nuevos, se tiene un conocimiento suficientemente acertado por similitud con otros semejantes.

En un puente arco construido sobre cimbra también se toma topográficamente la posición de la cimbra antes del hormigonado y se intenta prever cuanto va a descender. Si el



Figura 4. Toma de datos de posición del arco.

puente es grande, la cimbra es una estructura con entidad propia, con elementos totalmente definidos, de acero o madera, y es posible hacer los estudios necesarios para estimar con acierto su comportamiento al recibir el peso del hormigón fresco.

En un viaducto de tablero cajón ejecutado con carro de avance por dovelas sucesivas se va a controlar la obra de forma prioritariamente topográfica, tomando las coordenadas de secciones seleccionadas. Si se detecta una desviación respecto a la prevista, se asume lo construido con anterioridad y los segmentos que restan se ejecutan con una geometría corregida para minimizar el error final.

Si, además, se trata de un puente con el tablero empotrado en los estribos, su estabilidad dependerá de que no vuelquen. Habrá que añadir, como parámetro de seguimiento básico de seguridad global, si existe alguna movilización tipo vuelco de los estribos de tipo topográfico o instrumental, pero siempre contenido dentro de los datos de estudio periódico.

En un puente atirantado, por ejemplo, se debe sumar al seguimiento topográfico del tablero, el de los pilonos que podrían inclinarse. En ese caso el control de la fuerza en tirantes no suele ser principal, ya que su variabilidad no suele ser relevante, de tal manera que no suele existir la necesidad de plantear retesados a la mitad del proceso constructivo del tablero dada la estabilidad y regularidad de las cargas. Ocasionalmente se puede plantear un retesado al final para corregir todos los errores acumulados. Esto se hace así ya que la trascendencia sobre la modificación de esfuerzos en el tablero suele ser moderada.

El viaducto de Almonte alberga características de todos estos tipos de puentes (puente ejecutado con autocimbra, puente arco sobre cimbra, puente ejecutado con carro de avance,

punto empotrado en los estribos y ejecutado como un voladizo puro, puente atirantado) por lo que en su construcción han debido controlarse, como parte de su programa básico de seguimiento, todos esos parámetros. Se ha considerado que no era prudente distinguir entre esos parámetros cuál debía controlarse, relegando el resto a las tinieblas. Todos esos parámetros han sido juzgados relevantes y, por tanto, se ha considerado que debían constituir un cuerpo completo a analizar con periodicidad, frecuencia alta y profundidad suficiente.

Adicionalmente, el viaducto tiene otras particularidades que sustentan la importancia del amplio programa de seguimiento adoptado:

- El arco se construye con una forma antifunicular que no corresponde con la que realmente le conviene durante la ejecución, más propia de un atirantado, el cual sería recto y no introduciría efectos de forma relevantes. No es el caso, por lo que mantener su forma con precisión es un requisito elemental: si existe un exceso de esfuerzos de flexión negativos o positivos, se fisura y, por tanto, se degenera la rigidez del arco durante su explotación posterior.
- Se ha considerado esencial limitar las tracciones que originan la fisuración dentro de parámetros aceptables que fijen la profundidad y amplitud de las zonas fisuradas a zonas muy localizadas. Lograr esta limitación se ha encargado a los tirantes, que deben mantener el eje antifunicular futuro del puente y, además, limitar sus tracciones durante la obra. Estas dos necesidades son, en cierto grado, contradictorias, por lo que el rango de movimientos admisibles en el arco durante su construcción es una banda relativamente estrecha. Se justifica así la necesidad de un control intenso de los parámetros siguientes: tracciones en secciones del arco, fuerzas en tirantes, posición del eje del arco. Se trata de parámetros correlacionados, pero que dado el estrecho margen admitido de variación pueden todos dar un aviso o alerta durante la evolución de la estructura.

#### 4.2. El control monitorizado del viaducto

El objetivo de las labores de supervisión se plantea como un seguimiento monitorizado dirigido a cumplimentar los siguientes puntos:

- Asegurar unos errores constructivos mínimos lo que asegure esfuerzos de segundo orden menores tanto en el arco como en las pilas.
- Establecer un sistema de alerta inmediata ante incidencias que puedan tener que ver con la seguridad de la estructura durante alguna de las fases constructivas.
- Garantizar que el arco no sufre ninguna merma de su capacidad de servicio durante la fase constructiva.

Se puede decir, sin embargo, que además de esos objetivos concretos, como supervisores tenemos el convencimiento de que el conocimiento real en cada momento del estado de una estructura altamente evolutiva como es el viaducto de Almonte es prácticamente la única forma de asegurar el buen fin de la obra.

