

La restauración del templo parroquial de San Dionisio (Jerez de la Frontera, España). La inyección como método de reparación de estructuras de fábrica

The restoration of the parish church of San Dionisio (Jerez de la Frontera, Spain). Grout injection as a repair method for masonry structures

E. Rodríguez-Mayorga^(*), E. Yanes^(*), V. Compán^(*), A. Sáez-Pérez^(*)

RESUMEN

La Iglesia de San Dionisio es una de las más importantes desde el punto de vista histórico y patrimonial de Jerez de la Frontera (Cádiz). Al inicio del siglo XXI, varios pilares de la estructura comenzaron a presentar síntomas de agotamiento a compresión, hecho que condujo al cierre del templo. En 2005 se inició la investigación para identificar las causas del deterioro estructural y establecer una estrategia de reparación adecuada.

El método aplicado para la reparación de la estructura fue la inyección con tubo-manguito. Frente a otros métodos de inyección previamente documentados en fábrica, la inyección con tubo-manguito permite aplicar presiones de inyección significativamente superiores, consiguiendo así una mayor homogeneización y mejora de las propiedades resistentes del material inyectado.

Este artículo aborda la investigación llevada a cabo para caracterizar el origen de los daños, la descripción del procedimiento de reparación de la estructura y la evaluación de su efectividad.

105-24

Palabras clave: Restauración; fábrica histórica; técnicas no destructivas; inyección.

SUMMARY

San Dionisio Parish church is one of the main pieces of heritage in the city of Jerez de la Frontera (Cádiz, Spain). In the beginning of the 21st century, some columns of the church showed symptoms of damage by compressive stresses. Due to this fact, the temple was closed to the public. In 2005 a complete research began in order to find the causes of the damage. As a result, a restoration plan was proposed.

The applied method for repairing the structure was grout injection with the sleeve port pipe. It has the advantage of the higher pressures that can be applied when compared with other previously documented injection techniques. In this way, a better homogenization and improvement of the masonry mechanical properties are achieved.

This paper describes the research carried out to identify the causes of the damage, the repair of the structure and its effectiveness.

Keywords: Restoration; historical masonry; non-destructive techniques; grout injection.

^(*) Escuela Técnica Superior de Arquitectura-Universidad de Sevilla, (España).
Persona de contacto/Corresponding author: espe@us.es (E. Rodríguez-Mayorga).

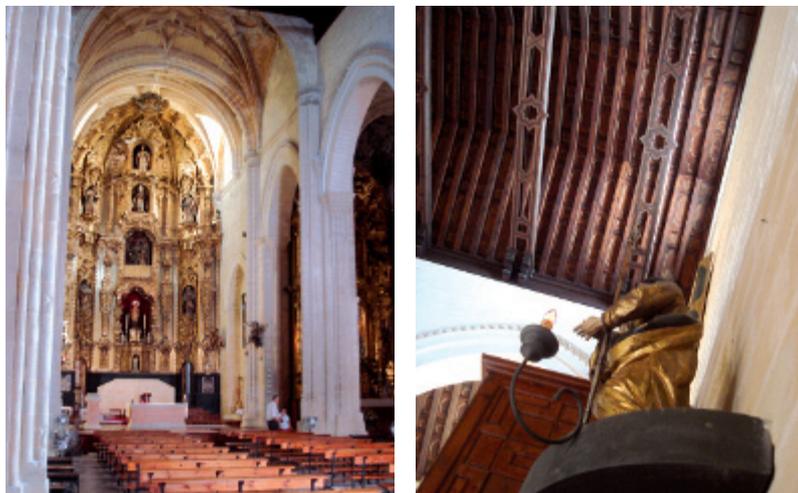
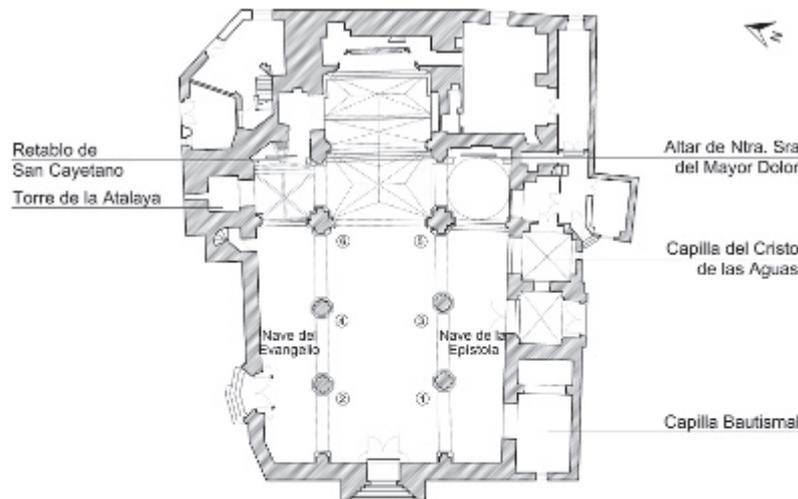
1. Iglesia de San Dionisio (Jerez de la Frontera, Cádiz). Planta y exteriores.

2. Interior de la Iglesia de San Dionisio (Jerez de la Frontera, Cádiz).

3. Detalle del artesanado de las naves de la Iglesia de San Dionisio (Jerez de la Frontera, Cádiz).

1. INTRODUCCIÓN

La parroquia de San Dionisio es un templo gótico-mudéjar de tres naves con capillas laterales adosadas y cubierta a dos aguas (Figura 1). Sus dimensiones aproximadas en planta son 25x38 m, y la altura máxima es de 18 m. en la nave central. La parroquia debe su nombre al patrón de la ciudad, San Dionisio Areopagita, ya que fue en el día de su onomástica del año 1265 cuando la ciudad de Jerez fue tomada por las tropas cristianas. No existe certeza acerca de la fecha de la construcción de la iglesia, pero todo apunta al periodo comprendido entre los siglos XIII y XIV. Las naves datarían de la segunda mitad del siglo XIV y la torre entre uno y dos siglos después (1) (2).



En la construcción de la iglesia se emplearon diversos materiales y sistemas constructivos: fábrica compuesta por hojas externas de piedra de la cantera de San Cristóbal (El Puerto de Santa María, Cádiz) y relleno de argamasa en muros y pilares; fábrica de ladrillo en la arquería; bóvedas nervadas de piedra en las cubiertas de las capillas laterales y la cabecera y artesanado neo mudéjar con decoración de lacería en las naves (Figuras 2 y 3).

