

ACUEDUCTO DE SEGOVIA: ESTADO DE LA CUESTION

SITUACION ACTUAL Y DESCRIPCION DE LOS ESTUDIOS Y ACTUACIONES QUE SE ESTAN LLEVANDO A CABO EN ESTE MONUMENTO

Marco Antonio Garcés Desmaison, Arquitecto*.

Francisco Jurado Jiménez, Arquitecto**.

Francisco Ruiz de la Torre, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos***

1. Antecedentes

«Los romanos sí que sabían construir y no vosotros: a ver cuando hacéis algo que dure 2000 años».

«¿Pero es verdad que el Acueducto puede caer-se?»

Entre estas dos interpelaciones, irónica la primera, incrédula la segunda, sólo media la publicación de unos cuantos titulares de prensa en el verano de 1992.

El origen inmediato de la alarma que ese cambio de actitud refleja, aparece en el informe emitido el 14 de julio de 1992 con carácter de urgencia por la Delegación Territorial de la Junta de Castilla y León, y elaborado por el Arqueólogo y el Arquitecto Territoriales, el Ingeniero Jefe de la Sección de Minas y el Director del Museo Provincial, en el que se llega al «convencimiento de que es necesaria una rápida actuación si se quieren evitar situaciones de ruina difícilmente reversibles».

En realidad la situación de deterioro del Acueducto planteada en el informe no era nueva, habiendo sido ya objeto de numerosas inspecciones y estudios, y de obras de reparación y consolidación como las llevadas a cabo a comienzos de los 70. Sin embargo, todos esos trabajos sí

coincidían en un aspecto: el proceso de deterioro del Acueducto, aunque con características en muchos casos semejantes a las ya observadas hace décadas, parece haber sufrido una aceleración en los últimos años que exige la realización de un estudio exhaustivo a partir del cual puedan decidirse, con pleno conocimiento de causa, qué medidas y actuaciones deben acometerse para repararlo y garantizar su supervivencia.

El informe citado destaca la existencia de separaciones y huecos de considerables dimensiones entre sillares y dovelas, fracturas (Foto 1), grietas (Foto 2) y pérdidas de volumen en sillares (Foto 3), subrayando la necesidad de adoptar una serie de medidas con carácter inmediato para, entre otras cosas, evitar posibles desprendimientos de fragmentos (Foto 4).

Como consecuencia directa de ello, la Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural (DGPPC) de la Consejería de Cultura y Turismo (Junta de Castilla y León), dictó inmediatamente las órdenes oportunas para que se procediera a la construcción de un andamio de inspección y apeo en los cuatro vanos centrales del Acueducto (Foto 5), cuya instalación comenzó ese mismo mes de julio finalizándose en agosto.

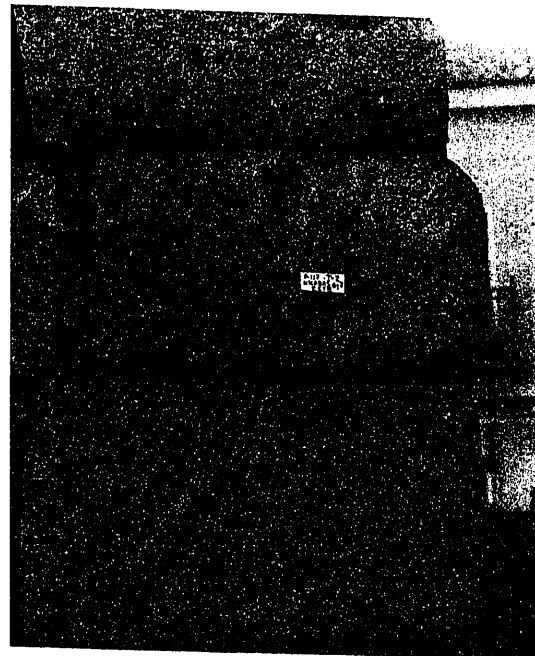
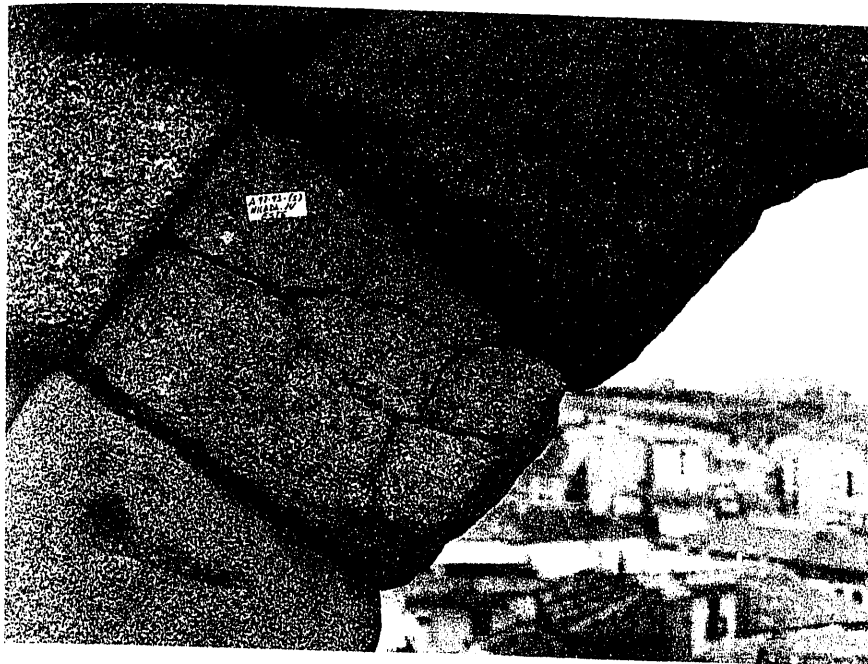
Durante esos días se sucedieron las reuniones y visitas al Acueducto con participación de la citada DGPPC y de su Servicio de Restauración, del Servicio Territorial de Segovia de la Junta de Castilla y León, del Ayuntamiento de la ciudad, y de GEOCISA como empresa ya conocedora de la situación reciente del Acueducto a través del estudio realizado en 1986-87.

A raíz de todas las reuniones se presentó un Plan de Trabajo elaborado por el mencionado Servicio de Restauración, que contemplaba una actuación en seis fases.

* Jefe del Servicio de Restauración de la Consejería de Cultura de Castilla y León.

** Profesor Asociado del Departamento de Estructuras de la E.T.S.A.M. Y es el arquitecto encargado de la dirección de los trabajos previos y de la realización de la diagnosis y propuesta de intervención en el Acueducto.

*** Director del Laboratorio «GEOCISA», empresa que actualmente realiza todos los estudios y análisis reseñados en este artículo.



Fotos 1 y 2.

La 1.^a fase tenía carácter de emergencia y planteaba la construcción de los andamiajes y apeos ya citados, y el inicio de recopilación de la documentación existente.

Las fases 2.^a y 3.^a contemplaban la realización de un reconocimiento general y de la reparación de 1973 en particular, así como el desarrollo de distintos análisis y tomas de datos a partir de los cuales se pudiera concluir en un primer diagnóstico la situación del Acueducto y sus causas.

En las fases 4.^a y 5.^a se elaboraría el diagnóstico general y síntesis de toda la información recogida, redactándose el proyecto de obras de reparación y consolidación que serían ejecutadas en la fase 6.^a.

