

2

APUNTES DEL CONOCIMIENTO

La inyección de cales en la consolidación de fábricas

Investigación aplicada

Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz



APUNTES DEL CONOCIMIENTO

2

**La inyección de cales en la
consolidación de fábricas**

Investigación aplicada

Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz



Título: La inyección de cales en la consolidación de fábricas. Investigación aplicada.
Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz

© Santa Maria Katedrala Fundazioa - Fundación Catedral Santa María

Edición y dirección: Santa Maria Katedrala Fundazioa - Fundación Catedral Santa María

Autores: Oskar Bell, Leandro Cámara, María del Carmen Fernández, Francisco García, Blanca Guaras, Iñaki Koroso, Juan Ignacio Lasagabaster, Pablo Latorre, Rafael Ramón-Lluch, Luis Miguel Martínez-Torres, Susana Mora, Diana Pardo, Alberto Plata, Leandro Sánchez y Santiago Tamayo.

Primera edición: marzo 2012

Maqueta y diseño: David Alvez

Las fotografías e imágenes de esta publicación forman parte del archivo fotográfico de la Fundación Catedral Santa María y su autoría, excepto en donde se indica expresamente, corresponde a los diferentes autores de los capítulos.

ISBN: 978-84-615-5308-2

Depósito legal: VI-505/09

Impresión: Imprenta Diputación Foral de Álava



Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas 3.0

Usted es libre de:



copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

Bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento. Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).



No comercial. No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas. No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

- Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.
- La utilización de las imágenes contenidas en esta obra para otro fin diferente es considerado obra derivada y por lo tanto no puede mostrarse en ningún otro contexto.
- Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.
- Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.

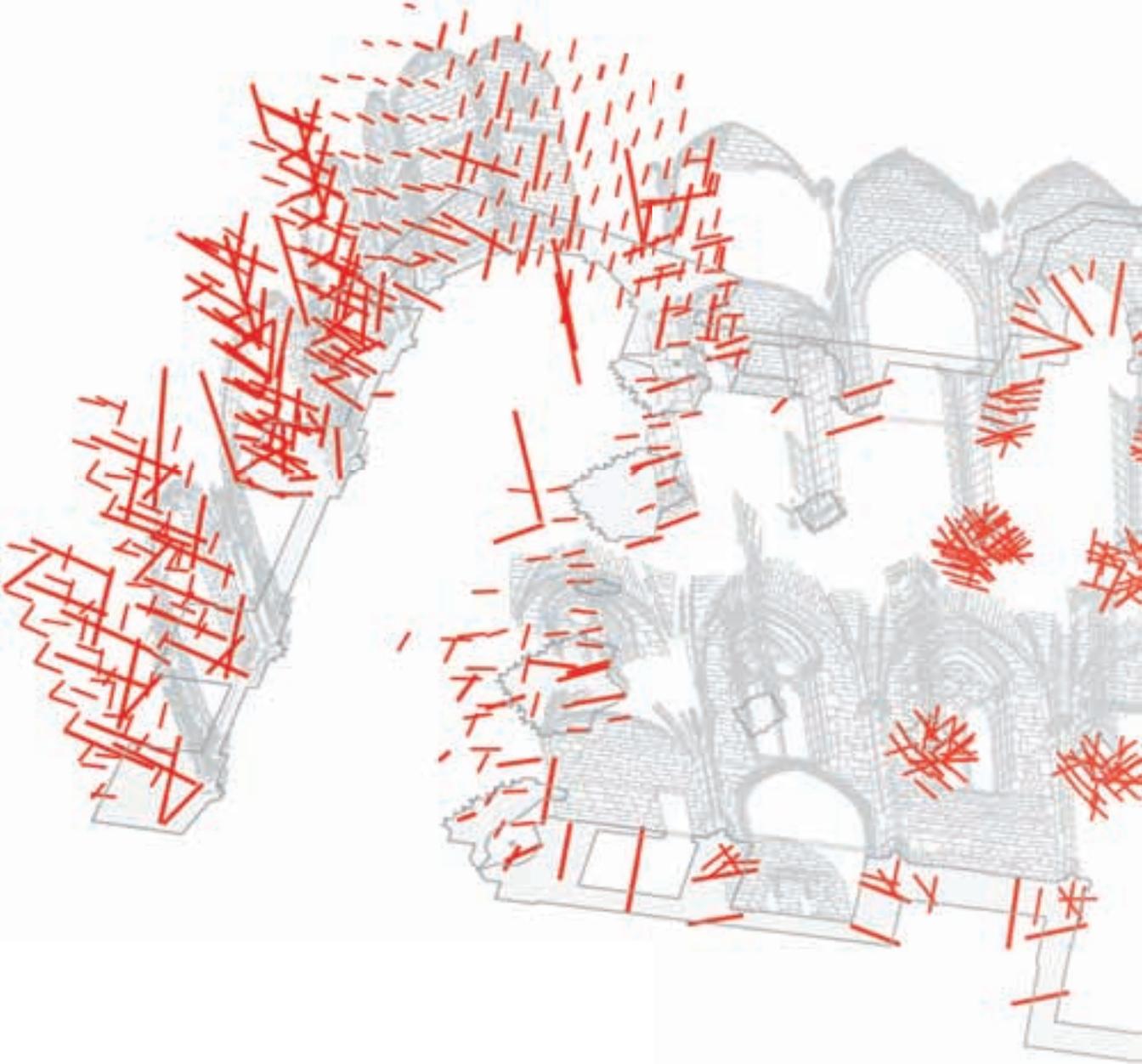
Los derechos derivados de usos legítimos u otras limitaciones reconocidas por ley no se ven afectados por lo anterior.

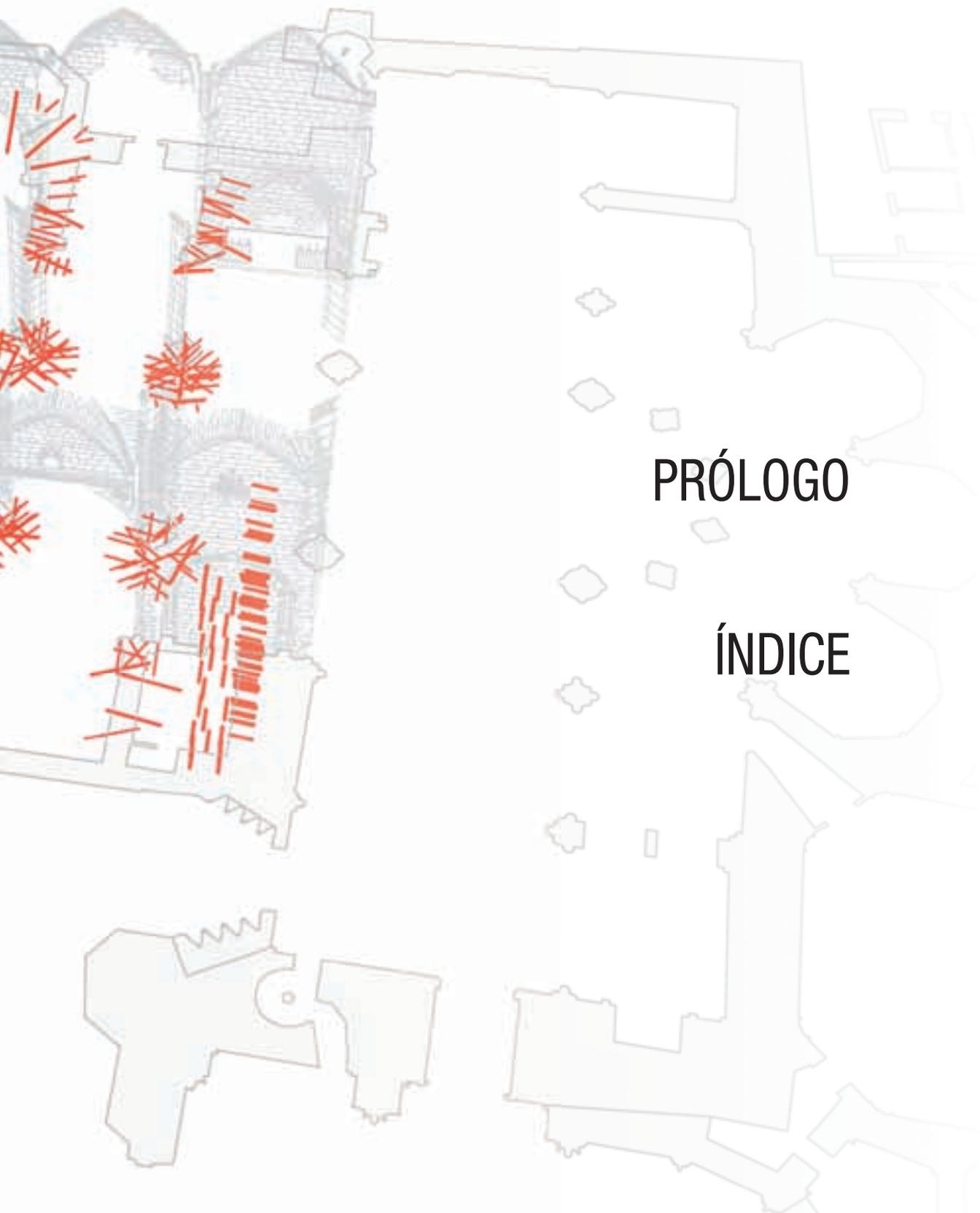
Esto es un resumen fácilmente legible del texto legal (la licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode>).

La inyección de cales en la consolidación de fábricas

Investigación aplicada

**Catedral de Santa María
de Vitoria-Gasteiz**





PRÓLOGO

ÍNDICE

PRÓLOGO

“Apuntes del Conocimiento”, es una colección que nació con vocación de compartir y socializar las experiencias habidas durante los trabajos de recuperación de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. El Plan Director para su Restauración Integral, publicado en 1998, debe ser considerado metodológicamente como una primera fase de un proceso de investigación y reflexión abierto, que se extiende en el tiempo y se completa con la realización de otros estudios complementarios, necesarios para la redacción de los correspondientes proyectos parciales de restauración.

Durante este tiempo, además, una gran parte de la actividad tanto investigadora como de intervención, se está llevando a cabo manteniendo una relación muy próxima con la sociedad. De hecho, todo el proceso de recuperación ha sido enfocado como una actividad cultural y formativa que es vehiculada por y desde la misma Catedral. La Fundación Catedral Santa María, cuyo patronato está formado por la Diputación Foral de Álava, el Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz y el Obispado de Vitoria, es la entidad que se crea para, precisamente, hacer posible su gestión unificada. A medida que las intervenciones van realizándose y el conocimiento sobre la realidad de nuestro templo aumenta, en la Fundación nos sentimos comprometidos con la transmisión del rico bagaje obtenido con nuestro trabajo a todos los que se hallan implicados, o simplemente se interesan, en la conservación del patrimonio monumental.

El objetivo de este segundo tomo de la colección, es el de poder compartir con las personas lectoras, el proceso seguido para la consolidación mediante inyecciones de una buena parte de las zonas ocultas de las fábricas de la catedral, ante la evidencia de su degradación interna. El sistema de trabajo seguido en la investigación sobre la historia constructiva del edificio (utilizando la disciplina denominada arqueología de la arquitectura) ha sido apoyado con el empleo de herramientas de análisis y detección no destructivas o de impacto reducido, simultaneando, en algunos casos incluso, la intervención con el estudio de las fábricas prácticamente en tiempo real.

Ello ha permitido una mejor evaluación del alcance y gravedad de los daños detectados, la adopción eficaz de las obligadas medidas preventivas, así como la programación con tiempo suficiente, de las investigaciones y ensayos considerados necesarios para la elección de los materiales y las técnicas de puesta en obra adecuados para la consolidación. Reflejo de todo ello es el pliego anexo de condiciones técnicas particulares aplicable a casos similares al nuestro.

Para ello ha sido fundamental el haber contado con el apoyo de la Diputación Foral de Álava, a través de los Servicios de Patrimonio Histórico-Arquitectónico y de Restauraciones, así como la disponibilidad de su Laboratorio General que ha jugado, en este empeño, un papel relevante y yo diría que imprescindible, al haber puesto todos sus medios técnicos y humanos a disposición de los equipos de trabajo de la Fundación. De igual manera la existencia de un convenio-marco estable, de colaboración con la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), ha facilitado la incorporación de cualificados especialistas al equipo transdisciplinar.

Un material como la cal, tan cotidiano y presente en la arquitectura histórica, adolece en su utilización de insuficientes, por no decir, inexistentes protocolos normalizados. Ello produce efectos muy contraproducentes de cara a su implementación como material sujeto a los procesos productivos comerciales que cada vez con mayor fuerza exigen de homologaciones referenciales. Quien lea entre líneas estos apuntes, podrá observar estas dificultades en nuestra búsqueda de resultados. Durante el proceso de investigación ha habido caminos iniciados, pero que no han sido recorridos en su totalidad. Desde aquí una humilde llamada a los responsables de las regulaciones normativas que afectan a la rehabilitación y restauración de edificios construidos con materiales “tradicionales”, para que, a la mayor brevedad posible, se resuelvan estas carencias, máxime cuando ya se evidencian, por doquier, las bondades de su aplicación en la construcción contemporánea, especialmente desde el punto de vista de la sostenibilidad medioambiental.

11

Juan Ignacio Lasagabaster Gómez

Director Gerente

Fundación Catedral Santa María

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN 17

1.1.- PRESENTACIÓN DEL MONUMENTO *(Extracto del Plan Director)*

1.1.1.- Emplazamiento

1.1.2.- Estructura general del complejo de edificios

1.2.- FÁBRICAS TRADICIONALES Y SU CONSOLIDACIÓN MEDIANTE SISTEMAS Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS 'MODERNAS' *(Susana Mora)*

1.2.1.- Antecedentes

1.2.2.- Las posiciones teóricas en la restauración de monumentos y las técnicas constructivas

1.2.3.- Las nuevas técnicas. Las inyecciones en la consolidación de monumentos. San Vicente de Ávila

1.2.4.- Santa María de Castro Urdiales

1.2.5.- La Catedral de Sevilla

1.3.- CONSOLIDACIÓN DE FÁBRICAS MEDIANTE INYECCIONES *(Leandro Cámara)*

1.3.1.- La Catedral de Santa María

1.3.2.- Consolidación o refuerzo de estructuras de fábrica

1.3.3.- Investigación y obra en la catedral

1.3.4.- Otras intervenciones

2.- PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 43

2.1.- MATERIALES UTILIZADOS EN LAS FÁBRICAS. PIEDRAS Y MORTEROS

(Luis Miguel Martínez-Torres)

2.1.1.- Dimensiones medias de las rocas *(Luis Miguel Martínez-Torres)*

2.1.2.- Litología *(Luis Miguel Martínez-Torres)*

2.1.3.- Características físicas y ensayos de alterabilidad *(Luis Miguel Martínez-Torres)*

2.1.4.- Morteros *(Blanca Guaras)*

2.2.- LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS EMPLEADAS EN LA CATEDRAL

(Alberto Plata, Leandro Sánchez)

2.2.1.- Las técnicas constructivas

2.2.2.- El ciclo productivo de la piedra

2.3.- VARIABLES TIPOLOGICAS DISCRIMINANTES DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA

(Leandro Sánchez, Alberto Plata)

2.3.1.- Introducción

2.3.2.- Definición de las variables morfológicas y constructivas discriminantes en una clasificación tipológica de los muros de fábrica

2.4.- COMPOSICIÓN HISTÓRICA DE LOS MUROS *(Leandro Sánchez, Alberto Plata)*

2.4.1.- La combinación de las técnicas en función de su relación histórico-constructiva

2.5.- TIPOLOGÍAS DE LOS MUROS DE LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA

(Extracto del Plan Director)

2.5.1.- Muro de mampostería de lajas en sus dos caras, de gran espesor construido en época de Alfonso VIII (1158-1214)

2.5.2.- Muro de mampostería de Alfonso VIII tallado y forrado interiormente por una hoja de sillería en las dos fases del gótico de los siglos XIII y XIV

2.5.3.- Muro de sillería de caliza blanca (lumaquela de Ajarte) en sus dos caras

2.5.4.- Muro de sillería en la hoja interior y de mampostería en la hoja exterior

2.5.5.- Muro de mampostería en sus dos caras de tipología diversa

2.5.6.- Muro de sillería de arenisca de la sierra de Elguea

2.5.7.- Muro de ladrillo y entramado de madera

2.5.8.- Muros enfoscados de cal o cemento

2.6.- PATOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS. CAUSAS DEL AFOLLAMIENTO DE LOS MUROS

(Pablo Latorre)

13

3.- DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN INTERIOR DE LAS FÁBRICAS 81

3.1.- MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

3.1.1.- Radiografías *(Luis Miguel Martínez-Torres)*

3.1.2.- Termografías *(Luis Miguel Martínez-Torres)*

3.1.3.- Radargramas *(Francisco García García)*

3.1.4.- Sondeos eléctricos *(Rafael Ramón-Lluch)*

3.2.- MÉTODOS DESTRUCTIVOS: PERFORACIONES, TESTIGOS Y ENDOSCOPIAS

(Oskar Bell, Pablo Latorre)

3.2.1.- Sistemas de perforación

3.2.2.- Inspecciones visuales remotas. Tipologías y características de los endoscopios industriales

3.3.- VALORACIÓN FINAL *(Oskar Bell)*

4.- CONTEXTO ACTUAL DE MATERIALES Y TÉCNICAS DE INYECCIÓN 105

- 4.1.- ANTECEDENTES (*Oskar Bell*)
 - 4.1.1.- El problema de la Catedral
 - 4.1.2.- Estado de la cuestión
 - 4.1.3.- Las consolidaciones históricas mediante inyección
- 4.2.- MATERIALES UTILIZABLES EN EL PROCESO DE INYECCIÓN (*María del Carmen Fernández*)
 - 4.2.1.- Planteamiento general
 - 4.2.2.- La cal como ligante
 - 4.2.3.- Propuestas para la investigación
- 4.3.- METODOLOGÍA DE INYECCIÓN (*Oskar Bell*)
 - 4.3.1.- Geotecnia y cimientos
 - 4.3.2.- Restauración artística
 - 4.3.3.- Restauración arquitectónica

5.- SELECCIÓN DEL MATERIAL A INYECTAR (*Santiago Tamayo*) 131

- 5.1.- ENSAYOS CON MORTEROS
 - 5.1.1.- Morteros con cal aérea
 - 5.1.2.- Morteros con cal hidráulica natural
- 5.2.- LECHADAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-5
 - 5.2.1.- Análisis de fluideces
 - 5.2.2.- Tiempo de utilización de la lechada
 - 5.2.3.- Análisis de resistencias
 - 5.2.4.- Control de inyecciones en obra
- 5.3.- HORMIGONES DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-5
- 5.4.- LECHADAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5
- 5.5.- MORTEROS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5 ALTA FLUIDEZ (MAF)
- 5.6.- HORMIGONES DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL 3,5

6.- GUÍA DE ACTUACIÓN. EJEMPLO PRÁCTICO 163

- 6.1.- METODOLOGÍA, DOCUMENTACIÓN PREVIA Y DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN INTERIOR (*Oskar Bell*)
 - 6.1.1.- Introducción al ejemplo práctico
 - 6.1.2.- La elección de la trama y el sistema de perforación
 - 6.1.3.- La identificación de los sondeos, las fichas y registros
 - 6.1.4.- El proceso de inyección

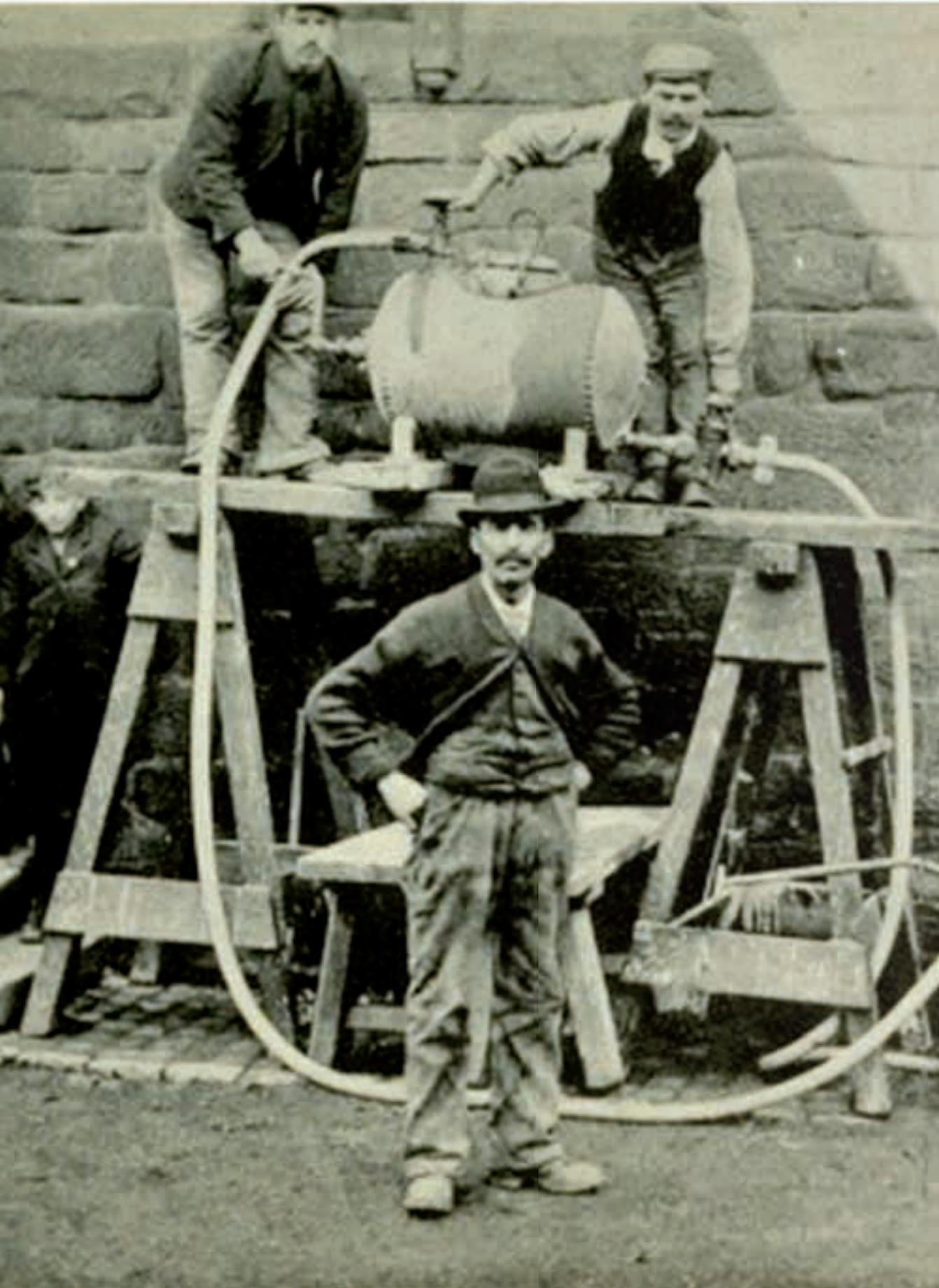
- 6.2.- GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN (*Iñaki Koroso*)
 - 6.2.1.- Introducción
 - 6.2.2.- Base de datos relacional
 - 6.2.3.- Georreferenciación e incorporación al Sistema de Información Monumental
 - 6.2.4.- Gestión de la información referida a los sondeos
- 6.3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS (*Oskar Bell*)
 - 6.3.1.- Introducción y comisión de cales
 - 6.3.2.- La consolidación del pórtico
 - 6.3.3.- Georreferenciación de resultados de inyección
 - 6.3.4.- Análisis de resultados
- 6.4.- APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA (*Oskar Bell*)
 - 6.4.1.- Inyecciones en los pilares de la nave
 - 6.4.2.- Inyecciones en las zonas inestables de la cabecera. La capilla de los Reyes

**7.- LA CAL APLICADA A LA RESTAURACIÓN DE LA OBRA ARTÍSTICA
VINCULADA A LA ARQUITECTURA (*Diana Pardo*)..... 235**

- 7.1.- INTRODUCCIÓN
- 7.2.- PIEZAS DESCOLGADAS
- 7.3.- HUECOS Y GRIETAS PROFUNDAS, ZONAS CON EXCESO DE HUMEDAD
- 7.4.- JUNTAS Y MORTEROS DE ACABADO
- 7.5.- FISURAS, DESGASTES Y EROSIÓN DE LA SUPERFICIE
- 7.6.- REVESTIMIENTOS DESPRENDIDOS
- 7.7.- DOSIFICACIONES
- 7.8.- CONCLUSIONES

ANEXO (*Oskar Bell*)..... 253

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARA LA CONTRATACIÓN DE LA EJECUCIÓN DE LAS INYECCIONES DE LECHADAS Y MORTEROS DE CAL HIDRÁULICA EN LAS FÁBRICAS DE LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA DE VITORIA-GASTEIZ





- 1 -

INTRODUCCIÓN



Img. 1.1. Vista general de la Catedral de Santa María en el año 2011 (Paisajes Españoles).

1.1.- PRESENTACIÓN DEL MONUMENTO ⁽¹⁾

1.1.1.- EMPLAZAMIENTO

El conjunto catedralicio de Vitoria-Gasteiz se encuentra enclavado en la parte más alta del promontorio en que se asentó la primitiva Gasteiz que da origen a la ciudad y dentro del espacio delimitado por su primer recinto amurallado. Es el extremo norte de un pequeño cerro alargado de dirección norte sur, elevado unos veinte metros de la llanada alavesa que lo circunda. El solar de la Catedral de Santa María acusa en su interior parte de ese fuerte desnivel, pues su zona sur y oeste, hacia

la ciudad vieja en la planicie superior, está elevada unos nueve metros respecto a la nordeste, a media altura de la ladera.

Esta condición orográfica e histórica hacía que el subsuelo del edificio albergase un gran volumen de rellenos de tierras aportadas artificialmente para regularizar el piso del interior del edificio, además de producir una gran diferencia de altura en la construcción de los cerramientos de sus distintos lados.