En consideración a todos estos razonamientos los parámetros básicos que se ha considerado necesario controlar y analizar para la toma de decisiones periódicas son:

- Deformada del arco.
- Deformada de los pilonos.
- Posición del carro de avance en varias subfases de cada fase de ejecución de cada dovela.
- Movimientos de los macizos de cimentación del arco.
- Movimientos de las zapatas de retenida.
- Fuerzas en tirantes.
- Temperaturas uniformes y gradientes.

La medición de dichos parámetros, junto con la definición de unos criterios de seguimiento para cada uno de ellos, permite dar paso a varios mecanismos de corrección.

Por ejemplo, en relación a la geometría del arco, para lograr un rendimiento estructural óptimo, la directriz del arco debe coincidir lo mejor posible con la línea de empujes para todas las combinaciones de carga. Para esto se ha desarrollado un procedimiento de control y corrección que se expone en el apartado 5 en donde se tiene en cuenta tanto las cargas permanentes como la influencia de las cargas térmicas, especialmente la radiación solar, la cual es decisiva para el posicionamiento de cada dovela.

#### 4.3. Coordinación de los trabajos de gestión de la construcción del arco

En esta obra, debido a su propia naturaleza, se ha considerado necesario establecer un trabajo coordinado de todos los participantes que se hallan bajo la jerarquía de la Dirección de Obra.

Se ha establecido una notable interdependencia entre los participantes: contratista principal y sus colaboradores internos y externos, asistencia al control de obra y sus equipos de obra y gabinete, y dirección de obra con sus auxiliares. El motivo de esta conexión coordinada es que todas las partes tienen una función y algo que aportar para definir, dentro del ritmo marcado por la obra, las decisiones operativas que regularmente y de forma ineludible, debían tomarse para el buen fin de la construcción.

Esta coordinación tiene su mejor materialización en el tratamiento que debe darse a los datos procedentes de múltiples medios, los cuales deben interpretarse para su transformación en recomendaciones de actuación.

Después de una primera etapa para decidir qué factores deben analizarse, bajo qué condiciones, qué sistema de monitoreo debe instalarse y cuál es el método, la frecuencia y la precisión de la medición, el personal fue organizado en tres niveles que se influyen mutuamente e interactúan continuamente (figura 5):

- Nivel 1: Registro, mantenimiento y presentación sectorial de los datos del comportamiento de la estructura. Estaría compuesto por los siguientes especialistas:
  - a. Topógrafos, los cuales hacen mediciones periódicas.
  - b. Especialistas en auscultación por medio de sensores, que aportan un registro continuo y automatizado vía internet.
  - c. Operarios de tesado de tirantes, los cuales hacen pesaje de la tracción por medio de gatos previa petición del nivel 2 o 3.

Cada uno de ellos aporta, de forma periódica predefinida, un informe con los datos registrados en el periodo de evaluación establecido dado el ritmo de evolución de la obra, es decir, la frecuencia con la que se ejecutaba una dovela de arco, en una