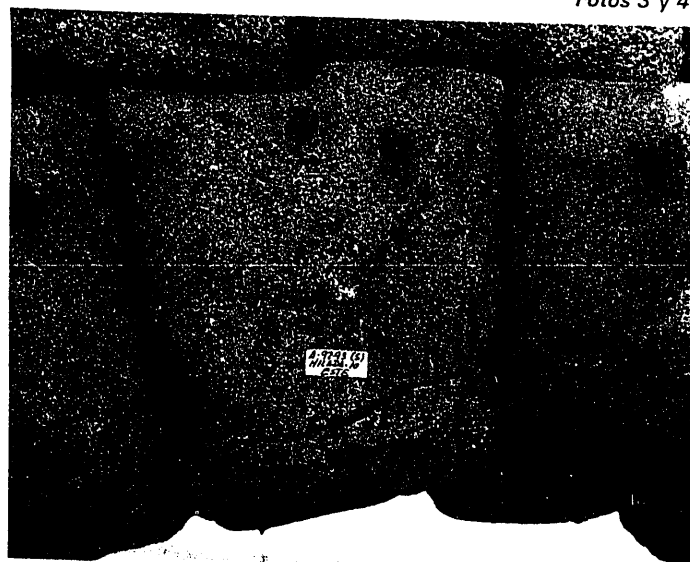
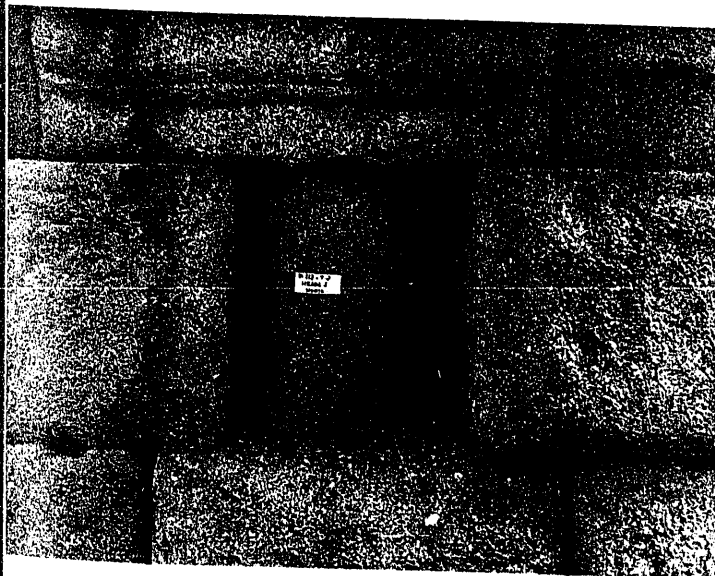
Este Plan inicial fue asumido por todos los organismos afectados y se inició su puesta en marcha inmediata con la adopción de una serie de medidas urgentes, como la colocación de los andamios y apeos ya citados o el corte del tráfico bajo

el Acueducto. Los apeos colocados tienen como finalidad principal evitar el posible desprendimiento de fragmentos de piedra, que aunque no afectasen a la estabilidad global del monumento, sí inciden en su integridad y constituyen obviamente un peligro para las personas.

El objeto del presente artículo es presentar las actuaciones llevadas a cabo hasta el momento o de próxima realización, desarrolladas dentro de este Plan, no pretendiéndose avanzar conclusiones ni diagnósticos definitivos, evidentemente imposibles, mientras no se hayan finalizado todos los estudios planteados.

2. Planteamiento de la actuación

La elaboración de este Plan de Trabajo (Fig. 1) y su modificación y perfeccionamiento posterior a medida que se va desarrollando, están orienta-



Fotos 3 y 4.

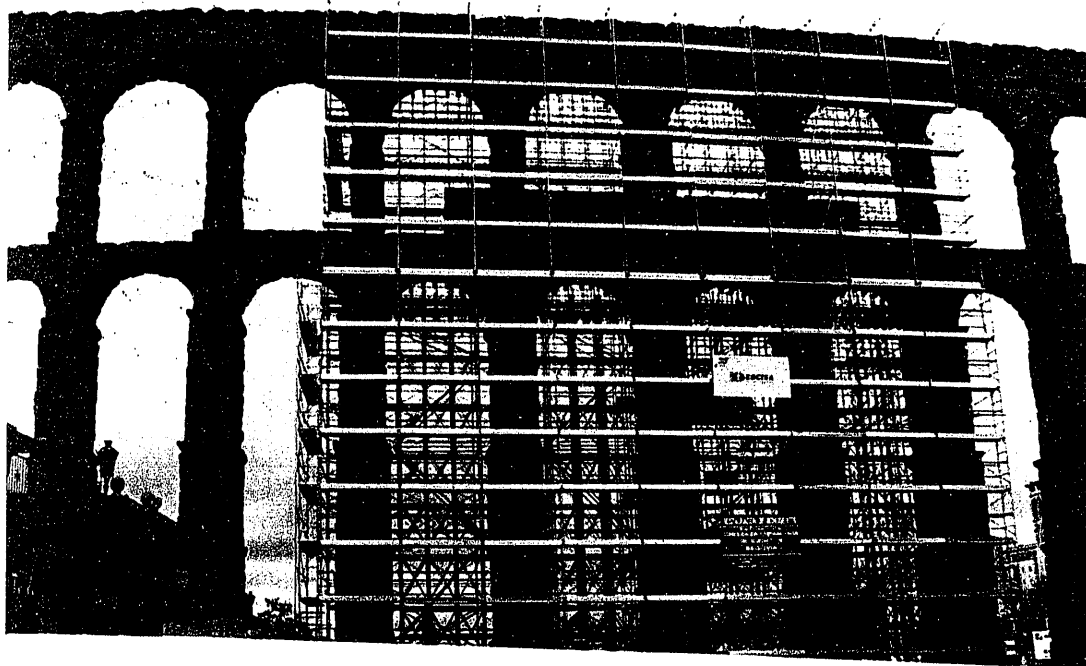


Foto 5.

dos siempre por una misma idea básica de partida:

«es necesario desarrollar el máximo de estudios y con la mayor profundidad posible, para lograr minimizar las actuaciones necesarias».

Pero al mismo tiempo este planteamiento debe ser compatible con el cumplimiento de sus objetivos básicos, centrados en la necesidad de:

- Evaluación de la situación en que se encuentra actualmente el monumento.

- Análisis de las posibles causas que han llevado a esa situación a través del estudio de los posibles mecanismos de deterioro.

- Estudio de las posibles soluciones a adoptar, tanto para evitar agentes agresivos sobre el Acueducto como para reparar los daños ya existentes y consolidarlo y protegerlo de cara al futuro.

- Redacción de tres proyectos correspondientes a los tres tipos de acciones directas que se prevé será necesario acometer sobre el Acueducto:

- Proyecto de consolidación y reparación de zonas dañadas gravemente y de intervención urgente.

- Proyecto de Protección para evitar el avance del deterioro en zonas no dañadas o deterioradas levemente.

- Proyecto de Conservación, Mantenimiento y Seguimiento, cuya necesidad parte del convencimiento de que en un monumento de este tipo no se trata de efectuar reparaciones más o menos costosas cada cierto número de años, sino de establecer un programa sistemático de auscultación y de mantenimiento con inversiones bastante menores pero constantes.

Una vez llevadas a cabo aquellas actuaciones que se decidió debían acometerse con urgencia (colocación de apeos de los arcos en la zona del sotabanco y andamios para su inspección) se han iniciado los estudios correspondientes al análisis

del estado actual del Acueducto, de los posibles mecanismos de deterioro que han podido conducir a esa situación, y de las posibles soluciones a adoptar, estando previsto finalizarlas y proceder a la redacción de los Proyectos citados dentro de este año 1993.

Los apartados que siguen describen las líneas generales de los estudios ya realizados o en fase de ejecución. Para ello se ha optado por agruparlos, en dos grandes apartados dedicados a:

- Actividades para evaluar la situación actual del Acueducto.

Figura 1.

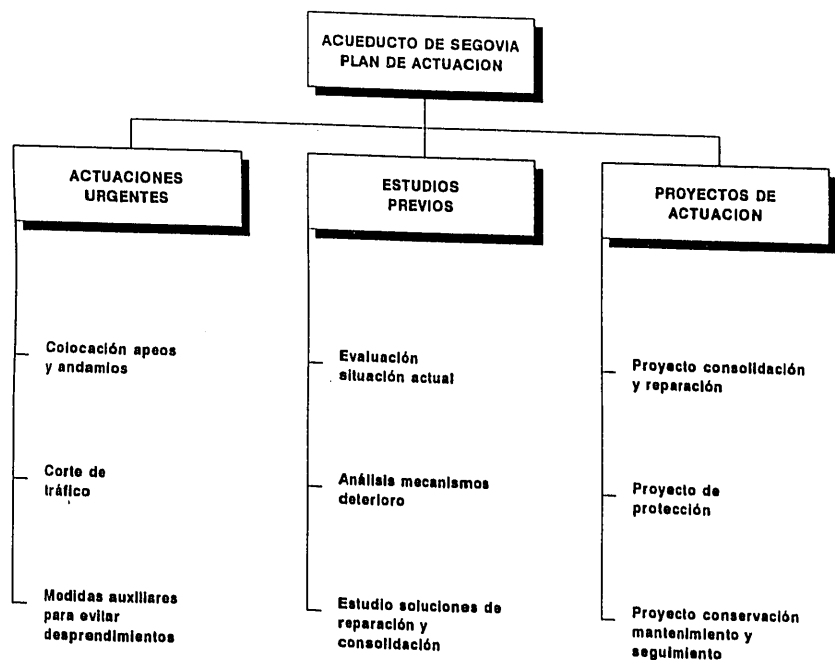
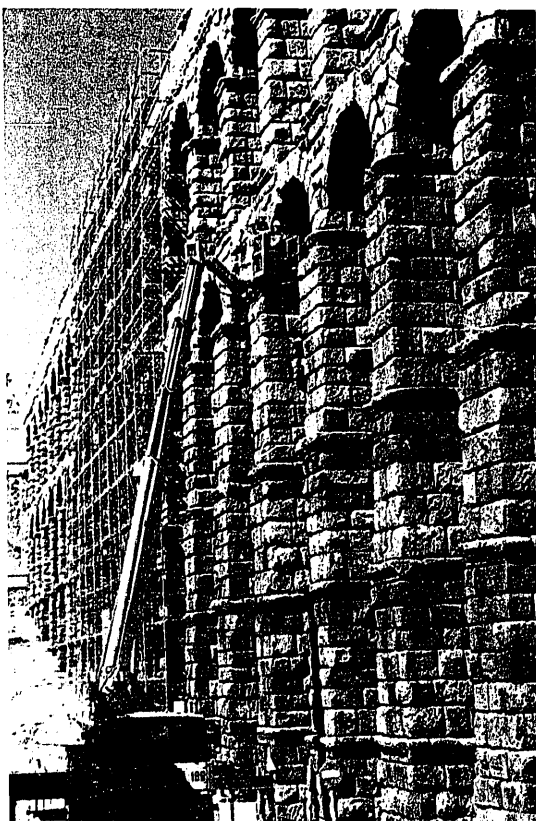