La observación de los planos de restitución de la evolución histórica del núcleo más antiguo permite observar el acomodo de la catedral formando parte de

la propia muralla medieval. Esto justifica tanto la apariencia maciza que tenían sus muros en el lado norte como la existencia del paso de ronda de esa muralla a través de toda la estructura del edificio, desde el extremo sur de su crucero hasta la esquina noroeste de su pórtico, circundando toda la girola, el transepto y la nave norte de la iglesia.

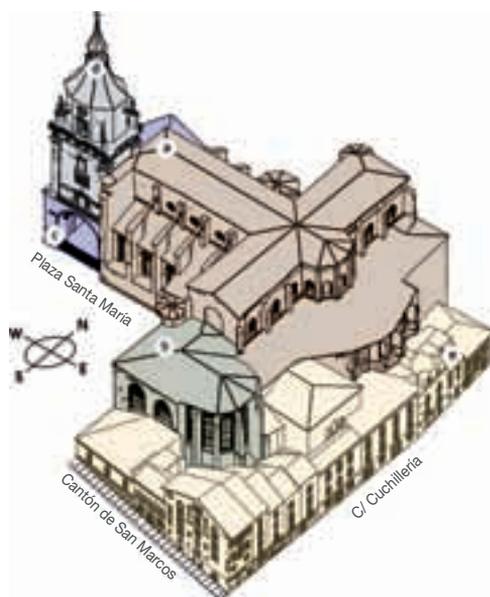
Hoy, sin embargo, el aspecto defensivo que tuvo se ha perdido en gran parte debido a la construcción de edificios de viviendas y servicios de la propia catedral en su flanco este, donde el enorme desnivel entre el paso de ronda y el terreno natural -unos doce metros- daría un aspecto imponente al exterior de la girola, similar al que sí tiene el testero norte del crucero. La catedral, en efecto, forma parte de una manzana de construcciones de distinto uso que enmascaran sus volúmenes, lo que, junto a la falta de una verdadera fachada, hace que carezca de la nítida imagen de monumento que suele esperarse de los edificios religiosos singulares.

La evolución de la ciudad ha dejado por fin un espacio libre en el ángulo suroccidental del conjunto, la plaza de Santa María, desde la que se accede al interior a una cota de suelo ligeramente más baja. En los lados oeste y norte, la calle de Fray Zacarías Martínez y el cantón de Santa María salvan el desnivel entre la plaza y la calle de Cuchillería circundando las fachadas oeste y norte respectivamente. Esta última calle sigue la curva de nivel a media ladera del cerro, bajo lo que fue la muralla oriental de la ciudad, y a ella dan fachada los edificios adosados tardíamente.

1.1.2.- ESTRUCTURA GENERAL DEL COMPLEJO DE EDIFICIOS

La Catedral de Santa María agrupa un conjunto de edificaciones de distintos usos construidas en momentos históricos distantes.

- El edificio principal y más antiguo del conjunto es la iglesia de Santa María, que se orienta con su eje longitudinal en dirección este-oeste, ligeramente inclinado hacia el norte en su extremo oriental.
- En el extremo sur del edificio se construye la capilla de Santiago, hoy parroquia de Santa María, de menor volumen y entidad pero de gran interés arquitectónico y constructivo.



Img. 1.2. Vista en perspectiva del edificio y su entorno.

- c) En el extremo occidental, a los pies de la iglesia, se alza un gran pórtico absidado de dirección norte-sur, que protege y completa el programa decorativo de las portadas.
- d) Sobre este pórtico, en su tercio meridional, se sobre eleva la enorme torre de campanas rematada con chapitel, hasta una altura de unos sesenta metros sobre la cota de la calle en esta zona.
- e) En todo el lado oriental de la iglesia de Santa María y de la capilla de Santiago se adosa un conjunto de construcciones de servicio de la catedral, de las que la más importante es la sacristía, de factura tardo barroca. A su alrededor han ido creciendo durante los siglos XIX y XX, espacios de administración, almacén y otros servicios relacionados con la designación de Vitoria como sede episcopal y la conversión de la antes colegiata en la actual catedral en 1861.

1.2.- FÁBRICAS TRADICIONALES Y SU CONSOLIDACIÓN MEDIANTE SISTEMAS Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS 'MODERNAS'

1.2.1.- ANTECEDENTES

No se puede realizar una extensa explicación sobre las distintas posiciones que frente a las preexistencias han venido sucediéndose o conviviendo a lo largo de la Historia, pero es evidente que han venido condicionadas por las técnicas que para su conservación o consolidación existían

en el momento. Como decía D. Modesto López Otero, *“la historia de las restauraciones es la historia de los recursos constructivos”*.

Este tema ha sido tratado en otros lugares, haciendo especial hincapié en aquellos aspectos documentales, inherentes a la materialidad del elemento y que deberían conservarse, con independencia de los aspectos formales.

Con relación a esto, recordaría una frase de Piero Sampaolesi en su *Discorso sulla Metodologia generale del restauro dei monumenti* (EdamEditrice, Firenze 1980, página 13): *“la restauración quiere y debe conservar cuanto sea posible no sólo la forma, sino la materia misma del edificio y con la materia la personalidad, esto es la piel externa y las estructuras, juntas, en resumen el edificio entero vivo en cuerpo y espíritu”*.

1.2.2.- LAS POSICIONES TEÓRICAS EN LA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS Y LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

Cesare Chirici en *Il problema del Restauro* (Milano, 1971), afirmaba que: *“son los medios técnicos los que establecen los límites y caracteres de la conservación de lo antiguo”*. Mucho antes, en 1932, Modesto López Otero, con motivo de su ingreso en la Academia de la Historia, señalaba en su discurso titulado *La Técnica Moderna en la Conservación de Monumentos*, que la historia de las conservaciones es la de los recursos constructivos de la época.

Durante siglos las técnicas y los materiales de construcción no sufrieron grandes transformaciones, pero es en el siglo XIX cuando las nuevas técnicas, la industrialización y su aplicación a las construcciones históricas plantearán problemas distintos.

Desdoblada la materia de la que consta un edificio histórico (siguiendo a Cesare Brandi) en estructura y aspecto, uno de los problemas cruciales será la aceptación o no del paso del tiempo por el elemento, en el intervalo interpuesto entre el final del proceso creativo y el momento del impacto en la conciencia del moderno observador.

Al aceptar las estratificaciones que en ese periodo intermedio se han ido acumulando, éstas se manifiestan a través de las irreversibles transformaciones físicas de la materia y en las modificaciones de las condiciones de visión.

Cuando la transformación física de la materia original la hacía inservible para cumplir la función para la que estaba destinada en el edificio, el procedimiento habitual había sido la sustitución de aquella.

Pero la difusión del concepto de *restauración estilística* significó en muchos casos una coartada, procediendo a las sustituciones sistemáticas de elementos *originales* por otros más próximos al elemento “como debía haber sido”.

La técnica del hormigón armado representará una aportación de capital importancia, en cuanto a que significará

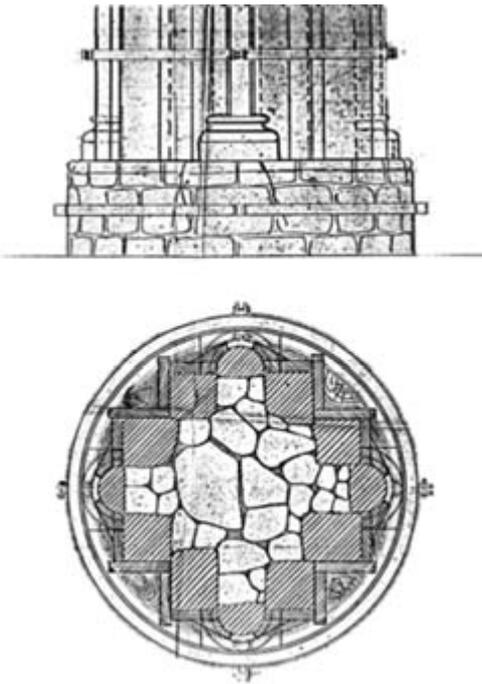
una posible sustitución de la estructura, salvando el aspecto, en esa dualidad de la materia propuesta por Brandi. No aceptando otras soluciones que rompieran la unidad figurativa, esta técnica abre un nuevo camino.

1.2.3.- LAS NUEVAS TÉCNICAS. LAS INYECCIONES EN LA CONSOLIDACIÓN DE MONUMENTOS. SAN VICENTE DE ÁVILA

El año 1903 en la revista *Arquitectura y Construcción*, número 193, página 255 aparece un suelto copiado del *Times Engineering Supplement*, asegurando que es posible la restauración de monumentos “cuando no flaquean más que por falta de solidez en las fundaciones o de la obra gruesa”, con sólo hacer una abundante inyección de mortero de cemento. Se mencionan como ventajas, la seguridad y la economía, pero también el que no haya que sustituir elementos de las antiguas fábricas. Se publica bajo el título *Restauración de los monumentos antiguos por inyección de mortero de cemento*, y en él, F. Fox cita las restauraciones de la Catedral de Winchester, de la iglesia sajona de Corhampton y del puente de Auld Brig Oáyr, en Escocia.

Con este motivo se dan a conocer intervenciones similares realizadas en España, país pionero en la técnica de consolidación mediante inyecciones.

En 1889, D. Enrique Repullés y Vargas en su *Proyecto de Restauración de la Basílica de San Vicente de Ávila*, contempla la consolidación de pilares con inyecciones



Img. 1.3. Proyecto de Repullés para la consolidación mediante inyecciones (Estudio de Repullés).

de lechada de cemento. Éstos se encontraban en situación muy peligrosa, presentándose rotos y desencajados al exterior. Posiblemente contruidos, como era habitual, por un núcleo central a base de mampuestos y mortero de cal y arena vertido, y una hoja externa formada por sillares de unos 20 ó 30 cm de espesor, sin llaves ni piedras pasantes, mal trabados ⁽²⁾.

Repullés señala que al descomponerse los morteros del núcleo central y quedar sueltas las piedras, éstas ejercen presión sobre ese revestimiento exterior formado por los sillares de pórfido arcilloso, que no es capaz de contenerla.

No le parece aceptable la reedificación del pilar, ni desde el punto de vista constructivo, ni desde el punto de vista que él llama *arqueológico*, pues “hubiera exigido grandes y costosos apeos, comprometiéndose la estabilidad del templo y desnaturalizándose la antigua estructura”. Por ello pensó en la consolidación empleando la técnica de inyecciones de mortero de cemento, y cuyo proceso él mismo explica⁽³⁾.

Primero se procedió a zunchar el pilar en el que se iba a intervenir, además de tomar otras precauciones, como un apeo generalizado. Para el zunchado del pilar, “se forró éste con tablonces de madera, sujetos unos con otros con tornillos, y todos ellos enlazados con zunchos de llanta de hierro, apretados con dobles tornillos con tuercas, colocados a un metro de distancia. Hecho esto, se hicieron varios taladros con una barrena mecánica en la zona superior del fuste, bajo los capiteles, y de unos dos o tres centímetros de diámetro. Por ellos y con una jeringuilla adaptada, se inyectó lechada de cemento, bastante fluida, hasta que por la base del pilar saliera agua filtrada”.

Una vez fraguado el núcleo se procedió a la sustitución de los sillares del revestimiento exterior en mal estado. Se comenzó por la base de piedra arcillosa que fue cambiada por sillares de granito de gran tizón, recibidos con mortero de cemento.

Después se fue cortando el forro de tablas, y se fueron arrancando los sillares exteriores en mal estado hasta dejar ver el núcleo central, que se había transformado en un todo homogéneo. Éste se rozó

en algunos puntos para poder recibir los nuevos sillares.

La graduación de las lechadas, dependería del tipo de cemento que se fuera a emplear y de las circunstancias de los elementos constructivos que se fueran a consolidar.

Para Repullés, cada edificio que se restaura es en el orden constructivo lo mismo que un enfermo en el fisiológico, y por ello no cree que puedan dictarse reglas generales, ya que entiende que no hay enfermedades sino enfermos. No obstante, como se acaba de ver, acepta los nuevos procedimientos constructivos y los nuevos materiales en las intervenciones en edificios antiguos, pero siempre que se mantengan ocultos; la evidencia visual de la intervención no le parece aceptable.

Esta posición recuerda otras, en relación con intervenciones anteriores, como la de Matías Laviña en la Catedral de León, a partir de 1860. Llevó a cabo la reconstrucción de las bóvedas y la portada del brazo sur del crucero, que previamente fueron derribadas. Así lo explica su autor: “se colocaron los aristones de las bóvedas con los rebajes que antes no tenían para enlazar la muradura de ladrillo y mortero con que se hicieron, a diferencia de las derribadas, que eran de piedra tova o esponjosa. La parte nueva de las bóvedas, consiste en tabiques de cuatro gruesos con mortero fino mezclado con cemento de Zumaya, que forma un clavo fuerte y activo sin necesidad de armazón de madera, hechas al aire como si fueran con yeso” ⁽⁴⁾. Repullés quiere beneficiarse de

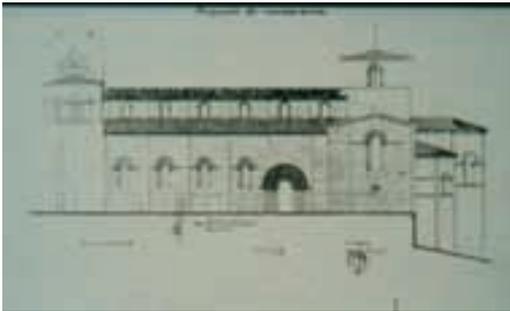
las técnicas modernas, pero sin embargo no piensa en imponerlas. Dedicó importantes esfuerzos al conocimiento del sistema constructivo del edificio, determinando sus problemas y las posibles causas de los mismos. Las soluciones tratan de dar respuesta a los daños que el paso del tiempo ha dejado en las antiguas fábricas, empleando las ventajas que la técnica moderna proporciona.

1.2.4.- SANTA MARÍA DE CASTRO URDIALES

Pero en los últimos años del siglo XIX, en España se realizaron otras intervenciones, donde se utilizaron sistemas de consolidación con inyecciones de cemento.

En 1889 se intervino en la Iglesia de Santa María de Castro Urdiales. Se trataba de una iglesia de tres naves, con girola y capillas absidiales, cuya construcción se llevó a cabo al parecer, y fundamentalmente, durante el siglo XIII. Sus tres naves presentan la misma altura, en el tipo del que Lamperez llamará de planta de catedral-salón.

G. Loredó en *Pequeñas Monografías de Arte* explica la intervención aplicando “procedimientos tanto científicos como artísticos” y sacando consecuencias. Se refiere al que considera célebre arquitecto M. E. Viollet le Duc, quien en su *Diccionario razonado de la Arquitectura francesa de los siglos XI al XVI* (tomo I, página 116) afirma que “la Arquitectura se compone de dos partes: la teoría y la práctica. La teoría comprende el arte propiamente dicho, las reglas inspiradas por el gusto,



Img. 1.4. y 1.5. Proyecto de restauración de San Vicente de Ávila (Archivo General de la Administración, Alcalá de Henares).



sacadas de la tradición y de las ciencias, que se pueden demostrar por fórmulas invariables, absolutas. La práctica es la aplicación de la teoría a las necesidades de la vida; la práctica es la que hace adaptarse el Arte y la Ciencia a la naturaleza de los materiales, al clima, a las costumbres de una época o a las necesidades del momento”.

Tras esta manifestación, dice que se entenderá la elección de la iglesia de Santa María de Castro Urdiales, para la aplicación de los citados procedimientos.

La iglesia presenta unos desplomes importantes. Lo primero que se lleva a cabo es un riguroso levantamiento de planos, que pone en evidencia las deformaciones del edificio y ayuda al conocimiento del mismo. La planta muestra la diferencia de distancias entre ejes de pilares de la nave central y su influencia en las bóvedas contiguas. También las diferentes dimensiones de los contrafuertes, así como de los pilares, y su posible refuerzo en el siglo XV.

El dibujo de la sección transversal es un maravilloso ejemplo de descripción y de intuición en el estudio previo de un monumento. Facilita la visión global del templo desde uno de sus puntos más representativos, para pasar después a estudiar los distintos elementos constructivos. Este tipo de estudios también lo realizarán, en otros monumentos, arquitectos como Juan de Madrazo y Demetrio de los Ríos, así como los de deformación de pilares que Narciso Pascual y Colomer efectuó en la Catedral de León hacia 1850.

G. Loredo realiza después un pormenorizado estudio de los esfuerzos a los que está sometido un pilar estratégico, siguiendo el cálculo denominado de flexión de los pilares de M. Planat. Considera que sobre el pilar cargan dos arcos formeros, un fajón y dos diagonales, además de la plementería correspondiente, parte de los muros superiores y armaduras de cubierta, llegando a la conclusión de que el peso total que carga sobre el pilar, un metro más abajo de la línea de arranques, es de 101 toneladas. Pasa a estudiar los empujes

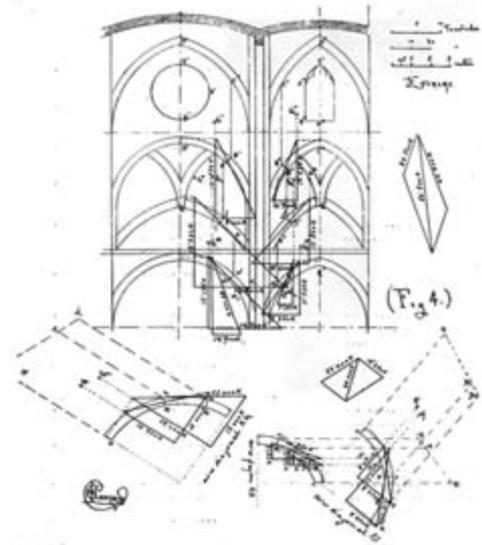
longitudinales y transversales, llegando a obtener todas las fuerzas, nueve, que actúan sobre el citado pilar y que él compone en dos únicas, y llega a un coeficiente de trabajo $r=14,5401$; le parece aceptable y lo compara con el de los pilares del crucero de San Pedro del Vaticano y San Pablo de Londres. Pasa a comprobar el equilibrio en un punto en el que ya hayan acometido las bóvedas bajas, llegando a un valor exagerado ⁽⁵⁾.

Por efecto de la gran presión en el arranque de las naves laterales y lo descuido de la construcción, se deformó el pilar, produciéndose un descentramiento con descenso de la junta exterior, y también del arco del arbotante superior, y la deformación de los arcos de las naves laterales.

Los pilares no están alineados en planta, sea por buscar la perspectiva, por recordar la nave de un barco, o por lo que parece más lógico, como es por error de replanteo, contribuyendo a que los arcos formeros (por esta desviación) puedan dar empujes oblicuos, llegando a favorecer el deslizamiento en el sentido de la junta.

Con este motivo, los contrafuertes se volvieron insuficientes y fue preciso reforzarlos, para asegurar la estabilidad de la parte alta de la edificación. Finalmente se llega a la conclusión de que el equilibrio está asegurado con la introducción del contrafuerte reforzado y el regruessado del pilar, que se aumentó en $0,45 \text{ m}^2$.

Del estudio del pilar antes de regruessarse, y con posterioridad a lo efectuado

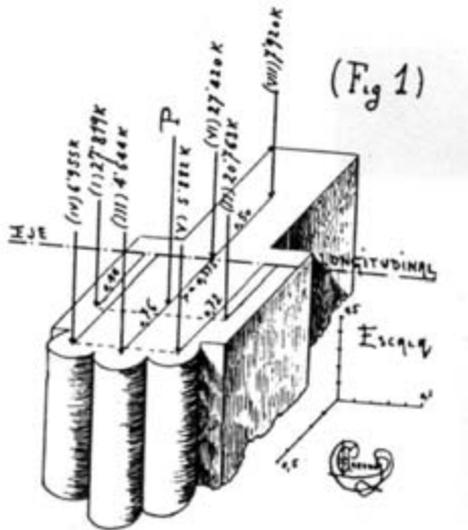


Img. 1.6. Plano del cálculo de estabilidad (COAM).

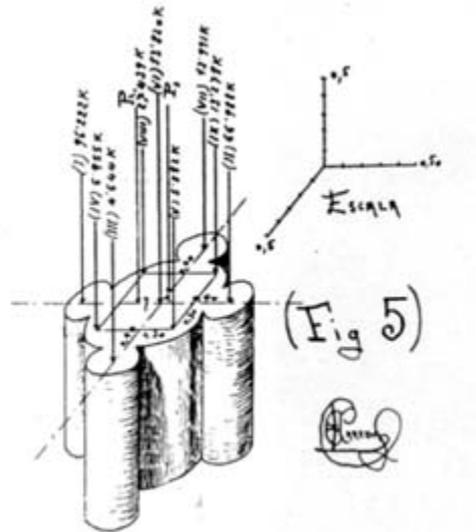
a partir del siglo XV, Loredó señala que está asegurado el equilibrio, siempre que no se destruya alguno de los elementos estudiados.

La iglesia se encuentra situada en un lugar donde el mar Cantábrico la sacude constantemente con el batir de sus olas. Y Loredó se pregunta si es digna de conservarse con tanto defecto para contestar que por supuesto, y de su estudio extrae las siguientes conclusiones:

- 1.- Nada se adelanta si la sección del pilar tiene gran amplitud si las cargas están mal repartidas.
- 2.- Siendo una iglesia relativamente pequeña, por un mal reparto de cargas, se hace trabajar el material a coeficientes tan exagerados para él, como 133 kg/cm^2 .



Img. 1.7. Sección de pilar y contrafuerte (COAM).



Img. 1.8. Sección de un pilar (COAM).

- 3.- Del examen de los cálculos se saca la consecuencia que de haber estado bien equilibradas las fuerzas que sobre él gravitan, acercándose o confundándose con el centro de gravedad, este coeficiente pudo ser de 41 kg.
- 4.- De haber empleado en la plementería de las naves bajas el mismo material que en las altas, los defectos se hubieran aminorado extraordinariamente, haciendo posible el equilibrio sin necesidad de los refuerzos y apeos.
- 5.- Los acodalamientos y apeos que se observan debajo del tejado de las naves laterales son debidos al segundo movimiento de los que se ha examinado; por lo cual, si en un principio fueron innecesarios y nacieron del temor del desconocimiento, hoy en día sería aventurado hacerlos desaparecer.

Como los pilares presentaban elementos dañados, Loredó pensó en el refuerzo con inyecciones de cemento, “dado el gran desarrollo que ha adquirido hoy día la fabricación de cementos” y dados los escasos recursos con que se contaba, pues se hizo una suscripción popular para afrontar la obra.

Pensar en apeos y sustitución de elementos del exterior de los pilares, era imposible por la escasez de dinero. Pero al quitar los guarnecidos que cubrían los paramentos, fueron apareciendo las fábricas descompuestas. Para limpiar las juntas y los espacios interiores de morteros descompuestos, se inyectó agua, hasta que salió limpia por la zona inferior de los pilares. Se recibieron las juntas con mortero de cemento y después, se rellenó el interior con “lechadas muy finas de este material”.

La revista *Resumen de Arquitectura* publica en 1897 un artículo relativo a esta restauración, donde su autor G. Loredo, estando de acuerdo con “salvar de la ruina su monumental iglesia de Santa María y para devolverla su prístina gracia y elegancia nativa”, se lamenta de que no haya habido acierto en el intento.

Se queja del empleo de cementos hidráulicos y cales grasas en vez de piedra compacta, a la vez que propone la desaparición de los arcos botareles o contrafuertes que resisten el empuje de las naves laterales, que podrán ser sustituidos por elementos de hierro.

No son soluciones muy bien aceptadas por la opinión pública en general, pues las entienden como soluciones prácticas y económicas, remedios de urgencia para evitar males mayores, pero siempre pensando que no es la solución óptima del problema.

1.2.5.- LA CATEDRAL DE SEVILLA

Un procedimiento similar se había proyectado para la Catedral de Sevilla.

Tras el derrumbamiento del pilar del crucero, que tuvo lugar el 1 de agosto de 1888, el arquitecto Joaquín Fernández sucede a Adolfo Fernández Casanova al frente de las obras. Presenta los proyectos de reconstrucción del pilar derrumbado y de las semibóvedas que cargaban en él, que son aprobados en marzo y mayo de 1890. Sin embargo, se impone la condición de que no sean ejecutadas las obras

de tracería de ventanales y detalles ornamentales sin que previamente se presenten los modelos o diseños correspondientes para su aceptación.

Para el pilar más peligroso, el del coro, propone su derribo y posterior reconstrucción, para lo que deberá presentar un proyecto de medios auxiliares.

Con posterioridad, Joaquín Fernández rectifica su decisión anterior, pues ha llegado a la conclusión de que no es necesaria ni conveniente la reconstrucción de ninguno de los pilares del templo. Para ello, dice que se ha excavado alrededor del pilar hundido y se ha comprobado que los cimientos son sólidos, al igual que el interior del pilar peligroso, que se ha inspeccionado. Pero de la observación del exterior de los pilares, deduce que presentan un estado similar al del pilar caído, pues la zona inferior de las fábricas está enripiada con piedras flojas y ladrillos no bien trabados, mientras que la zona superior está bien construida.

Joaquín Fernández tratará de conseguir la estabilidad y firmeza necesarias en las fábricas, uniendo los materiales de construcción disgregados dentro del pilar, mediante inyecciones de lechadas de cemento que unan la mampostería del núcleo central entre sí, y con la sillería exterior.

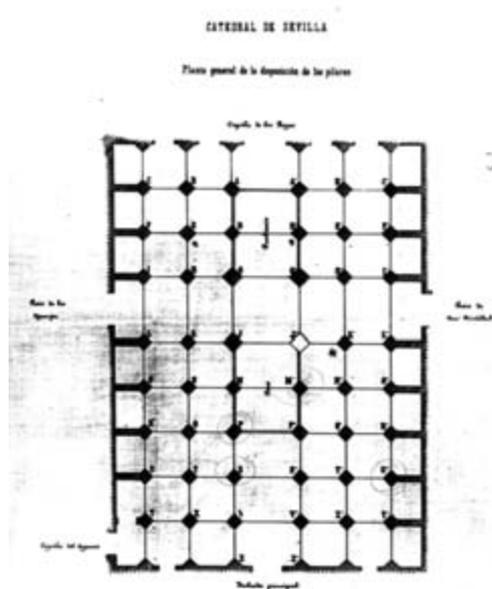
Para ello, propone un procedimiento consistente en inyectar bajo presión lechadas de cemento, por dos taladros de seis centímetros de diámetro ejecutados cada dos metros de altura, efectuados en dirección perpendicular entre sí y situa-

dos en planos horizontales. Con anterioridad a las lechadas de cemento, se habría introducido agua para eliminar los morteros descompuestos. Después, por cada plano horizontal, se introducirá, en una sola de las perforaciones y alternando las direcciones, una varilla de bronce de tres centímetros de diámetro. Con posterioridad se repararán los sillares que constituyen el perímetro exterior del pilar, sustituyendo los rotos.