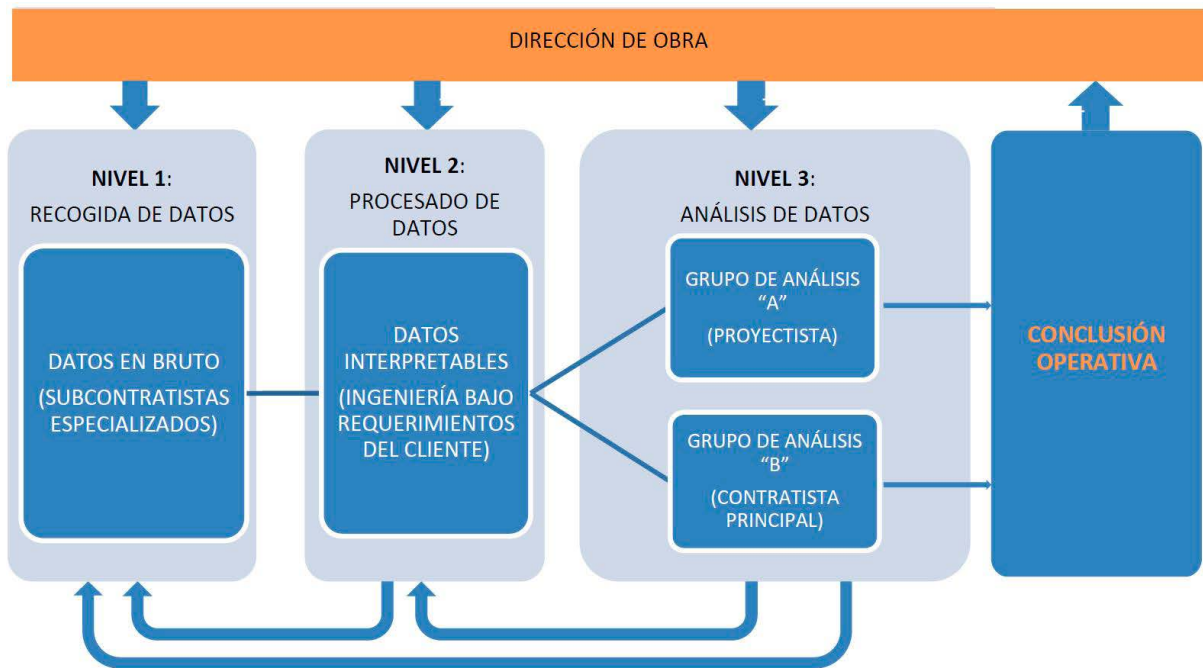


Figura 5. Diagrama de organización del tratamiento de datos para su uso efectivo en la ejecución del arco.

semana. El resultado de este nivel son varios conjuntos de datos inconexos pero ordenados de forma cronológica.

Cabe mencionar que los datos obtenidos por los sensores unidos a un sistema de adquisición de datos se han transformado automáticamente en unidades de ingeniería *in situ* y se presentan, a los tres niveles del seguimiento, vía internet, de forma esencialmente instantánea.

- Nivel 2: Es un análisis primario que elabora una evaluación inmediata de la coherencia de los datos de los tres informes antes descritos con las predicciones teóricas proporcionadas por el calculista y evalúa simultáneamente la perfección de los registros.

En este nivel se compila la medición de la estación total del topógrafo con mediciones automáticas del sistema de adquisición de datos y, cuando hay medición de tesado de tirantes, se incorpora el valor medido con los gatos de tesado. Este análisis primario fue realizado por un equipo de ingenieros independientes. El resultado final del trabajo de este grupo es una compilación de los datos que se comparan con los valores esperados, más una serie de observaciones sobre posibles mejoras en los resultados del nivel 1.

- Nivel 3: Es un análisis secundario que evalúa en profundidad la correlación con las predicciones teóricas y hace correcciones a los cálculos del modelo para mejorar la precisión de las predicciones y evaluar el origen y las consecuencias de las divergencias.

Este análisis secundario fue realizado por dos equipos de ingenieros independientes entre sí y sin relación con los otros niveles. Uno de estos equipos lo formaban los diseñadores del puente. El resultado final del trabajo de este doble equipo son recomendaciones operativas para el órgano director de la obra y, dado el caso, observaciones sobre posibles mejoras en los resultados de los niveles 1 y 2.

Al existir dos equipos de ingenieros independientes dentro del nivel 3, con herramientas de cálculo puestas a punto, contrastadas y validadas paralelamente con antelación, se ha considerado que la posibilidad de error se minimiza pues en todo momento los resultados deben ser esencialmente idénticos. En este nivel 3 se debían explicar las incidencias y aportar la consecuente recomendación, siempre de forma consensuada.

Lo habitual en una estructura de cierta complejidad es que el sistema disponga al menos, y de forma más o menos explícita, de los niveles 1 y 3, prescindiendo del análisis intermedio. Se ha comprobado, sin embargo, que al añadir el nivel intermedio se logran mejoras en la celeridad y en la calidad de los análisis. Se trata de mejoras asociadas a la inclusión de un equipo de ingenieros adicional y de la posibilidad de hacer comprobaciones directas o indirectas de forma jerárquica.

#### 4.4. Calidad y agilidad de los datos operativos

Cada uno de los niveles debe asegurar la calidad dentro de su ámbito. Por ejemplo, el equipo especialista de la auscultación con sensores debe encargarse de que todos ellos funcionen correctamente dentro de lo esperable, de forma que si hay una medida anormal deba quedar purgada y el sensor afectado reparado. Sin embargo, el nivel 1 no entra en comparación con los valores teóricos. Esta misión se reserva en exclusiva al nivel 2, que dispone de los valores esperados proporcionados por los calculistas del nivel 3. Ellos hacen el análisis comparativo que no hacen los otros niveles y alertan con inmediatez de divergencias respecto a lo esperado. Este nivel 2 también observa si los sensores están funcionando adecuadamente o si están ocultando alguna deriva. En caso de defecto en la medición, lo pone en común con los niveles 1 y 3 y, dado el caso, se corrige.

El nivel 3 toma los datos perfeccionados por el nivel 2 y saca conclusiones que pueden conducir, una vez analizados, a una modificación de los modelos de cálculo para ajustarlos a la realidad del puente en construcción o, alternativamente, a una reafirmación de los resultados teóricos establecidos hasta ese momento y, por tanto, de su previsión de evolución futura. Esto tiene como resultado una decisión operativa clara que afecta a la obra.