Foto 6.



■ Estudio de los mecanismos de deterioro.

Aunque obviamente bastantes aspectos de los estudios comentados tienen influencia en los dos aspectos, así como en el tercero antes citado de estudio de posibles soluciones.

3. Actividades para evaluar la situación actual del Acueducto

3.1. Reconocimiento general del Acueducto

Como se ha comentado anteriormente, la alarma generada en 1992 sobre la situación del Acueducto, aunque reincidiendo sobre daños y problemas ya detectados con anterioridad, tiene su origen en la observación del estado de los arcos de la zona del sotabanco al examinarlos de cerca con motivo de un estudio arqueológico realizado sobre el mismo.

La cuestión que inmediatamente se plantea es la necesidad de tener un conocimiento más preciso de la situación del resto del Acueducto. Si el estado de los arcos centrales ha hecho aconsejable proceder a un pseudo-apeo de los mismos destinado a evitar posibles desprendimientos de fragmentos, ¿No será necesario recurrir a medidas similares en otras zonas del Acueducto?

Se hacía, por tanto, imprescindible un reconocimiento general de toda la parte final del Acueducto orientada según las siguientes pautas generales:

■ El objetivo básico no es efectuar una inspección exhaustiva sillar por sillar, pero sí detectar

aquellos problemas más graves que, al igual que en la zona del sotabanco, podían exigir la adopción de medidas urgentes del tipo de las aplicadas en los arcos centrales, por suponer un compromiso, aunque fuera local, desde el punto de vista de estabilidad (peligro de desprendimiento de fragmentos o caída de piezas).

■ Debía desarrollarse en un tiempo lo más breve posible, pero cubriendo todos aquellos aspectos que pudieran ser importantes.

■ Se trataba de efectuar una inspección *visual*. No era objeto de esta actuación la realización de estudios y ensayos para analizar las razones de los daños observados.

■ El propio carácter de inspección visual exigía el cumplimiento de las tres condiciones básicas inherentes a reconocimientos de esa naturaleza: es necesario *poder ver*, *saber ver* y definir claramente *qué se quiere ver*.

■ El reconocimiento debía efectuarse con la ayuda de medios auxiliares (Foto 6) que facilitasen el acceso a las partes altas del Acueducto para que el inspector pudiera observar de cerca los posibles problemas existentes.

Teniendo en cuenta el objetivo básico del examen, se decidió centrarlo en el reconocimiento de arcos y tímpanos, completándolo con la descripción de las alteraciones más relevantes observadas en los sillares de las pilas.

Antes del inicio de los trabajos se elaboró una ficha-tipo para recoger la siguiente información de cada arco y tímpano:

■ Croquis de planta del intradós del arco, reflejando en el mismo los desperfectos fundamentales observados y la composición de las distintas dovelas.

■ Croquis de los alzados del arco por ambas caras.

Croquis de alzado de los dos tímpanos asociados a la pila de numeración menor que delimita el arco objeto de la ficha, reflejando los desperfectos fundamentales detectados y la composición de las diferentes hiladas de sillares.

■ Deterioros más importantes detectados en la pila asociada a esos tímpanos, con indicación del sillar en que se localizan.

Como ayuda para poder reflejar en la mencionada ficha los daños fundamentales, se definió previamente una relación de los defectos más importantes que ya se habían detectado en los arcos centrales y en las observaciones y visitas previas efectuadas con motivo de la realización de los apeos, estableciendo una nomenclatura para poder reflejarlos en los croquis sin sobrecargarlos excesivamente:

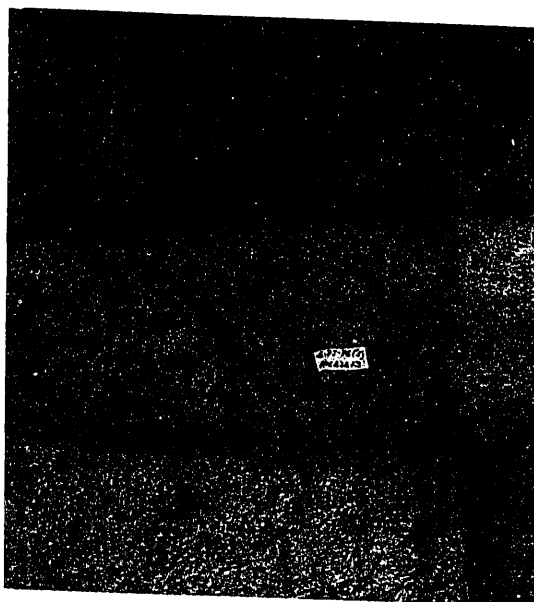
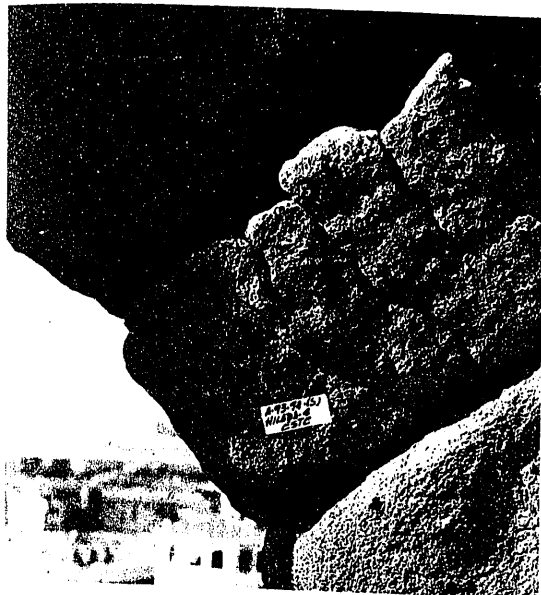
— Rotura de sillar (Foto 7) (reflejando en croquis su forma aproximada).

— Grieta en sillar (Foto 8) (dibujando en croquis su forma aproximada).

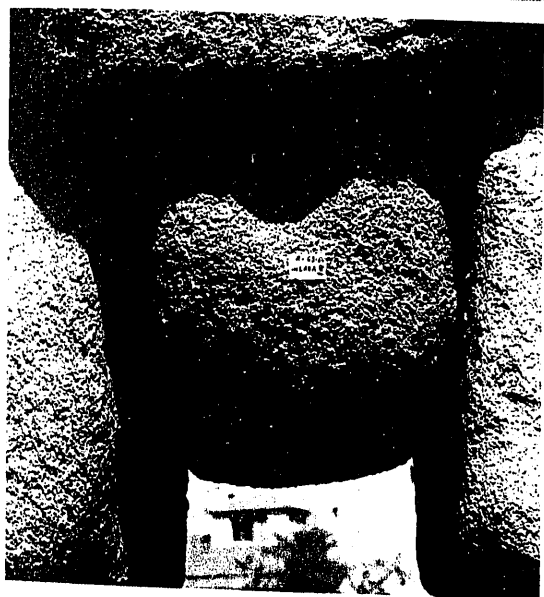
— Pérdida de volumen notable en aristas, esquinas o caras del sillar (Foto 9).

— Erosión superficial (Foto 10), exfoliaciones o descamaciones (Foto 11), y desconchamientos (meteorización).

— Juntas entre sillares con relleno vegetal (Foto 12), animal o mineral, o con espacios huecos entre sillares de notables dimensiones.



Fotos 7 y 8.



Fotos 9 y 10.