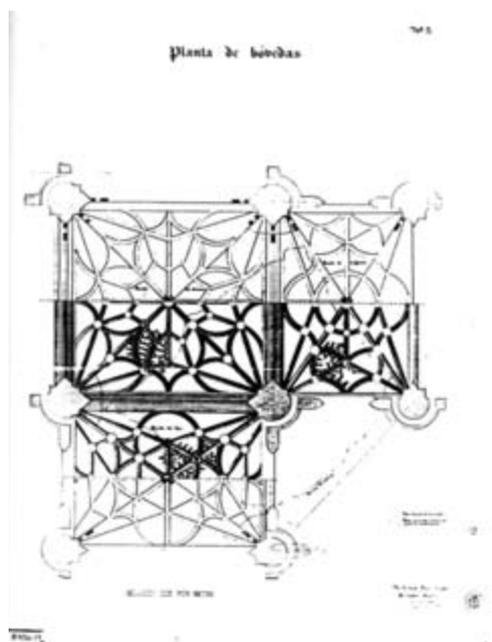
La Academia de San Fernando, al informar sobre el proyecto, se muestra menos optimista respecto al estado tanto de la cimentación como de las fábricas. La técnica de inyección no le parece adecuada si lo que sucede es falta de trabazón y no hay oquedades, pues dice, las lechadas de cemento penetrarán muy difícilmente por los intersticios que pueda contener cada masa de fábrica de dos metros de altura; pero sí lo hará el agua, que dejará humedad difícil de eliminar. Las varillas de bronce no se consideran suficientes para contener la presión de dentro a fuera que determina el asiento paulatino del relleno interior. Finalmente esta propuesta no se realizará.

Adolfo Fernández Casanova propondrá la reconstrucción de pilares, mejorando el sistema constructivo, macizándolos.

Éste había venido siendo el procedimiento habitual, y poco a poco se habían ido sustituyendo numerosos elementos. El Plan General de Obras propuesto por Adolfo Fernández Casanova el 22 de diciembre de 1881 distinguía entre las obras que se ocupaban de la solidez y conser-



Img. 1.9. Planta general con pilar peligroso (Archivo General de la Administración, Alcalá de Henares).



Img. 1.10. Planta de bóvedas (Archivo General de la Administración, Alcalá de Henares).

vación del templo, y de las que, una vez realizadas las primeras, se ocuparían del completamiento de todo aquello inacabado. La Academia de Bellas Artes de San Fernando, en informe firmado por su secretario Simeón Ávalos, señala que “toda demolición y apeo lleva consigo inevitablemente movimientos o alteraciones que hacen perder a las fábricas conservadas una parte de su cohesión y de su fuerza, ocurriendo con frecuencia la necesidad de sustituir las partes demolidas con materiales de mejor clase y con sistemas más perfectos en su estructura, como indudablemente había de acontecer a la reconstrucción del pilar ruinoso, en el que su fábrica de mampostería o de ladrillo refrentada de sillarejo, habrá de sustituirse por otra de material homogéneo de sillería”.

En la ejecución de las obras correspondientes al *Proyecto de reconstrucción de formeros, ventanajes y semibóvedas de colaterales del costado O. del brazo sur del crucero*, E. Fernández Casanova encuentra que el pilar sobre el que cargaban estos elementos presentaba quiebros que denunciaban la estructura alterada y sin la cohesión indispensable para garantizar la estabilidad. Ve imposible su “renovación parcial”, con revestimiento de cantería, y plantea su demolición y reconstrucción total. Para ello, tiene que realizar una importante labor de apeo, con grandes carpinterías.

El 5 de julio de 1888 el director de la Academia de San Fernando Federico de Madrazo y su secretario Simeón Ávalos proponen que le sea concedida la Gran

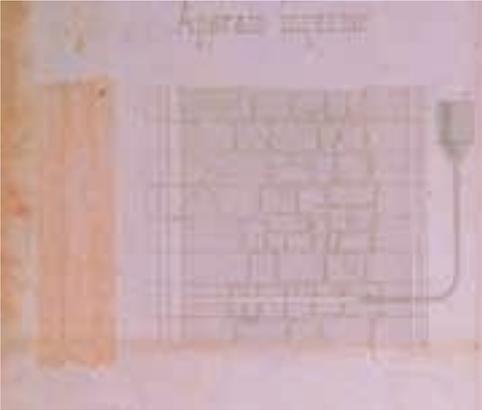


Img. 1.11. Proyecto de consolidación de apeos (Archivo General de la Administración de Alcalá de Henares).

Cruz de Isabel la Católica a Adolfo Fernández Casanova tras haber finalizado la reconstrucción del pilar sur del crucero. Duró desde el 8 de enero al 4 de abril, cuando se colocó la última piedra destinada a recibir los enjarjes de las fábricas conservadas; la altura total hasta los mismos es de 18 metros, con un volumen de más de 240 metros cúbicos.

El pilar reconstruido es de fábrica homogénea de sillería, constituido por 55 hiladas. Consta de un núcleo interior o corazón, de un solo sillar, en las 49 hiladas inferiores, y de dos y de tres en las superiores.

En torno a este núcleo un revestido de cantería, de hiladas alternas de mayor y menor, de diez sillares las hiladas impares y de nueve las pares. Para dotarle de trabazón y rigidez, se establecieron cuatro líneas verticales de enlace en los principales ángulos del pilar, colocando también una de sillares engrapados cada seis hila-



Img. 1.12. Proyecto de consolidación de apeos. Aparato inyector (Archivo General de la Administración de Alcalá de Henares).

das, quedando enlazadas las nuevas fábricas en sentido horizontal y vertical.

Las juntas son más finas que las de las antiguas fábricas. Las de lecho han quedado a nivel y son muy delgadas, y las montantes son encontradas.

¿Se entiende que los sistemas constructivos forman parte insustituible de los edificios? ¿Que un cambio en los aspectos mecánicos plantea un cambio radical en el entendimiento de aquellos? Posiblemente no. El debate irá por otros derroteros. Muchos años más tarde seguirá sucediendo lo mismo, salvo escasas excepciones.

El recuerdo y la admiración por estas primeras intervenciones que intentaban respetar el sistema constructivo fundamental del edificio, que se habían esforzado por conocer, utilizando las técnicas y materiales más modernos, han sido importantes para profundizar en estos conocimientos.

1.3.- CONSOLIDACIÓN DE FÁBRICAS MEDIANTE INYECCIONES

Desde el año 1991 la Catedral de Santa María se encuentra sumida en un proceso de recuperación funcional y constructiva que se derivó en primera instancia de la puesta en evidencia de sus problemas estructurales con el desprendimiento accidental de un fragmento del revestimiento del intradós de una de sus bóvedas, acaecido en aquel año.

A partir de ese suceso se ha venido desarrollando un proceso de intervención, que ha querido ser riguroso en todos sus aspectos, y que comenzó por la redacción de un plan director de restauración sustentado en una meticulosa investigación previa, tanto constructiva como histórica, continuó con la redacción de un anteproyecto global de restauración en el que se hacía una propuesta completa de intervenciones formalizadas arquitectónica y constructivamente, y está siendo culminado con la realización de las obras de restauración en sucesivas fases, con objetivos y medios acotados por los anteriores documentos.

Todo ello se ha ejecutado con la ayuda científica más adecuada a los objetivos y a los medios disponibles, realizando los estudios y ensayos necesarios para cada caso de intervención y formando de paso un corpus de conocimientos sobre la catedral y sobre los edificios históricos en general que se trata de poner en conocimiento del público interesado mediante publicaciones como ésta.

El estudio que se presenta en este volumen viene a mostrar parte del trabajo de investigación aplicada en la obra de restauración de la catedral que se ha desarrollado en los años recientes, centrándose en una de las técnicas empleadas en ella, la de las inyecciones de lechadas de material aglomerante en el interior de sus fábricas.

La obra prevista en los proyectos de restauración derivados de las propuestas generales de actuación indicadas en el plan director incluía la realización de esas inyecciones en algunas partes de las fábricas, dentro de un conjunto de actuaciones enmarcadas conceptualmente en una valoración general sobre el modo en que se comporta la estructura de la catedral y sobre sus necesidades de reparación.

La necesidad de operar con precaución tanto en la selección del material de inyección como en las técnicas para su ejecución en obra y control posterior llevó naturalmente a la realización de una serie de investigaciones previas centradas en cada uno de esos aspectos, estudios cuyos resultados se presentan ahora.

1.3.1.- LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA

La catedral es un edificio de origen medieval construido a partir de los inicios del siglo XIII, ocupando el solar donde se ubicaban una iglesia y un caserío, y formando parte de la muralla defensiva de la ciudad erigida en el siglo XII y modificada puntualmente con la obra de Santa María.

Durante años y siglos se siguen en la catedral distintas obras para dar lugar al edificio actual, una iglesia basilical formada por tres naves separadas por pilares y flanqueadas por capillas construidas en distintos momentos, y una cabecera formada por un largo transepto de una sola nave con capillas en su lado oriental y girola con deambulatorio y tres capillas absidales en torno al presbiterio, separados también por pilares. A los pies del templo se añaden un gran pórtico y una torre sobre éste, en su cabecera una sacristía y, por último, un edificio de servicio para el cabildo, incluyendo la sala capitular, vestuario, despachos y otras dependencias.

El templo es una construcción de fábrica de piedra de distintos tipos, con todos sus espacios cubiertos asimismo con distintos tipos de bóvedas. En el templo principal, las bóvedas se disponen a dos alturas distintas, la inferior cubriendo las naves laterales, capillas del transepto, deambulatorio y capillas absidales a una altura aproximada de diez metros, y la superior a una altura de veintitrés metros cubriendo las naves central y del transepto y el presbiterio. Entre ambas alturas discurre un triforio transitable que corta el muro de cierre de las naves altas en todo su desarrollo, formando un sistema arquitectónico y estructural prácticamente dividido horizontalmente en dos cuerpos.

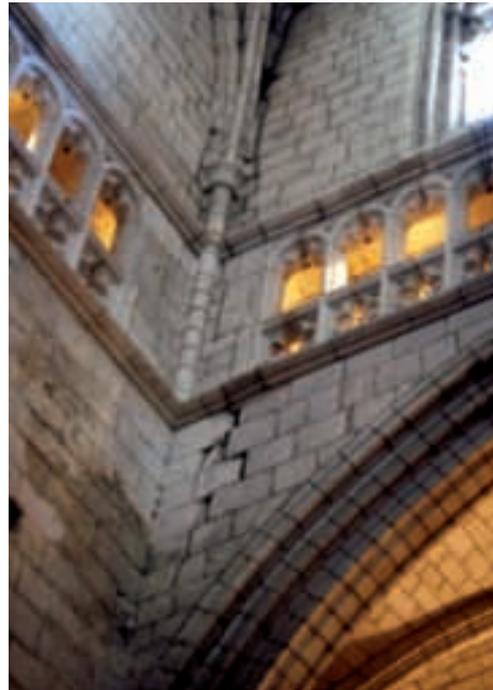
El sistema de empujes de las naves superiores, con bóvedas de cantería caliza en sus nervaduras y travertino en sus plementerías, se transmite al cuerpo inferior mediante un conjunto de estribos adosados a los muros de cierre, estribos

que vienen a descansar sobre los arcos y muros perpiaños que separan los distintos tramos de las naves laterales o las capillas del transepto. En la nave central el sistema se completa con un conjunto de arbotantes descansando en sendos estribos botareles adosados a las colaterales en su cara exterior, lo que permite la introducción de las capillas laterales.

Este sistema produce inevitablemente que los pilares que separan las tres naves, así como los muros por encima del triforio, se inclinen progresivamente. Los primeros empujados por los arcos perpiaños de las naves laterales hacia el eje central de la nave, y los segundos empujados por los arcos de las bóvedas más altas hacia sus dos laterales exteriores. El resultado es una sección transversal siempre sinuosa que mantiene el equilibrio de modo más o menos estable a lo largo del tiempo y a través de las distintas situaciones de cargas transitorias que tienden a incrementar sus inclinaciones.

Con el paso del tiempo estos continuos movimientos vienen a producir una deformación del conjunto de la estructura que en algunos puntos alcanza grandes desplomes de los muros altos, con las consiguientes aperturas de los arranques de las bóvedas, descenso de sus claves, agrietamiento general y aparición de puntos de fractura del material en las pseudoarticulaciones de los tercios inferiores de los arcos.

El avance progresivo de los desplomes de muros y pilares podría llevar, tras un número de ciclos de deformación, a un



Img. 1.13. Extremo noreste del transepto, con el gran desgarro provocado por los empujes de los arcos inferiores sobre el muro exterior. Se aprecia la apertura reparada de la balaustrada del triforio en el primer tramo del lado derecho.

colapso parcial o general de la estructura, y resulta imprescindible conocer hasta donde sea posible cuáles son los índices de esos movimientos. Así, antes, durante y después de la redacción del plan director se dispuso un sistema de monitorización de esos movimientos, sucesivamente ampliado y localizado en distintos puntos de control, para evaluar tanto las magnitudes de los movimientos cíclicos como su retorno anual a las posiciones de partida. Además, también dentro de las investigaciones del plan director, se hizo un pormenorizado estudio de las lesiones y deformaciones de las fábricas, basado en un



Img. 1.14. Fisura de separación entre bóveda y muro en el brazo sur del transepto, donde se aprecia el hueco dejado por la caída de parte del revestimiento.

levantamiento fotogramétrico tridimensional, y un análisis del funcionamiento estático de las secciones constructivas principales de la catedral.

El resultado de estos análisis vino a centrar los problemas estructurales en tres puntos principalmente. En primer lugar, el contrafuerte situado junto al portal de Santa Ana, en el costado occidental del brazo sur del transepto, donde se había producido el primer desprendimiento de material. En segundo lugar, el extremo

noreste de la nave mayor del transepto, donde la gran altura y esbeltez de los muros y el deficiente contrarresto de sus empujes, junto a un probable asentamiento progresivo de las fábricas de mampostería y al debilitamiento de los muros en esa zona producido por la apertura de nuevos vanos durante la restauración de los años sesenta del siglo pasado, han dado como resultado un desplome de la esquina que a lo largo de los siglos ha alcanzado una magnitud de casi veinte centímetros en la fractura presente en la balaustrada del triforio inmediata a la pilastra del rincón interior. Por último, en todos los pilares exentos del interior, pero especialmente en los que abren el crucero a la nave central y los inmediatos a éstos en dirección hacia los pies de la iglesia se manifiesta un fuerte desplome hacia el eje de la iglesia que, en el cuerpo alto, se compensa e invierte con otro desplome aún más acusado de sentido contrario, todo ello resultado de ese movimiento sinuoso que, si bien no se detiene en ningún momento, parece producir una evolución muy lenta, casi imperceptible por lo errático de algunos de sus movimientos, y que sólo a lo largo de mucho tiempo podría llegar a producir daños importantes en la estructura.

Por otro lado, entre las construcciones añadidas al templo principal, la torre resulta ser una de las estructuras más singulares, no sólo en la propia catedral sino en el contexto general de la construcción de torres de iglesias. En efecto, se trata de una obra de casi sesenta metros de altura, de grandes dimensiones en planta (once por seis metros), rematada en un enorme chapitel de estructura de madera y, lo que



Img. 1.15. Arcos de descarga en la parte norte de la torre.

es más singular, arrancando por encima de un pórtico muy amplio, con una luz de nueve metros entre sus apoyos principales, vano que salvan las fábricas de la torre haciendo uso de recursos constructivos difíciles, como arcos de descarga en distintas alturas y concentración de pesos en las esquinas (Img. 1.15.). Con lo que esta concentración de las cargas sobre las pilastras principales del pórtico ha producido que dos de ellas, las exteriores al pórtico, construidas con mampostería, hayan sufrido un progresivo asiento que se ha manifestado, por un lado, en la fractura de sus sillares esquinales, algunos re-

parados históricamente y, por otro, en el desplome global del conjunto de la torre hacia el lado oeste.

Todos esos resultados dan lugar a dos conclusiones generales respecto al comportamiento estructural de la catedral. La primera es que el edificio como tal estructura está bien configurado, con proporciones adecuadas de alturas, vanos y dimensiones de los elementos constructivos (arcos, muros, pilares), de manera que el sistema estático funciona sin ninguna dificultad en todas sus partes. A lo largo del tiempo, reformas efectuadas en

algunos elementos, tales como la apertura de capillas en las naves laterales o de sepulcros en los muros medianeros de las capillas del transepto y la girola, han provocado problemas puntuales de desequilibrio de las fábricas, con agrietamientos y desplomes muy rápidos y alarmantes que afortunadamente fueron, casi todos, reparados en su momento siglos atrás. Entre los no reparados definitivamente se cuenta precisamente el contrafuerte situado entre el portal de Santa Ana y la capilla de los Reyes, que ha sufrido varios procesos de restauración a partir del siglo XVI, cuando se abre el muro de cierre de la nave sur para dar entrada a la capilla, y que al final ha llegado a ser el causante de aquella alarma inicial sobre el peligro que podía correr la estructura.

La segunda conclusión no es sin embargo tan optimista, pues viene a constatar que la evolución a lo largo del tiempo de las fábricas de la catedral, especialmente las de obra de mampostería, está provocando un continuo asiento de unas partes de las fábricas respecto a otras, con los consiguientes giros y desplomes progresivos. Este problema es especialmente importante en los elementos constructivos más cargados, es decir, en los cimientos de los pilares interiores, y se ve agravado por dos circunstancias distintas. En los pilares de las naves la continua ejecución de pequeñas obras de adaptación de la iglesia, tanto para las distintas versiones del culto como, sobre todo, para su uso funerario entre los siglos XVI a XVIII, ha venido mermando progresivamente la integridad material de los cimientos, reduciéndolos en varios casos a delezn-

bles aglomerados de piedra y morteros descompuestos cuya calidad constructiva y resistencia estructural era más que dudosa. Y en los pilares del crucero, presbiterio y deambulatorio, la construcción de la catedral en una fuerte ladera obligó a la construcción de unos tambores de cimentación muy altos en los que la gran masa de mampostería admite un asiento también muy grande, siempre proporcional a esa altura debido a la gran plasticidad de los morteros históricos de cal. En ambos casos el resultado es similar: la gran deformabilidad de los cimientos provoca que los giros y asientos de los pilares sobre ellos sean continuos y con efectos a largo plazo imposibles de evitar.

Ese estado de cosas, marcado por dos importantes problemas, en primer lugar la relativa debilidad y, sobre todo, gran plasticidad de las fábricas, y en segundo lugar y como consecuencia de esto último, la gran deformación de la geometría de la obra resultado de los asientos producidos en los cimientos, viene a exigir una intervención centrada en atender a ambos problemas, el primero tratado como raíz y el segundo como consecuencia.

De un lado las propuestas de intervención general en la catedral se centrarán en mejorar ese comportamiento general que está en la raíz de las deformaciones. De otro lado, intervenciones puntuales concretas tienen que solucionar los problemas de deformación cuando éstos han alcanzado un punto en que pueden hacer peligrar la estabilidad de una parte o el conjunto de la estructura, o bien reparar algunos elementos constructivos con-



Img. 1.16. Machones exteriores del pórtico. En primer plano el que soporta la torre ha sufrido fractura de todos sus sillares esquinales por aplastamiento de la fábrica, mientras que, en el de más atrás, estos se encuentran en perfecto estado.

cretos muy dañados por las progresivas lesiones o por intervenciones anteriores poco efectivas.

Todo ello, sin embargo, debe cumplir con dos criterios principales de compatibilidad de las intervenciones, por un lado la de los materiales a emplear con los existentes, y por otro la del comportamiento estructural de cada elemento con el conjunto. Esto se traducirá, por el primer criterio de compatibilidad material, en el uso de piedra y morteros de cal para las obras de reparación y, por el segundo criterio de compatibilidad estructural, en la reparación sin un refuerzo global de la

fábrica que no produzca cambios sustanciales en el comportamiento general de la estructura.

1.3.2.- CONSOLIDACIÓN O REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA

Estos criterios generales de intervención en las obras de fábrica deben respetarse en todo caso y lugar, no sólo en la Catedral de Santa María. La idea que los explica es la de que los edificios de fábrica son sustancialmente construcciones no rígidas con una gran deformabilidad, tanto parcial (en la constitución material de cada uno de sus elementos, ya sean muros de mampostería o bóvedas de cantería labrada) como global (en la configuración general de la obra sea cual sea la composición de sus elementos).

Esta distinción entre las partes y el todo es en cualquier caso sólo una estrategia para acometer el problema de la intervención en edificios de fábrica. Se tratará de actuar sobre cada parte para reparar en ella su función dentro del conjunto, recuperando su desempeño dentro del comportamiento general de éste que, por lo demás, no puede modificarse sin hacer una previa evaluación de sus consecuencias para el conjunto. La corrección de la configuración estructural original se comprueba con el hecho de que ha perdurado a lo largo de un tiempo, en ocasiones varios siglos, y ha mantenido el equilibrio a lo largo de ese proceso de sucesivas alteraciones debidas a los movimientos de la estructura o a las modificaciones de su forma. Es el posible fallo de uno de sus

elementos el que podría eventualmente dar lugar a colapsos parciales o globales, y es esta posibilidad la que se debe indagar y evitar.

Este criterio general permite dividir el problema y centrarse en mejorar el funcionamiento de algunos elementos al margen del análisis del comportamiento general, que a su vez se analizará y se podrá reestructurar con la introducción de otros elementos sólo en caso necesario.

Así, volviendo al problema general detectado en la catedral, el de la resistencia y evolución a largo plazo de las fábricas, y especialmente las de mampostería, se puede decir que el origen de su progresiva deformación se encuentra tanto en la composición material original como en la alteración de los propios materiales a lo largo del tiempo.

Las fábricas de mampostería de la catedral tienen en general una gran cantidad de mortero en sus juntas, que llega a ser de casi el diez por ciento de su altura total, con lechos de cerca de dos centímetros para hiladas de piedra de unos veinte centímetros de altura. Por sí mismo el mortero de cal es muy deformable, lo cual es bueno para el comportamiento general de la estructura, pues la dota de una alta flexibilidad muy útil para responder a sollicitaciones cambiantes a lo largo del tiempo, pero tiene el coste de permitir grandes giros y desplomes de los distintos elementos estructurales.

A lo largo del tiempo, además, esos morteros, y especialmente los que se

encuentran en el interior de las fábricas cuyo endurecimiento suele ser deficiente debido a la falta de aireación, sufren una fuerte degradación física y química cuyo resultado es la desagregación de sus componentes y, en algunos casos, el lavado del interior de la fábrica y la aparición de grandes coqueas ocultas. Así se detectó en la investigación realizada mediante endoscopias en distintos puntos de la catedral para el plan director y continuada posteriormente con mayor detalle para la restauración de cada elemento constructivo, según se explica en este estudio.

Como consecuencia de todo ello en el orden práctico de la restauración de la estructura, el objetivo central es la reconstitución material de los elementos constructivos como medio para el mejoramiento del comportamiento de las fábricas, pero sin introducir en ella materiales incompatibles desde cualquier punto de vista, sea por los procesos químicos que pudieran provocar, sea por los posibles cambios radicales en las rigideces internas de las propias fábricas, que provocarían concentración de tensiones en las piedras si el mortero resultante llega a tener excesiva dureza.

Para conseguir estos objetivos que, como puede desprenderse de lo anterior, básicamente consisten en reforzar pero sin rigidizar las fábricas, compactarlas pero sin hacerlas monolíticas, y así sucesivamente buscando un punto intermedio difícil de determinar, se ha planteado la investigación aplicada a la obra que se presenta en este libro.

1.3.3.- INVESTIGACIÓN Y OBRA EN LA CATEDRAL

En ella se ha indagado en dos vías principalmente; en primer lugar la determinación de cuál sería el material más adecuado y en segundo lugar cuáles las técnicas de aplicación en obra, todo ello para obtener un resultado lo más acorde con esas intenciones.

Desde el primer momento son conocidos los malos resultados que las inyecciones de cemento han producido en otros edificios restaurados a lo largo de los últimos decenios, manifiestos en la fuerte degradación química que han provocado tanto en la piedra como, sobre todo, en los morteros de cal originales. Por ello, se optó por este último material como el único que podría cumplir las condiciones básicas de compatibilidad material.

Sin embargo, el problema se complica cuando se trata de elegir la cal adecuada: cómo ha de endurecer en ausencia de aire en el interior de las fábricas; qué dureza y resistencia final tendrá el material inyectado y, lo que es más importante, el aglomerado resultante formado por la cal nueva, los morteros antiguos remanentes y la piedra de los rellenos interiores; qué grado de elasticidad se podría conseguir sin desembocar en una gran plasticidad, con cales de qué resistencias características y qué durabilidad podrá tener a largo plazo el aglomerado resultante.

La investigación realizada viene a dar una respuesta, nunca definitiva ni exhaustiva, pero sí suficiente para los objetivos marcados: se opta finalmente por una cal

hidráulica natural, de mediana resistencia característica, formando no lechadas sino morteros, es decir, con áridos de granulometría muy bien graduada, y con una alta fluidez obtenida con aditivos.

La otra variable, la de la colocación en obra, tiene también muchas variantes que estudiar: a qué presión se debe introducir el material, cuánto volumen cada vez, cómo controlar su alcance en el interior de un muro que no se ve y cómo minimizar el daño que se hará a éste con las necesarias perforaciones.