La iglesia ha presentado diversos problemas estructurales a lo largo de la historia. Los más importantes desde el punto de vista de la estabilidad del templo están ligados a problemas en su cimentación. Los primeros problemas documentados datan del siglo XVI, y consistieron en daños en la bóveda de la capilla del Cristo de las Aguas (Figura 1) a causa de los movimientos que estaba experimentando la cimentación de uno de los pilares de la cabecera. La explicación de dichos movimientos llegó en el siglo XX, cuando con motivo de nuevos trabajos de reparación se comprobó que la iglesia se encuentra cimentada sobre una escorrentía subterránea (1). Estos últimos trabajos, que transcurrieron entre 1948 y 1976, fueron motivados por distintas causas, entre las que se encuentran (3):

- Los pilares presentaban daños importantes con origen en sus respectivas cimentaciones. Por esta causa, se rehicieron las zapatas previo desmontaje de los soportes. En la posterior reconstrucción de los pilares se utilizaron los sillares de piedra original cuando fue posible.
- Las cubiertas de las naves se encontraban en muy mal estado de conservación y debían ser sustituidas. Para la nave central se utilizaron viguetas prefabricadas de hormigón armado decoradas a modo de artesanado de madera. Para la nave de la Epístola, en cambio, se usaron vigas de madera.

En los primeros años del siglo XXI, la aparición de importantes signos de deterioro en los pilares (Figura 4) condujo al inicio de un largo proceso de investigación que terminó con la reparación de la estructura. Siguiendo las recomendaciones de *ICOMOS (International Council of Monuments and Sites)* (4), el proceso total se dividió en cuatro fases: anamnesis, diagnóstico, terapia y control. El proceso total de restauración de la iglesia de San Dionisio es el objetivo de este artículo, así como el análisis de los resultados obtenidos y de la técnica de reparación empleada.

2. ANÁLISIS DE LOS DAÑOS

Los soportes de la iglesia, sobre todo los numerados como 1, 2, 3 y 4 (Figura 1) presentaban fisuras y desprendimientos, que se concentraban aproximadamente en sus dos metros inferiores (Figuras 4 y 5).

Otro problema importante era la humedad en los pilares y en los muros. El porcentaje de humedad era bastante elevado sobre todo en las secciones inferiores, oscilando entre el 10% del pilar 6 y valores en torno al 30% en los pilares 3 y 5 (Figura 6).

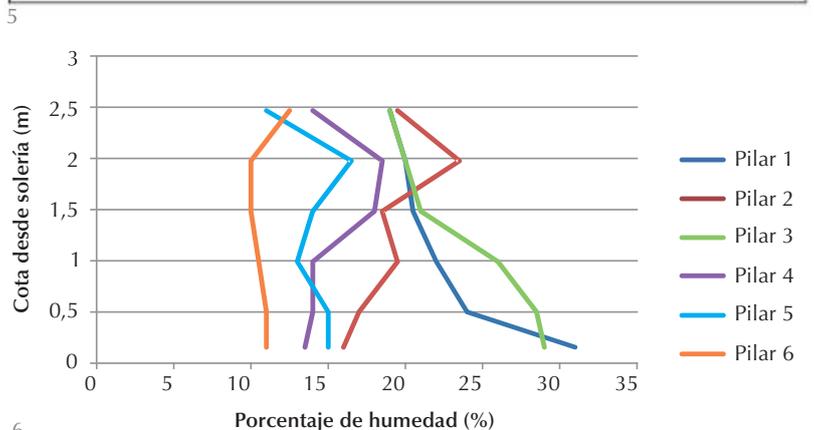
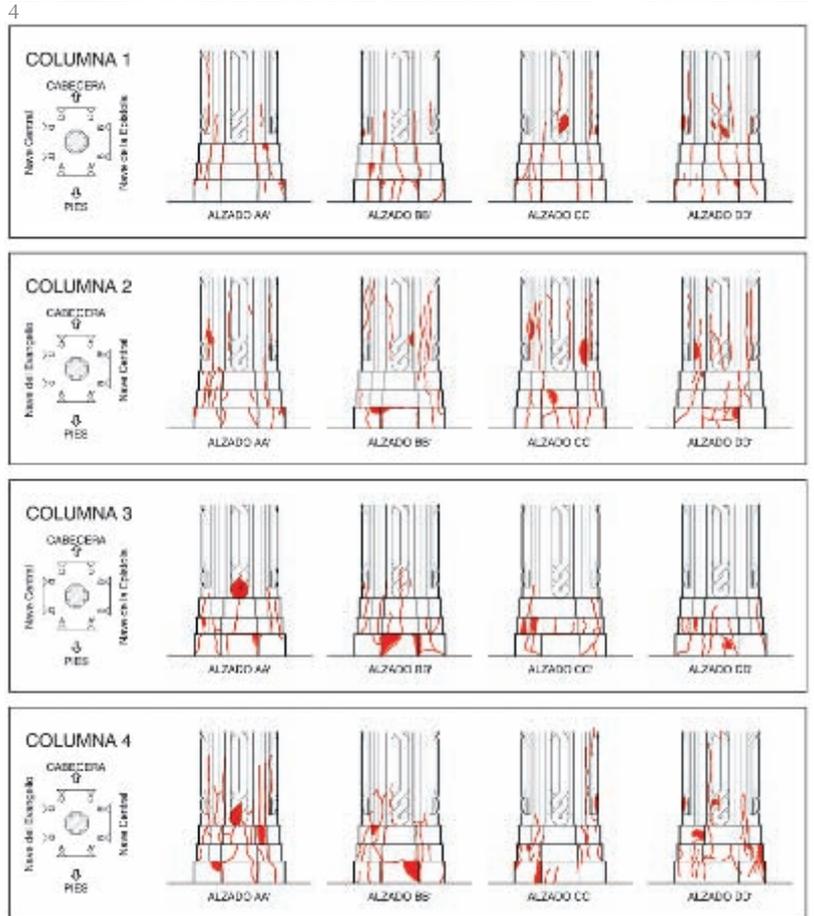
3. ANÁLISIS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Los tipos de materiales que componen la fábrica se identificaron mediante la extracción de cuatro testigos (Figura 7): tres de los pilares 2, 3 y 4 y uno de la fachada principal. Del análisis de estos testigos se obtuvieron los siguientes datos:

- La zona externa de los elementos estructurales, cuyo espesor oscilaba en torno a 30 cm, estaba compuesta por roca arenisca. La excepción eran las bases de los pilares, en las que se encontraba aplacado de piedra de buena calidad (resistencia a compresión en torno a los 4 MPa) tomado con mortero de cemento.
- En el interior del muro de la fachada principal se encontró tapial de tierra compacto, así como restos cerámicos, nódulos calizos y fragmentos de roca. El espesor de esta capa estaba en torno a los 45 cm y su resistencia a compresión de aproximadamente 1,5 MPa, de acuerdo a los ensayos realizados sobre los testigos extraídos.
- En el núcleo de los soportes y muros se encontró argamasa de cal con fragmentos de roca calcarenita.

Una vez identificados los materiales de manera individual, se analizaron las fábricas de los elementos estructurales en su conjunto. Para ello se realizaron dos tipos de ensayos no destructivos: georradar y prueba sónica (5).