Fotos 11 y 12.

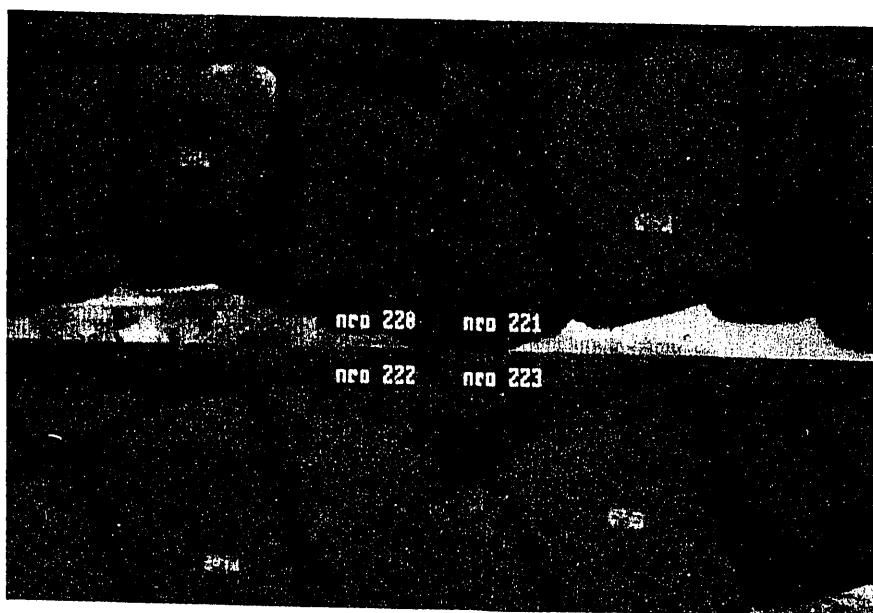


Foto 13.

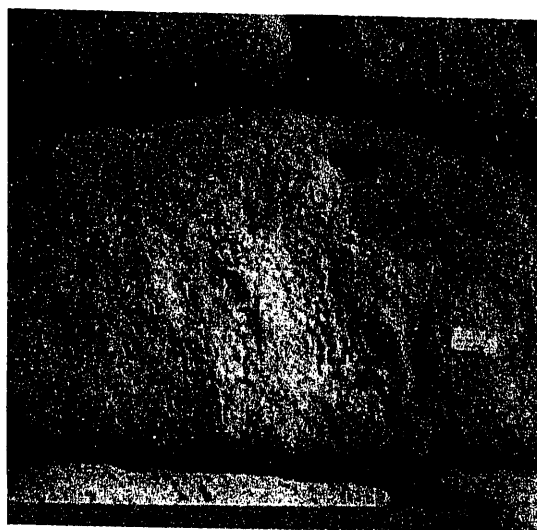
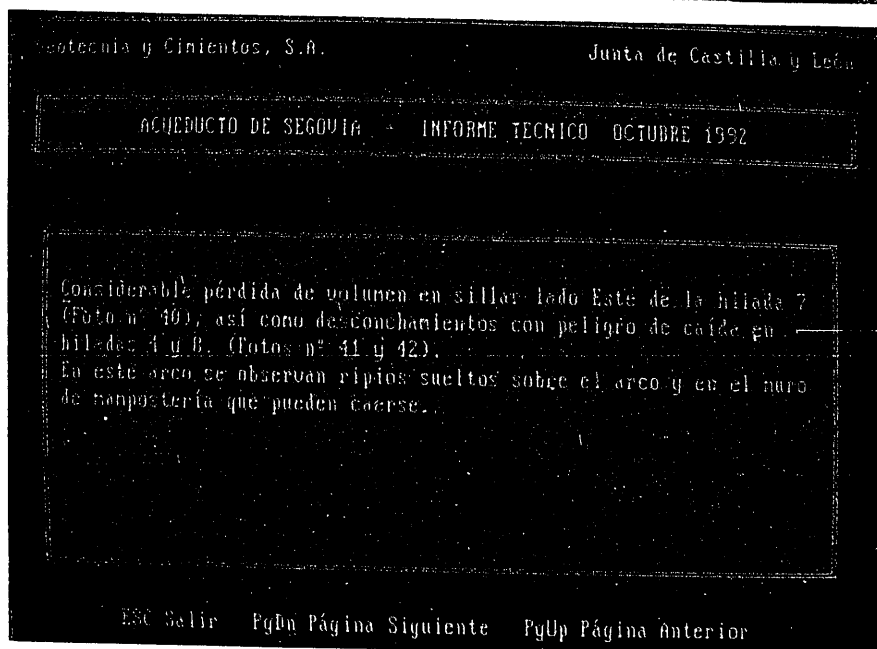


Foto 14.



- Manchas de humedades.
- Desplazamiento relativo entre sillares apreciable (por encima de ± 5 cms.).
- Indicación de la existencia de reparaciones efectuadas en 1970-73 según pudieran o no apreciarse.

Para las pilas la relación de desperfectos y nomenclatura empleada era la misma, indicando en la ficha el tipo de defecto existente y la ubicación del mismo dentro del pilar según los criterios resumidos en el croquis de la Fig. 2 (n.º de pilar, tramo, cara de la pila, hilada y posición dentro de la misma).

La información se completaba con la ilustración fotográfica de los deterioros que, a juicio del inspector, fueran más importantes.

Para garantizar al máximo la uniformidad en la recogida de datos, se inició la campaña con un sólo equipo de inspección para después de una semana de rodaje, reexaminar los criterios inicialmente adoptados, y poner en marcha un segundo equipo, pero intercambiando los miembros de ambos equipos durante una semana, de forma que los componentes de este segundo equipo se rodaran durante un tiempo junto a las personas que habían iniciado el trabajo y pudieran asimilar los mismos criterios.

Como resultado de la inspección se elaboró un informe en el que se agrupaban, arco por arco, la ficha debidamente cumplimentada y las fotografías ilustrativas de los desperfectos más significativos de ese arco, y de la pila y tímpanos a él asociada. En total se han recogido casi 700 fotografías acompañando a las fichas de 92 arcos (desde el 60-61 al 118-Estribo 2, siendo dobles desde el arco 75-76 al arco 117-118 (Fig. 3).

3.2. Base de datos

La base de datos surge de la necesidad de contar con una herramienta auxiliar que permita tratar de forma ordenada la gran cantidad de información generada por el reconocimiento general del Acueducto, aunque de inmediato se amplía el horizonte inicial, para desarrollar una estructura informática que facilite el estudio, control, y seguimiento futuro de la situación del monumento, permitiendo:

- Acceder de forma rápida a los distintos elementos para su consulta y/o actualización.
- Integrar distintos tipos de información (fotografías, texto, informes técnicos, etc.).
- Presentación de resultados al usuario final de modo claro y atractivo.

Cualquier información que se quiera incorporar a la base de datos se referirá a un determinado elemento que queda identificado a través de su pertenencia a una zona definida (arco, pilar, tímpano, imposta,...) y con una ubicación determinada en la misma (cara Norte, Sur, Este u Oeste, superior o inferior, hilada y posición dentro de la misma, etc.).

Este sistema de pseudo-coordenadas, permite definir inequívocamente cualquier elemento. La información principal asociada a éste es el informe

procedente del reconocimiento general efectuado (texto) que es complementada con la imagen (fotografías o croquis). Las tres informaciones (elementos y coordenadas, texto asociado, y fotografías) se integran en una Base de Datos Técnica (BDT) a la que se puede acceder por imagen y por elemento.

En el acceso por elemento se localiza el mismo por su ubicación y se visualiza la información asociada (texto e imágenes), pudiendo obtenerse cuatro tipos de presentaciones en pantalla:

- Imagen principal y descripción del elemento.
- Imágenes (de 4 en 4) asociadas al elemento (Foto 13).
- Ampliación (zoom) de cualquiera de las imágenes asociadas (Foto 14).
- Informe técnico (texto) asociado al elemento (Foto 15).

El acceso por imágenes permite llegar a las mismas cuatro pantallas a partir del número de la imagen a visualizar.

Ambos tipos de acceso disponen de menús de ayuda que guían al usuario sobre los posibles caminos a seguir, y le muestran otros tipos de informaciones asociadas al elemento.

Esta BDT servirá para la generación de otra de tipo general (BDG) que tendrá como información de partida la misma contenida en la BDT, y podrá recibir, además, cualquier otra que provenga de Estudios técnicos específicos, Informes de seguimiento, Actuaciones especiales de mantenimiento o reparación, etcétera.