Esta segmentación del trabajo se hace para alcanzar una alta especialización, lo que redundará en la calidad obtenida, dado que en cada nivel queda revisado el trabajo de los inmediatamente inferiores. Además, al tratarse de un trabajo repetitivo y como la exigencia de prontitud ha sido determinante, después de un período inicial de programación específica y de puesta a punto de las distintas piezas de software, la emisión de datos desde los niveles 1 y 2 se ha acelerado, ganando en tiempo de interpretación el nivel 3.

Con este sistema se ha conseguido una gran agilidad en la toma de decisiones; de esa forma se ha logrado que la influencia en el ritmo de la obra de estos trabajos fuera de tajo sea nula, salvo cuando de forma fundamentada se ha debido proponer alguna modificación para resolver las incidencias sobrevenidas para las que el sistema de control ha sido concebido.

#### 4.5. Valores de aviso y alarma

La necesaria rapidez de respuesta ante incidencias que pueden ser relevantes y que puede requerir acción inmediata, obliga a establecer una serie de valores de aviso y alarma. Se ha buscado que estos valores queden incluidos dentro del sistema automatizado de registro de los sensores del puente. Como resultado, cualquier incidencia además de ser expuesta ante todos los agentes que participan en la obra vía internet, es enviada automáticamente a miembros concretos de los equipos a través de correo electrónico para que sea atendida a la mayor brevedad.

#### 4.6. Duplicidad en las verificaciones

Desde el inicio de la fase constructiva del proyecto se ha seguido la directriz de ADIF de que los cálculos debían llevarse de forma paralela por dos equipos. La materialización de este criterio ha dado lugar a la creación de dos grupos, uno constituido por ingenieros asociados a la Asistencia al Control de Obra de ADIF liderados por los diseñadores del viaducto (Arenas & Asociados + Idom) y otro por la Asistencia Técnica del propio contratista (FCC). En un primer momento de la obra ambos grupos han trabajado independientemente para poner en marcha dos modelos evolutivos globales del puente para hacer predicción de su comportamiento. Los programas de cálculo utilizados han sido diferentes, así como los criterios para la representación modelizada de la realidad futura del puente aún no construido.

Los resultados de ambos modelos se han comparado, de forma que las diferencias de resultados en movimientos y esfuerzos han sido contrastadas, discutidas y resueltas. Una vez que los resultados han convergido, se ha considerado que los dos equipos disponían de la herramienta mutuamente validada que sirve para hacer el seguimiento de la ejecución paso a paso del puente. Posteriormente, durante la obra se han recibido resultados del comportamiento realmente medido de la estructura, además de resultados de largo plazo de probetas de

retracción y fluencia del hormigón constituyente del puente. Con todos esos nuevos datos los modelos se han podido refinar, siempre de forma paralela, hasta alcanzar gran precisión en las previsiones.

La misma duplicidad de comprobaciones se ha seguido en el desarrollo de todos los elementos que han requerido verificación analítica: detalles adaptados a los medios realmente utilizados, estudio de contraflechas, torres provisionales, elementos auxiliares de los tirantes y de cualquier otro elemento relevante para la seguridad del puente en explotación o en construcción.

## 5. CONTROL GEOMÉTRICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ARCO

### 5.1. Exposición del problema

Para obtener un rendimiento estructural óptimo, la geometría de eje del arco debe coincidir lo más posible con la línea de presiones en todas las combinaciones de carga. Este problema de proyecto, se resuelve, desde el origen, diseñando un arco de canto suficiente. De esa forma se logra mantener la línea de empuje dentro del núcleo central de inercia y evitar tensiones de tracción para las combinaciones de carga de servicio y construcción.

Sin embargo, el arco no está rígidamente soportado durante la construcción. Es notoriamente un voladizo atirantado y, además, toda la estructura se ve afectada por la temperatura, que es un parámetro determinante de construcción: en el momento de ejecutar cada dovela del arco la estructura ha sufrido un cambio de temperatura uniforme y, adicionalmente, un gradiente. Por ejemplo, no es lo mismo hacer el hormigonado de una dovela a primera hora de la mañana, cuando el sol acaba de salir, que por la tarde cuando el soleamiento alcanza su máximo. Es decir, cada segmento del arco se hormigona a diferentes temperaturas respecto a la de cálculo de proyecto, lo que debe tener un tratamiento durante la ejecución.

### 5.2. Procedimiento de control geométrico

Se concluye que la mejor filosofía y práctica de construcción es hacer el control geométrico completo de la estructura registrando las temperaturas realmente existentes en la estructura e introducir las correcciones necesarias en las fuerzas de tirantes y en las coordenadas de posicionamiento del encofrado del carro de avance con un grado de precisión meticuloso. Naturalmente luego se ha de confiar en que el control geométrico previo al hormigonado produzca una estructura acabada con la geometría deseada, la cual será, en todo caso, comprobada posteriormente.