La solución, nuevamente no generalizable a todos los edificios, es que los mejores resultados se han obtenido con inyecciones a presión moderada, entre una y dos atmósferas realizadas a través de las juntas entre los mampuestos, lo que es tanto la mejor manera de evitar daños a la fábrica como de llegar directamente a su núcleo; realizadas por tongadas de menos de un metro de altura para evitar grandes presiones laterales sobre las hojas exteriores, y controladas mediante revisión constante de sus posibles fugas.

En cuanto al resultado final, sin embargo, las incertidumbres no dejan de existir. Qué se ha conseguido en cuanto a aumentar la resistencia del elemento sin perder su elasticidad; qué compacidad no monolítica tienen las fábricas; qué posibles riesgos de fallos internos de éstas por concentración de tensiones se evitarán; todo ello forma parte más bien de las intenciones del trabajo que de sus resultados, pues éstos sólo se podrán comprobar a largo plazo mediante un seguimiento continuo de



Img. 1.17. Reparación del contrafuerte junto al portal de Santa Ana, en el brazo sur del transepto, mediante un refuerzo lateral con sillería. Se aprecian las estructuras metálicas de contrarresto dispuestas provisionalmente para evitar el aumento de los desplomes del muro.

la evolución de la catedral, posible gracias a la documentación exhaustiva realizada de todo el proceso, que también se presentan en este libro, pero que exigirá una labor constante de observación y mantenimiento del edificio.

1.3.4.- OTRAS INTERVENCIONES

Por último, y aunque quede fuera del alcance de esta publicación, no se puede dejar de insistir en que estos procesos forman parte de una propuesta general

de intervención en el edificio que se desarrolla elemento por elemento, como se ha explicado, pero que incluye otras obras de distinto carácter y extensión que sólo se mencionaran para mejorar la comprensión del contenido del estudio que presentamos, pues serán en el futuro objeto de otras publicaciones detalladas.

En cuanto a los contrafuertes de la capilla de los Reyes y del portal de Santa Ana, la obra realizada ha incluido también una reconstrucción completa con cantería de su lateral sur, formando una espina vertical de gran resistencia que viene a sustituir al contrafuerte medieval, demasiado dañado e irrecuperable. Como corolario de la intervención en esta parte de la catedral, la de la alarma inicial sobre su estabilidad, los arcos y las bóvedas que descansan en ese contrafuerte se han reubicado mediante un ingenio de cimbras articuladas accionadas por gatos hidráulicos, ganándoles curvatura para mejorar su comportamiento resistente, es decir, su capacidad de recoger distintas posiciones de la línea de empujes interna correspondientes a distintas disposiciones de cargas externas, sean variables o permanentes.

En cuanto a los cimientos de los pilares, éstos se han revestido con un muro de mampostería exterior que hace las veces tanto de encamisado para contener las inyecciones en el núcleo central original como de apoyo para un sistema de arcos codales que envuelven las bases de los pilares formando un conjunto de apoyos articulados que permiten su giro e impiden su desplazamiento, adaptándose así a los movimientos que reclama de ellos el



Img. 1.18. Arcos codales entre los pilares de las naves, encamisado de las bases mediante muros de mampostería y cadenas de cantería. Se aprecian las durmientes para la estructura del forjado que apoya en los arcos.

comportamiento global de la estructura con sus cíclicas dilataciones y contracciones. Este sistema de acodamiento servirá además para dar soporte a los nuevos forjados lígneos de la catedral, tras la excavación arqueológica de su subsuelo ya realizada.

En conjunto, el sistema estructural de la catedral deberá funcionar de modo similar

a como lo ha hecho siempre, sin coartar los movimientos sinuosos de sus pilares y muros pero evitando que se produzcan daños locales en los elementos singulares que pudieran desembocar en colapsos generales. En opinión de los autores, así es como se debe hacer una intervención estructural y así se ha empezado a contar en esta publicación.

NOTAS

⁽¹⁾ Texto extraído del *Plan Director de Restauración. Catedral de Santa María. Vitoria-Gasteiz*, Agustín Azkarate, Leandro Cámara, Juan Ignacio Lasagabaster, Pablo Latorre.

⁽²⁾ Repullés y Vargas, Enrique. *Proyecto de Restauración de la Basílica de San Vicente de Ávila*. Leg. 9.082-2. Archivo Central de la Administración. A.C.A.

⁽³⁾ Repullés y Vargas, Enrique. *Actualidades en Arquitectura y Construcción*, 1903. p.p.354 y ss.

⁽⁴⁾ Lamperez y Romea, Vicente. *La Restauración de la Catedral de León en Arquitectura y Construcción*, 1901. pp.6 y ss.

⁽⁵⁾ Lecanda de, Juan José. *Restauración de Santa María de Castro Urdiales en Resumen de Arquitectura*, 1 de noviembre de 1897.





- 2 -

PLANTEAMIENTO
DE LA
INVESTIGACIÓN

2.1.- MATERIALES UTILIZADOS EN LAS FÁBRICAS. PIEDRAS Y MORTEROS

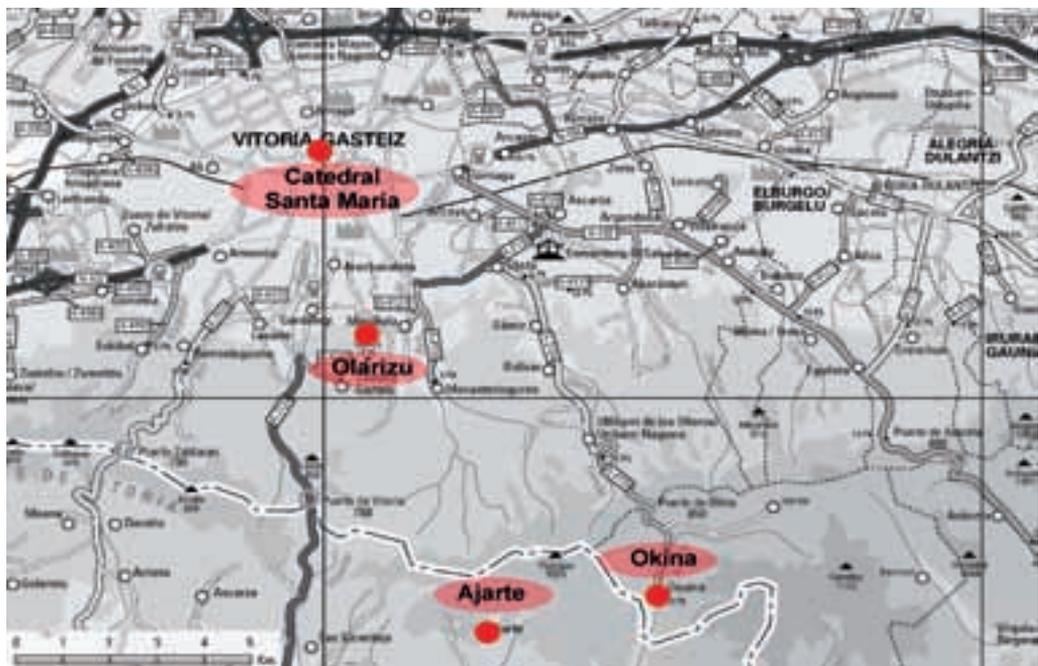
2.1.1.- DIMENSIONES MEDIAS DE LAS ROCAS

La distribución de las diferentes rocas reconocidas quedó representada en el mapa litológico (v. *Plan Director de Restauración. Catedral de Santa María. Vitoria-Gasteiz*). En él se aprecia la distribución superficial debidamente georreferenciada en plantas y alzados de cada elemento constructivo, sillar o mampuesto, asociado a una litología.

En general, para los sillares, mampuestos, ripios y plementos siempre se em-

plean litologías similares. Los sillares casi siempre son rocas calcáreas procedentes de Ajarte; los mampuestos calcarenitas de Olárizu; los ripios calizas y calizas margosas locales; y los plementos de la nave central y cruceros están contruidos mayoritariamente con travertinos. Este esquema se repite en la mayor parte del edificio, si bien puntualmente, como en la zona alta de la torre o en la capilla del Santo Cristo, la sillería empleada son areniscas de la Sierra de Elguea. Sin embargo, para los fines descriptivos de este apartado y en el contexto de este trabajo no serán consideradas esas areniscas.

A partir de los alzados se han determinado las dimensiones medias del bloque



Img. 2.1. Mapa de localización de canteras antiguas citadas en el texto.

unitario de sillares y mampuestos. Además, con los sondeos realizados en diferentes puntos del monumento se han determinado los valores medios del grosor de esos elementos. Debe insistirse que las dimensiones obtenidas son valores medios con fines descriptivos y que cada elemento o unidad de obra presenta características individuales analizables puntualmente.

Además de lo anteriormente expuesto, del porcentaje de recuperación de los sondeos, esto es, el porcentaje lineal de material no extraído en el testigo, y admitiendo que la pérdida de material es debida a la porosidad y al lavado de mortero, es posible conocer el porcentaje de mortero y porosidad ligado a cada una de las litologías. En las lumaquelas no se recupera el 16%. Esto es, la porosidad actual más el mortero perdido por lavado durante la realización del sondeo, alcanza un 16% medidos linealmente en el testiguero. En la mampostería de calcarenitas el porcentaje medio de sondeo no recuperado es del 30%, y en los ripios de calizas margosas no se recupera el 41%.

Con estos valores y las dimensiones medias deducidas de los alzados, se han caracterizado las dimensiones tipo de las tres litologías empleadas mayoritariamente en la catedral:

a) Las lumaquelas procedentes de Ajarte tienen unas dimensiones medias de: 85,14 cm de ancho, 35,29 cm de alto y 31,15 cm de fondo. Como la densidad media de esas calizas es de 1,977 gr/

cm³, el peso medio del bloque unitario es de 185,03 kg. La pérdida de material no recuperado en los sondeos realizados en esta litología es del 16%.

- b) Las calcarenitas procedentes de Olárizu arrojan dimensiones medias de: 29,03 cm de ancho, 12,5 cm de alto y 30,92 cm de fondo. Esto implica, para una densidad media de 2,633 gr/cm³, un peso de 29,54 kg. El porcentaje de material no recuperado en esta litología es del 30%.
- c) Las calizas y calizas margosas locales tienen en los sondeos un valor medio de 30,62 cm de fondo. Las restantes dimensiones, alto y ancho, no son deducibles pues los sondeos realizados han sido mayoritariamente horizontales. Sin embargo, a partir de las observaciones directas en algunos muros excavados o desarmados, se puede asumir para estos ripios una geometría planar con dimensiones muy similares a las obtenidas para las calcarenitas de Olárizu. En esta litología en los sondeos no se recupera el 41% del material.
- d) Travertinos, también denominados tobas calcáreas. Sus dimensiones no han sido deducidas ya que siempre aparecen raseados en el intradós y trasdós de los plementos. Su principal característica es la baja densidad de tan sólo 0,8 gr/cm³, lo que explica su empleo en las bóvedas superiores.

Una vez descritas las dimensiones medias de las piedras empleadas en las fábricas, se comentan sus principales características litológicas, de alterabilidad y procedencia.

2.1.2.- LITOLOGÍA

2.1.2.1.- Lumaquelas de Ajarte

Las lumaquelas son rocas calcáreas constituidas esencialmente por conchas. Pueden clasificarse como biomicritas. Se han distinguido dos subtipos según el diámetro de su porosidad: lumaquelas de porosidad milimétrica y lumaquelas de porosidad centimétrica. Ambos tipos constituyen una serie continua. En el interior del monumento es muy difícil distinguir los dos subtipos debido a los raseos. En el exterior, los dos subtipos son fácilmente distinguibles por el mayor grado de alteración y pérdida de material de las lumaquelas con porosidad centimétrica.

El color de la roca fresca es gris crema claro a gris amarillento claro, y el color de roca meteorizada es gris azulado claro. La roca aparece masiva, con unos característicos moldes por disolución de fósiles, esencialmente fragmentos de lamelibranquios. Composicionalmente está mayoritariamente constituida de calcita, con textura de micrita y calcirudita; un 5% de la roca es dolomita, presente en el interior de los moldes, y como minerales accesorios se distinguen arcillas. La porosidad móldica, sea mili o centimétrica, no es comunicada y supone un 15-20% de la roca. Las ligeras variaciones en el grado de dolomitización se traducen en sutiles variaciones cromáticas rosáceas y amarillentas. Cronológicamente pertenecen al Daniense - Monticense, esto es, hace aproximadamente 60 millones de años (60 m.d.a.).

Como alteración más importante destacan las fracturas que afectan a los sillares, debidas a esfuerzos diferenciales. Sin embargo, en general, no presenta ningún tipo de alteración intrínseca y sólo muestran alteraciones por la actuación de agentes externos. En las zonas inferiores, en contacto con el substrato, suelen presentar pérdida parcial de material por desconchamiento y alveolización. Puntualmente cristalizan sales. Todo ello es debido al alto porcentaje de porosidad que facilita la capilaridad y filtración de fluidos. En las zonas expuestas a rozamiento se reconoce desgaste antrópico, explicable por su baja dureza.

En las zonas expuestas a la intemperie, la lumaquela de porosidad centimétrica presenta claros procesos de alveolización, desconchamiento y pérdida significativa de material. Ello es debido al tamaño milicentimétrico de los moldes de lamelibranquios, que favorece la retención del agua y la exposición aérea de las zonas internas. Todo ello se traduce en procesos de meteorización ligados a cambios térmicos, gelifracción, capilaridad, abrasión eólica...

La mayoría de las rocas *blancas* presentes en la catedral corresponden a lumaquelas de Ajarte. Se emplea como sillar en muros y columnas, en los plementos de las naves laterales, así como en la casi totalidad de las tallas.

En la localidad treviñesa de Ajarte se distingue con dificultad el nivel de extracción de la lumaquela, ya que caleras posteriores han borrado los frentes originales de explotación. Aunque se han distingui-

do claramente dos antiguos frentes, se pueden adivinar otros muchos de menor entidad. Las canteras observadas se sitúan en las proximidades de Ajarte y en el antiguo camino de Ajarte a Vitoria.

La capa explotada en Ajarte buza 10° hacia el sur, en una ladera que se orienta suavemente hacia el solano, lo cual permite avanzar frontalmente en la capa con escaso recubrimiento edáfico. Asimismo, el suave relieve y buzamiento permite un amplio desarrollo lateral del frente de explotación, en lo que se denomina una explotación perimetral.

2.1.2.2.- Calcarenitas de Olárizu

En su mayoría corresponden a intraesparruditas, pasando por biomicrorruditas, bioesparitas con aspecto de lumaquelas y biomicritas. Presentan laminación ondulada, ocasionalmente bioturbada. Además de esta serie continua, se ha distinguido un subtipo de calcarenita bioclástica de Olárizu. En cualquier caso, en las canteras de procedencia, todas ellas forman una serie completa a nivel de afloramiento que explica las variaciones encontradas en la catedral. *De visu* son mayoritariamente calcarenitas gris-azuladas oscuras a gris-verdosas oscuras. En ocasiones, la cara expuesta al exterior coincide con diaclasas rellenas de calcita de recristalización, lo que se traduce en un color blanco intenso. Esta disposición es puntual pero de un marcado impacto visual.

El mineral principal es la calcita. El cuarzo supone un 10-25% del total de la

roca, los bioclastos un 10-25% y los feldspatos un <2%. En lámina delgada, como accesorios, se observan mica blanca, chert y glauconita. Los clastos son muy redondeados a subangulosos, con una esfericidad alta. La porosidad está ausente en lámina delgada. Los contactos intergranulares son tangenciales. La edad de las calcarenitas de Olárizu es Campariense (70 m.d.a.).

Las calcarenitas y calcarenitas bioclásticas de Olárizu aparecen en todos los muros exteriores de mampostería, siendo junto a la lumaquela de Ajarte la mejor representada en la catedral. Como alteración, únicamente se observan en el exterior costras negras, ajenas a la roca. En aquellas facies bioturbadas con cierta porosidad pudieran producirse fenómenos de pérdidas de cemento con la consiguiente erosión, aunque sólo se ha observado muy puntualmente y con escasa entidad. En general puede considerarse como una roca de propiedades geotécnicas muy buenas y baja alterabilidad.

Existen un gran número de huecos de cantera en los que se ha explotado este tipo de roca, profusamente empleada en las construcciones de Vitoria-Gasteiz. Entre otras pueden citarse las canteras de Lasarte, Mendiola, Arechavaleta, Gardelégui o Castillo, si bien las facies más representativas se localizan en la parte alta del monte Olárizu, al sur de la ciudad.

El sistema ortogonal de diaclasas y la estratificación centi-decimétrica subparalela, permiten una extracción sencilla con barras. Como su finalidad es constructiva,

como mampuesto, y los fragmentos extraídos presentan las diaclasas bastante planas, pueden utilizarse en la obra directamente, sin necesidad de pretallas. Esta observación se corrobora por la inexistencia de escombreras en las canteras visitadas.

2.1.2.3.- Calizas y calizas margosas locales

Bajo este epígrafe se incluyen micritas con intraclastos e intramicritas gris azuladas oscuras del Campaniense (70 m.d.a.). El color de alteración es gris azulado claro, puntualmente con tintes ocre. Como estructura sedimentaria predominante se observa una fina laminación paralela, aunque también aparecen ripios de estructura masiva. Son frecuentes los equinodermos e inocerámidos. En general es una roca muy compacta con pequeños pasos de agua con recristalización de calcita y ocre por alteración de sulfuros.

La calizas margosas locales están mayoritariamente compuestas de calcita en forma de micrita y en menor medida como calcirudita (2-5%). Como minerales accesorios aparecen óxidos de hierro. Se observa una porosidad móldica (<2%) con recristalización de calcita.

Constituye el substrato de la catedral y está siempre presente como ripios en los muros. Como alteración, debe indicarse que las calizas margosas locales contienen una pequeña porción de montmorillonita, lo que unido a la laminación, favorece la actividad expansiva de la arcilla. Por todo ello, es una roca que sometida

a cambios de humedad se disgrega fácilmente. Asimismo, ante esfuerzos compresivos no perpendiculares a la laminación puede presentar bajos valores de resistencia a la carga. Sin duda, de todas las rocas presentes en el monumento es el tipo más problemático.

Su procedencia debe localizarse en las proximidades de la catedral, pues constituye su propio substrato. Por la orientación, morfología y cercanía bien pudieran haberse extraído de la vecina Plaza de la Burullería. Al ser lajable y frágil es fácilmente extraíble, aunque no es apta para la talla.

Dentro de la serie de calizas margosas locales se han distinguido unas calizas negras, que por sus facies probablemente correspondan a algún nivel calcáreo intercalado en la serie calco-margosa del substrato de la catedral. Aparece puntualmente entre los mampuestos de los pilares de las columnas y ocasionalmente en la base de los muros, en el nivel superior de la cimentación de mampostería. Se caracteriza por su carácter masivo y por no mostrar alteración.

2.1.2.4.- Travertinos

Comúnmente suelen denominarse como tobas, aunque debería agregársele el adjetivo calcárea para diferenciarlas de las tobas volcánicas. Son unas micritas móldicas gris crema claro a naranja claro, con tonalidades de alteración gris azulada a gris ocre. La roca está constituida de micrita con un 30-50% de moldes de

Características de rocas para ser en obras monumentales											
Material empleado	Masa Volumétrica Real (Kg/m³)	Masa Volumétrica Aparente (Kg/m³)	Porosidad aparente al agua %	Coeficiente de saturación %	Ensayos de durabilidad						
					Cristalizaciones por inmersión total para placas de tamaño (15x15) cm		Cristalizaciones por inmersión parcial para placas de tamaño (15x15) cm		Resistencia (15x15) cm		
					Pérdida de peso %	Agrietamiento y degradación Escala Frost	Pérdida de peso %	Agrietamiento y degradación Escala Frost	Resistencia %	Alteraciones volumétricas observadas en el ensayo	
Lanzapunta de Aarte	1.ª	2001.0	1995.0	25.50	95.0	4.50	Rotura y fisuras observadas en todas las caras	10.0	Degradación y desmenujamiento de materia	5.30	Fisuras observadas en todas las caras
	1.ª	2000.0	2027.0	24.75	95.0	1.80	Rotura y fisuras observadas en todas las caras	50.0	Degradación y desmenujamiento de materia	700	Rotura y fisuras observadas en todas las caras
	1.ª	2000.0	1981.0	30.00	95.0	4.20	Rotura y fisuras observadas en todas las caras	90.0	Degradación y desmenujamiento de materia	5.01	Fisuras observadas en todas las caras
Travertino (Castro de Arce)	2.ª	2017.0	1922.0	49.40	100.0	0.20	Pérdida de material en todas las caras	20.0	Pérdida y rotura de material en todas las caras	100	Rotura y fisuras observadas en todas las caras
	2.ª	2017.0	1960.0	47.00	90.0	0.50	Pérdida de material en todas las caras	20.0	Pérdida y rotura de material en todas las caras	2.00	Rotura y fisuras observadas en todas las caras
Calizamiento de Alarcos	3	2004.0	2004.0	1.00	90.0	0.20	Materiales intactos	1.0	Materiales intactos	5.10	---
Calizos travertinos Lanai (Pinar)	4	2014.0	2011.0	1.00	90.0	0.20	Pérdida de material y fisuras en todas las caras	0.2	Pérdida de material en todas las caras	100	Rotura y fisuras observadas en todas las caras

Tabla 2.1. Cuadro de características físicas y ensayos de alterabilidad (modificada del plan director).

vegetación. La porosidad es comunicada. Como minerales accesorios se reconocen arcillas. Su densidad es muy baja, habitualmente por debajo de la unidad.

Es una roca muy erosionable por su altísima porosidad y ausencia de diagénesis. Se degrada fácilmente por acción de muy diversos procesos físico-químicos y biológicos (plantas, arácnidos, insectos, etc.), pulverizándose la roca. Además, su altísima porosidad la hace susceptible de almacenar importantes volúmenes de agua, con el consiguiente aumento de peso.

Su edad es reciente, inferior al millón de años, y su procedencia puede ser muy diversa: Ocio, Peñacerrada, Corres, Izarra, Valderejo, etc, aunque por proximidad los travertinos de la catedral pudieran proceder de Okina. La extracción de

los travertinos es muy sencilla, pues se cortan fácilmente con sierra manual.

2.1.3.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ENSAYOS DE ALTERABILIDAD

Ya en el plan director se incluyeron los análisis realizados por el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava. Entre las características físicas destaca la baja densidad de los travertinos, común a este tipo de rocas, inclusive con valores más bajos. Respecto a la alterabilidad estas mismas rocas muestran unos porcentajes de pérdida muy altos, ya en los primeros ciclos, lo cual también es habitual en este tipo de rocas, dada su altísima porosidad.

En general las rocas pueden considerarse como poco alterables, exceptuando

algunas lumaquelas de porosidad centimétrica y los ya citados travertinos. En ambos casos su alterabilidad está en relación directa con la porosidad primaria de la roca, que además suele ser comunicada. Estos aspectos ya fueron comentados en el plan director y no se insistirá sobre ellos.

2.1.4.- MORTEROS

En este apartado se conocerá los morteros que dan cohesión a los distintos elementos de construcción para configurar la fábrica de la Catedral de Santa María.

Un mortero es una mezcla homogénea de arena y/o grava (árido) ligada por un aglomerante. El método analítico está basado en un estudio petrológico de una selección de muestras, de cuya rigurosidad y planteamiento dependerá, en gran parte, el éxito del trabajo.

Si se toma como criterio su función constructiva, se puede diferenciar tres tipos de morteros de fábrica. Por un lado, los morteros de juntas empleados en dar unión a los elementos de sillería y mampostería, por otro los utilizados como relleno en los muros de tres hojas, cuya hoja central está constituida por ripios de piedra y mortero, y finalmente los morteros de cimentación de los muros.

En líneas generales, los morteros utilizados en la fábrica de la catedral son morteros de cal con tonalidades diversas, desde blancos, crema, grises hasta ocres amarillentos y rojizos rosáceos. El aglo-

merante es una cal ligeramente hidráulica, con un porcentaje de componentes hidráulicos que oscila entre un 10% y un 20%. Estas fases hidráulicas son silicoaluminatos cálcicos, formados durante el proceso de elaboración de la cal, a partir de calizas margosas. Esta propiedad de hidráulicidad es fundamental para el fraguado y endurecimiento de la cal en situaciones en las que el contacto con el CO₂ del aire no está garantizado.

La composición litológica de las arenas (tamaño de grano entre 1/16 mm y 2 mm) y gravas (tamaño de grano superior a 2 mm) es bastante homogénea. Los áridos más frecuentes son de caliza, aunque las areniscas y el cuarzo están siempre presentes. Las calizas presentan distintas facies: biomicritas tipo Ajarte, calcarenitas tipo Olárizu, calizas y calizas margosas, parcialmente recristalizadas a esparita. Las areniscas son tipo Elguea (ver descripciones petrológicas en el apartado anterior). El cuarzo, con distinta granulometría, procede de las calcarenitas o bien de areniscas. Además, se observan áridos accesorios procedentes de las litologías principales, como óxidos de hierro, restos fósiles, turmalina y restos cerámicos. La morfología de estos áridos es subredondeada, lo que indica que se trata de arenas y gravas naturales con cierto grado de madurez. De todo esto se deduce que las arenas utilizadas en la elaboración de los morteros proceden de un ámbito comarcal. El área fuente de las rocas calcáreas parece estar en la zona al sur de Vitoria-Gasteiz, mientras que las areniscas proceden del noreste, de la Sierra de Elguea, por tanto, los depósitos arenosos

Características texturales		Juntas	Relleno	Cimentación
Composición aglomerante		Cal	Cal	Cal
Composición áridos		Calizas	Calizas	Calizas
		Areniscas	Areniscas	Areniscas
		Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo
AG/AR	Primeras etapas	40/60	35/65	35/65
	Etapas tardías	60/40		
Granulometría áridos		Centil: 4 mm Mediana: 800 micras	Centil: 1 cm Mediana: 1.1 mm	Centil: 1 cm Mediana: 1.1 mm
Morfología áridos		Subredondeados	Subredondeados	Subredondeados

Tabla 2.2. Características petrológicas de los morteros de fábrica de la Catedral de Santa María.

que contienen estas litologías se pueden encontrar en el entorno de la ciudad, en más de un punto de extracción.