De este modo se podrá disponer de una Base de Datos que, actualizada y mantenida oportunamente, integre de modo puntual e histórico las actuaciones llevadas a cabo en cualquier fecha sobre cualquier elemento o zona del Acueducto.

CROQUIS DE NOMENCLATURA

Figura 2.

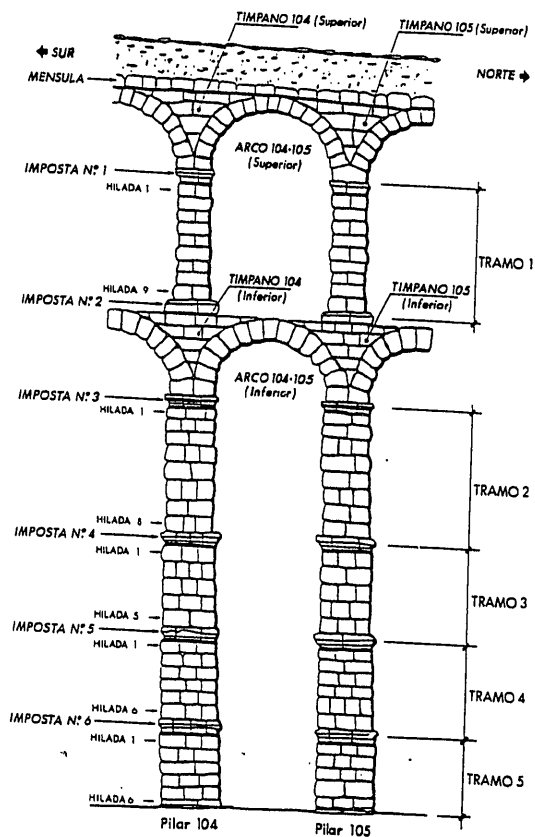


Figura 3.

ESQUEMA DE LA ZONA INSPECCIONADA Y NUMERACION DE LAS PILAS

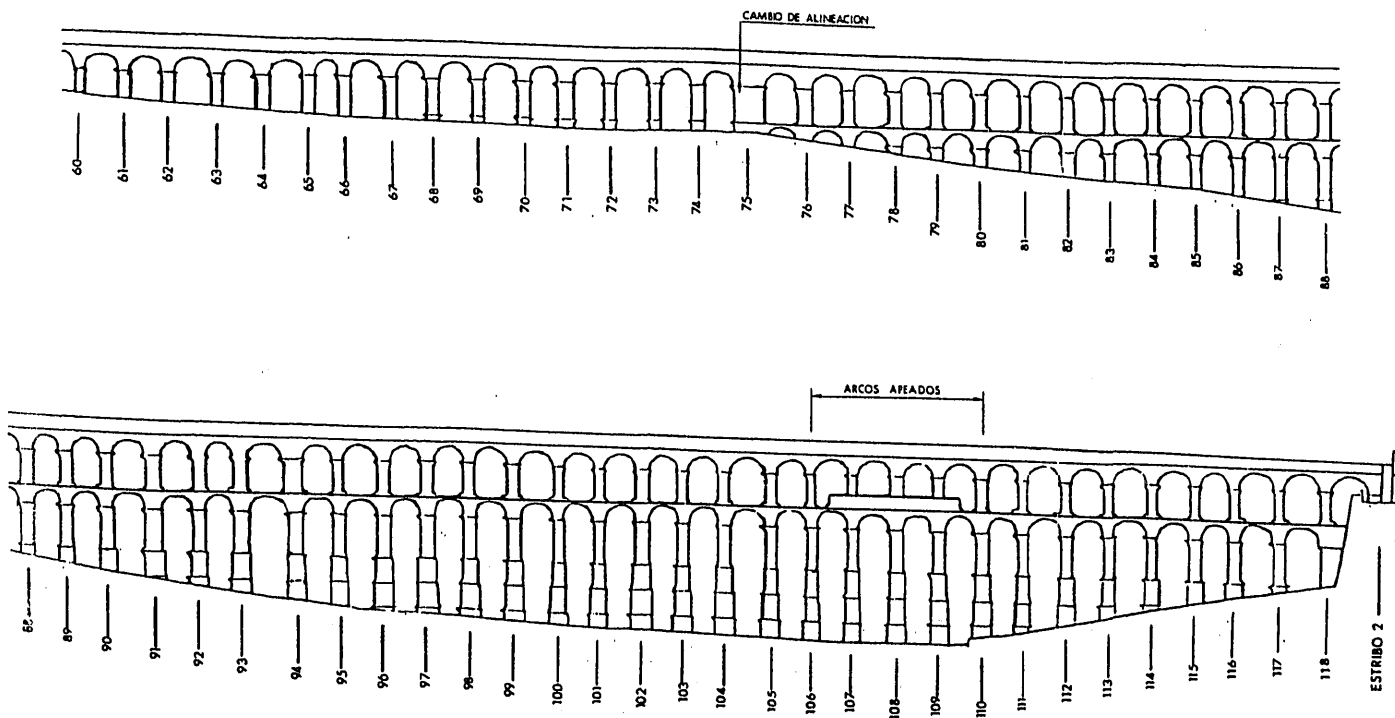
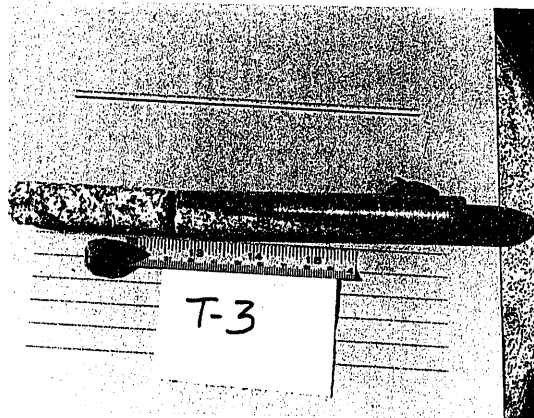


Foto 16.



3.3. Evaluación del estado de la reparación de 1970-73

Dentro de la campaña de evaluación de la situación actual del Acueducto y como complemento al reconocimiento general antes comentado, interesaba estudiar el estado de las actuaciones llevadas a cabo dentro del Plan de reparación y consolidación ejecutado en los primeros años 70.

A estos efectos las actuaciones llevadas a cabo hace veinte años que se pretendía estudiar eran las siguientes:

Foto 17.



■ Impermeabilización del canal: para impermeabilizar las juntas de las piezas en U que forman el canal se emplearon resinas tipo epoxi con un polisulfuro incorporado, aplicando en la parte exterior mortero de cemento y cal para proteger la resina.

■ Refuerzo de la cimentación de una de las pilas (la n.º 111): se realizaron 78 micropilotes recogiendo sus cabezas mediante una viga encepado que circunda la pila y hace de zuncho recogiendo parte de la primera hilada de la sillería de la cimentación.

■ Inyecciones de relleno: se inyectaron todos los tímpanos de ambos niveles en la zona que va desde el pilar 75 hasta la muralla. Las inyecciones se hicieron con mortero de cemento o lechada, a través de unos taladros verticales realizados desde el canalillo para los arcos superiores y con taladros oblicuos desde el primer piso sobre entajas, para los arcos inferiores.

■ Cosido de sillares: las dovelas que conforman los arcos están formadas en general por dos sillares en sentido transversal, con excepción de tres dovelas situadas en riñones y clave que generalmente están constituidas por una única pieza. En la reparación de 1970-73 se procedió a coser determinadas dovelas en las que se apreciaban sillares partidos, empleando para ello taladros de 36 mm. de diámetro en los que se introdujeron bulones roscados de latón, inyectando resina epoxi pigmentada en rojo para lograr la adherencia entre bulón y granito y coser así las piezas que estaban en mal estado. Los frentes del taladro se terminaron con mortero fabricado con arena procedente del mismo tipo de granito que los sillares.

Con relación a estas reparaciones, el reconocimiento general antes descrito permitió comprobar la coincidencia de la documentación relativa a esas reparaciones con lo que realmente existe (algo no siempre habitual en este tipo de obras).

La comprobación complementaria a esta observación ocular consistió en una toma de muestras, examen visual de las mismas y, en su caso, ensayos de identificación y/o comprobación de su estado.

Esta comprobación complementaria ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

■ Los materiales empleados en el cosido de dovelas (bulones de latón, resina y mortero de sellado) no presentan ninguna alteración perceptible (Foto 16), estando la resina perfectamente adherida a los bulones y al granito. Los tapones de mortero están preparados con cemento aluminoso, presentando un buen aspecto.

■ Los masilla empleada en la impermeabilización de juntas del canal es un polisulfuro que no presenta ningún indicio de cuarteamiento u otras alteraciones y tiene una adherencia al mortero y granito excelente.