Por tanto, este ha sido el procedimiento general de construcción:

- Determinar el contorno geométrico de la estructura final bajo temperatura normal (fijada en 16°C en esta estructura) basado en pesos exactos para todas las partes.
- Determinar la posición sin carga de cada componente. Esto implica determinar el cambio de forma de cada

componente desde la geometría de carga muerta con la temperatura normal y corregirla con la temperatura de hormigonado en cada etapa.

- Colocación de carros de encofrado en voladizo, con la debida precisión, en cada etapa de construcción específica. Ajuste, al mismo tiempo, de las fuerzas del cable de suspensión en caso necesario.
- Verificación de la geometría resultante en cada etapa y determinación de las correcciones de la próxima colocación del encofrado o ajuste adicional de las fuerzas de apoyo.

En cualquier caso, es necesario realizar estudios continuos y exhaustivos de la estructura en construcción en cada etapa, determinando los datos geométricos y tensionales correspondientes, para preparar el plan, paso a paso, del procedimiento de montaje. Cabe señalar que, bajo ciertas condiciones de carga de construcción, sobre todo hipótesis que incluyen viento y temperatura, el puente ve expuesta la integridad estructural de alguno de sus elementos (arco, tirantes, pilonos y cimientos) y que, por tanto, debe ser convenientemente verificada. Y dichas conclusiones deben ser incluidas dentro del plan de obra concretando, por ejemplo, operaciones de retiado de tirantes para variar la fuerza que realmente se debe introducir en el arco.

La colocación del carro de encofrado en voladizo se controla mediante cuatro prismas reflectores fijados en el extremo del encofrado. De este modo, es posible determinar la posición del extremo del arco en voladizo en cualquier etapa y compararla con los cálculos teóricos. También hay puntos de medición para determinar la posición del eje del arco en cada segmento materializados en forma de prismas y dianas. De esta manera se puede controlar la estructura a lo largo de toda su longitud y en cualquier momento durante el montaje.

A medida que el arco crece, aumenta la influencia de las cargas térmicas, especialmente la radiación solar, y se hace decisiva para el posicionamiento del encofrado de dovela. Para tenerlo en cuenta se llevan a cabo todas las mediciones de posicionamiento a primera hora de la mañana cuando su influencia, en forma de gradiente, es mínima. Este requisito se prescribe obligatoriamente en el caso del control del posicionamiento del encofrado del carro de avance antes de la ejecución de la estructura de hormigonado y, también, durante su control posterior.

### 5.3. Tolerancias de construcción

Para actuar a tiempo, de manera que los valores máximos de tolerancia se alcancen y sea imposible la corrección de errores futuros adicionales, se ajustan los valores de prealarma. Estos valores están muy alejados de los que definirían el límite de integridad estructural en la construcción o de la capacidad de servicio futura y dependen de la precisión de la medición y de los movimientos esperados en el arco en construcción; dado que dichos movimientos aumentan a medida que crece el voladizo que supone el semiarco, y que el sistema se vuelve más flexible y por lo tanto más susceptible a cualquier efecto (por ejemplo, la temperatura en los cables de atirantamiento), las alarmas se definen según la dovela de la que se trate. Estas eran las tolerancias permitidas: las dovelas 1 a 15 ( $\pm 50$  mm), las dovelas 16 a 13 ( $\pm 100$ mm) y las dovelas 24 a 32 ( $\pm 180$ mm).

Cabe señalar que los errores finales de construcción nunca fueron superiores.

## 6. CONTROL DEL HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES

El hormigón autocompactable de alta resistencia HA-80 ha requerido un proceso de validación por medio de ensayos (figura 6). Se exponen sus particularidades con detalle en otro capítulo de este monográfico, por lo que en este apartado solo se van a mostrar una serie de puntos relacionados con la supervisión de obra.

### 6.1. Resultados de resistencia a compresión

Se muestran en este apartado los resultados de la resistencia a compresión de las más de 3 500 probetas elaboradas y ensayadas por la ACO durante el curso de la obra.

- Resultados a 7 días:  
Resistencia mínima: 66 MPa  
Resistencia máxima: 104 MPa  
Media: 84.48 MPa  
Desviación estándar: 7.52 MPa  
Percentil del 5%: 72 MPa
- Resultados a 28 días:  
Resistencia mínima: 80 MPa  
Resistencia máxima: 124 MPa  
Media: 95.49 MPa  
Desviación estándar: 6.90 MPa  
Percentil del 5%: 83.5 MPa
- Resultados a 56 días:  
Resistencia mínima: 82.5 MPa  
Resistencia máxima: 128.2 MPa  
Media: 101.2 MPa  
Desviación estándar: 7.56 MPa  
Percentil del 5%: 87.5 MPa



Figura 6. Comprobación de fluidez del hormigón.