La conclusión obtenida de las lecturas de georradar (6), realizadas con antena de 800 MHz, fue que los pilares número 1, 2, 3 y 4 presentaban discontinuidades en su interior, algunas de ellas interpretadas como fracturación interna (Figura 8). El resto de los elementos estructurales presentaban daños de menor entidad, como por ejemplo, la pérdida o degradación del mortero de la junta entre sillares (5).



Para la prueba sónica (7) se utilizó un acelerómetro triaxial con rango de frecuencias entre 100 Hz y 6,5 kHz (Figura 9). Se ensayó la fábrica a dos cotas diferentes (0,5 y 3,0 m desde la cota de la solería) y en dos direcciones ortogonales, NS y EW (Figura 1 y 10). En cada uno de los puntos se tomaron tres lecturas para minimizar el ruido (8).

4. Ejemplo de daños encontrados en los pilares.

5. Levantamiento de daños en las bases y los fustes de los pilares.

6. Porcentaje de humedad en las secciones inferiores de los pilares.

7. Testigos extraídos del pilar 2 (testigo 1), pilar 4 (testigo 2), pilar 3 (testigo 3) y muro de fachada (testigo 4).

8. Lectura del georradar para los pilares 1, 2, 3 y 4 (antena de 800 MHz de frecuencia de emisión).

9. Acelerómetro empleado para la prueba sónica en la iglesia de San Dionisio.

10. Esquema de la prueba sónica.

11. Sección esquemática de la cimentación de San Dionisio.

12. Información obtenida del georradar con antena de 500 MHz para 0,20 m. de profundidad.



7

Donde μ (módulo de rigidez transversal) = $\rho \cdot v_s^2$; K (Módulo de compresibilidad volumétrica) = $\lambda + 2/3 \mu$; λ (Coeficiente de Lamé) = $\rho \cdot v_p^2 - 2\mu$; ρ (densidad) = 1.800 kg/m³.

Los valores obtenidos para los pilares dañados están recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos obtenidos con la prueba sónica para los pilares 1, 2, 3 y 4.

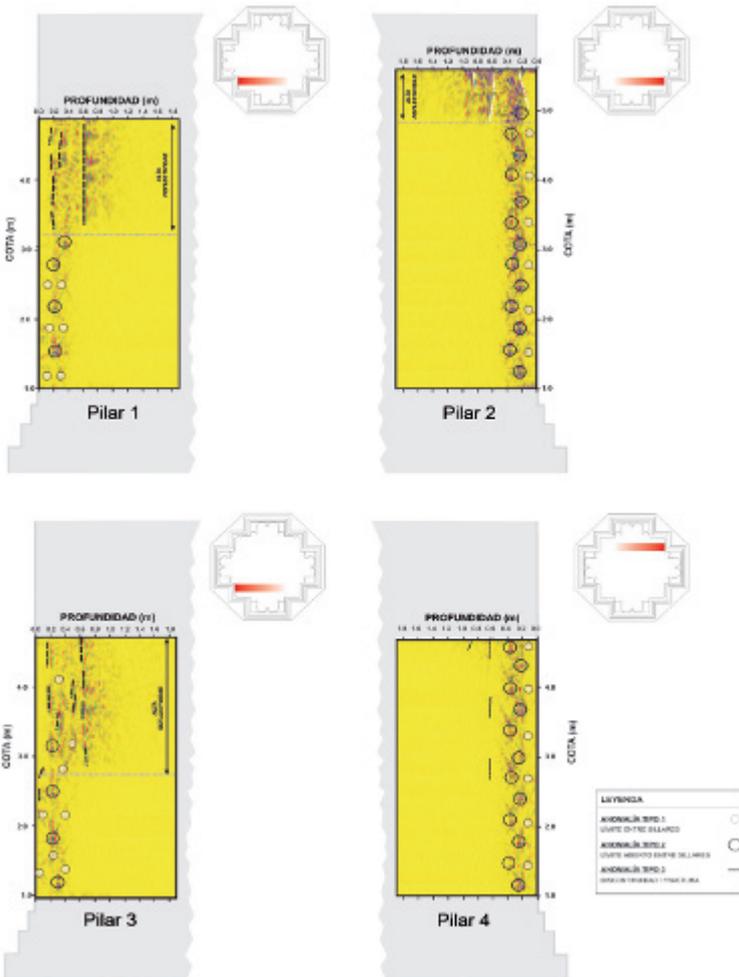
Pilar	Cota (m)	Dirección de medida	v_p (m/s)	v_s (m/s)	E_{din} (GPa)
1	0,5	SW-NE	1524	808	3,1
		NW-SE	1367	768	2,7
	3	SW-NE	1418	800	2,9
		NW-SE	1297	967	2,9
2	0,5	SW-NE	1414	938	3,5
		NW-SE	1583	1200	4,3
	3	SW-NE	1368	1021	3,3
		NW-SE	1311	1002	2,9
3	0,5	SW-NE	1367	1047	3,1
		NW-SE	1374	821	3,0
	3	SW-NE	1872	1080	5,3
		NW-SE	1827	1287	6,0
4	0,5	SW-NE	1314	844	2,9
		NW-SE	1493	831	3,2
	3	SW-NE	1368	817	2,9
		NW-SE	1479	977	3,8

El valor de referencia del módulo de deformación dinámica de la fábrica sana es de 10-12 GPa, valor que se obtuvo en un testigo de fábrica sana del mismo tipo que la de la iglesia de San Dionisio y medido por el procedimiento descrito anteriormente (9).

4. ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN

El objetivo de analizar de la cimentación de la iglesia de san Dionisio era comprobar si la presencia de agua en el subsuelo había producido nuevos daños desde la conclusión de los trabajos de reparación llevados a cabo a mediados del siglo XX. Para este análisis se emplearon técnicas destructivas y no destructivas, principalmente varios sondeos y lecturas de georradar a varias cotas de profundidad (0,20, 0,50, 0,80 y 1,20 m).

8



A partir de las velocidades de las ondas P (v_p) y S (v_s) se aproximaron los parámetros elásticos dinámicos de la fábrica mediante su asimilación a un medio isotrópico:

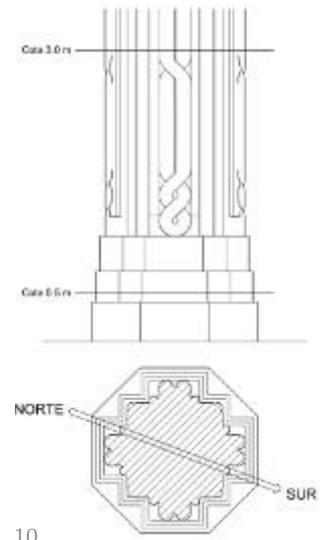
Módulo de deformación E_{din} [1]

$$[1] \quad E_{din} = \frac{9K\mu}{(3K + \mu)}$$

9

Tabla 2. Cota de cimentación y tipo de estrato sobre el que apoyan las zapatas

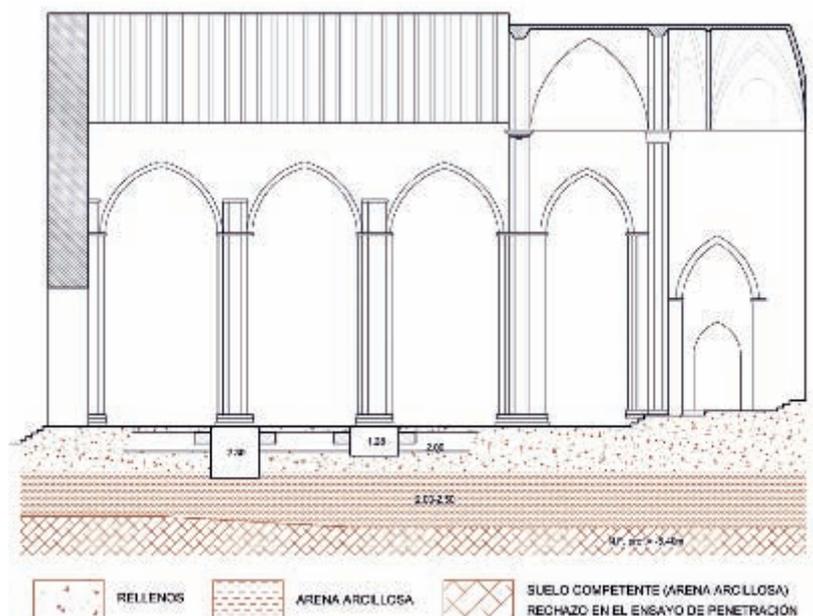
Elemento	Cota de apoyo de la cimentación	Estrato de apoyo
Pilar 1	-2,30 m	Transición entre relleno antrópico, compacidad de muy suelta a suelta y arena arcillosa de compacidad de media a densa
Pilar 2	-2,15 m	Relleno antrópico, compacidad de muy suelta a suelta
Pilar 3	-1,28 m	Relleno antrópico, compacidad de muy suelta a suelta
Pilar 4	-	Relleno antrópico, compacidad de muy suelta a suelta
Pilar 5	-4,80 m	Arena arcillosa compacta
Pilar 6	-2,20 m	Relleno antrópico, compacidad de muy suelta a suelta
Muro de fachada	-2,30 m	Relleno antrópico, compacidad de muy suelta a suelta



También se obtuvo información visual mediante videoscopio y algunas calicatas. El resumen de los datos obtenidos en referencia al firme de cimentación se encuentra recogido en la Tabla 2 (10).

De todos los ensayos realizados se extrajeron las siguientes conclusiones:

- El apoyo de las zapatas se producía a distintas cotas y sobre estratos de rigidez muy variable (Tabla 2, Figura 11).
- El terreno bajo la solería actual era relleno sin compacidad en determinadas zonas. En el subsuelo existían bastantes huecos, en su mayoría enterramientos. También había uno de dimensiones superiores bajo el presbiterio que era usado como almacén (Figura 12).
- El grado de humedad en el subsuelo era elevado. En los sondeos se encontró agua subterránea aproximadamente a 5 m de profundidad.

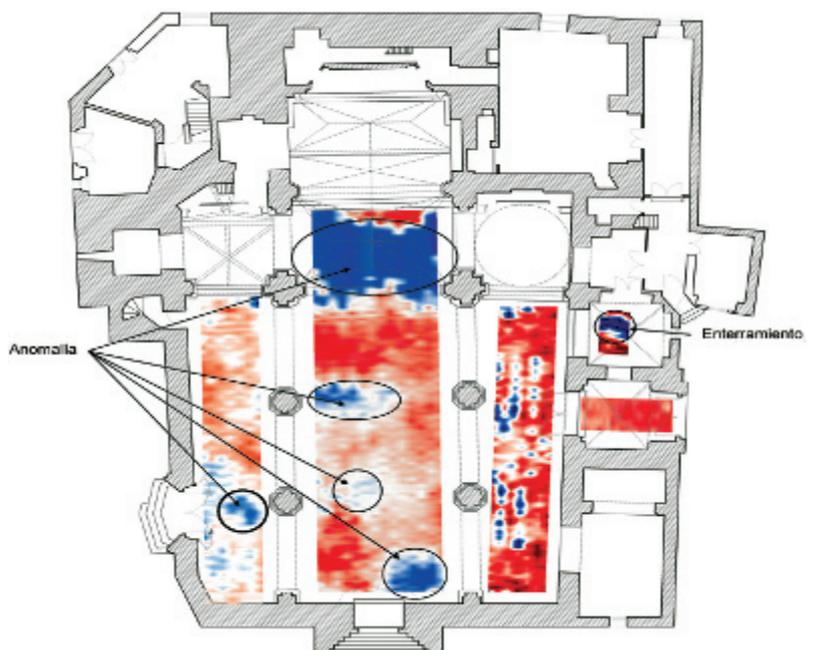


11

5. DIAGNÓSTICO

Los elementos más dañados de la estructura eran los pilares. Un factor importante a tener en cuenta en referencia a estos elementos estructurales es la pérdida de resistencia que determinados tipos de piedra presentan en presencia de humedad. Concretamente, en el caso del tipo de piedra de la fábrica de San Dionisio, la pérdida se ha cifrado en torno al 30% (9). La fábrica de la iglesia de San Dionisio, originalmente de baja resistencia, unida al efecto de un elevado nivel de humedad en el subsuelo había conducido a los pilares a un estado tensional cercano al agotamiento.

En referencia a la cimentación, las zapatas de los distintos pilares apoyaban sobre estratos con propiedades diferentes. De aquí



12

se deriva un comportamiento diferencial de los elementos estructurales frente a cargas gravitatorias. Por último, apuntar que la presencia de huecos de importantes dimensiones en el subsuelo no resulta favorable en este aspecto.

Así pues, la solución adoptada debía ir principalmente encaminada a corregir los siguientes puntos:

- Mejorar las propiedades resistentes de los pilares, a la vez que consolidarlos.
- Homogeneizar la rigidez del firme de cimentación, así como la cota de cimentación de las zapatas para llevar las cargas de los soportes hasta estratos rigidez similar.
- Expulsar, dentro de lo posible, el agua existente en el subsuelo para evitar posteriores lavados de la cimentación, como medida preventiva frente a futuros daños.

6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

Son varias las técnicas utilizadas tradicionalmente para reparar estructuras cuando se encuentran en estado de degradación similar al de la iglesia de San Dionisio, pero básicamente pueden reducirse a tres: consolidación de la estructura dañada, adición de elementos externos que sustituyan total o parcialmente la función estructural de los soportes, o la sustitución completa de los elementos estructurales. A las necesidades existentes debían sumarse otros dos aspectos que condicionaban de forma importante la decisión a tomar: la urgencia de la intervención y la escasez de recursos económicos disponibles. La primera era evidente a la vista de los daños existentes (Figuras 4 y 5) y de los resultados de los ensayos realizados. La segunda hizo inviable solucionar el problema mediante la sustitución completa de los pilares, pues habría supuesto la reconstrucción desde los cimientos de los cuatro soportes dañados del templo.