■ El mortero empleado tanto en la inyección de los tímpanos de arcos superiores como en su intradós es de cemento portland, no carbonatado, con un contenido en cloruros despreciable y un contenido en sulfatos superior al normal.

■ En el único testigo extraído del tímpano de uno de los arcos inferiores no se detecta la presencia del mortero de las inyecciones. ¿Fluyó tras su inyección? ¿Se ha degradado con el tiempo?

3.4. Control de movimientos

Dentro del esquema de actuaciones destinadas a conocer el estado actual del Acueducto se han realizado nuevas medidas sobre los puntos de control de movimientos implantados en 1986 con objeto, precisamente, de proporcionar una red mínima de seguimiento de los movimientos del monumento.

Aunque en estos años se ha avanzado de manera notabilísima en la topografía de muy alta precisión se ha pretendido obtener medidas comparables a las obtenidas entonces al realizar ese estudio, utilizando por tanto los mismos equipos empleados entonces.

La metodología seguida ha sido la observación de las bisecciones angulares formadas por los extremos de la base de medida formada por los puntos 1.000 y 2.000 (materializados mediante placas empotradas en el pavimento) sobre 7 testigos emplazados en la zona central del Acueducto, y la posterior resolución de los triángulos así definidos (Fig. 4).

Se han calculado de esta forma las coordenadas X, Y, Z de los diferentes testigos pudiendo obtenerse, por comparación con las calculadas a origen, los desplazamientos sufridos por esos puntos del monumento.

Además de las efectuadas entonces (11 de julio —lectura cero—, 7 de agosto, y 24 de octubre de 1986, y febrero de 1987), se han realizado lecturas en septiembre de 1992 y marzo de 1993, no detectándose movimientos significativos de los puntos controlados, salvo posibles deformaciones de origen térmico (dilataciones y/o contracciones).

4. Estudio de los mecanismos de deterioro

4.1. Estudio del granito

Bajo este epígrafe se pretende agrupar una serie de actividades que están vinculadas no sólo a la evaluación del estado actual del monumento, sino a las posibles acciones futuras que queden contempladas dentro de los Proyectos de Conservación Mantenimiento y Seguimiento, Protección, y Consolidación y Reparación (Fig. 1).

Los objetivos generales que se persiguen en este estudio pueden resumirse en:

- Determinar las características de la piedra, su alterabilidad y grado de alteración (Foto 17).
- Determinar las causas de la erosión (Foto 18) y alteración que se observa en los sillares.
- Evaluar la evolución de esta alteración y erosión con el tiempo.
- Analizar posibles soluciones de tratamiento de la piedra para aplicación sobre sillares alterados y erosionados para evitar la progresión de tales alteraciones sin producir otro tipo de efectos secundarios indeseables.

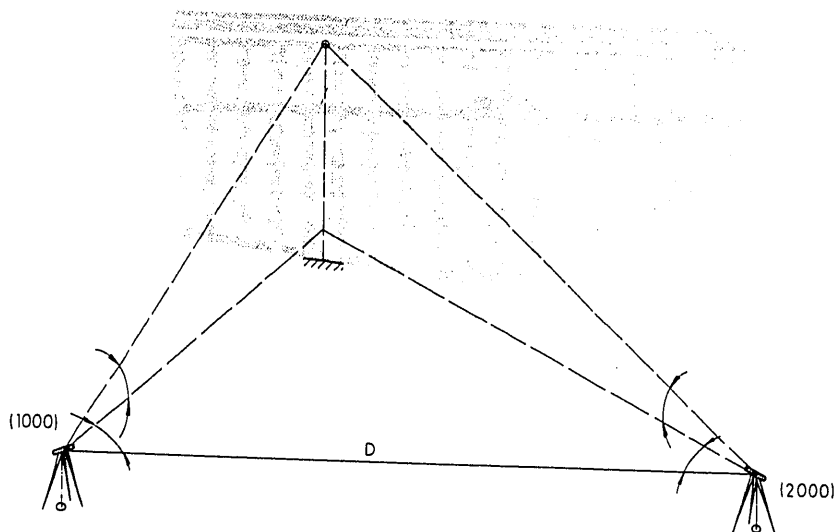


Figura 4.

■ Recomendar posibles medidas de protección sobre sillares en buen estado o con grado de alteración pequeño.

■ Localizar la zona de extracción de sillares para obtener muestras sobre las que hacer ensayos minimizando la necesidad de recurrir a muestras obtenidas del propio Acueducto.

Para lograr alcanzar en la mayor medida posible estos objetivos, se ha iniciado un estudio en el que se están desarrollando las siguientes tareas:

■ Extracción de testigos (20) de pequeño diámetro en sillares que resulten representativos de los distintos tipos de granito presentes en el Acueducto, de las alteraciones que presenta, costras superficiales, etc.

■ Extracción de muestras en la zona de procedencia de la piedra empleada en el monumento.



Foto 18.

■ Ensayos de laboratorio para determinar las características de estos testigos y su variación con la profundidad. Ensayos de porosidad, absorción, densidad, resistencia, velocidad de ondas longitudinales, etcétera.

■ Ensayos químicos para determinar la alterabilidad, grado de alteración o presencia de sustancias procedentes de la contaminación en la superficie.

■ Estudios petrográficos en lámina delgada para ver las características de la piedra y su grado de alteración y fisuración.

■ Ensayos de alteración acelerada con ciclos de hielo-deshielo y de ataque de sulfato sódico, para conocer la influencia de las heladas, ciclos de humedad sequedad para conocer la influencia de los cambios térmicos, y ciclos de ataque por disoluciones ácidas para conocer la influencia de los contaminantes químicos (anhídridos de azufre, lluvia ácida, etc.).

■ Determinación de la velocidad de propagación ultrasónica en los sillares donde se extraigan los testigos, y a lo largo de varias pilas para comparar con los resultados de los testigos por una parte, y ver la evolución en el tiempo del estado de los sillares por otra.

■ Ensayos con productos de impregnación sometiendo posteriormente las muestras tratadas a ensayos de alteración acelerada para conocer la eficacia y durabilidad de estos productos.

En el momento de redactar estas líneas se ha completado ya la extracción de testigos tanto en el propio Acueducto como en la cantera de procedencia de los sillares, así como la medida de velocidades de ondas ultrasónicas en testigos y sobre más de 400 sillares. Igualmente se encuentran muy avanzados los ensayos de laboratorio tanto químicos como mecánicos y petrográficos, aunque resulta prematuro para avanzar las conclusiones que podrían deducirse del estudio.

Foto 19.



4.2. Estudio contaminación ambiental

Tanto el Plan de Trabajo elaborado por la Junta de Castilla y León, como los diferentes estudios e informes llevados a cabo en los últimos años han sido coincidentes en la posible influencia negativa que para el granito de los sillares del Acueducto puede tener el entorno atmosférico que lo rodea.

Esa influencia puede derivarse de dos tipos de actuaciones: las climatológicas y las derivadas de distintos agentes contaminantes con capacidad de agresión sobre la piedra.

Se trata por tanto, de individualizar los parámetros climatológicos y los contaminantes atmosféricos, cuantificar sus magnitudes y conocer su evolución temporal en períodos significativos de las alternancias estacionales.

De cara al seguimiento de la contaminación atmosférica, se han realizado medidas de inmisión de los siguientes parámetros:

- Monóxido de carbono (CO).
- Anhídrido sulfuroso (SO₂).
- Óxidos de nitrógeno (NO_x).
- Partículas en suspensión.
- Partículas sedimentables.

En una primera fase se efectuaron medidas puntuales por parte del Servicio de Protección Ambiental de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta, mediante una estación móvil; posteriormente se ha instalado una Estación Fija de Control con monitores en continuo de CO, SO₂, NO_x, ozono y partículas en suspensión.

4.3. Biodeterioro

Al igual que en el caso de los agentes atmosféricos, parece clara la necesidad de evaluar el papel negativo que en el deterioro de la piedra puedan estar jugando procesos de tipo biológico con intervención de microorganismos.

La transformación de rocas en suelo fértil es un proceso ampliamente conocido muy similar al que se está observando en diversos monumentos pétreos, con deterioros producidos por la acción conjunta de factores físicos, químicos y biológicos.

Así por ejemplo tanto algunos contaminantes óxidos de azufre y nitrógeno con una acción química conocida directa (transformación en ácidos sulfúrico y nítrico), como otros (derivados del petróleo,...) pueden favorecer, en presencia de humedad, el crecimiento de diversos microorganismos.