Figura 7. Toma de temperaturas de fraguado de hormigón fresco.

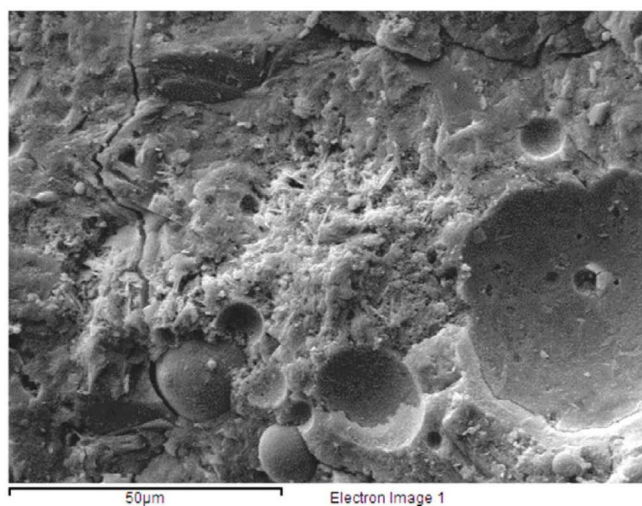


Figura 8. Escaso sulfato, en el centro, de formato no tubular. Se observa fisura atribuible al método de extracción de la muestra.

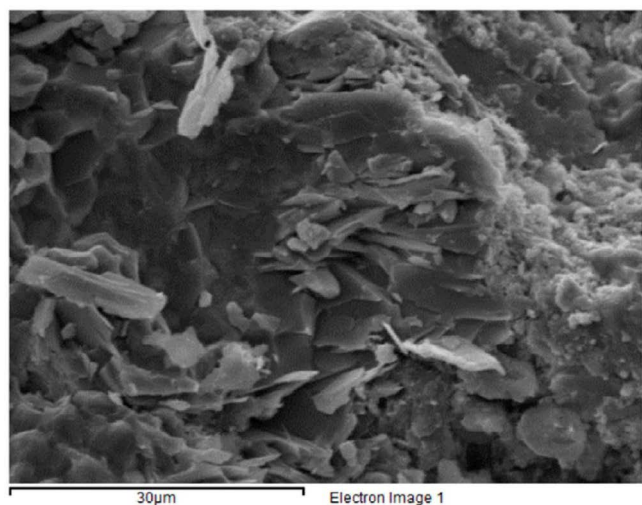


Figura 9. Reacción puzolánica de una ceniza volante.

Se observa que una vez acabada la obra se tiene garantizada una resistencia característica de más de 87.5 MPa, cuando todas las verificaciones resistentes del arco se han efectuado con 80 MPa. Esto quiere decir que la resistencia característica real del hormigón del arco es, en el conjunto de la pieza, un 9% mayor que la requerida. Se señala, sin embargo, que hay dovelas en donde la resistencia es menos holgada, aunque siempre sea mayor que la resistencia característica de 80 MPa predefinida en el proyecto.

También se constatan las altas resistencias iniciales, necesarias por proceso constructivo, en donde usualmente las últimas una o dos dovelas hormigonadas forman un voladizo libre apoyado en el último tirante instalado. Eso da lugar a compresiones importantes en las placas de anclaje de los tirantes. Adicionalmente, también se dan unas tensiones de tracción inevitables en la cara superior de la dovela en donde se halla en cuelgue del tirante, por el propio funcionamiento como voladizo libre. Cumpliendo con la exigencia de una alta resistencia a compresión del hormigón inicial, se plasma igualmente una alta resistencia a tracción, con lo que se soslaya la fisuración prematura del arco que, como se ha indicado en apartados anteriores, degenera la rigidez de la estructura para su vida futura.

## 6.2. Verificación de ausencia de formación diferida de etringita

El fenómeno de la formación diferida de etringita (DEF por sus siglas en inglés) es una forma de ataque por sulfatos que pone en riesgo la durabilidad a medio y largo plazo de las estructuras cuyo fraguado se produce a temperaturas mayores de 75°C (figura 7). En esas condiciones la etringita, denominada primaria, no se forma o, de haberse formado, se descompone.

Si el hormigón tiene un aporte de humedad suficiente la etringita se forma posteriormente dentro de los huecos de la matriz de pasta de cemento con el riesgo de romperlo debido a su expansividad.

Para evitar este riesgo se ha hecho uso de cemento con muy bajo contenido de sulfatos y aluminatos que adicionalmente tiene un calor de hidratación bajo. En caso contrario hubiera sido ineludible fijar una temperatura máxima de fraguado necesariamente menor de 75°C; conseguir este valor en condiciones de alta temperatura ambiente, de secciones masivas y del uso de cementos de alta resistencia inicial, lo que hubiera obligado a implementar un sistema totalmente garantizado de pre y post enfriamiento del hormigón.