El proceso de elaboración del mortero y la procedencia de las materias primas varía a lo largo de toda la construcción del monumento. Este hecho, unido a su diferente funcionalidad, da lugar a morteros con distintas características petrológicas.

En el análisis petrológico realizado son cuatro las variables que han permitido diferenciar y correlacionar los distintos morteros con el fin de contribuir a la caracterización del material y a la lectura estratigráfica del monumento. La primera variable a considerar es la proporción de aglomerante frente a áridos (AG/AR), con importantes diferencias entre los morteros de juntas (de sillares y mampuestos), los de relleno de muros y los de cimentación. En los primeros, la proporción AG/AR es variable, y oscila entre 40/60 y 60/40. Esta variación parece guardar relación con las etapas constructivas, de tal manera que en las primeras etapas los morteros son

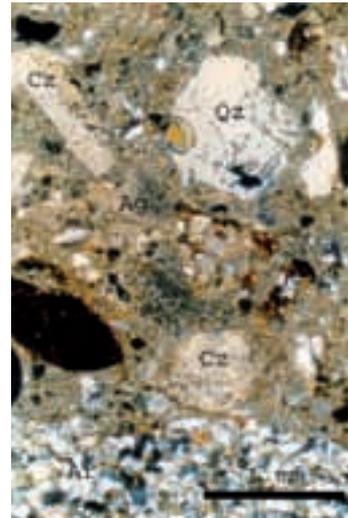
más pobres en cal y más ricos en áridos (valores próximos al 40/60, lo que se denominan morteros magros), mientras que en etapas más tardías la proporción de cal es mayor (próximos al 60/40, que se denominan morteros grasos). Los morteros de relleno y de cimentación son más homogéneos; son morteros magros con una proporción media de aglomerante y áridos de 35/65. La segunda variable a considerar es el tamaño de los áridos, es decir, su granulometría. Son heterométricos, sin embargo, se encuentran diferencias, de tal manera que para elaborar morteros cuya finalidad es unir los elementos de sillería o mampostería se utilizan arenas, aunque desde el punto de vista granulométrico algunos áridos alcanzan el tamaño grava (centil: 4 mm y mediana: 800 micras). Sin embargo, para cimentar y rellenar muros se elaboran morteros más gruesos (centil: 1 cm y mediana: 1.1 mm). Así, se puede resumir diciendo que para cimentar y rellenar se utilizaban morteros magros de alta granulometría, mientras que para dar cohesión a sillares y mampuestos se utilizaban morteros más grasos de grano



Img. 2.2. Fotomicrografía muestra 1. Cimentación corte calefacción. Absidiolo epístola. Qz: cuarzo; Cz: caliza; Ar: arenisca; Ag: aglomerante.



Img. 2.3. Fotomicrografía muestra 53. Junta sillar. Triforio; cierre ándito; nave norte; tramo 2. Qz: cuarzo; Op: minerales opacos; Ag: aglomerante; Po: porosidad.



Img. 2.4. Fotomicrografía muestra 81. Relleno de muro. Sondeo 14. Profundidad 100-110 cm. Cz: cuarzo; Cz: caliza; Ar: arenisca; Ag: aglomerante.

medio. Las otras dos variables que se han estudiado son las proporciones litológicas de los componentes de las arenas y la morfología de los áridos, las cuales presentan, en general, una homogeneidad (Tabla 2.2).

Hasta el momento, se puede tener una idea del tipo de mortero utilizado en la construcción de la fábrica de la catedral, sin embargo, interesa reflexionar sobre la calidad y estado de conservación de los mismos. Los morteros de cal tienen unas propiedades que los hacen adecuados para su utilización en construcciones arquitectónicas, tanto debido a su durabilidad como a sus características de plasticidad, de modo que absorben parte de la deformación y son capaces de adaptarse a ella, al mismo tiempo que ofrecen

resistencias suficientes para conservar el conjunto arquitectónico. El alto contenido en rocas calcáreas de las arenas también favorece la plasticidad del mortero, mientras que el contenido en cuarzo le confiere resistencia. Así que, en general, se puede hablar de morteros de una calidad aceptable.

A priori, se puede dudar de esta última afirmación, ya que en muchos casos se observan morteros en un estado de gran deterioro, totalmente deleznable, a escala macroscópica.

En el caso de los morteros de relleno en los muros de tres hojas, a partir de los sondeos realizados con testigo continuo, se ha podido recuperar una media del 24% del mortero, lo que indica una pér-

didada de material del 76% durante el proceso de deformación y envejecimiento del monumento, o bien durante la realización del sondeo. En los morteros de cimentación también se observan importantes procesos de lavado con la consiguiente formación de oquedades. La filtración de agua y humedad parece ser la causante de estos procesos de lavado del mortero, tanto en el relleno de muros como en las cimentaciones. A escala microscópica los indicadores de deterioro son escasos. Puntualmente, se observan procesos de disolución del aglomerante y procesos de fracturación a causa de la deformación.

Así, se puede concluir que los morteros empleados en levantar la fábrica de la Catedral de Santa María, en sus distintas etapas constructivas, son morteros de cal de buena calidad, a pesar de sus diferencias petrológicas. El estado actual de deterioro, en algunos puntos, parece guardar relación con humedades y procesos de lavado durante el envejecimiento y deformación del monumento, más que con las características intrínsecas y propiedades petrológicas de los morteros.

2.2.- LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS EMPLEADAS EN LA CATEDRAL

El estudio de las cales está íntimamente ligado al de las formas de construir, ya que de ellas dependerá la necesidad de emplear un tipo u otro de cal, su composición, sus proporciones, etc. Por ello es necesario definir de manera esquemática las técnicas constructivas empleadas en la Catedral de Santa María, dado que ayu-

darán a comprender el contexto en el que las cales fueron empleadas.

Dado que en este trabajo el objetivo es el conocimiento de las cales y los métodos idóneos para su inyección en las fábricas históricas, no se profundizará en el estudio de las técnicas.

2.2.1.- LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

Resumiendo, se puede decir que las técnicas constructivas están siempre condicionadas por una serie de aspectos: el nivel técnico de los constructores, los materiales disponibles y los recursos económicos del comitente son probablemente los más influyentes. Otros aspectos como las preferencias estéticas o la voluntad de representar un determinado estatus a través de la construcción pueden ser importantes, pero siempre estarán condicionados por los aspectos antedichos.

Esos elementos definirán la complejidad de los ciclos productivos, que será mayor o menor en función de los recursos (humanos, económicos, etc.) puestos a disposición de la obra.

2.2.2.- EL CICLO PRODUCTIVO DE LA PIEDRA

Los ciclos productivos relacionados con una construcción de este tipo son numerosos, pero los que afectan en medida más directa a las fábricas son tres:

- El ciclo de la madera.
- El ciclo de la piedra.
- El ciclo de la cal.

Para el estudio del ciclo de la madera se cuenta con muy pocos vestigios, ya que se trata de elementos de uso temporal (andamios) o que han desaparecido (bóvedas lógicas). El ciclo de la cal será objeto de análisis por parte de los especialistas que colaboran en este volumen, por lo que no será necesario extenderse en él. El ciclo de la piedra es, por lo tanto, el que interesa en este momento ya que de la presencia de un tipo u otro de ejecutor dependerá la calidad de los muros.

El ciclo de la piedra consta de tres momentos:

- La extracción.
- La transformación.
- La puesta en obra.

Cada uno de ellos implica una serie de acciones que requieren determinados conocimientos, y es en función de esas acciones que se puede definir la presencia de dos tipos de técnicas:

- Técnicas de cantero.
- Técnicas de albañil.

Las diferencias principales entre estas dos técnicas se establecen en los momentos de extracción y transformación; el producto final para las técnicas de cantería suele ser la sillería, y para las técnicas de albañil los diferentes tipos de mampostería. Ambas técnicas pueden aparecer combinadas en determinados contextos.

La figura del albañil aparece en cualquier tipo de construcción, siendo quien realiza, en general, la puesta en obra de las piezas; para la labra de sillares se re-

quiere la presencia de canteros, ya que son necesarios determinados instrumentos y el conocimiento de unas reglas específicas que permiten la confección de piezas escuadradas.

Para la extracción, las técnicas de cantería requieren una selección más fina de las canteras, ya que no todas las piedras son aptas para ser escuadradas. Las técnicas de albañil permiten el uso de un abanico más amplio de materiales, recurriéndose por lo general a las canteras más cercanas al emplazamiento; en el caso de la catedral, una parte importante de los mampuestos procede del entorno del edificio.

¿Y en qué medida afecta a las inyecciones el hecho de reconocer un tipo de técnica u otra en la obra? La respuesta está en el resultado final: las técnicas de cantero producen muros formados por piezas que encajan de manera muy ajustada, con muy poco mortero en las juntas, que en general son muy finas. Existen, dentro de estas construcciones, aquellas con relleno de ripios y otras sin él; en el primer caso la presencia de mortero es irregular entre las caras del muro y el núcleo; en el segundo caso, las caras y el núcleo son homogéneos en cuanto a su composición. Las técnicas de albañilería crean muros cuyas caras presentan juntas más amplias, con morteros que pueden ser de una granulometría mayor; también ocurre, como en el caso de la sillería, que puede haber muros con núcleo de ripios y otros que no; sin embargo, las diferencias entre las caras y el núcleo suelen no ser tan acusadas como en el caso de las

obras de cantería dado el mayor espacio entre piezas.

Diferenciar ambos tipos de trabajo puede ayudar también a reconocer el origen de los productores del mortero, ya que en una obra en la que se puede contar con trabajadores muy especializados como los canteros para la labra de la piedra es razonable pensar que se contara con personal con un nivel de especialización similar para el mortero. La calidad del mismo (granulometría, apagado, etc.) debería estar en relación a la calidad de la obra de piedra. Esto, sin embargo, no es siempre así, lo que permite visualizar las relaciones existentes entre las técnicas empleadas con la pérdida del mortero: la mala ejecución en alguno de los elementos puede estar en el origen de la pérdida de material que provocan los huecos.

Cuando se está ante obras de sillería, en las que las piezas están correctamente escuadradas, se puede constatar que es una ejecución correcta por parte de los canteros que dan forma a las piezas; el problema se sitúa, entonces, en alguno de los otros momentos del ciclo de la piedra: la extracción y la puesta en obra.

En la extracción esto podría ocurrir por la selección de materiales poco durables, en general debido al aprovechamiento de vetas de baja calidad. En la puesta en obra, por la colocación de piezas sin el debido cuidado o por operarios poco especializados. En ambos casos, suelen ser evidencias de unos recursos algo limitados en relación a la obra que se ejecuta.

2.3.- VARIABLES TIPOLÓGICAS DISCRIMINANTES DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA

2.3.1.- INTRODUCCIÓN

Al observar las fábricas de la Catedral de Santa María llama la atención el contraste que puede reconocerse entre la homogeneidad de las muros del interior, contruidos con una sillería bastante regular de una piedra caliza blanca, y la heterogeneidad de los alzados exteriores, donde la sillería de caliza blanca o arenisca y la mampostería se combinan en un complejo *collage* construido. Existen paños de muro contruidos con varios tipos de sillería y mampostería; muros de mampostería de más de tres metros de espesor y otros de menos de un metro; muros de mampostería al exterior y de sillería en el interior; estribos en la fachada sur que se inician con sillería y se rematan con mampostería y otros en la girola que se inician con mampostería, continúan su trazado con sillería y se rematan con unos ladrillos sobre los que apoyaba la estructura de madera; existen ventanales cuya tracería está enfoscada de cemento, así como óculos con tracería de arenisca insertados en un muro de sillería caliza, y otras múltiples combinaciones. Esta complejidad de las fábricas de la catedral responde directamente a una historia también compleja en su evolución constructiva, que es la que al fin y al cabo puede explicar las diferentes combinaciones.

Aclarar las diferentes situaciones requiere de una definición clara de los as-

pectos discriminantes que forman los muros, individualizando cada parte del complejo constructivo para caracterizarlo de manera individualizada; la definición de cada tipo de aparejo saldrá de la combinación entre esas claves discriminantes, que de esa manera se convierten en tipologías.

El primer paso para discriminar las variables que iban a ser analizadas era establecer zonas en el edificio, lo que se estableció en función de las características generales de los muros. En función de esta zonificación se realizó la campaña de toma de muestras, las que permitieron definir la litología, conocer la composición de los morteros y sobre todo, las cualidades y características de los rellenos interiores.

El hecho de contar con una restitución fotogramétrica tridimensional de toda la fábrica permitió trabajar con el despiece de todos los materiales de la catedral, así como realizar un análisis riguroso de la geometría, forma y el aparejo. Esto se combina con el estudio de la litología, los morteros y los ensayos de laboratorio, lo que en conjunto permite establecer las características de los materiales que componen los muros. Su sección y composición pudo ser establecida gracias a una exhaustiva campaña de extracción de testigos y a la inspección visual con endoscopios de las perforaciones resultantes. El análisis estratigráfico (histórico y arqueológico) de las fábricas fue fundamental para relacionar las variaciones tipológicas dentro de un mismo elemento constructivo con las diferentes fases de la construcción.

Los elementos ocultos como las cimentaciones, el trasdós de las bóvedas o el apoyo de algunos contrafuertes, pudieron ser conocidos gracias a las excavaciones arqueológicas y algunas actuaciones de urgencia.

Gracias a lo dicho anteriormente, se estaba en condiciones de presentar todas las variables tipológicas del edificio con una cierta pretensión de exhaustividad; algo que inevitablemente llevaría a una lista demasiado larga para los objetivos de esta presentación. Por ello se ha optado por la enumeración de las principales combinaciones de variables, precisamente aquellas que ocurren en la mayor parte de los muros del edificio y que, por extensión, explican la mayoría de los casos relacionados con la necesidad de inyección de mortero.

Se ha procurado que la descripción de la clasificación tipológica de las fábricas incluya tanto aspectos externos y visibles de la morfología y la construcción del elemento, como aquellos de naturaleza interna que hayan podido ser deducidos de los estudios y de los ensayos realizados. El objetivo de este capítulo es describir la composición formal y material de las fábricas que componen la Catedral de Santa María definiendo como resultado las tipologías existentes y su localización en el edificio.

Antes de pasar a la descripción de cada tipo de aparejo, resulta sin embargo necesario enumerar cuáles son las variables implicadas en su definición.

2.3.2.- DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS Y CONSTRUCTIVAS DISCRIMINANTES EN UNA CLASIFICACIÓN TIPOLÓGICA DE LOS MUROS DE FÁBRICA

Se considera un muro aquella obra de fábrica en la que el espesor es pequeño con relación a la altura y la anchura y sirve para cerrar un espacio. Los muros, especialmente los medievales, están compuestos de dos hojas de una fábrica de mejor calidad que conforman las superficies exteriores y dentro de las cuales se construye un relleno de peor calidad de cascote, ripio o de hormigón de cal (por ello, muchas veces se habla de muros de tres hojas: dos hojas exteriores y una interior o relleno). Para unir y trabar las fábricas de las caras exteriores entre sí y éstas con el relleno del interior del muro y conseguir que estos elementos trabajen solidariamente, a veces, se colocan unos sillares dispuestos transversalmente al muro que se denominan perpiaños.

La relación entre las hojas exteriores y el relleno, la configuración y composición de cada uno de estos elementos y el sistema de unión o trabado que tienen los muros determinan la casuística. Normalmente, su clasificación se realiza estudiando primero el aparejo y los materiales utilizados. En la catedral hay muros con sus caras externas totalmente de mampostería o de sillería, así como muros cuya cara exterior es de mampostería y la interior de sillería; también existen aparejos mixtos de mampostería con sillería en las aristas o de mampostería en la que se insertan sillares reutilizados colocados de manera aleatoria. En todos

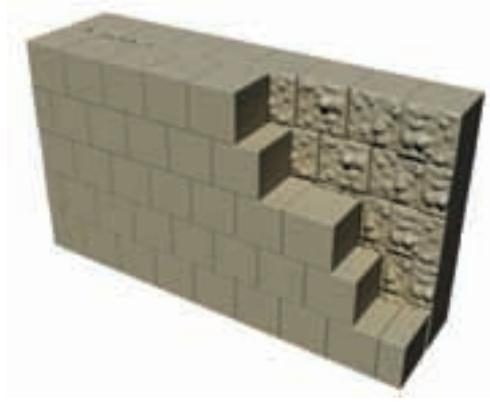
los casos, las piezas que componen las fábricas son de pequeñas o medianas dimensiones. La altura media de las hiladas es de 30 cm, sin llegar a superar nunca los 50 cm; el ancho medio de las piezas es de alrededor de 70 cm, superando en muy pocas ocasiones el metro.

La clasificación tipológica debe realizarse también en función de las dimensiones y la relación existente entre las hojas exteriores y el relleno. Desde esta perspectiva, la clasificación tipológica de los muros se mueve entre los muros sin relleno interior -donde las caras exteriores, normalmente de sillería, se traban directamente entre ellas- y los muros con un relleno interior de gran espesor y resistencia que asume todas las funciones mecánicas; en este último caso, las caras exteriores funcionan como una simple piel que protege al núcleo de la erosión. Entre estos dos tipos, existe toda una variedad de rellenos con diferentes calidades, espesores y sistemas de trabado entre las hojas.

En el caso particular de la catedral, como en muchos otros edificios de su tipo, la mayoría de los casos prácticos se refieren a muros de dos hojas exteriores y relleno, variando mucho sus dimensiones y composición. Los casos de paños de dos hojas sin relleno o de una sola hoja son en realidad anecdóticos o limitados a situaciones muy particulares, como es el caso de las paredes del triforio. La función portante es realizada, en su mayoría, por muros de dos hojas y relleno. Se trata, por otro lado, de la mayor parte de los paramentos que requirieron



Img. 2.5. Muro con dos caras de sillería y relleno interior.



Img. 2.6. Muro con dos caras de sillería sin relleno interior.



Img. 2.7. Muro con dos caras de mampostería y relleno interior.



Img. 2.8. Muro con una cara de mampostería, otra de sillería y relleno interior.

de inyecciones de mortero al ser los que mayores oquedades presentaban.

Por ello, las variables que se analizarán para la definición de las tipologías serán las implicadas en los muros predominantes. En la catedral los tipos de muros más comunes son:

- (1) Muro con dos caras de sillería y relleno interior (Img. 2.5).
- (2) Muro con dos caras de sillería sin relleno interior (Img. 2.6).
- (3) Muro con dos caras de mampostería y relleno interior (Img. 2.7).
- (4) Muro con una cara de mampostería, otra de sillería y relleno interior (Img. 2.5).

Variables del aparejo de las hojas exteriores.

- Litología
- Trabajo
 - Material recogido sin trabajar del campo
 - Material nuevo extraído por capas naturales-lajas
 - Material semielaborado
 - Mampuesto
 - Sillarejo
 - Sillar
- Acabado
 - Sin acabado
 - Desbastado
 - Labrado
- Dimensiones
 - Cara visible
 - Espesor
- Colocación
- Junta
 - Mortero (aglomerante, litología áridos, granulometría áridos, proporciones de la mezcla)
 - Dimensiones
- Aparejo del esquinal

Variables del relleno

- Dimensión (espesor)
- Mortero (aglomerante, litología áridos, granulometría áridos, proporciones de la mezcla)
- Material de relleno
 - Litología
 - Trabajo
 - Dimensiones
- Proporción

2.4.- COMPOSICIÓN HISTÓRICA DE LOS MUROS

Cuando las construcciones se presentan de manera uniforme, es decir, que un muro dado es el resultado de una misma acción constructiva, su interpretación a partir del análisis de sus caras visibles no debería presentar problemas. Sin embargo, dada la propia naturaleza de las edificaciones históricas, las fábricas casi nunca se presentan de esa manera: los muros con los que se trabaja son el resultado de las acciones de construcción, ruina, adición, eliminación, etc., que se fueron dando a lo largo del tiempo tanto por la mano del hombre como por la acción de la naturaleza. En la comprensión de este hecho reside en gran medida la correcta identificación de una fábrica desde el punto de vista histórico, pero también estructural. Nunca, o muy pocas veces, existen los muros en condiciones idénticas a las originales.

2.4.1.- LA COMBINACIÓN DE LAS TÉCNICAS EN FUNCIÓN DE SU RELACIÓN HISTÓRICO-CONSTRUCTIVA

Como se ha comentado, para el estudio de los muros de las edificaciones históricas resulta fundamental el reconocimiento de las distintas obras implicadas en el resultado final. Este reconocimiento implica definir los tipos de relación que pueden establecerse entre diferentes fábricas para conformar una única fábrica con un grado diferente de homogeneidad. Estas relaciones pueden ser de tres tipos.

Apoyo. Un muro se construye sobre otro.

Es una relación de tipo vertical en la que se eleva la altura de un muro por medio de la superposición de otro con la misma anchura o, en algunos casos, más estrecho. La superficie horizontal resultante de esta unión puede ser susceptible a la aparición de huecos (Img. 2.9).



Img. 2.9. Relación de apoyo.

Adosamiento. Un muro se construye junto a otro, pegado al mismo y en paralelo.

En estos casos, la posibilidad de aparición de huecos está en todo el recorrido de unión de ambos muros.

- a) Adosamiento completo. Los dos muros conservan sus tres hojas. Si bien es una situación más rara que otras, ya que lo normal es construir un muro adosado a otro sin construir la cara oculta del nuevo, esta situación se da en numerosas ocasiones (Img. 2.10).
- b) Adosamiento parcial. El muro nuevo sólo se construye con relleno y hoja exterior, aprovechando la cara externa del muro antiguo. Es la situación más normal de las dos, que prescinde de construir la cara interna del muro nuevo que, al fin y al cabo, hubiera quedado oculta (Img. 2.11).



Img. 2.10. Relación de adosamiento completo.

Corte.

- a) Corte longitudinal y adosamiento. Se corta una de las caras del muro antiguo y parte de su relleno, adosándose una nueva cara externa y parte del relleno. Se trata en realidad de la sustitución de una de las caras del muro por una constituida por un material distinto; por lo general se cambia un muro de



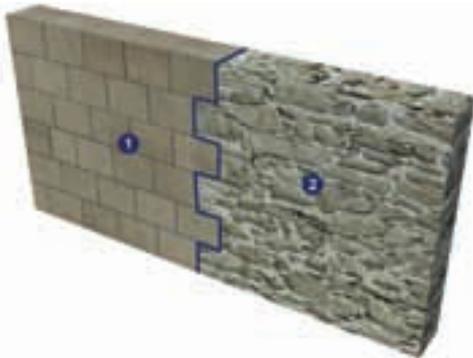
Img. 2.11. Relación de adosamiento parcial.



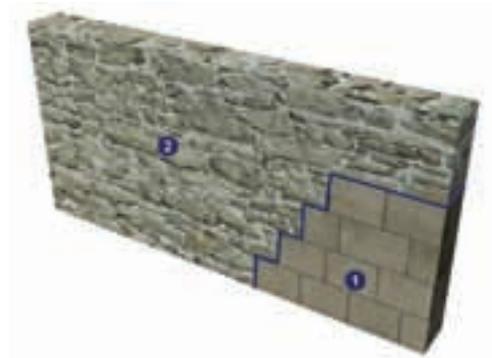
Img. 2.12. Relación de corte longitudinal y adosamiento.



Img. 2.13. Relación de corte transversal y adosamiento.



Img. 2.14. Relación de corte transversal y adosamiento con continuación de obra.



Img. 2.15. Relación de corte transversal y adosamiento con muro cortado.

mampostería por uno de sillería, creando un acabado superficial de mayor calidad; otra opción es que se trate de una simple reducción del grosor del muro, en cuyo caso el acabado superficial puede ser del mismo tipo que el que es sustituido. La superficie de contacto entre ambas obras resulta muy adecuada para la formación de espacios sin mortero, por el acomodo diferencial de ellas (Img. 2.12).

b) Corte transversal y adosamiento. Se corta el extremo de un muro, adosando uno nuevo en la misma dirección y normalmente con el mismo espesor. Son las situaciones más habituales para la aparición de huecos, estando en el origen de un importante número de grietas en las edificaciones históricas (Img. 2.13). Hay dos opciones posibles. La primera, donde el muro no fue acabado y la nueva obra es una continua-

ción de la anterior. Es una situación habitual en la construcción histórica, especialmente en aquellas de una cierta envergadura; los recursos disponibles no siempre eran suficientes para la finalización de un proyecto, por lo que resultaba necesario dejar partes inacabadas pero preparadas para su continuación. En general se dejaban adarajas para que la unión de la obra que continuaba la construcción fuera mejor. En la catedral esto se da en numerosas ocasiones, siendo la norma en los diferentes tramos de las zonas altas de la nave central (Img. 2.14).

Y en la segunda, el muro es cortado; esto puede ser obra humana o por colapso. En este caso se trata de ampliaciones, cambios de proyecto o reparaciones de una ruina parcial del edificio. En cualquier caso, siempre se requiere un saneado del corte para la continuación de la obra, que en general se realiza en forma de adarajas. Por esto resulta difícil definir si se trata de un corte o la continuación de una obra inacabada; uno de los elementos discriminantes suele ser que en los casos de corte o ruina la línea de unión es más irregular, con tendencia al escalonamiento (Img. 2.15).

Es importante volver a destacar, para finalizar, que en las construcciones históricas nunca se encuentran muros completamente homogéneos desde un punto de vista temporal; esta falta de homogeneidad (producida por el deterioro propio del paso del tiempo así como por las obras de adición y remoción) es la que configura las estructuras actuales. Sin su comprensión,

es imposible entender de manera adecuada el funcionamiento de las fábricas.