Las recomendaciones, cuando se trata con patrimonio histórico, van en la línea de aplicar técnicas reversibles, siempre que sea posible, y que modifiquen lo mínimo la percepción visual del monumento antes y después de la intervención. Dada la imposibilidad de aplicar técnicas de reparación completamente reversibles (11), y teniendo en cuenta todos los factores que condicionaban la intervención, se consideró que la inyección de lechadas, para consolidar tanto la estructura como el terreno de cimentación, constituía la mejor opción. La inyección ha sido un método de consolidación de estructuras degradadas muy utilizado a lo largo de la historia.

Es una opción apropiada para la reparación de estructuras patrimoniales, pues el aspecto final resulta completamente inalterado. Muestra de ello son los numerosos monumentos que han sido objeto de su aplicación en diferentes momentos de la historia. Pueden tomarse como ejemplo los casos de la catedral de Sevilla (12) (13), la iglesia de San Vicente de Ávila (13) o el Katholikon de Dafni (14), entre otros. En el caso de la fábrica de San Dionisio, la inyección se consideró una buena opción, ya que, tal como se había demostrado en el análisis realizado, el volumen de huecos interior era importante y por tanto la fábrica era inyectable. La lechada empleada debía cumplir los tres requerimientos de compatibilidad química, física y mecánica con la fábrica. En general, las lechadas hidráulicas con un tamaño de grano apropiado y con bajo contenido de sales cumplen estos tres requerimientos.

En paralelo a la inyección de estructuras de fábrica, y sin relación aparente con ella, en España se viene utilizando con bastante éxito una técnica de inyección para el tratamiento, consolidación, mejora y estabilización de terrenos. Esta técnica es conocida como inyección armada o inyección repetitiva selectiva, y combina la bien documentada y estudiada inyección de suelos (15) (16) con la inserción de refuerzos metálicos, principalmente a través de la propia herramienta utilizada para la inyección, el tubo-manguito (*tube-à-manchette*), que al final del tratamiento permanece unido al terreno tratado, cosiéndolo y funcionando como armadura.

Una descripción detallada de la inyección armada como técnica de tratamiento del terreno puede encontrarse en la bibliografía (17) (18) (19). Muy resumidamente, el procedimiento comienza con la colocación del tubo-manguito en el terreno previa perforación, para posteriormente introducir la lanza de inyección dentro del tubo-manguito. La lanza habitualmente va equipada con un obturador doble (Figura 13). El tubo-manguito recibe su nombre por los manguitos de goma que recubren los taladros periféricos por lo que pasa la lechada. Estos manguitos ceden bajo la presión de la inyección y funcionan como válvulas antirretorno. La función del obturador doble es aislar cada una de las válvulas de manguito de goma, de modo que se controla el volumen de lechada que se introduce en cada sección del terreno. El proceso puede hacerse en repetidas fases, de modo que en cada una de ellas habrá que recurrir a presiones de inyección mayores y a lechadas de granulometría inferior. La "gaine" o vaina es el relleno con lechada del espacio que queda entre el tubo y el terreno. Su función es la de obturar longitudinalmente

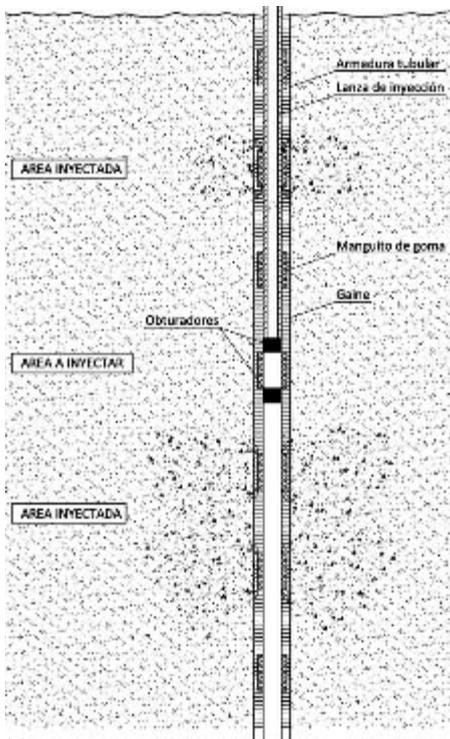


13. Herramientas para la inyección: Tubo manguito (izquierda) y obturador doble (derecha), en reposo (arriba) e hinchado (abajo).

14. Terreno inyectado.

13

la perforación y, al romperse bajo la presión de inyección, permitirá el paso de la lechada al terreno solamente en el entorno de uno de los manguitos. Así pues, el tubo-manguito funciona como tubería de inyección, como válvula y como refuerzo final del terreno consolidado (Figura 14).



14

La estructura de la iglesia de San Dionisio ha sido reparada mediante inyecciones de lechadas, usando como herramientas el tubo-manguito (*tube-à-manchette*) y el obturador doble. Por tanto, se ha adaptado la inyección armada o inyección repetitiva selectiva para su aplicación al caso de las estructuras. El empleo del tubo-manguito permite la inyección en fases repetidas, y por tanto, la aplicación de presiones de inyección superiores a las realizadas sin él y documentadas en la bibliografía (Tabla 3). Las propiedades mecánicas finales dependen de la presión de inyección, entre otros factores (19) (20) (21) (22) (23) (24). Por tanto, el empleo del tubo-manguito posibilita una mejora superior del material inyectado, así como una mayor homogeneización de la que se obtiene con presiones inferiores. La adaptación de la inyección

Tabla 3. Valores de presiones de inyección documentadas en fábricas (20).

Autor	Presión de inyección
Feilden (1982)	0,20 MPa
Vogiatzis (1989)	0,10 MPa
Tomazevic (1992)	0,20 MPa
Binda (1993)	0,35 MPa

armada al caso de las estructuras se llamará "inyección con tubo-manguito", con el fin de diferenciarlas de las "inyecciones armadas" que se aplicaron principalmente en Italia durante la segunda mitad del siglo XX (25).

Parámetros de la inyección

Los parámetros necesarios para caracterizar la inyección se definieron mediante ensayos con base en experiencias previas sobre fábrica de características similares (9). Principalmente son tres: el tipo de lechada, la presión de inyección y el caudal empleado. El control de los dos últimos, aspectos clave para el éxito del tratamiento, se tratarán en el siguiente punto.