Aun así, una vez descartada de raíz la posibilidad de formación diferida de etringita, se ha creído necesario hacer una investigación allí donde, por incidencias de la obra, pudiera existir riesgo.

Para esa determinación se han realizado observaciones microscópicas y análisis químicos elementales por medio de microscopio electrónico de barrido (figuras 8 y 9). Se verificó que los testigos tenían siempre una pasta de cemento hidratada densa y compacta confirmando la baja presencia de compuestos de azufre, de morfología no tubular, la cual es la habitual en la etringita. Además, se constató siempre la ausencia de compuestos expansivos.

**TABLA 1**  
Análisis químico de una muestra de la pasta de cemento

Elemento	% Peso	% Atómico	% Compuesto	Fórmula
Na K	2.12	2.16	2.86	Na <sub>2</sub> O
Mg K	3.30	3.19	5.48	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Al K	4.91	4.27	9.27	SiO <sub>2</sub>
Si K	16.12	13.47	34.48	
K K	3.49	2.10	4.21	K <sub>2</sub> O
Ca K	29.45	17.25	41.20	CaO
Fe K	1.95	0.82	2.50	FeO
O	38.66	56.74		
<b>Total</b>	<b>100.00</b>			

**TABLA 2**  
Análisis químico del árido ofítico

Elemento	% Peso	% Atómico	% Compuesto	Fórmula
Na K	3.69	3.68	4.97	Na <sub>2</sub> O
Al K	8.15	6.93	15.40	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si K	22.71	18.56	48.57	SiO <sub>2</sub>
Cl K	1.93	1.25	0.00	
K K	1.29	0.76	1.56	K <sub>2</sub> O
Ca K	5.87	3.36	8.21	CaO
Fe K	15.05	6.19	19.36	FeO
O	41.32	59.28		
<b>Total</b>	<b>100.00</b>			

**TABLA 3**  
Análisis químico de la arena silíce

Elemento	% Peso	% Atómico	% Compuesto	Fórmula
Si K	46.74	33.33	100.00	SiO <sub>2</sub>
O	53.26	66.67		
<b>Total</b>	<b>100.00</b>			

**TABLA 4**  
Análisis químico de ceniza volante en consolidación

Elemento	% Peso	% Atómico	% Compuesto	Fórmula
Al K	13.73	10.73	25.93	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si K	28.26	21.23	60.46	SiO <sub>2</sub>
K K	7.82	4.22	9.42	K <sub>2</sub> O
Ca K	3.00	1.58	4.19	CaO
O	47.20	62.24		
<b>Total</b>	<b>100.00</b>			

### 6.3. Elaboración y puesta en obra del hormigón. Dovela de prueba.

Las labores de supervisión a la construcción durante la elaboración y puesta en obra del hormigón han sido las que indica la normativa EHE-2008.

Sin embargo, durante la puesta en obra se ha establecido una presencia constante de vigilancia durante todo el proceso para control del vertido y colocación del hormigón de todas las dovelas. Se han cuidado especialmente los hormigonados en tiempo frío y caluroso, condiciones ambas que se dan frecuentemente en el emplazamiento del puente.

Dentro de los trabajos previos, antes de la ejecución del arco, se ha construido una dovela de prueba con los procedimientos planificados para la pieza real y con geometría y armadura muy similar (figura 10). El objeto de esta prueba ha sido:

- Detectar problemas en la puesta en obra del hormigón autocompactante HA-80, especialmente diseñado para la obra.
- Investigar posibilidades de ejecución del arco que mejoren en alguna medida los procesos constructivos.

La armadura colocada fue representativa, tanto en cuantía como en posición, de la que se colocaría en el arco real; las barras de acero pasivo fueron dispuestas de un diámetro similar a la situación más desfavorable que se iba a dar en el arco; y su posición, sobre todo la separación entre barras, era igual a la definida en planos de ejecución.

### 6.4. Juntas de hormigonado

La formación de juntas de hormigonado dentro de una dovela se ha identificado, desde el principio de la obra, como uno de los principales riesgos: solo se han considerado admisibles juntas perpendiculares a la línea de presiones del arco, es decir, a su eje longitudinal. Cualquier desviación de la prescripción, no garantiza una resistencia rasante suficiente para las cargas para las que el puente se proyecta durante su explotación.