2.5.- TIPOLOGÍAS DE LOS MUROS DE LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA ⁽¹⁾

Como resultado del estudio se han definido las siguientes tipologías de muro:

- Muro de doble hoja de mampostería de lajas de calcarenita de Olárizu de alrededor de 3 m de espesor.
- Muro de mampostería de lajas de calcarenita de Olárizu en su hoja exterior aplacado con sillería de lumaquela de Ajarte al interior, de 2,5 m de espesor.
- Muro de doble hoja de sillería de lumaquela de Ajarte de 0,95 m de espesor.
- Muro de mampostería irregular de calcarenita de Olárizu o caliza negra en su hoja exterior y de sillería de lumaquela de Ajarte en el interior de aproximadamente 0,95 m de espesor.
- Muro de doble hoja de mampostería de tipología y espesores variables.
- Muro de doble hoja de sillería arenisca de la Sierra de Elguea.
- Muro enfoscado, normalmente de mampostería en sus dos caras.
- Muro de ladrillo y entramado de madera.

63

2.5.1.- MURO DE MAMPOSTERÍA DE LAJAS EN SUS DOS CARAS, DE GRAN ESPESOR CONSTRUIDO EN ÉPOCA DE ALFONSO VIII (1158-1214)

- **Descripción y aparejo.** Muros de gran potencia y de un grosor notable que varía desde los 3 m de espesor hasta 3,5 m. Hojas exteriores de fábrica de mampostería careada en calcarenita de Olá-



Img. 2.16. Interior del muro (epígrafe 2.5.1).



Img. 2.17. Exterior del muro (epígrafe 2.5.1).

rizu con hiladas regulares de lajas bien aparejadas. Rellenos muy compactos con mampuestos de caliza margosa y morteros de cal de muy buena calidad. En toda la zona inferior de estos muros, las lajas aumentan sus dimensiones y la fábrica de mampostería se transforma en una fabri-

ca de sillarejo muy bien trabajada de gran potencia con unas piezas de hasta 25x80 cm también de calcarenita de Olárizu. El cambio entre los dos aparejos se produce de una forma gradual disminuyendo progresivamente el tamaño y el trabajo de las piezas que componen el muro (Img. 2.16 e Img. 2.17).

Composición interna. El endoscopio realizado desde el exterior en el lateral septentrional del edificio define un muro de un espesor total de 3.5 m, con una hoja exterior de calcarenita de Olárizu de 38-40 cm, un relleno compuesto de un hormigón de cal muy compacto con mampuestos grandes de caliza margosa de 270 cm y una hoja interior 38-40 cm de calcarenita de Olárizu.

Cronología. Esta tipología aparece asociada a la primera fase constructiva del edificio que corresponde estrictamente con el proyecto de un gran templo fortaleza integrado en el primer perímetro amurallado de la ciudad, y cuya construcción se inicia a partir del incendio de 1202. Este proyecto, definido como la muralla de Alfonso VIII, traza una iglesia de grandes dimensiones, con un crucero muy largo y siete capillas en la cabecera -dos rectangulares en cada brazo del transepto y una capilla mayor con tres absidiolos poligonales-. Exteriormente, la construcción se remata con un paseo de ronda y en los extremos del crucero con dos torreones con tres niveles de ventanas saeteras. Como elementos formales significativos integrados en su estructura aparecen ménsulas a cuarto bocel y ventanas saeteras con derrame interior.

Distribución. Cumplen con esta designación las fábricas que componen la parte inferior de los alzados oriental y septentrional del edificio, por debajo del paso de ronda; la estructura del cubo que formaliza la esquina de estas dos fachadas y que se levanta hasta la altura del triforio; y la estructura de otro cubo idéntico al descrito que se sitúa, encuadrando la fachada oriental que simétricamente con respecto al eje longitudinal de la catedral en la esquina sur este del brazo sur del crucero, oculto por las construcciones de la sacristía y la capilla de Santiago que se le adosan. Este cubo es únicamente visible en la bajocubierta de la sacristía y en la prolongación del paseo de ronda entre el muro sur del crucero y el norte de la capilla de Santiago. Finalmente, se construye también con este aparejo la parte inferior del cuerpo octogonal de las escaleras de caracol que aparece en la fachada oeste del crucero y que es visible desde la plaza de Santa María.

2.5.2.- MURO DE MAMPOSTERÍA DE ALFONSO VIII TALLADO Y FORRADO INTERIORMENTE POR UNA HOJA DE SILLERÍA EN LAS DOS FASES DEL GÓTICO DE LOS SIGLOS XIII Y XIV

Descripción y aparejo. Este muro es el resultado de la transformación constructiva del gran muro de mampostería de la construcción de Alfonso VIII para adaptarlo al trazado del proyecto de la nueva catedral gótica iniciada en época de Alfonso X. Con este propósito, se picó toda la cara interior de mampostería de este muro rebajando considerablemente su espesor (entre 70 cm y un metro) hasta

la línea del trazado de los nuevos muros. Posteriormente, el muro descarnado se forró con un aplacado de sillería de caliza de Ajarte de un espesor variable (entre 20 y 40 cm), que se coloca con abundantes llaves de elementos atizonados. El aparejo de esos aplacados es muy heterogéneo y varía en su desarrollo en altura correspondiendo con las dos fases definidas del gótico. La primera fase corresponde con la obra del periodo de Alfonso X (1252-1284) y designada como Gótico A y se extiende entre el suelo de la catedral y el suelo del pasillo de ronda. En esta zona la altura de las hiladas es de aproximadamente 50 cm y la anchura de las placas varía entre los 25 cm y 1,30 m; sin embargo, en esta zona se presenta mayoritariamente un aparejo muy llamativo en el que se alternan placas cuadradas de 50x50 cm entre otras de la mitad de su modulo, que podrían funcionar como tizones para atar este aplacado con la antigua fábrica de mampostería que se había descarnado (Img. 2.18 e Img. 2.19).

En la siguiente fase constructiva (designada como Gótico B, 1330-1400) se continuó, desde el nivel del pasillo de ronda, forrando con un aparejo diferente los muros más altos de la obra de Alfonso VIII y que corresponden con los dos cubos que se sitúan en los extremos del transepto. La altura de las hiladas del aparejo de este aplacado va reduciéndose hasta alcanzar la altura de 20 cm pero mantiene la alternancia entre la anchura de las placas de 50 y 25 cm. Esta diferencia en el aparejo entre las dos zonas se separa con una hilada de regulación más estrecha que, en algunos casos, presenta una pequeña cor-



Img. 2.18. Interior del muro (epígrafe 2.5.2).



Img. 2.19. Exterior del muro (epígrafe 2.5.2).

nisa biselada y que constructivamente coincide con la altura del suelo del pasillo de ronda. En un primer momento, se puede interpretar las diferencias entre el aparejo por encima y por debajo de este nivel como un problema constructivo entre un

aplacado y un muro de doble hoja. Sin embargo, estas diferencias entre el aparejo de este recubrimiento se repite, no sólo en los aplacados interiores de los cubos de las esquinas del transepto, sino también en los muros de doble hoja que separan las dos capillas rectangulares. Estos dos muros, aunque completan respectivamente las caras norte y sur de los cubos de los extremos del transepto, no parece que por su espesor (de un metro) y por el espesor de sus caras de sillería de 20 cm se puedan considerar unos muros aplacados como los que se han descrito.

Composición interna. Los endoscopios realizados a diferentes alturas, en el muro oriental de la capilla de Santa Ana en el extremo sur del transepto, definen la sección de estas dos fases del aplacado de los muros de la obra de Alfonso VIII. El endoscopio realizado a una altura de un metro del suelo define un espesor para este muro de 230 cm, con una hoja exterior de mampostería de calcarenita de Olárizu de 43 cm (esta hoja actualmente es la cara interior de la sacristía y esta enlucida), un relleno interior de hormigón de cal con mampuestos de caliza margosa de 141 cm y un sillar interior de lumaquela de Ajarte de 46 cm. El endoscopio número 40 está realizado en muro sur de esta misma capilla a la altura del pasillo de ronda, y corresponde con la segunda fase del aplacado. Espesor del muro 230 cm, hoja exterior de mampostería de calcarenita de Olárizu de 22 cm, relleno interior de hormigón de cal muy disgregado y con huecos con mampuestos de caliza margosa de 180 cm y un aplacado interior de lumaquela de Ajarte de 30 cm.

Cronología. Como sabemos por la investigación histórica, la construcción de la primera fase gótica reutilizó la potente estructura de época de Alfonso VIII sobre la que se apoyó el nuevo edificio. Para dar una unidad a la construcción del interior del templo se picaron todos los alzados interiores de los muros de mampostería preexistentes, desde la altura del nivel de suelo proyectado hasta su coronación; posteriormente, se forraron con un aplacado de chapas de lumaquela de Ajarte idéntica a la de la sillería con la que se construirían los muros de esta fase, pero sólo hasta el nivel del paso de ronda. El forro en los cubos de los extremos del transepto se completó en la siguiente fase del gótico. Por tanto, la cronología de estos muros es triple y se deben asignar a cada zona la cronología que le corresponde.

Distribución. Este muro aparece en el interior de las capillas rectangulares del transepto y en los absidiolos de la girola aplacando en el interior de la catedral la construcción de Alfonso VIII.

2.5.3.- MURO DE SILLERÍA DE CALIZA BLANCA (LUMAQUELA DE AJARTE) EN SUS DOS CARAS

Se incluye en este apartado la totalidad de muros que existen en el edificio cuyas dos hojas son de fábrica de sillería de la piedra caliza designada como lumaquela de Ajarte. Puesto que el interior del espacio del templo es completamente de sillería corresponden con esta denominación todos los muros del edificio cuya cara exterior es de sillería, ya que únicamente aparece mampostería en los alzados interiores

del pórtico, en la torre y en el recrecido que construye la bajocubierta del edificio (Img. 2.20 e Img. 2.21). Presentan estos muros un aparejo de sillares dispuestos a soga con algún tizón esporádico y con un módulo de sillar que varía notablemente según las zonas pero, que en ningún caso, es de grandes dimensiones. Este aparejo de mu-



Img. 2.20. Interior del muro (epígrafe 2.5.3).



Img. 2.21. Exterior del muro (epígrafe 2.5.3).

ros es bastante convencional, muy común y de uso muy frecuente en la construcción medieval, por lo que existe una dificultad real para estudiarlo y clasificarlo. Su espesor se reduce notablemente con respecto a los muros que ya se han estudiado y se encuentra siempre alrededor de un metro. Para establecer una zonificación de estos muros se ha seguido la clasificación realizada en el estudio histórico, en el que se ha tenido en cuenta, además del aparejo, variables como: el tipo de talla, marcas de cantero, gafas, elementos decorativos, etc. Sabemos, por este estudio, que la mayoría de estas fábricas de sillería de lumaquela de Ajarte se construyen en la “fase gótica” del edificio en el periodo comprendido entre el siglo XIII y el siglo XV.

Gótico A: Alfonso X (1252-1284)

Descripción y aparejo. El aparejo y la apariencia externa de este muro coincide con las características definidas para el forro interior del muro de este periodo. Altura de las hiladas, de aproximadamente 50 cm, y una anchura de los sillares entre los 25 cm y 1,30 m; se presenta mayoritariamente un aparejo muy llamativo en el que se alternan placas cuadradas de 50x50 cm entre otras de la mitad de su modulo.

Composición interna. El endoscopio número 18, realizado en el muro de separación de las dos capillas rectangulares que se abren al transepto norte, define un muro de 1 m de espesor, con dos hojas de lumaquela de Ajarte de 20 cm y un relleno de 60 cm de hormigón de cal muy disgregado con mampuestos de caliza negra.

Distribución. Corresponden a esta fase únicamente, los muros de separación de las capillas rectangulares de los brazos norte y sur del transepto, hasta la altura del nivel del suelo del pasillo de ronda y los muros que cierran los absidiolos por encima del pasillo de ronda. En realidad, el muro de separación de las capillas rectangulares del brazo sur del transepto está completamente alterado por los sepulcros abiertos.

Gótico B: (1330-1400)

Descripción y aparejo. El aparejo correspondiente a este periodo coincide también con el aplacado que se han definido en el apartado anterior para este periodo y tiene unas características que, por su generalidad, prácticamente se repite en todos los aparejos de sillería posteriores. El aparejo es completamente convencional dispuesto a soga con esporádicos tizones de sillares rectangulares, con unas dimensiones que mantienen una relación de 1 a 1,5/2 entre la altura y la anchura. En el aparejo, la altura de los sillares en cada hilada es constante, variando esta altura de una hilada a otra en medidas que oscilan entre los 20 y 50 cm. La anchura de los sillares en la hilada es siempre variable y completamente aleatoria, manteniendo únicamente la proporción establecida lo que permite componer el aparejo.

Composición interna. Únicamente se tienen realizadas endoscopias que pueden corresponder a esta tipología en las pilastras del transepto por debajo del triforio y cuya descripción está incluida en

el punto referido a las pilastras. El resto de los endoscopios realizados en un muro de dos hojas de sillería corresponde a los muros de la obra gótica de los siglos XV y XVI pero, dadas las similitudes entre estas fábricas, se pueden deducir que la composición interior de estos muros será muy similar.

Distribución: Los muros de doble hoja de sillería de esta fase se extienden básicamente desde el nivel de suelo del pasillo de ronda hasta el nivel del triforio, y por encima de este nivel en los muros de sillería que al exterior completan los primeros tramos de la nave y el transepto más próximos al crucero. De éstos únicamente son de sillería el alzado norte de la nave, el oriental del transepto norte y el occidental del transepto sur. El resto son al exterior de mampostería. También corresponden a este periodo los muros que componen las portadas y los que pueden apreciarse en la fachada occidental de la capilla de Santiago. Probablemente, muchos de los muros que se extienden por debajo del triforio tendrán su cara exterior de mampostería, ya que esta cara no es visible al estar oculta por los rellenos de las bóvedas de las naves laterales o la girola.

Siglos XV y XVI

Descripción y aparejo. En las zonas de muros definidas como de este periodo, además de la característica sillería a sogá ya descrita, se ha podido observar varias tipologías de fábrica de sillería con características específicas que se dividen en tres grupos:

Sillería cuadrangular con hiladas de regularización

Estas fábricas tienen un aparejo muy característico donde se combinan dos o tres hiladas seguidas de sillares más o menos cuadrangulares, con una hilada muy tendida como de regularización donde los sillares tienen una forma alargada. Se sitúa en los dos primeros tramos -desde los pies- de los muros de la fachada sur de la nave central, los más próximos a la torre. Este aparejo se interrumpe en el segundo tramo junto al contrafuerte más oriental donde aparece una fábrica más convencional de sillares regulares a sogá. De unas características parecidas a este aparejo aparece un pequeño paño de muro en el alzado oriental del primer tramo del transepto sur.

Sillería con gafas

Fábricas de sillares a sogá, bastante cuadrangulares con gafas en su lado visible. Se concentra esta tipología fundamentalmente en el alzado occidental del transepto sur sobre la portada de Santa Ana, y aparecen también algunos metros en todo el frente oriental de la parte superior del transepto.

Sillería del fuste de la fachada sur de la torre

En realidad esta fábrica es una lámina de una sola hoja de sillería de 30 cm de espesor que forra el arco apuntado que soporta el cuerpo de campanas. En el vano dejado por el arco el muro aparece aparejado con una sola hoja de sillería sin nada que lo soporte por detrás. El aparejo es de una sillería a sogá con una piezas perfectamente rectangulares de dimensiones

mayores a las habituales en el edificio y colocado casi sin junta.

Composición interna. De acuerdo al resultado obtenido de las inspecciones en las perforaciones realizadas para atirantar los dos primeros tramos del transepto sur aparece una composición dimensional bastante heterogénea en la composición de estos muros. Espesor uniforme de alrededor de 95 cm.

Distribución. La distribución de estos muros es bastante amplia y repartida por todo el edificio. A este periodo corresponde uno de los momentos constructivos más activos ya que el edificio pasa a ser iglesia colegial. En este momento se remata la construcción de los extremos del transepto, se construyen las bóvedas superiores de piedra, el pórtico y se inicia la construcción de la torre.

2.5.4.- MURO DE SILLERÍA EN LA HOJA INTERIOR Y DE MAMPOSTERÍA EN LA HOJA EXTERIOR

- **Descripción y aparejo.** Se incluye en este apartado la totalidad de muros que existen en el edificio cuya hoja exterior es de fábrica de mampostería de calcarenita de Olárizu o caliza negra y su hoja interior de sillería de lumaquela de Ajarte (Img. 2.22 e Img. 2.23). Como el interior del templo es completamente de sillería, corresponden con esta denominación todos los muros del edificio cuya cara exterior es de mampostería y que no corresponden con la obra de Alfonso VIII. Estos muros se diferencian: por su espesor que, en este caso, es de alrededor de un metro frente a

los 3 m que presentaban los más antiguos y 2.5 m los que habían sido aplacados por el interior; segundo, por el aparejo de mampostería con unas piezas más redondeadas e irregulares de tamaños muy diferentes repartidas de manera aleatoria y con ripios entre sus juntas; tercero, por las características de la sillería del interior que cumple las mismas características definidas para los muros de doble hoja de sillería. Este aparejo de muros es también muy frecuente en la construcción del edificio y bastante convencional, por lo que existe una dificultad real para estudiarlo, clasificarlo y establecer su zonificación. Del mismo modo que en la tipología anterior es necesario seguir la clasificación realizada en el estudio histórico que otorga a esta tipología un abanico muy grande de periodos.

Composición interior. De acuerdo, al resultado obtenido de las inspecciones en las perforaciones realizadas para atirantar los dos primeros tramos del transepto sur aparece una composición dimensional bastante heterogénea pero de unas características similares que la que corresponde al muro de dos caras de sillería. Espesor uniforme de alrededor de 95 cm.

Distribución. Se reparten por todo el exterior del edificio especialmente en las partes superiores de las fachadas norte y este y en la mayoría de los estribos y contrafuertes. Se deben asociar estas fábricas a las continuas refracciones que sufre el edificio por sus problemas estructurales.

Cronología. La cronología de estos muros es igualmente extensa y abarca prác-



Img. 2.23 y 2.24. Interior y exterior del muro (epígrafe 2.5.4).

ticamente todo el periodo gótico, desde el siglo del siglo XIII al siglo XVI. Además, por sus características tan comunes es una tipología que se repite también en fechas posteriores cuando se tienen que realizar reparaciones y pequeñas transformaciones de la estructura precedente.

2.5.5.- MURO DE MAMPOSTERÍA EN SUS DOS CARAS DE TIPOLOGÍA DIVERSA

Descripción y aparejo. Con esta tipología existen una serie de muros muy diferentes entre sí, situados en zonas muy concretas del edificio y que corresponden a fases específicas de la construcción o actuaciones muy concretas de una extensión limitada, por lo que se ha optado por incluirlos como subtipos separados dentro de esta tipología.

Muro de mampostería de la torre (actualmente revocado).

La fábrica de estos muros es de muy buena calidad, de aproximadamente 1,5 m de espesor, con un aparejo de unos mampuestos de lajas grandes y alargadas. Aunque cronológicamente la construcción de estos muros corresponde al siglo XVI y en el edificio se datan varias fábricas de mampostería de este periodo, esta fábrica es específica de los muros que constituyen el fuste de la torre y no se repite en ningún otro punto (Img. 2.24 e Img. 2.25). Esta especificidad responde a la función constructiva tan concreta de estos muros que constituyen la estructura del cuerpo de la torre que sirve de soporte al campanario. Para salvar el vano del pórtico principal de la catedral y apoyarse en los grandes estribos que le sirven de soporte, estos muros construyen en el centro de cada uno de sus lados cuatro grandes arcos apuntados con dovelas irregulares del mismo material. En las fachadas sur y oeste estos arcos se encuentran revestidos con un muro de sillería en la fachada sur y de mampostería en la fachada oeste. Este último forro y los cuatro machones



Img. 2.24 y 2.25. Interior y exterior del muro de mampostería de la torre.



Img. 2.26 y 2.27. Interior y exterior del muro de mampostería de dos caras con sillares reutilizados.

que rematan las esquinas corresponden a una reforma posterior del siglo XVII.

Muro de mampostería en sus dos caras con sillares reutilizados.

Esta mampostería recorre perimetralmente la parte superior de los muros de la nave y el crucero y corresponde a los recrecidos que son necesarios realizar para permitir la construcción de la cubierta

con cuchillos de madera (Img. 2.26 e Img. 2.27). Esta reforma del edificio se realizó en 1648 para liberar las bóvedas de los rellenos de tierra con los que se conformaba el tablero de la cubierta. Esta fábrica se caracteriza por su irregularidad, la reutilización de sillería desmontada del edificio o procedente de otras construcciones y colocada como un mampuesto más de la fábrica y una junta gruesa de mortero



Img. 2.28. Exterior de la capilla del Santo Cristo.

de cal enrasada con el plano exterior de la fábrica. Son muros de unos 60 cm de espesor.

Muro de mampostería en sus dos caras con enfoscado de cemento imitando aparejos preexistentes.

Son unas fábricas perfectamente identificadas y que se construyeron en la restauración de los años sesenta recreando

los muros perimetrales de la capilla de Santiago y la torre octogonal que aparece en la fachada Oeste.⁽²⁾

Composición. No se ha efectuado ninguna inspección en el interior de alguno de estos muros.

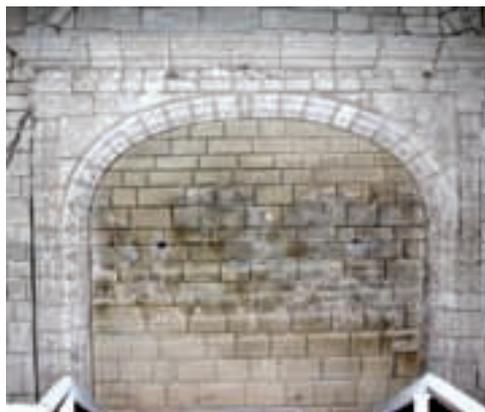
Distribución. Aparece esta tipología en las zonas ya citadas. Muros del fuste de la

torre de cierre del pórtico, de cierre perimetral de la bajocubierta de la nave y el transepto y muros de remate de la capilla de Santiago.

2.5.6.- MURO DE SILLERÍA DE ARENISCA DE LA SIERRA DE ELGUEA

Descripción y aparejo. Con este material, de unas cualidades excelentes, se construyen muros de sillería y unos elementos arquitectónicos de cantería de una escala superior a la utilizada habitualmente en la catedral, y en general de una calidad mayor. El aparejo de los muros que construyen la capilla del Santo Cristo es de una sillería a sogá con piezas algo mayores a las construidas hasta este momento en el edificio, con una altura de hilada de 35 cm pero con un ancho que se aproxima a los 85 cm. (Img. 2.28). En realidad, todas las construcciones realizadas con este material tiene multitud de piezas molduradas y su utilización aparece en el monumento a partir del siglo XVIII.

Distribución. Aparecen contruidos con este material fundamentalmente la cornisa que remata el fuste de la torre y la capilla del Santo Cristo. También aparece una serie de remates en los contrafuertes, los botareles, en las esquinas de la torre, en el pavimento y en el banco del pórtico y la plaza de Santa María. Constituye también uno de los materiales que más se utiliza en las obras de restauración de los años sesenta en las sustituciones y reparaciones del pórtico y de la portada de Santa Ana y en las jambas y arcos de los ventanales y rosetones contruidos en la



Img. 2.29. Sillería figurada dibujada sobre muro enfoscado.

nave y el crucero. Igualmente se colocan sobre los contrafuertes, aleros, cornisas, etc. una chapa de unos 4 cm, de arenisca como cubierta de la lluvia.

2.5.7.- MURO DE LADRILLO Y ENTRAMADO DE MADERA

La construcción con ladrillo y entramado de madera que aparece en la construcción de la catedral es una fábrica, que por su contraste con el resto de las que componen el edificio, es perfectamente identificable tipológica y cronológicamente. Se construye con este material un almacén al que se accede por una puerta que se sitúa bajo el coro y en el llamado cuarto de la escolanía de la catedral, que se sitúa en el nivel del paso de ronda sobre el coro. También aparece esta tipología en una pequeña banda que remata los muros de la nave y del transepto y que se relaciona con una segunda reforma de las estructuras de las cubiertas. Todas estas construc-

ciones son de escasa calidad arquitectónica y pertenecen a reformas de principios del siglo XX.

2.5.8.- MUROS ENFOSCADOS DE CAL O CEMENTO

En algunos puntos de la catedral la fábrica de mampostería aparece enfoscada con morteros de cal en las que se ha dibujado una sillería figurada (Img. 2.29). Durante el proceso de investigación arqueológica de las fábricas se han picado algunos de estos paños identificando la tipología de la fábrica que ocultaban que mayoritariamente era de mampostería. También, en la fachada este del crucero, rodeando la apertura de los huecos apuntados que se construyeron con la restauración de los años sesenta, aparecen unas fábricas enfoscadas de cemento o de piedra artificial imitando sillería. Estos huecos, completamente nuevos y abiertos en el muro oriental del transepto, deberían haber estado contruidos con sillería de lumaquela de Ajarte o arenisca del mismo modo que se construyeron los rosetones de la nave en esta misma restauración. Sin embargo, tal y como se ha comprobado desde el andamio instalado en el transepto sur, estos huecos están contruidos con una piedra artificial de cemento armado que imita una sillería.

2.6.- PATOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS. CAUSAS DEL AFOLLAMIENTO DE LOS MUROS

El estudio de la técnica constructiva de un muro, un arco, una bóveda o de cualquier elemento constructivo exige el co-

nocimiento de la composición interna de sus zonas ocultas; especialmente, cuando alguna de sus caras no es visible o cuando su espesor o sus dimensiones exigen para su construcción la ejecución de rellenos importantes, cuya composición difícilmente puede deducirse de una simple inspección visual. Además, la ejecución de las obras de fábrica y, especialmente las medievales, presentan normalmente en el interior una composición muy heterogénea, existiendo grandes diferencias entre la fábrica con la que se construye la cara superficial del elemento y la composición con la que normalmente se construyen los rellenos interiores.

En general, las caras exteriores, bien sean de sillería o mampostería, se cuidan mucho más, tanto por problemas estéticos como por problemas constructivos que atañen a la impermeabilidad del muro, a su dureza, su resistencia a la degradación, etc. Los interiores de los muros y las zonas ocultas de los elementos constructivos de fábrica se suelen construir con mamposterías u hormigones de cal con un mortero de cal pobre y con frecuencia apenas si se ejecutan llaves ni se colocan sillares atizonados que traben las hojas exteriores con el núcleo interior.