Existen una serie de bacterias quimiolitótrofas que pueden crecer sobre piedras en zonas contaminadas obteniendo su energía a partir de compuestos reducidos de azufre y nitrógeno provenientes de la polución atmosférica o de deyecciones de aves. Estas bacterias al crecer oxidan dichos compuestos y producen ácidos sulfúrico y nítrico que contribuyen de manera sinérgica al deterioro del monumento.

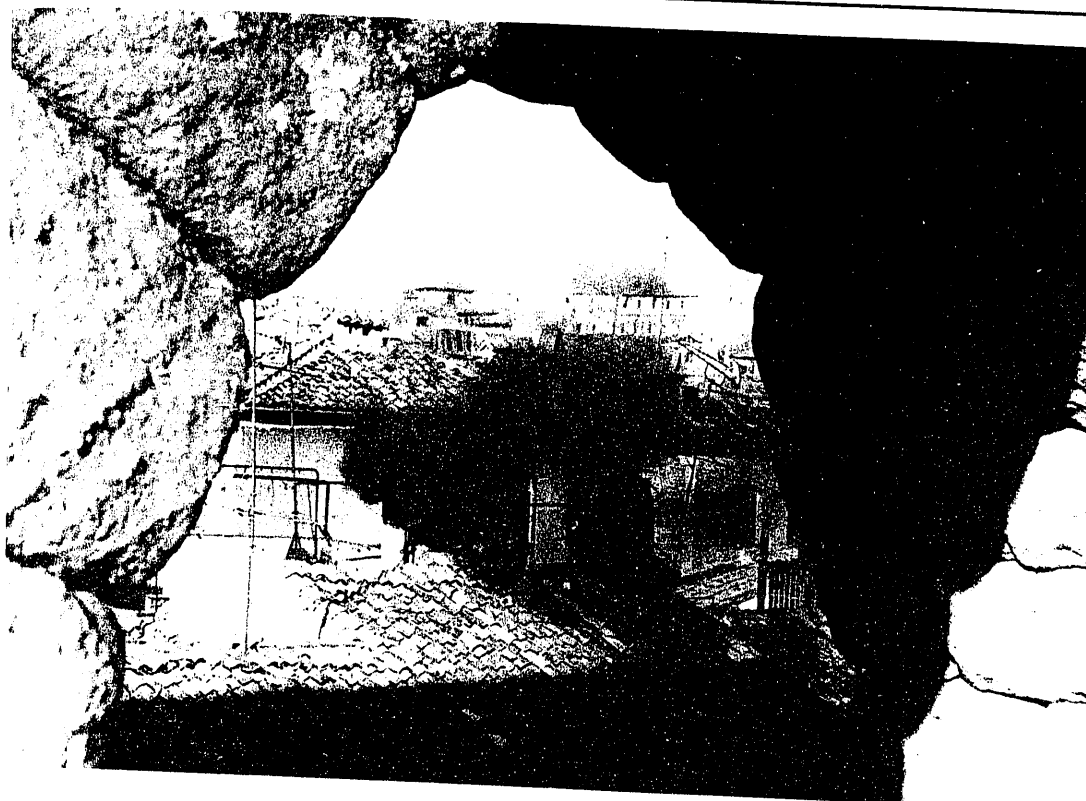


Foto 20.

Por su parte los restos de derivados del petróleo y las grasas pueden ser degradados por diversos microorganismos (bacterias y hongos) produciendo ácidos orgánicos que contribuyen también a la degradación de la roca.

Además de esta acción bioquímica, puede considerarse un efecto biofísico como el de los hongos que pueden crecer sobre las rocas, produciendo rupturas originadas al penetrar las hifas en la propia roca.

De hecho en el Acueducto, como ha podido constatarse en el reconocimiento general efectuado, se dan todas las condiciones para que, aparte de otros agentes y como agente coadyuvante pueda estar produciéndose un proceso de biodeterioro de la piedra.

Como se ha comentado, no sólo se ha observado la presencia de rellenos vegetales (plantas) en numerosas juntas entre sillares, sino que también se han detectado en no pocos puntos nidos de aves y presencia de numerosos murciélagos. Manchas que parecían a distancia producidas por humedades, se ha comprobado que son restos de orines de éstos últimos.

En algunos casos, tras fragmentos desprendidos procedentes de exfoliaciones o descamaciones de los sillares aparece un material de color oscuro, en el que se ha detectado con la lupa la presencia de hifas de hongos.

Además se ha constatado en el reconocimiento general la presencia de depósitos de diferentes sustancias adheridas a los sillares fundamentalmente en zonas afectadas más directamente por el tráfico (Foto 19) o por los humos de calefacciones o cocinas próximas (Foto 20).

Por ello se está realizando un estudio con el fin de dictaminar la influencia del biodeterioro en la situación actual del Acueducto. Se han tomado di-

versas muestras que se están estudiando con el fin de determinar en ellas la presencia de microorganismos, fundamentalmente la presencia de bacterias del ciclo del azufre, del ciclo del nitrógeno, hongos productores de ácidos orgánicos, así como microorganismos que utilicen derivados del petróleo.

4.4. Análisis estructural

Una obra como el Acueducto ha estado sometida fundamentalmente a tres tipos de acciones desde su construcción con efectos directos sobre las tensiones mecánicas inducidas en él: su propio peso, la acción del viento y las variaciones de temperatura.

Es necesario añadir a esto el efecto indirecto derivado de la propia degradación de la piedra, llegando a la disminución considerable de volumen de determinados sillares e incluso a su rotura o desaparición, o a la degradación del granito superficial o en masa, efectos todos ellos que pueden traducirse en la aparición de concentraciones de tensiones (Foto 21).

En las últimas décadas han venido a sumarse a los efectos anteriores, las vibraciones transmitidas por el tráfico rodado o por los procesos de construcción de sótanos excavados en roca en zonas próximas al monumento.

Un análisis completo del deterioro del Acueducto exige la evaluación de cuál es su situación actual desde un punto de vista mecánico resistente teniendo en cuenta esa diversidad de acciones posibles, y el estudio de la posible influencia que puedan tener de cara a garantizar su supervivencia.

En el Acueducto se dan todas las condiciones para que pueda estar produciéndose un proceso de biodeterioro de la piedra

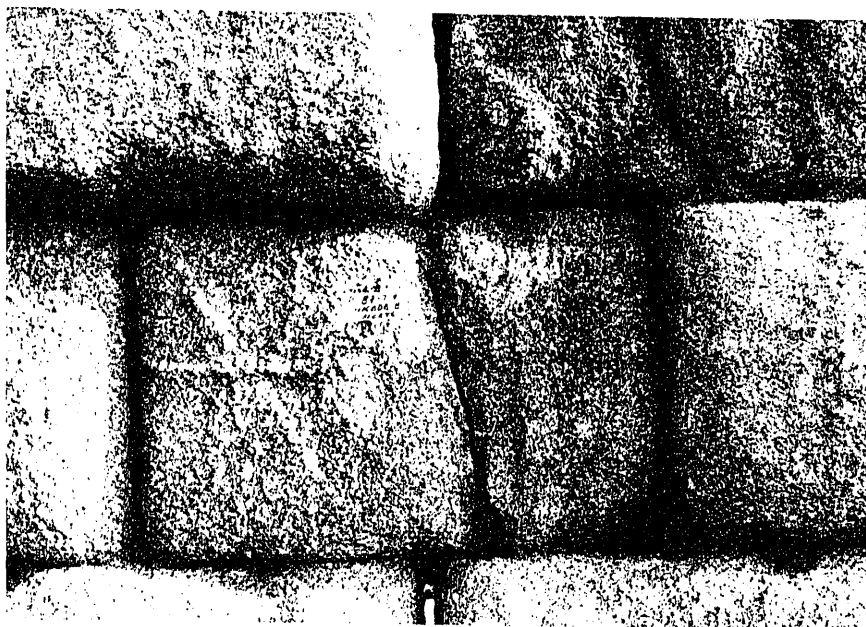


Foto 21.

Las actuaciones llevadas a cabo desde la aparición de la alarma sobre el estado del Acueducto el pasado año, han permitido comprobar que su grado de deterioro es importante y requerirá una serie de medidas de protección, consolidación y reparación que deberán llevarse a cabo cuanto antes

Teniendo en cuenta los diferentes efectos que se pretende cuantificar, se propone abordar el análisis empleando diversos modelos, de diferente complejidad, en función del efecto que se desea evaluar. En principio, este análisis se ha iniciado por los modelos más elementales, para, en función de los resultados, decidir acometer o no modelos más sofisticados de comportamiento estructural.