El objetivo marcado en relación a la fábrica era alcanzar valores comparables a los de la fábrica sana (módulo de deformación dinámico en torno a 10-12 GPa). Para conseguir esta mejora en las propiedades se requería una lechada de resistencia elevada. Por este motivo las lechadas seleccionadas fueron de microcemento (20) (24). Concretamente, se emplearon lechadas de microcemento hidráulico ultrafino Spinor A12. Este tipo de conglomerante, recomendado para la inyección de estructuras degradadas, presenta como características principales:

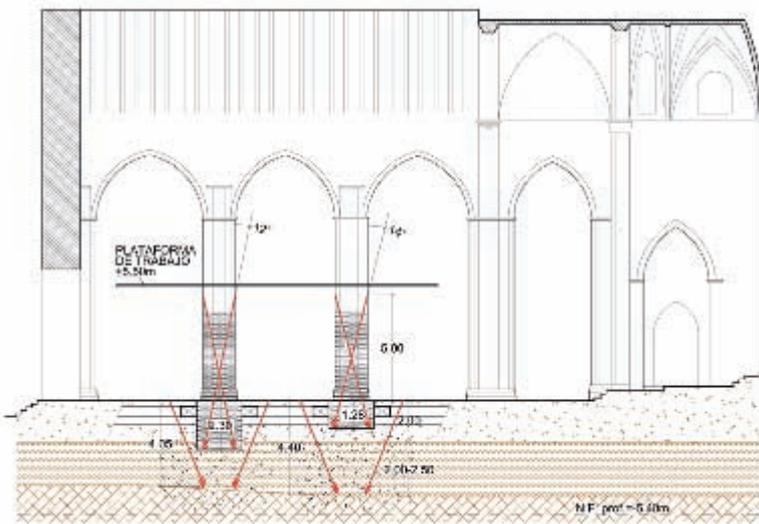
- Tamaño de partícula inferior a 12 μm .
- Composición aproximada de 75% de escorias de altos hornos y 25% de clinker.
- La resistencia a la compresión de la lechada con igual proporción de agua y microcemento es de 14 MPa, medido este valor a los 7 días de la inyección en una probeta de arena de granulometría entre 0,1 y 0,3 mm.

15. Sección del tratamiento en el terreno y en los pilares.

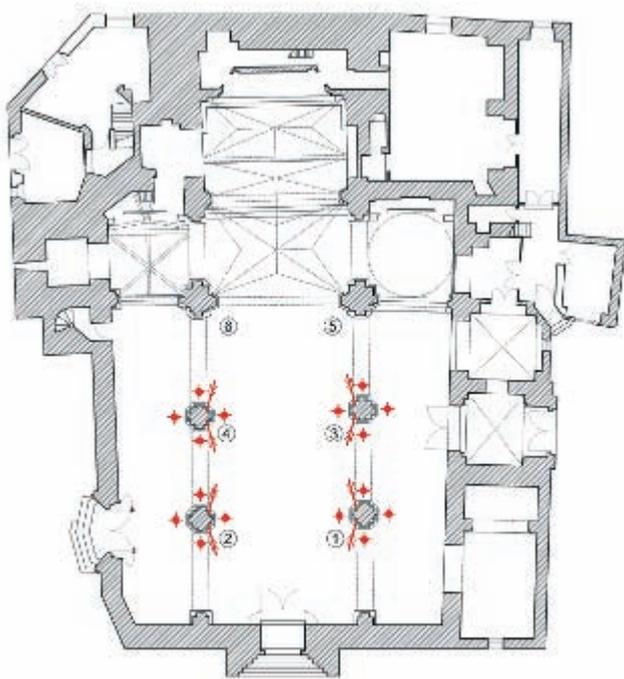
16. Planta esquemática del tratamiento

- El tiempo de paso por el cono de Marsh depende de la dosificación, pero está en torno a los 29 segundos (ténganse como referencia los 27 segundos de tiempo de paso del agua).

Para hacer la lechada inyectable y evitar la floculación de las partículas, fue necesario un aditivo superfluidificante-dispersante (PLAST 355), para reducir la viscosidad y evitar la segregación bajo la presión de inyección. La proporción empleada fue de 25 kg de microcemento por 75 L. de agua y 1 kg de aditivo. Para esta composición, el fabricante asegura 8,5 MPa de resistencia mecánica a compresión a los 7 días en probeta sin drenar.



15



→ Inyección subvertical de las fustas ● Inyección armada bajo los pilares

16

Medidas correctoras

La intervención se dividió en dos partes principales: el tratamiento del terreno y el de la fábrica. En el tratamiento del terreno se empleó la inyección armada en su forma original. El tratamiento de la fábrica, a su vez, se dividió en dos partes: unas inyecciones iniciales en el perímetro del soporte, que se llamarán inyecciones radiales, y una segunda parte, que consistió en la inyección con el tubo-manguito. La Figura 15 resume el tratamiento global. A continuación se procede a la descripción en detalle de cada una de las etapas del proceso.

La eficacia del tratamiento se controló mediante pruebas sónicas, estimando valores del módulo de deformación dinámico tras cada una de las fases del tratamiento. De este modo se pudo cuantificar la mejora en proporción a este parámetro. También se llevó a cabo el control de los movimientos de la estructura mediante topografía de precisión.

Fase 1: Inyección armada de la cimentación.

Los objetivos a cumplir por el tratamiento del subsuelo mediante inyección armada eran:

- Homogeneizar las propiedades de los estratos a los que eran transmitidas las cargas de los pilares. Este era el objetivo principal, ya que uno de los problemas de la estructura venía causado por las diferentes rigideces frente a cargas verticales de los apoyos de los soportes.
- Consolidar del terreno de cimentación y aportar al terreno, inicialmente de baja consistencia y con abundantes oquedades, la resistencia que necesitaba para soportar la carga adicional que suponía la inyección de los pilares.
- Desalojar el agua subterránea presente en el subsuelo (19). De este modo, se conseguiría reducir el volumen de humedad ascendente.

La inyección de la cimentación se llevó a cabo mediante cuatro inyecciones armadas bajo cada uno de los pilares (Figura 16). Las lechadas usadas fueron de cemento y bentonita, de proporción agua-cemento 1-1 y aproximadamente 4% de bentonita. Se tomó la precaución de no penetrar en las arenas arcillosas para no generar apoyos de distintas rigideces (Figura 15). Por último, se generó una solera por inyección de colmatación superficial bajo la solería.

Fase 2: Apeo y zunchado de los pilares.

El apeo, y sobre todo el zunchado perimetral de los pilares, fueron los pasos preparatorios para el comienzo de la inyección de los soportes.

El apeo y los zunchos estaban compuestos por piezas metálicas. La función del apeo era de estabilización y descarga parcial de los soportes, mientras que la de los zunchos era aportar resistencia a la fábrica de los pilares frente a la presión de inyección. Los zunchos presentaban huecos para permitir tanto la inyección radial de los pilares como la ejecución de la prueba sónica para el control del tratamiento (Figura 17).



17

Solamente se zuncharon los 2,5 m. inferiores de los pilares, por ser esta la zona más debilitada y por tanto en la que se realizaría la inyección radial previa al tratamiento definitivo. También eran las secciones donde las tensiones verticales eran mayores y por tanto, las presiones de inyección también debían ser superiores (16). Para conseguir que el zuncho funcionase de manera correcta, las piezas metálicas se rellenaron con escayola, previa aplicación a la superficie del pilar de un sellador que facilitara la eliminación de la escayola al final del tratamiento.