En primer lugar, hay que pensar que la necesidad de levantar con cierta velocidad un muro, por cuestiones defensivas o económicas, puede obligar a utilizar morteros secos que permitan su rápido endurecimiento y eviten que éste, al utilizarse cales aéreas y colocarse confinado, no pueda carbonatar. Este problema se agrava por la utilización, también por econo-

mía, de morteros pobres de cal y con una granulometría del árido muy gruesa que facilitan también la aireación del mortero. También es posible que por estos mismos problemas se construyan los propios rellenos de la fábrica dejando huecos vacíos entre los mampuestos para permitir la carbonatación de los morteros de cal.

Estas características de la construcción de un muro de fábrica -especialmente de los medievales- y de otros elementos constructivos agravan enormemente los efectos que la humedad puede tener sobre su consistencia y resistencia. Un mortero mal carbonatado, pobre en cal y en el que es probable que se haya utilizado en su composición un árido con una granulometría gruesa e inadecuada, es un mortero poroso y fácilmente disgregable por acción de la humedad. Un muro u otro elemento constructivo construido con un mortero de estas características y en el que existen huecos entre sus mampuestos es un muro que permite la penetración y la circulación del agua, que tiende a humedecerse con facilidad en todo su volumen y a retener la humedad en su interior.

El paso del tiempo en el edificio somete a la construcción a ciclos estacionales, las diferencias de temperatura y humedad relativa del ambiente y la humedad que se filtra directamente a los muros por defectos de ejecución en cornisas, aleros y terrazas y por falta de mantenimiento de cubiertas, canalones y bajantes acaba provocando la disgregación de los morteros pobres del interior de los muros. Es evidente que en los momentos de guerras

o depresión económica la falta de mantenimiento de los edificios debería ser una constante, lo que provocaría periodos prolongados de goteras y humedades en las fábricas.

Son los rellenos de los muros sobre los que apoya directamente los planos de la cubierta los que sufren directamente la erosión provocada por el lavado de los morteros por el agua de escorrentía de las cubiertas deterioradas. Hay que pensar que, en estos casos, la humedad suele ir acompañada del deterioro de los aleros y del nudo de apoyo sobre los muros de las estructuras de madera de las cubiertas. Además, cualquier gotera en el plano de la cubierta tenderá a escurrir siguiendo el faldón hasta tropezar con el alero. Si gotea directamente hasta el trasdós de la bóveda, igualmente tenderá a escurrir por el casquete para acumularse en el seno donde se estanca para filtrarse empapando los rellenos de la bóveda hasta alcanzar la pieza de salmer, desde la cual se introduce en el muro, escurriendo hasta el suelo a través de los rellenos.

Un mortero pobre, realizado con un aglomerante de cal aérea mal apagada y colocado en la construcción de la fábrica siguiendo un proceso muy rápido conduce a unos morteros arenizados, fácilmente disgregables. Son estos morteros los que serán lavados y disueltos en el interior de los muros, lo que permitirá su afollamiento, la aparición de oquedades y la separación de las hojas exteriores de las fábricas -mucho más rígidas- de su núcleo interior -mucho más deformable- permitiendo que las tres partes que lo componen fun-

cionen de forma independiente y tiendan a separarse formando huecos en su estructura interior.

Una humedad de capilaridad constante acabará provocando un efecto parecido. Estas humedades más difíciles de eliminar permanecerán en la fábrica durante periodos más prolongados en el interior de muros y pilares favoreciendo la disolución del aglomerante mal carbonatado y la arenización del mortero y su disgregación.

La descomposición y pérdida de masa y resistencia del núcleo del muro, así como la diferencia de resistencia entre núcleo y superficie, deriva en problemas de pandeo de las hojas exteriores que absorben una carga mucho mayor procedente de las bóvedas o de las cubiertas. Hay que pensar en el comportamiento de un muro, un pilar, un estribo o un contrafuerte debilitado por efecto de la humedad y con unos morteros y una construcción como la descrita, sometido al empuje y los esfuerzos de una bóveda o al de la estructura de una cubierta.

Normalmente, los nervios de una bóveda de crucería descansan sobre una pieza de salmer que debe atar en forma de perpiño toda la sección del muro y sobre la que también deben acometer desde el exterior las dovelas del arbotante. Evidentemente, la construcción no siempre es de este modo, y generalmente la pieza de salmer sólo forma parte de la hoja interior del muro, adentrándose únicamente un poco en el relleno interior. Al deformarse la estructura de un muro de estas

características, las hojas exteriores –más rígidas que las del relleno interior– tienden a separarse de su núcleo, formando unas grandes lentejas que separan cada una de las partes de la fábrica deshojándola hasta conseguir su afollamiento.

El objetivo de la inspección está en determinar la composición interior de muros y pilares del edificio, de los materiales que la integran y su definición litológica, espesores existentes y nivel y dimensiones de los huecos, etc. Como ya se ha comentado en el preámbulo de este capítulo, las técnicas para el conocimiento de las zonas ocultas de la construcción se pueden clasificar en destructivas y no destructivas. Se considera destructiva la ejecución de catas en el elemento constructivo para permitir el acceso directo al interior del mismo, sin ningún medio indirecto de acceso y visualización, ni mecanismo alguno. Se consideran técnicas y ensayos no destructivos aquellos que permiten acceder a la inspección del interior del elemento constructivo mediante mecanismos indirectos de tipo óptico (inspección visual remota) o mecánico (extracción de testigos). También se consideran como no destructivas aquellas técnicas que permiten conocer la composición interior del elemento constructivo por su respuesta a la transmisión de determinadas señales de tipo físico emitidas sobre el elemento (termografía, ultrasonidos, rayos X, etc).

De un modo general, para el reconocimiento de los elementos constructivos horizontales como las cimentaciones, bóvedas, forjados, etc, se considera más adecuado la realización de catas y para

el reconocimiento de los elementos verticales como muros, pilares, pilastras, columnas, etc. la utilización de las técnicas no destructivas de inspección. De todos modos, la selección de la técnica más ade-

cuada para la inspección dependerá tanto de las características específicas del elemento -objeto de la inspección- como de los objetivos que se quieren alcanzar con la misma.

NOTAS

- (1) Texto extraído del *Plan Director de Restauración. Catedral de Santa María. Vitoria-Gasteiz*, Agustín Azkarate, Leandro Cámara, Juan Ignacio Lasagabaster, Pablo Latorre.
- (2) Lorente Junquera, M., 1964, Óp. Cit. “ En la partida 4 se incluye la obra de mampostería a realizar en la zona alta de la capilla de Santiago y en su torreón”.

BIBLIOGRAFÍA

- CHOISY, A. *Histoire de l'architecture. Bibliothèque de l'Image*, Paris, 1996. (reed. Orig. 1899) (Historia de la construcción).
- ERLANDE-BRANDENBURG, A. *La Catedral*. Ediciones Akal, Madrid, 1993. (Las catedrales góticas).
- HEYMAN, J. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 1995. (Teoría y técnicas de consolidación estructural).
- HEYMAN, J. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*, Instituto Juan de Herrera, 1999 Madrid.
- LASAGABASTER, J.I. *Actas del Primer Congreso Europeo sobre Restauración de Catedrales Góticas*. Diputación Foral de Álava, Vitoria, 2001. (Teoría y técnicas de consolidación estructural).
- MACAULAY, D. *Nacimiento de una Catedral*. Editorial Timún Mas, Barcelona, 1980 (Orig. 1973) (Historia de la construcción).
- MARTÍNEZ-TORRES, L. M., 2009a. *La Ruta de la Piedra*. Servicio Editorial de la UPV/EHU, Bilbao. 80 pp. ISBN: 978-84-9860-060-5.
- MARTÍNEZ-TORRES, L. M., 2009b. *The Typology of Ancient Quarries within the Paleocene Limestone of Álava in Northern Spain*. *Geoarchaeology*, 24 (1): 42-58. DOI: 10.1002/gea.20252.
- VIOLLET-LE-DUC, E. *La construcción medieval*. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 1996. (Historia de la construcción).
- VIOLLET-LE-DUC, E. *Encyclopédie Médiévale*. Facsimil en Bibliothèque de l'Image, 1998. (Historia de la construcción).
- VON SIMSON, O. *La catedral gótica*, Alianza Editorial, 1993.
- VV.AA. *Curso de Mecánica y Tecnología de los Edificios Antiguos*. Colegio de Arquitectos de Madrid, 1987. (Teoría y técnicas de consolidación estructural).



- 3 -

Sondeo A

Sondeo B

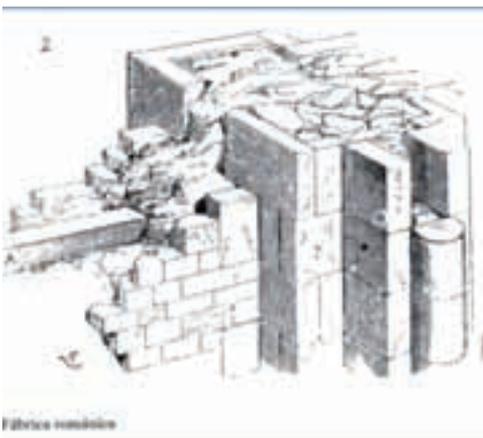
DETERMINACIÓN DE
LA COMPOSICIÓN
INTERIOR DE LAS
FÁBRICAS



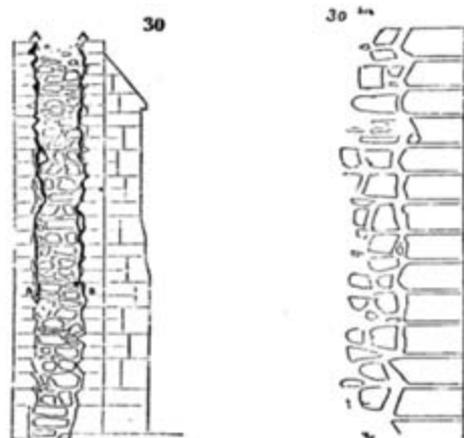
La determinación de la composición interna de un elemento de fábrica se antoja necesaria para evaluar con anterioridad a la inyección, el porcentaje de poros y la comunicabilidad entre ellos. Esto es, resulta conveniente conocer, independientemente del consolidante a inyectar, el volumen previsible de inyección, la posible distribución del mismo, así como el volumen ocupado. Cuestiones a priori difíciles que exigen una metodología de estudios previos exhaustiva y pormenorizada.

Con el paso del tiempo, las diferencias de temperatura y humedad relativa del ambiente o la humedad que se filtra directamente a los muros por defectos de ejecución en cornisas, aleros o terrazas, y por falta de mantenimiento de cubiertas, canalones y bajantes, acaban provocando la disgregación de los morteros pobres del interior de los muros. Esto influye a su vez en la separación de las hojas exterior-

res de las fábricas medievales (mucho más rígidas) de su núcleo interior (mucho más deformable). La descomposición y pérdida de resistencia de este núcleo, así como, las diferencias de resistencia entre núcleo y superficie deriva en problemas de pandeo de las hojas exteriores que absorben una carga mucho mayor, procedente de los elementos constructivos situados en las partes altas: bóvedas y cubiertas. Esta patología descrita en el punto 2.6 de este libro, es recogida en diferentes tratados y diccionarios de arquitectura en lengua castellana como el de E. Mariategui de 1876, donde con el término *afollar* se recoge el ahuecamiento o avejijamiento de un muro. El objetivo de esta inspección está por tanto en determinar la composición interior de muros y pilares del edificio, de los materiales que la integran y su definición litológica en relación a los espesores existentes y nivel y dimensiones de los huecos.



Img. 3.1. Construcción de fábrica románica según E.V.le Duc. Siglo XVIII.



Img. 3.2. Deshojamiento de un muro de tres hojas según E.V.le Duc. Siglo XVIII.

Las técnicas para el conocimiento de las zonas ocultas de la construcción se pueden clasificar en destructivas y no destructivas:

- Se considera destructiva la ejecución de catas en el elemento constructivo para permitir el acceso directo al interior del mismo, en los que se destruye el material perforado. Es decir, a los métodos directos de intervención, como los sondeos mecánicos en los que la pérdida de material, total o parcial es irreversible.
- Se consideran técnicas y ensayos no destructivos aquellos que permiten acceder a la inspección del interior del elemento constructivo mediante mecanismos indirectos de tipo óptico (inspección visual remota). También se consideran como no destructivas aquellas técnicas que permiten conocer la composición interior del elemento constructivo por su respuesta a la transmisión de determinadas señales de tipo físico emitidas sobre el elemento (termografía, ultrasonidos, rayos X, etc). En resumen, se podría hablar de métodos no destructivos en aquellos casos en que se determina alguna característica física sin pérdida, descomposición o alteración del material estudiado.

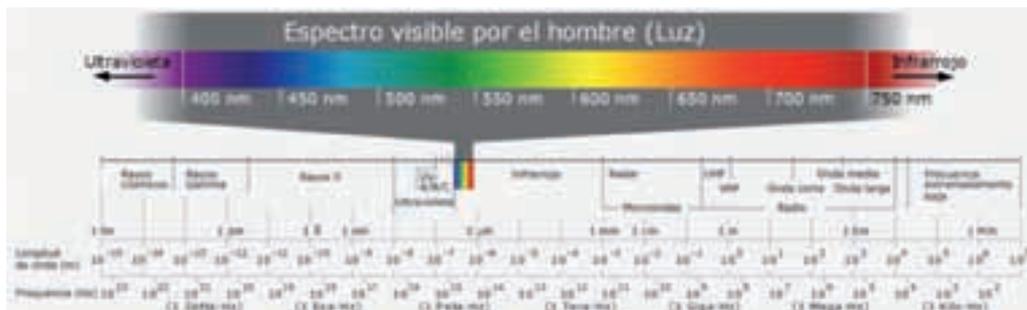
De un modo general, para el reconocimiento de los elementos constructivos horizontales como las cimentaciones, bóvedas, forjados, etc. se considera inicialmente más adecuado la realización de catas y por tanto perforaciones más o menos destructivas. Por el contrario, para el reconocimiento de los elementos verticales como muros, pilares, pilastras,

columnas, etc. la utilización de las técnicas no destructivas de inspección. De todos modos, la selección de la técnica más adecuada para la inspección dependerá tanto de las características específicas del elemento -objeto de la inspección- como de los objetivos que se quieren alcanzar con la misma. En los siguientes apartados se describen algunos de los métodos considerados y empleados en mayor o menor medida en el estudio de las fábricas de la catedral.

3.1.- MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Están basados en el comportamiento de los materiales a determinadas longitudes de onda, bien reflejadas, emitidas o absorbidas, así como a otras características físicas, como por ejemplo la transmisividad eléctrica. En general, todas las técnicas pueden incluirse dentro del campo de la Geofísica, si bien cada técnica recibe una terminología específica que la diferencia.

En principio, cuando se estudian las ondas electromagnéticas, su análisis se enmarca dentro de la teledetección o percepción remota. El espectro electromagnético es el conjunto de ondas electromagnéticas o, más concretamente, la radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia. Van desde las de menor longitud de onda (rayos cósmicos, rayos gamma y rayos X), pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda (microondas, ondas de radio y ondas sísmicas). En la Img. 3.3 se muestra un esquema del



Img. 3.3. El espectro electromagnético y los campos de aplicación (autor Horst Frank, wikipedia).

espectro electromagnético con las longitudes de onda y los principales campos de aplicación.

La teledetección o percepción remota es el conjunto de técnicas que, sin estar en contacto con el objeto, permiten definir características del mismo. Su campo de aplicación está limitado a unas determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético, también denominadas bandas espectrales. Según sea el rango de la longitud de onda y el sensor sensible a esas bandas se hará referencia a radiografías, fotografías, termografías o radargrafías.

Otra posible clasificación de los análisis no destructivos (NDT) se refiere al sensor o mecanismo que analiza una determinada propiedad física. Así, se clasificarán en sensores pasivos o activos. Los sensores pasivos son aquellos que captan una determinada longitud de onda del objeto bien por reflexión, refracción o emisión. Un ejemplo de ello sería la cámara termográfica o de infrarrojos, que mide la emisión térmica. Los sensores activos son aquellos que emiten y a su vez captan una

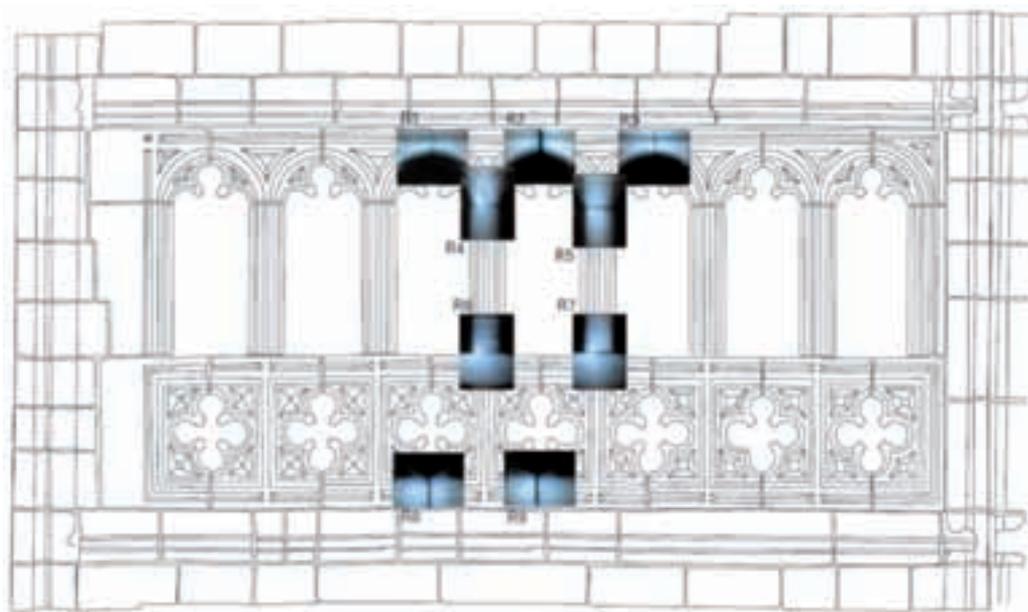
determinada longitud de onda a través o reflejada en el objeto. Un ejemplo típico de sensor activo es el radar.

Para determinar las características internas de los muros de la catedral se han empleado varias técnicas no destructivas de percepción remota y geofísica. Aunque la información aportada por estos métodos para reconocer el interior de los muros de tres hojas ha sido muy limitada frente a los métodos destructivos, esto es, los sondeos, tiene interés citar brevemente las técnicas empleadas, sus resultados y limitaciones.

3.1.1.- RADIOGRAFÍAS

Los rayos X o Rx se localizan dentro del espectro electromagnético entre 1 A y 100 A (A = amstrong). Su uso, muy extendido en medicina, no requiere comentarios. En la catedral se han empleado para verificar la presencia de llaves metálicas en dos sectores del triforio.

El espesor de las paredes sometidas a radiografías fue de 270 mm. Para espeso-



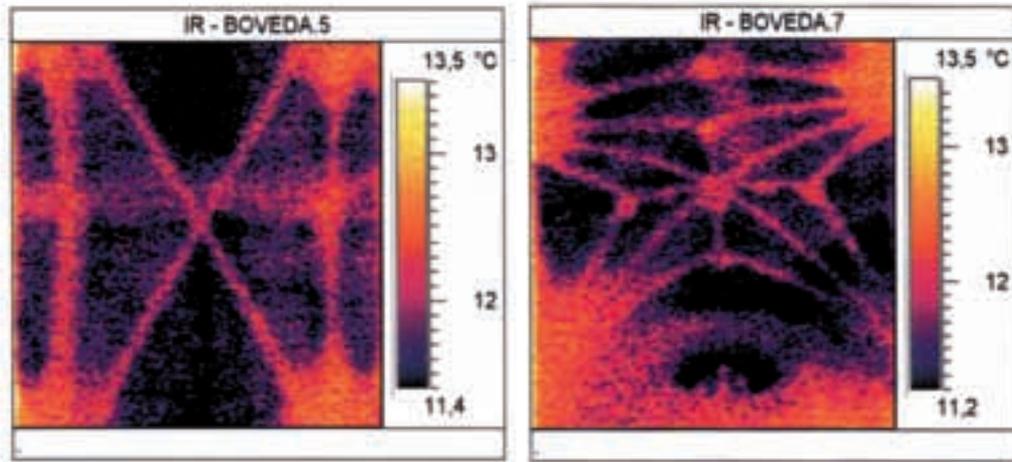
Img. 3.4. Radiografías realizadas en el triforio.

res mayores se desconoce el comportamiento del sistema técnico. En cualquier caso, las imágenes a obtener en las paredes sometidas a estudio únicamente reflejarían la presencia de elementos metálicos que impedirían el flujo de las ondas. En el negativo las piezas o minerales metálicos aparecerían en un tono blanco intenso. En el positivo las piezas metálicas aparecerían en negro, ya que impiden al paso de los Rx. El aire, sin embargo, aparecería en tonos oscuros en el negativo y blanco en el positivo, al permitir la transmisión de los rayos.

Las radiografías, al igual que otros métodos no destructivos aquí comentados, tienen el problema de ser representaciones planares, con unas coordenadas X e Y y un tercer valor Z representado en el

negativo en diferentes tonalidades grises entre el blanco y el negro. Para un punto X, Y del plano el valor Z representa el sumatorio de propiedades de todos los elementos perpendiculares al plano, en este caso atravesados por los Rx. Si en ese punto, por ejemplo, existiera un elemento metálico, otras características en esa perpendicular quedarían enmascaradas.

La porosidad interior en los muros, que debiera aparecer en tonos oscuros en el negativo, queda solapada por los materiales rocosos que la recubren. En otras palabras, las ondas de Rx no alcanzarían los poros al estar todos ellos recubiertos por roca que impide la transmisividad. Por tanto, la radiografía no es un método aplicable al estudio de las fábricas pétreas aquí consideradas.



Img. 3.5 y 3.6. Termografías de bóvedas en la Catedral de Santa María.

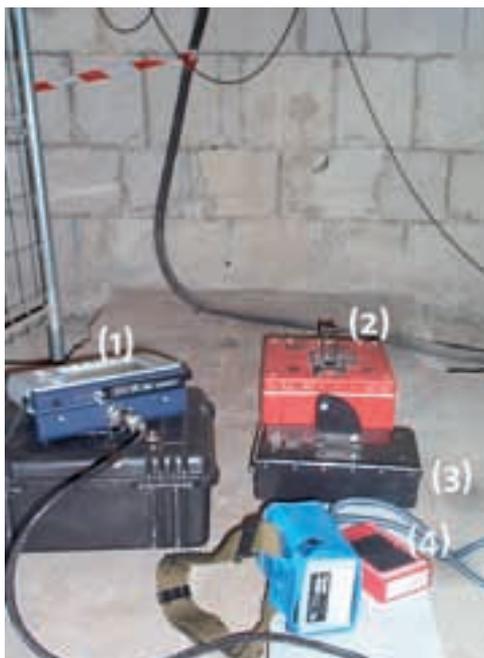
3.1.2.- TERMOGRAFÍAS

Las ondas infrarrojas tienen longitudes de onda comprendidas entre 0,75 micras y 1 mm. Al espectro localizado cerca del espectro visible, en concreto a la banda comprendida entre 1 y 3 micras, se denomina infrarrojo cercano o infrarrojo térmico. En teledetección es ampliamente empleado pues el agua no transmite esas ondas y aparece en las imágenes de color negro. Dicho en otros términos, a mayor cantidad de agua tonos más oscuros.

Dentro de un material homogéneo las variaciones de intensidad en el infrarrojo cercano están relacionadas con la transmisividad térmica del material, a mayor temperatura mayor intensidad en la imagen. Los valores obtenidos por los sensores se transcriben a escalas digitales 8 bits, es decir 256 valores posibles desde 0 hasta 255. Para visualizar mejor estos valores se emplean tablas de colores, como

las mostradas en la publicación *Plan Director de Restauración. Catedral de Santa María. Vitoria-Gasteiz*.

Las limitaciones de las termografías en el reconocimiento interior de muros es el escaso poder de penetración. Aunque en algunas imágenes se observan variaciones relacionadas con irregularidades interiores es difícil determinar su origen y su profundidad. Otras limitaciones de este método es la calibración del sensor dependiente de los gradientes térmicos y, sobre todo, de los contenidos de agua. Por otra parte, al igual que ocurre con otras técnicas, la imagen obtenida queda representada en tan sólo dos coordenadas, la tercera variable a analizar queda enmascarada en un único valor. En otras palabras, para un único punto localizado en un plano se superponen todos los valores perpendiculares a ese punto hasta donde lo permita el poder de penetración del sensor.



Img. 3.7. Equipo de georadar utilizado en este estudio: (1) georadar SIR3000; (2) antena 1.5 GHz de frecuencia central; (3) antena 900 MHz de frecuencia central; (4) antena 400 MHz de frecuencia central.

3.1.3.- RADARGRAMAS

El georadar es un método de prospección geofísica basado en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (entre 1 ns y 10 ns) en la banda de frecuencias de UHF-VHF (normalmente entre 100 MHz y 1 GHz).

La técnica de georadar se basa en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio. La propagación de estos pulsos electromagnéticos por un medio se puede definir teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas.

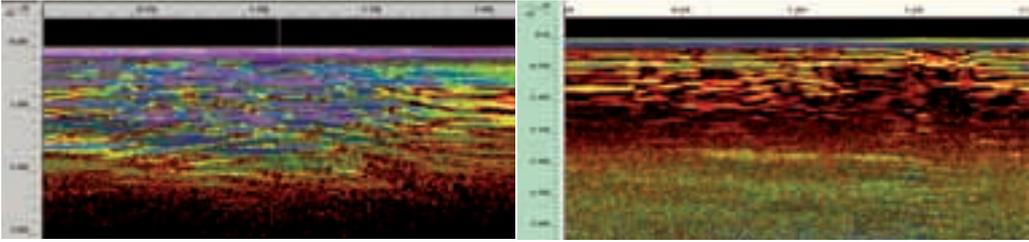
Esta técnica geofísica es un sistema electromagnético para la detección y localización de elementos y/o formaciones en el subsuelo, construcciones u objetos materiales.