Para el análisis primario de las tensiones inducidas por efecto del peso propio y el viento, y una estimación de la influencia relativa que sobre las mismas pudieran tener pérdidas de sección, por roturas o desaparición de sillares (Foto 22), como las detectadas en la inspección del monumento, se está empleando un modelo clásico de composición vectorial; para ello se está empleando un programa que implementa en modo gráfico sobre soporte informático ese sistema clásico de cálculo, a base de suponer la estructura dividida en bloques sobre los que actúan distintas fuerzas, acciones exteriores y peso propio, obteniendo su resultante.

En tanto que las resultantes en cada línea de junta se mantengan con inclinaciones bajas (inferiores a un ángulo de rozamiento razonablemente seguro para la junta entre sillares de granito), sus resultados serán globalmente válidos.

En principio y de modo genérico, se pretende evaluar mediante este método de cálculo las tensiones inducidas por el peso propio, o el peso propio y el viento actuando conjuntamente en dos situaciones diferentes: con la sección resistente actual de la zona de Acueducto estudiada, o con la sección resistente modificada por pérdida o rotura de un sillar.

Paralelamente a ello se desarrollará un modelo de elementos finitos lineal para evaluar de forma más aproximada posibles efectos de concentraciones de tensiones, las rigideces axial y transversal (necesarias para desarrollar un modelo global de deformación por efecto térmico) y la respuesta dinámica frente a excitaciones de baja frecuencia (tráfico).

En función de los resultados obtenidos en el seguimiento de los movimientos del Acueducto, y en los cálculos anteriores se desarrollaría un modelo para el análisis global de deformación por efectos térmicos estacionales, reproduciendo la alineación entre las pilas 60 a 118 aproximadamente. Dada la práctica imposibilidad de reproducir dicho comportamiento mediante un modelo de elementos finitos por el desorbitado número de elementos que requeriría, se pretende desarrollar un modelo simplificado partiendo de las rigideces axial y transversal evaluadas en el modelo de elementos finitos ya citado.

Una etapa posterior la constituiría el análisis local de concentraciones de tensiones mediante un nuevo modelo lineal de elementos finitos, reproduciendo en detalle, con una discretización más fina, posibles causas de alteración del campo de tensiones presumiblemente cuasi uniforme que se derivase del análisis global. Este modelo se emplearía para estimar concentraciones de tensiones por efecto de las diferencias de temperatura entre la superficie y la masa interior, o la degeneración o deterioro de juntas entre sillares ya sean transversales o paralelas a la dirección de las compresiones.

Para la realización del análisis dinámico antes comentado es necesario conseguir una buena definición de las sollicitaciones debidas a las vibraciones transmitidas por la presencia del tráfico rodado, tanto en amplitudes como contenido de frecuencias.

Para ello se examinarán en primer lugar, los datos ya existentes procedentes de estudios y ensayos llevados a cabo en los últimos años. En función del alcance de los mismos se prevé la realización de una campaña de ensayos complementarios midiendo las vibraciones causadas por distintos tipos y niveles de tráfico en varios puntos de la base, e incluso tomar medidas en algunos puntos de la parte superior de la estructura para poder calibrar el modelo matemático.

Si los resultados de los modelos lineales de las fases anteriores lo aconsejan, porque indiquen que se exceden en las juntas entre bloques las fuerzas de rozamiento admisibles o que se producen tracciones en las interfases, se llevaría a cabo un análisis no lineal mediante un modelo de basado en técnicas y programas del tipo de los utilizados en el análisis de macizos rocosos con líneas de falla; en concreto se trataría de desarrollar un modelo en el que se consideran bloques rígidos (un bloque por cada sillar) conectados mediante interfases con leyes de rozamiento especificadas.

5. Actuaciones inmediatas y a corto plazo

Como consecuencia del reconocimiento general indicado en el punto 1, se detectaron numerosas zonas que, si bien no parecía probable que supusieran una amenaza para la estabilidad del Acueducto, sí podían entrañar un peligro por el posible desprendimiento de fragmentos. Por ello se han colocado en diferentes puntos del Acueducto protecciones preventivas que eviten la caída de esos fragmentos (Foto 23), realizadas con redes de plástico gris fijadas a los sillares median-



Foto 22.

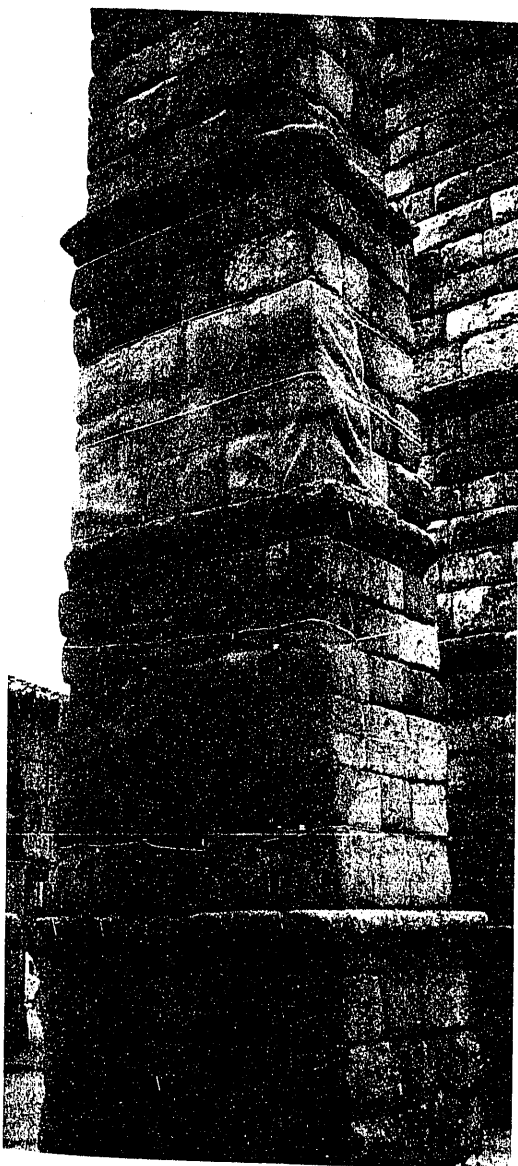


Foto 23.

te cuerdas también de plástico y cuñas de madera forradas con neopreno, materiales inertes que nunca deterioran el granito en tanto en cuanto se determinen definitivamente las metodologías de reparación o protección más adecuadas.

Paralelamente se van a iniciar trabajos de fotogrametría de la totalidad del Acueducto, endoscopías y examen del interior de las pilas, mediciones de alta precisión para detectar posibles movimientos diferenciales entre sillares debidos a acciones térmicas, etc. y, en general, todos aquellos análisis que los resultados de los trabajos ya en marcha aconsejen ampliar o profundizar, ya que las causas que han originado esta situación pueden ser múltiples, por lo que la urgencia en la adopción de soluciones no debe interferir con la necesidad de completar todos aquellos estudios que se consideren necesarios para llegar a una adecuada identificación de los agentes y mecanismos de deterioro, y a la definición de sistemas eficaces para combatir su acción en el futuro.

Con este hilo conductor se están desarrollando todas las actividades que en torno al Acueducto se vienen aplicando desde el verano de 1992 y que se han tratado de presentar aquí someramente.

6. Consideraciones finales

Las actuaciones llevadas a cabo desde la aparición de la alarma sobre el estado del Acueducto el pasado año, han permitido comprobar que su grado de deterioro es importante y requerirá una serie de medidas de protección, consolidación y reparación que deberán llevarse a cabo cuanto antes.

Sin embargo, no podemos eludir el problema del criterio de intervención... Ya hemos citado al principio el acuerdo unánime de la mínima intervención, pero la supervivencia del Acueducto va a obligar a efectuar reparaciones y consolidaciones cuyo resultado no solo ha de ser benefactor en el día de hoy, sino que ha de permitir la longevidad máxima del bello conjunto que supone esta construcción.

El problema fundamental reside en que sólo son accesibles unas determinadas caras de los sillares de granito, mientras que las que están en contacto con otros, en el interior de arcos y pilas, tienen un grado de deterioro similar al de los frentes visibles... Pero el Acueducto fue construido «a hueso», piedra sobre piedra, sin ningún aglomerante entre ellas por lo que, en un meticuloso proceso de conservación, no se debería introducir ningún material en esas juntas (la manera más inmediata para consolidar y preservar el deterioro de las superficies ocultas).

¿Cuál ha de ser entonces el procedimiento de consolidación?

Ese es el motivo de todos los estudios y análisis que estamos realizando y, una vez subsanados los problemas de posibles caídas de fragmentos, bien vale la pena reflexionar antes de efectuar cualquier tipo de intervención irreversible....

Al fin y al cabo, todos deseáramos que la edad actual de este viejo Acueducto llegue al menos a duplicarse. ■