Fase 3: Inyección radial de los soportes.

Las inyecciones radiales recibieron este nombre por su disposición equidistante en el perímetro de los soportes. Consistían en el tratamiento de las secciones inferiores y zunchadas, que, como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, eran las más deterioradas. Eran pues, un paso previo y preparatorio para las inyecciones con el tubo-manguito.

Para estas inyecciones se usaron obturadores manuales o “manerales” (Figura 18) introducidos en taladros horizontales de 50 mm. de diámetro que llegaban hasta el núcleo del pilar. La disposición de los taladros de inyección radial fue a tresbolillo, en planos equidistantes a 50 cm. y habiendo cuatro taladros por cada plano horizontal. Esta disposición tiene como objetivo conseguir

la mayor cobertura posible con lechadas en el interior del pilar (20) (26).



18

La inyección se comenzó por los planos inferiores, en los cuatro taladros a la vez y con la misma presión para conseguir un resultado uniforme. Antes de empezar la inyección todas las perforaciones estaban hechas, de manera que las superiores funcionaban como taladros de alivio para las inferiores en el momento de la inyección de estos últimos. En este punto es muy importante destacar la importancia del caudal de inyección. El caudal es uno de los parámetros más importantes a controlar, ya que si éstos son altos, el efecto conjunto del aire ocluido y la presión aplicada en el interior de los soportes pueden conducir a la rotura del material inyectado. En este caso, el caudal máximo aplicado fue de 5 L/min., de manera que se garantizara la salida del aire y el correcto tratamiento de la fábrica. Los valores de las presiones fueron crecientes en cada una de las fases o pasadas hasta llegar a un máximo de 2 MPa. Los caudales, en cambio, se mantuvieron constantes y con el valor comentado.

Fase 4: Inyección longitudinal de los soportes.

Las inyecciones longitudinales o sub-verticales constituían la parte central del tratamiento. El tubo-manguito serviría como válvula de inyección además de como refuerzo al permanecer dentro de la sección del pilar al final del tratamiento.

Para la introducción el tubo-manguito se realizaron taladros en el fuste del pilar. Se colocaron dos tubos-manguito por cada elemento. Los tubos tenían una inclinación de 12 y 14° sobre la vertical, y la distancia entre ellos era la suficiente para que no se interferieran durante la fase de perforación (Figuras 15 y 19).

La inyección comenzó por las válvulas inferiores, no inyectando ambas tuberías simultáneamente. Al igual que se ha descrito para las inyecciones radiales, el proceso se realizó en fases o pasadas, con presiones ascendentes en cada una de ellas.

17. Apeo y zunchado de los soportes.

18. Obturadores “manerales” usados para las inyecciones radiales.



19

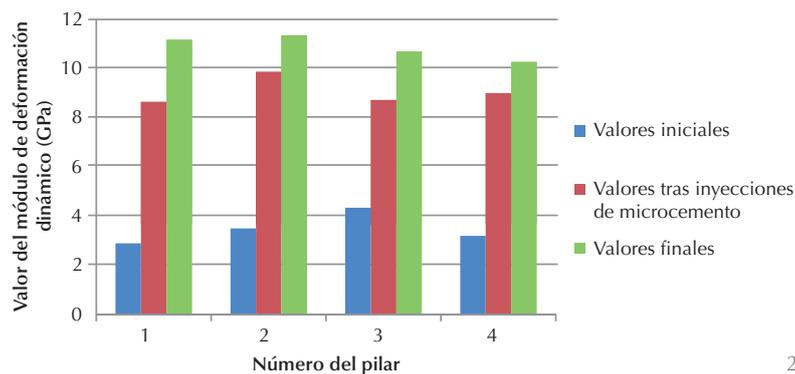
19. Perforadora preparada para taladrar (izquierda) y tubo manguito introducido en uno de los fustes (derecha).

20. Valores medios del módulo de deformación de los pilares tratados.

El número de pasadas osciló entre las dos pasadas en la mayoría de los casos y las seis que fueron necesarias en alguno de los manguitos en el pilar 3. Las presiones finales estuvieron entre 1,0 y 1,5 MPa. La Tabla 4 recoge un resumen de los parámetros de la inyección. El tratamiento de consolidación terminó inyectando lechadas de polímeros en las bases de los pilares, que colmataron los huecos que habían quedado tras la inyección de microcemento.

Tabla 4. Resumen de los parámetros de la inyección para los pilares tratados de la iglesia de San Dionisio.

		Inyecciones radiales	Inyecciones longitudinales	
			Tubo-manguito 1	Tubo-manguito 2
Pilar 1	Presión media (MPa)	2	1	1
	N.º medio de pasadas	2	2	2
	Admisión total (L)	2355	800	1685
Pilar 2	Presión media (MPa)	2	1,5	1,4
	N.º medio de pasadas	2	2	2
	Admisión total (L)	2370	1125	775
Pilar 3	Presión media (MPa)	2	1	1,2
	N.º medio de pasadas	2	3	2
	Admisión total (L)	2275	1285	1360
Pilar 4	Presión media (MPa)	2	1,2	1,5
	N.º medio de pasadas	2	3	3
	Admisión total (L)	1870	1405	890



20

Las medidas de control de la eficacia del tratamiento se tomaron al final de la fase de inyección con el tubo-manguito y al final de la inyección de polímeros. Los valores de los módulos de deformación dinámicos obtenidos a partir de dichas medidas están recogidos en la Figura 20, así como su comparación con los módulos iniciales. Puede observarse como los módulos finales han mejorado hasta alcanzar los valores esperados correspondientes a una fábrica sana (entre 10 y 12 GPa).

Para finalizar el tratamiento, se aplicó un mineralizador a las zonas inferiores de pilares y muros, así como a sus zapatas. Esta es una medida de índole preventiva para suplementar a las inyecciones del terreno su función de impermeabilización. Concretamente, en la iglesia de San Dionisio se aplicó un mineralizador químico. La aplicación se realizó mediante inyección sin presión del mineralizador impermeabilizante a través de taladros a tresbolillo.

7. CONCLUSIONES

Este artículo presenta el análisis, diagnóstico y restauración de la iglesia de San Dionisio en Jerez de la Frontera (Cádiz, España). El análisis realizado puso de manifiesto que la causa del deterioro de los pilares era doble: cimentación y baja resistencia de la fábrica de los soportes. Ambos problemas fueron corregidos usando la técnica de inyección con el tubo-manguito. Este método, que fue de aplicación directa para la consolidación de la cimentación, se ha adaptado para su aplicación al caso de fábricas, dando buen resultado. En este caso concreto, se han mejorado las propiedades mecánicas del material hasta alcanzar las de la piedra sana. Las presiones aplicadas han permitido esta mejora, sin suponer ningún riesgo para los soportes debido al diseño del tratamiento: inyecciones en repetidas fases o pasadas con presiones ascendentes y caudales bajos. También juegan un papel esencial en el buen resultado el zunchado de los soportes y las inyecciones radiales.