En este sentido, se ha controlado que las aparentes juntas de hormigonado subhorizontales que se visualizan en las paredes verticales de las dovelas no constituyen una verdadera junta. Se ha comprobado que se trata de un fenómeno propio de los hormigones autocompactantes, en los que el vertido se hace en un punto y debe extenderse, por su propia fluidez, en horizontal, hasta ocupar toda la planta del hueco a hormigonar. Esto da lugar a sucesivas lenguas de hormigonado que se van superponiendo, con un cierto intervalo temporal y una cierta componente caótica debido a la viscosidad del fluido, pero que siempre se mantienen en la parte superior mientras el suministro de hormigón sea constante. Para controlar este fenómeno, que posee potencialmente la capacidad de formación de una junta, se han anulado los lapsos de interrupción del suministro de hormigón. El proceso de llenado fue continuo y sin interrupción, puesto que ayudaba a mantener el flujo, y reducía las juntas frías en la superficie y las variaciones de color.

El fenómeno de formación de lenguas superpuestas de hormigonado, que se da casi únicamente en el hormigón autocompactable, ya que en hormigón vibrado se rompe siempre la barrera entre capas horizontales al introducir el vibrador, está poco descrito en la literatura técnica y es recomendable plantear de forma sistemática su control. Este control deberá ajustarse de acuerdo con las características propias del hormigón a colocar y, también, de la geometría a rellenar. Después de un estudio inicial, materializado originalmente en la dovela de prueba, se ha considerado recomendable aumentar el número de ventanas de entrada de hormigón, e ir alternado entre ellas.

Se ha de mencionar que la velocidad de descarga del hormigón en el encofrado estará relacionada con la densidad de armado, las características de fluidez del hormigón y el posible efecto de oclusión de aire en el vertido. Por tanto, un elevado ritmo de colocación en vertical no dará tiempo suficiente al aire para subir a la superficie y poder salir, con el consecuente



Figura 10. Dovela de prueba desencofrada.

aumento del número de huecos y coqueras de aire atrapado en el hormigón y burbujas superficiales. También se limitó el recorrido del flujo a menos de 10 metros para evitar el riesgo de segregación dinámica.

Por otro lado, las juntas normales de separación entre dove-las no se han vigilado especialmente, ya que su resistencia a rasante es suficiente para, en conjunción con las altas tensiones de compresión, descartar cualquier posibilidad de deslizamiento.

Sí que se dispuso, en cambio, la conveniencia de disponer juntas con llaves, en forma de rehundidos, allí donde la carga principal no se direccionaba de forma claramente perpendicular a la interfase entre hormigón nuevo y antiguo, por ejemplo, en la unión entre tablero y arco y en los mogotes provisionales que reciben los tirantes en el dorso del arco.

## 7. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan algunos puntos que debidamente controlados durante la obra, permiten, dentro de la necesaria complejidad de la ejecución de un viaducto de gran luz, soportar una parte del éxito de una obra como la que se expone en este monográfico.

Estos puntos son, en esencia, dos:

- Asegurar una definición completa y detallada del procedimiento de construcción antes de la ejecución.
- Hacer un seguimiento estrecho con control geométrico y de materiales estricto para verificar el grado de ajuste a lo previsto.

De esta forma, utilizando las herramientas tecnológicas que ya existen, hoy en día es posible construir estructuras singulares y difíciles, en donde el mayor problema puede venir de la gestión del seguimiento. Para ello es necesaria la ayuda de una estricta planificación y una amplia previsión de las diferentes situaciones que pueden darse en la construcción según la experiencia acumulada y el estado de los conocimientos tecnológicos actuales.

## Referencias

- [1] CAPELLÁN, G., MARTÍNEZ, J., MERINO, E., GARCÍA, P. y JIMÉNEZ, P., "Viaducto de Almonte. Diseño y Control de Construcción". VII Congreso de ACHE. La Coruña, ACHE Asociación Científico-Técnica de Hormigón Estructural, pon 318.
- [2] CAPELLÁN, G., MARTÍNEZ, J., MERINO, E., GARCÍA, P. y JIMÉNEZ, P., "Viaduct over River Almonte. Site Control and Supervision". 19th Congress of IABSE. Stockholm, "Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment", pg. 1855.
- [3] FU Y., 1996. "Delayed Ettringite Formation in Portland cements Products". Thesis (Ph.D.).Dept. Civil Engineering, University of Ottawa
- [4] MATOS, L., SILVA, A.S., SOARES, D. y CANDEIAS, A., "The Application of Fluorescence Microscopy and Scanning Electron Microscopy in the Detection of Delayed Ettringite Formation in Concrete". Materials Science Forum Vols. 636-637 (2010) pp 1266-1271.
- [5] BANFILL, P.F.G., "The rheology of fresh cement and concrete – A review" Proceedings 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, May 2003
- [6] MIDDLETON, C., FIDLER, P y VARDANEGA, P. (2016). "Bridge Monitoring: A Practical Guide." Cambridge Centre for Smart Infrastructure & Construction. ICE Publishing
- [7] GAUTE, A., (2017). "Monitorización de estructuras, criterios de diseño y aplicación a la construcción y verificación del comportamiento de puentes". Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.