Económicamente puede afirmarse que la inyección con el tubo-manguito es una solución eficiente para la consolidación de estructuras. En este caso, con una media de entre 4000 y 5000 L de lechadas de microcemento por pilar se ha aumentado notablemente su capacidad de carga. En total, el presupuesto de ejecución material de esta obra se situó en 372144,40 €, resultando así una solución mucho más económica del coste que habría supuesto la aplicación de otras técnicas de reparación, como por ejemplo la sustitución completa de los elementos estructurales dañados.



21. Iglesia de San Dionisio una vez finalizada la restauración.

21

Aunque la inyección sea una técnica invasiva, en este caso su aplicación está justificada por la extrema urgencia de la restauración. Adicionalmente, en el resultado final la percepción de la fábrica no se altera lo más mínimo, pues la solución queda completamente oculta en el interior de los pilares. La iglesia, una vez limpia la fábrica y repuestos los trozos de sillares que se habían perdido, fue reabierta al culto en

Febrero de 2010 y actualmente presenta la imagen recogida en la Figura 21.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración prestada por el arquitecto técnico David Lugo Muñoz y los arquitectos Alejandro Cobo Fernández y Jorge Domínguez de Cos.

REFERENCIAS

- (1) García Peña, C. (1990). *Arquitectura gótica religiosa en la provincia de Cádiz: diócesis de Jerez* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid.
- (2) Ríos Martínez, E., Aroca Vicenti, F. (1999). *Historia de Jerez de la Frontera* (vol. 3): *El arte en Jerez*. Diputación de Cádiz, Servicio de Publicaciones.
- (3) Álvarez Luna, A., Guerrero Vega, J., Romero Bejarano, M. (2003). *La intervención en el patrimonio. El caso de las iglesias Jerezanas (1850-2000)*. Colección Premios Manuel Esteve. Servicio de Publicaciones, Ayuntamiento de Jerez.
- (4) ICOMOS. Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del Patrimonio Arquitectónico, 2001. <http://www.icomos.org/>
- (5) Geofísica Aplicada S. L. - Vorsevi, S. A. (2005). *Estudio Geofísico para los trabajos de restauración de las iglesias de Santiago y San Dionisio en Jerez de la Frontera (Cádiz)*. Madrid.
- (6) Maierhofer, C., Leipold, S. (2001). Radar investigation of masonry structures. *NDT&E International*, 34(2): 139-147. doi:10.1016/S0963-8695(00)00038-4 .
- (7) Christaras, B. (1996). Non destructive methods for investigation of some mechanical properties of natural stones in the protection of monuments. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology and the Environment*, 54(1): 59-63. doi: 10.1007/BF02600697.
- (8) Geofísica Consultores S. L. - Vorsevi, S. A. (2010) *Estudio Geofísico, mediante registros acelerométricos, para el proyecto de corrección de patologías de la Iglesia de San Dionisio en Jerez de la Frontera (Cádiz)*. Madrid.
- (9) Rodríguez Mayorga, E. (2011). *Rehabilitación del Templo Parroquial de Santiago Apóstol en Jerez de la Frontera: anamnesis, diagnosis, terapia y control* (Tesis Doctoral) Universidad de Sevilla.
- (10) Vicedo, Manzanares, F. (2004) *Reconocimiento de la patología de una edificación. Iglesia de San Dionisio. Plaza de la Asunción. Jerez de la Frontera (Cádiz)*. Sevilla.
- (11) Croci, G. (2000). General Methodology for the structural restoration of historic buildings: the cases of the Tower of Pisa and the Basilica of Assisi. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1): 7-18. doi: 10.1016/S1296-2074(99)00119-3.

- (12) Jiménez Martín, A. (2009). El proyecto de sustitución de los pilares 4C y 5C de la Catedral de Sevilla. *Revista Patrimonio Cultural de España*, 2: 302-323.
- (13) Mora Alonso-Muñoyerro, S. (2008). Consolidaciones históricas. Las fábricas tradicionales y su consolidación mediante sistemas y técnicas constructivas "modernas". *Acti del 2.º Convegno Nazionales Storia dell' Ingegneria*, pp. 661-669.
- (14) Miltiadou Fezans, Kalagri, A. Kakkinou, S. Ziagou, A. Delinikilas, N, Zarogianni, E. Chorafa, E. (2008). *Methodology for in situ application of hydraulic grouts on historic masonry structures. The caso of the Katholikon of Dafni Monastery. Structural Analysis of Historic Construction*. pp.1025-1033, D' Ayala & Fodde (eds), Taylor & Francis Group.
- (15) Cambefort, H. (1975). *Geotecnia del Ingeniero: reconocimiento de suelos*. Editores Técnicos Asociados, Barcelona.
- (16) Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. Balkema Publisher, Netherlands.
- (17) Santos, A., Cuéllar Mirasol, V. (1997). Inyecciones de impregnación y de fracturación. Curso sobre Técnicas Generales de Refuerzo del Terreno y sus Aplicaciones, CEDEX, Madrid.
- (18) Cuéllar Mirasol, V. (2004). Inyecciones por fracturación e inyecciones de impregnación. Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS, CEDEX, Madrid.
- (19) Da Casa, F., Echeverría, E., Celis, F. (2007). La intervención bajo rasante, la importancia de su conocimiento. La técnica de la inyección armada. *Informes de la Construcción*, 59(505): 21-35. doi:10.3989/ic.2007.v59.i505.498.
- (20) Van Rickstal, F. (2000) Grout injection of masonry, scientific approach and modeling (PhD Tesis). Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven.
- (21) Tomažević, M., Apih, V. (1993). The strengthening of stone-masonry walls by injecting the masonry-friendly grouts. *Journal of the European Association for Earthquake Engineering*, 6(1): 10-20.
- (22) Santos, A., Cuéllar Mirasol, V. (2000). Mechanical improvement of an argillaceous marl through cement-based reinforced grouting. *Fourth international Conference of Ground Improvement Geosystems*. Finnish Geotechnical Society, pp. 287-293.
- (23) Vintzileou, E., Miltiadou-Fezans, A. (2008). Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts. *Engineering Structures*, 30(8): 2265-2276. doi:10.1016/j.engstruct.2007.11.003.
- (24) Vintzileou, E., Tassios, P. (1995). Three-leaf masonry strengthened by injecting cement grouts. *Journal of Structural Engineering*, 121(5): 848-856. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:5(848).
- (25) Lizzi, F. (1989). Il consolidamento del terreno e dei fabbricati: cause dei dissesti, criteri d'intervento, casistica. Flaccovio.
- (26) Modena, C., Pineschi, F., Valluzzi, M. R. (2000). Valutazione della vulnerabilità sismica di alcune classi di strutture esistenti. Sviluppo e valutazione di metodi di rinforzo. Gruppo Nazionale per la Difesa dai terremoti (C. N. R.), Roma.

* * *