Todos los medios citados poseen sus características electromagnéticas propias (constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica).

Sus fundamentos teóricos son los mismos que los que un radar convencional emplea para detectar un avión, pero el georadar utiliza un ancho de banda más amplio, y las antenas receptora y emisora se dirigen hacia el subsuelo u objeto a estudiar.

Esquemáticamente, las mediciones se efectúan mediante la generación por la antena emisora de una onda electromagnética con una frecuencia característica. Ésta se va propagando por el medio hasta que alcanza una zona u objeto cuyas propiedades eléctricas son diferentes respecto a las circundantes o adyacentes, entonces, parte de la energía electromagnética se refleja hacia la superficie, mientras que el resto de energía continúa propagándose. La onda electromagnética reflejada se recibe a través de la antena receptora y se registra para su posterior tratamiento e interpretación.

El actual *modus operandi* del georadar puede originar secciones verticales continuas (llamadas registros radar o radargramas) del subsuelo, similares en apariencia e interpretación a una sección sísmica. Las operaciones de campo con



Img. 3.8. Radargramas correspondientes a las campañas del 2004 (antes de la inyección) y 2010 (después de la inyección) realizados en el muro oeste del crucero sur, donde se observa la efectividad de las inyecciones de cal en el muro.

un georadar de este tipo son sencillas y la adquisición de datos es muy rápida. Estas mediciones se realizan desplazando las antenas del georadar en vehículos o manualmente.

Dependiendo del tipo de problema a resolver, es decir de la auscultación hasta la profundidad deseada (por ejemplo 25 cm, 50 cm, 1 m, 5 m, 10 m, 30 m,...), debe utilizarse una o varias antenas de emisión y recepción. Estas antenas tienen frecuencias de emisión generalmente de 1,5 GHz, 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz, 200 MHz y 100 MHz. La frecuencia de emisión de los pulsos (orden de los KHz), la duración de éstos (orden de nanosegundos) y la amplificación de la señal a aplicar depende de cada tipo de problema a tratar y de las características de los materiales y/o terrenos a investigar.

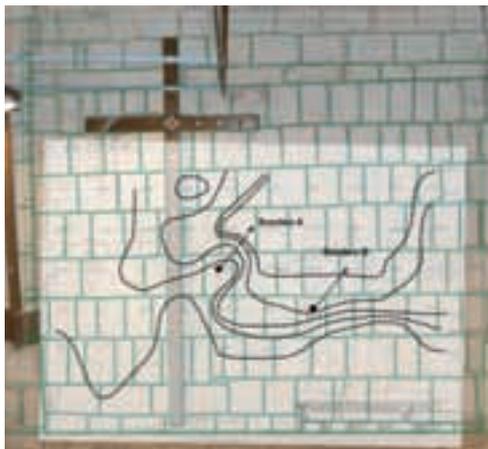
La captación y representación de datos procesadas por el software propio del sistema permite determinar propiedades electromagnéticas del medio (constante dieléctrica, grado de humedad), aunque no se pueden cuantificar características físicas usualmente empleadas en cálculos de obras y edificación.

En la catedral se han realizado varias pruebas con georadar, empleándose tres antenas distintas (1.5 GHz, 900 MHz y 400 MHz) para alcanzar rangos de profundidad diferentes (Img. 3.7). El desplazamiento lineal del georadar sobre los muros permite obtener imágenes del plano perpendicular a la línea de desplazamiento de la antena-receptor.

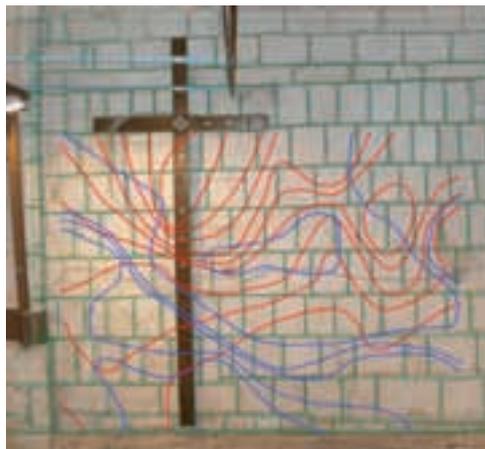
En la catedral se obtuvieron radargramas mediante la realización de dos campañas de georadar en los años 2004 y 2010 en los mismos muros, zapatas y pilares antes y después de la inyección de cales. Los cambios detectados en los radargramas después de las inyecciones son muy patentes y claros (Img. 3.8). Además, si se tiene en cuenta que es un método no destructivo (no invasivo) le confiere un carácter idóneo como una herramienta más en este tipo de estudios de conservación y restauración monumental.

3.1.4.- SONDEOS ELÉCTRICOS

Un método geofísico muy extendido en hidrogeología y geotecnia son los sondeos geoelectrónicos, también conocidos como



Img. 3.9. Alzado del muro sur con las resistividades puntuales obtenidas y las líneas de isovalores derivadas.



Img. 3.10. Alzado del muro sur con las resistividades obtenidas por el método de calicata tipo SEV. En azul valores del muro norte y en rojo valores del muro sur.

SEV (Sondeos Eléctricos Verticales). Están basados en la trasmisividad eléctrica de los materiales, aunque habitualmente se trabaja con su inversa la resistividad. Muy sucintamente el sistema de prospección es un polo colocado en un punto fijo y otro polo que es trasladado a través de la superficie. Controlando la intensidad aportada al sistema se recoge la electricidad saliente, la cual está relacionada con la trasmisividad o resistividad de los materiales atravesados.

En la catedral, para comprobar las posibilidades del método geoelectrico, se seleccionó un muro de una hoja de sillería de lumaquelas de Ajarte de 1 m de espesor. De él se conocía el despiece y se habían practicado dos sondeos mecánicos con recuperación de testigo que atravesaban la totalidad de la pared. A ambos lados del muro (norte y sur) se realizaron pequeños taladros donde se colocaron puntas de

acero para asegurar la conductividad del circuito. Los taladros ocupaban una superficie de 10 m de anchura por 5 m de altura, dispuestos en una cuadrícula regular de 0,5 m de luz.

En primer lugar se midieron directamente a través del muro las resistividades de la lumaquela. Para ello se colocaba un polo en un punto del muro (extradós) y el otro en su simétrico del intradós. Las resistividades obtenidas se han representado como un alzado de isovalores (Img. 3.9). En ella se observa un descenso progresivo de la resistividad hacia arriba. Las resistividades más bajas, o en otros términos, la trasmisividad más alta, puede explicarse por una mayor presencia de agua.

Sin embargo, si se considerara un grado de humedad homogéneo en la pared, el máximo de resistividad se sitúa cercano al sondeo A, en el cual se reconoció un

perpiaño, es decir, un sillar que atravesaba la totalidad del muro. Siguiendo este mismo criterio, las resistividades más altas corresponderían a una fábrica de tres hojas, similar a la encontrada en el sondeo B, con dos hojas externas de lumaquela de 28 y 26 cm respectivamente y un relleno de ripios de lumaquelas y calizas margosas locales de 46 cm de grosor, y un 37% de sondeo no recuperado. En valores absolutos, el sondeo B tiene una pérdida del 12%, frente al sondeo A con una recuperación del 100%.

Además, la lectura estratigráfica del muro había permitido reconocer una puerta en el muro, que más o menos, corresponde con el valor máximo de la izquierda de la *Img.* 3.9.

El otro dispositivo de medición en la misma pared fue la superposición en cada punto de un sistema de calicata similar a los empleados en los SEV. Sobre un punto se situaba un polo y se abrían progresivamente dos alas simétricas en las que se medía la resistividad. Los valores obtenidos han sido representados como líneas de isovalores (*Img.* 3.10). Las calicatas eléctricas, al abrirse el ala de medición, atraviesan la totalidad del grosor del muro pero, además, en la línea transversal entre el polo central y los puntos externos se atraviesan las juntas entre sillares, enmascarándose los valores. En otras palabras, comparando el ensayo realizado con un SEV convencional, se podría afirmar que además de las capas subhorizontales se tendría un sistema de planos discontinuos verticales. Esta observación, además, explicaría la falta de

correlación entre el alzado de isovalores en ambas caras del muro.

En resumen, los sondeos eléctricos realizados en la catedral no aportan información concluyente al conocimiento de la constitución de los muros. En las pruebas realizadas, únicamente la medición directa de la resistividad a través de la pared ha aportado información correlacionable con la fábrica ya conocida. De no conocerse la estructura previa los resultados obtenidos no hubieran sido interpretados correctamente.

3.2.- MÉTODOS DESTRUCTIVOS: PERFORACIONES, TESTIGOS Y ENDOSCOPIAS

El conocimiento de la composición interna de los muros es una tarea compleja, como así lo evidencian los diferentes métodos no destructivos comentados hasta ahora. En el caso de recurrir al método destructivo de sondeo mecánico (adecuado a la escala arquitectónica), se deben puntualizar algunas cuestiones.

Primero habrá que elegir aquellos lugares donde realizar las catas pensando en que éstas aporten la mayor cantidad posible de información. En este caso, se han elegido zonas y elementos constructivos que tuvieran al exterior diferentes configuraciones funcionales, constructivas, litológicas o cronológicas. Es decir, se han valorado:

- Elementos de diferente función constructiva, pilares, muros, estribos, cimentaciones, etc.

- Elementos con diferentes técnicas constructivas, mampostería, sillería, combinación de ambas, etc.
- Elementos con diferentes materiales litológicos visibles al exterior. No hay que olvidar que la visión exterior de un muro es una visión plana en dos dimensiones y que es la composición interna la que da esa tercera dimensión.
- Elementos cuyas cronologías de ejecución sean diferentes, para todo lo cual la ayuda de la disciplina arqueológica aplicada a la arquitectura y los datos históricos conocidos son fundamentales.
- Golpeo e hincas desplazando el material, comprimiéndolo y sin recuperación alguna del mismo (destrutivo).
- Perforación mediante rotación de tubos huecos en los que se recupera parte del material o testigo (semi-destrutivo).
- Perforación por rotación y percusión en los que se destruye el material extra-yéndolo en forma de polvo (destrutivo).

Una vez discriminado el lugar de perforación en base a un planteamiento de estudio global basado en los criterios anteriormente comentados, se ha procedido a la ejecución del sondeo teniendo en cuenta los diferentes sistemas de perforación. No hay que olvidar que para este estudio inicial los sondeos no han de servir como canal de inyección y por tanto es recomendable su ejecución en horizontal o vertical para obtener una estratigrafía continua, y directamente relacionada con el espesor del elemento. Es más, estos sondeos pueden servir en el futuro como puntos de control permanentes del estado interior de las fábricas.

3.2.1.- SISTEMAS DE PERFORACIÓN

Existen multitud de sistemas para la ejecución de perforaciones, buena prueba de ello se observa en los campos de la geotecnia y el bricolaje entre otros. Pero en lo que respecta a la escala de construcción podrían agruparse en tres grandes familias.

De una manera más concreta y volviendo al problema de la escala de construcción intermedia en la que se van a desarrollar los trabajos, es necesario contar con maquinaria de un alcance intermedio y buena portabilidad. Se trata de utilizar sistemas que permitan movilidad suficiente como para trabajar desde un andamio, sin renunciar a una buena precisión y alcance en las perforaciones, de unos 5 m como máximo. Por otro lado y puesto que se trata de la intervención en patrimonio histórico, se han descartado todos los sistemas de hincas y golpeo entendiéndose que son inadecuados por alterar y comprimir las paredes de las futuras vías de inyección. A priori, los de rotación con recuperación de testigo tienen el inconveniente de ser más caros, pero la ventaja fundamental de la obtención de muestras, además de un mayor alcance. Los de perforación por rotopercusión constituyen un método barato, pero su alcance y diámetros son bastante limitados, lo cual hace que no sean excesivamente destructivos.

En definitiva, se han utilizado dos sistemas de perforación distintos, con una variante.

- Corona de diamante con recuperación de testigo, con la variante de tubos o camisas provisionales que eviten el desprendimiento de las paredes de los canales de inyección. Variante sólo en caso necesario.
- Rotopercusión, método destructivo, empleable en diámetros adecuados para obtener buen alcance y un canal de inyección suficientemente amplio.

Para obtener de cada elemento constructivo que vaya a consolidarse la composición y estado de sus fábricas, se realizarán -a diferentes alturas y orientaciones- una serie representativa de sondeos en los que esté previsto la extracción del testigo de la perforación para su estudio. Se perforará en los puntos marcados previamente por rotación simple con corona de diamante siguiendo las prescripciones planteadas en el estudio global de las fábricas.

En cualquier caso, la trama de las perforaciones definida podrá variar también a medida que se desarrollan los trabajos. En todo momento será necesario tomar nota de los datos de perforación que serán recogidos en fichas, tal y como que se comentan con detalle en el desarrollo del ejemplo práctico y en el pliego anexo al final del libro.

3.2.1.1.- Perforación con corona de diamante y recuperación de testigo

La ventaja fundamental de este método radica en la obtención directa de una muestra no excesivamente alterada de la composición interna del muro. Además,

permite un canal lo suficientemente amplio como para realizar una inspección visual con comodidad. El alcance es muy amplio, para un diámetro pequeño. En torno a los 50 mm, puede rondar los 5 m, ya que el tubo se va ampliando con elementos que se ensamblan entre sí.

La perforación se efectúa siempre sin golpeo, mediante equipos de perforación a rotación simple con coronas diamantadas y agua como fluido de evacuación y refrigeración de las coronas de corte. El anclaje de la máquina de perforación se realiza adecuándose a las circunstancias de la obra, evitando que los taladros de fijación de la máquina alteren el monumento. Por ello conviene fijar la máquina al andamio siempre que sea posible. El buen anclaje de la máquina resulta determinante para la correcta ejecución del sondeo. Cabe destacar que la presencia de agua para refrigeración de la corona es constante, por lo que resulta conveniente canalizar ésta evitando que discurra libremente por toda la pared, especialmente en las zonas interiores.

Por ello se hacen necesarias canalizaciones temporales para evacuar el agua de perforación hasta la red de saneamiento municipal o depósito habilitado al efecto, evitando que el agua se acumule en la calle o en las zonas de paso. Sin olvidar que la presencia de humedad puede alterar el estrato rocoso o un suelo dependiendo de su composición.

Se debe tener un control de la cantidad de agua de perforación utilizada en cada sondeo, por lo que hay que cuantificar el



Img. 3.11. Ejecución de perforación con corona de diamante.



Img. 3.12. Sistema auxiliar provisional de recogida y evacuación de agua de perforación.

porcentaje de agua recuperada (25, 50, 75, 100%) en toda la longitud de perforación. Datos que se registrarán en unas fichas que ayuden a realizar diferentes análisis.

Las perforaciones por rotación con corona de diamante no deben tener un diámetro mayor de 50 mm, ya que diámetros superiores suponen una destrucción mayor del elemento constructivo. Esta medida constituye un diámetro más que suficiente para la recuperación del testigo.

Los testigos extraídos se colocan en cajas normalizadas de 60 cm de anchura, debidamente preparadas para ello, de manera que sea identificable el principio, el fin y cada maniobra realizada a diferentes profundidades del sondeo. Los testigos se disponen ordenados en profundidad sucesiva de perforación, tomando las medidas necesarias para que no se muevan, ni se altere su orden correcto. Al exterior de la caja quedan identificados todos los sondeos recogidos en su interior, con los

datos suficientes para su correcta localización.

En caso de ser un canal de inyección, el ángulo de inclinación hacia el interior del muro oscilará entre 15 y 30 grados por encima de la horizontal, lo que facilitará la penetración de la lechada por gravedad en el proceso de inyección posterior. No obstante, para el estudio general es más lógico realizarlos horizontales o verticales como se ha comentado anteriormente y siempre normales a la superficie exterior del muro.

Durante la ejecución de la perforación, los operadores han de tener especial cuidado en intuir la zona de salida del sondeo, en caso de que éste atravesase el elemento constructivo. Puede ocurrir que, sin querer, se atravesase un elemento constructivo de lado a lado que, en el caso de existir escultura monumental, supondría una pérdida irreparable de la talla. Para garantizar un testigo continuo, la perfo-



Img. 3.13. Ejecución de perforación por rotoperCUSión.



Img. 3.14. Taladro de 25 mm ejecutado por rotoperCUSión.

ración se continúa aunque se atraviesen huecos por los que se pierde la totalidad del agua de perforación ya que muchas veces las zonas de huecos son puntuales. Esta medida queda sujeta a la idoneidad de disminuir o aumentar su alcance.

Hay que tener presente que en la catedral existen elementos que tienen un gran espesor, como ocurre en los muros de la muralla de Alfonso VIII, estribos, contrafuertes y pilares donde no habrá que realizar taladros que traspasen de lado a lado.

Por último, se debe tener en cuenta que la vida de una corona de diamante es de aproximadamente 100 m de perforación, por lo que es importante prever su desgaste con suficiente antelación.

3.2.1.2.- Perforación por rotoperCUSión

La perforación a rotoperCUSión para el estudio de la composición interior de los

muros tiene varios problemas. El primero es su alcance limitado a profundidades en torno a 100 cm. El segundo es el carácter altamente destructivo que no permite más que la recuperación del material extraído convertido en polvo. Es este polvo, que se queda en el interior disperso y pegado a las paredes laterales del orificio, el que dificulta en gran medida la observación de los diferentes materiales mediante inspección visual remota. Y, por último, al emplearse diámetros más pequeños, en torno a los 25 mm, se dificulta también el empleo de técnicas de inspección visual remota.

No obstante, a pesar de su carácter más destructivo, su alcance limitado y de los problemas que puede provocar en determinados elementos constructivos debido a los golpes y vibraciones implícitos en este sistema de perforación, es una forma mucho más rápida de trabajo y muy adecuada como canal de inyección. Permite, además, realizar unas perforacio-

nes de un diámetro menor, y no necesita agua. Por el contrario, hay que tener un cuidado especial en su manejo. La longitud máxima de perforación viene limitada por la longitud de la broca a emplear. No se encuentran en el mercado con facilidad brocas superiores a 1 m real para diámetros inferiores a 30 mm, lo que implica que la longitud efectiva de perforación ronde los 80 cm. Por ello, se emplean diámetros mayores, de alrededor de 40 mm, con el fin de lograr un alcance que supere los 150 cm de profundidad sin necesidad de agua de perforación.

El proceso de perforación por rotoper-cusión debe comenzar por realizar un pretaladro del diámetro e inclinaciones indicadas con una broca de pequeño alcance (+/-10 cm). Este pretaladro servirá de embocadura para la broca de largo alcance, de manera que esta segunda no resbale por la pared, evitando dañar a los operarios y la superficie exterior de las fábricas. No obstante, es conveniente la previsión en obra de un tubo de diámetro interior ligeramente superior a la broca de perforación y de unos 25 cm de longitud. Este tubo sirve puntualmente para dirigir la broca de perforación en caso de ser necesario. Durante todas las perforaciones es conveniente contar con un sistema básico de recogida del polvillo originado por la perforación justo a la salida del agujero. El canal obtenido debiera limpiarse por aspiración o con aire a presión antes de efectuar cualquier operación posterior, y del mismo modo los restos que pudieran quedar en la pared deben ser cepillados en seco para que no queden adheridos por presencia posterior de humedad.

3.2.1.3.- Entubamiento de las perforaciones

En determinados casos, siempre que sea estrictamente necesario y con el fin de evitar la obturación del orificio por desmoronamiento del relleno interior, se entuban o encamisán las perforaciones. Este encamisado se realiza mediante la introducción de una tubería de plástico con un diámetro exterior algo inferior al de la perforación realizada, y se introducirá hasta el fondo de las zonas desmoronables. En cualquier caso, en las zonas entubadas no se puede realizar inspección visual remota para ver el relleno interior de las fábricas, pero sí para comprobar la correcta colocación del tubo. Este apeo es provisional y se debe retirar en el proceso de inyección.

3.2.2.- INSPECCIONES VISUALES REMOTAS. TIPOLOGÍAS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ENDOSCOPIOS INDUSTRIALES

Una vez ejecutados los taladros y tras haber analizado y registrado todos los datos relativos a la perforación y a la extracción del testigo, se debe proceder a la ejecución de las inspecciones visuales remotas. Esta información complementaria será fundamental para obtener mayores certezas en la composición y estado de conservación del interior de las fábricas. Para ello se utilizan diferentes instrumentos que permiten ser utilizados en la inspección interior del elemento constructivo. A continuación se describen de manera general las tipologías de endoscopios industriales comúnmente empleados.

3.2.2.1.- Los endoscopios

El endoscopio es un aparato que permite la observación de cavidades normalmente inaccesibles o con una accesibilidad extremadamente reducida. Estos aparatos se definen primero por la accesibilidad de su punta hasta el lugar de la observación lo que determinará la longitud, sección y flexibilidad, y segundo por la tecnología necesaria para transmitir la imagen y la luz a través de la sección, la longitud y la flexibilidad del aparato. Las diferentes tecnologías de transmisión de la imagen y de la luz que se utilizan en los diferentes endoscopios existentes en el mercado se han desarrollado para permitir simultáneamente la mínima sección compatible con la máxima longitud, la máxima flexibilidad y la máxima resistencia. Características que deben compatibilizarse con la calidad de la imagen transmitida.

Comercialmente los diferentes tipos de endoscopios existentes en el mercado se designan y clasifican de acuerdo a la técnica empleada para recoger y transmitir la imagen desde la punta al observador. La imagen se puede transmitir mediante sistemas de lentes (boroscopios), mediante fibra óptica (fibroscopios) o mediante imagen digital a través de minicámaras de vídeo con un chip CCD que se sitúa en la cabeza del endoscopio (vídeo endoscopio). Los boroscopios se caracterizan por su rigidez; los fibroscopios y los videoendoscopios por su flexibilidad.

Otra de las características que distingue a estos aparatos es el objetivo que montan en la punta y su posición con respecto

a la dirección de la lanza. El objetivo podrá estar montado según la dirección de la lanza del endoscopio, perpendicular o con un ángulo determinado con respecto de la misma lo que definirá la dirección de la visión (0°, 45°, 60°, 90°, 110°). Existen algunos aparatos que montan junto al objetivo un prisma móvil que puede girarse sobre su eje y que se manipula por el observador permitiendo el movimiento de la dirección de la visión según la dirección de la lanza. En segundo lugar, el objetivo tendrá un campo visual y una profundidad de enfoque con unas características similares a las de los objetivos que montan las máquinas de fotos y de vídeo. El campo visual puede variar entre los 35° y los 100°, la profundidad de enfoque entre los 3 mm hasta el infinito.

El siguiente dato que distingue la tipología de aparatos existentes en el mercado es el modo en que se genera y transmite la luz. Como los endoscopios son generalmente de pequeño diámetro, el espacio disponible para las fibras de iluminación es limitado. En la actualidad, la mayoría de los endoscopios transmiten la luz mediante una guía de fibras ópticas no coherente integrada en el tubo del endoscopio desde una fuente de luz fría externa al endoscopio hasta la punta del mismo, donde se sitúa el objetivo. La mayoría de las fuentes de luz utilizan como standard lámparas de proyector de luz halógena de tungsteno con potencias que varían entre 75 W, 100 W, 150 W y 250 W. Las fuentes de alta intensidad y rendimiento utilizan lámparas de arco de xenón de 300 W o de metal haloide de 250 W y permiten la inspección de grandes

espacios o largas distancias. Únicamente en los boroscopios extensibles se utiliza como fuente de iluminación una lámpara halógena de baja intensidad y voltaje que se sitúa en la punta del sistema junto a la óptica, normalmente 6 V, 4 W, esta lámpara condiciona la visión frontal de estos aparatos y además coloca una fuente de calor (la lámpara) en la punta del aparato, lo que imposibilita determinadas inspecciones.

Boroscopio. Sistema óptico tradicional, semejante al periscopio, con varios prismas y lentes que transportan la imagen desde el plano focal a un ocular externo. Su construcción debe realizarse sobre una estructura rígida, normalmente un tubo de acero. Este tubo de acero puede ser de una pieza o por el contrario alargarse mediante elementos que se acoplan. En el primer caso la luz se transmite por fibra óptica desde una fuente de luz externa y en el segundo caso tiene que situarse una lámpara de baja intensidad en la punta del aparato, lo que condiciona enormemente su visión frontal. Los boroscopios, con una tecnología relativamente más sencilla que la del resto de equipos, ofrecen una calidad de imagen muy superior, con un coste económico más reducido a la que presentan los fibroscopios flexibles y superior incluso a la de los videoendoscopios, pero únicamente pueden utilizarse cuando el acceso está en línea recta al área de la inspección. Existe una gama muy amplia de secciones y longitudes entre los boroscopios de una sola pieza, los diámetros de los tubos de estos aparatos varían entre 2 mm a 16 mm y la longitud máxima se aproxima a los 140 cm.

Boroscopios extensibles. Para salvar el problema de la longitud máxima útil de un boroscopio rígido, se fabrican también unos aparatos que sacrifican el sistema de iluminación por fibra óptica para permitir el acoplamiento in situ de tubos de 80 cm hasta alcanzar una longitud máxima de 8 m. Estos aparatos montan en su punta un sistema de iluminación con una lámpara de incandescencia que impide tener una visión frontal de la perforación y permite únicamente la visión en 45° o perpendicular a la dirección de avance del tubo del boroscopio. Estos aparatos son muy utilizados en la industria de armamento para la inspección del fondo de los tubos de cañones.

Fibroscopio. Sistema óptico que transmite la imagen utilizando guías de imagen construidas con miles de fibras ópticas muy delgadas colocadas sobre una matriz que permite crear una guía coherente de imágenes. La iluminación en la punta se transmite desde una fuente de luz externa por un haz no coherente de fibras integrado con el de la imagen. Para permitir la accesibilidad de estos aparatos su punta puede dirigirse por el observador en todas las direcciones. Se ofrecen estos aparatos con diámetros de 0,6 a 13 mm y con longitudes de 0,7 a 6 m. En los fibroscopios la calidad de la imagen está muy condicionada por su longitud y a partir de los 2 m la calidad de la misma desciende considerablemente.

Videoendoscopio. Utilizan un chip ccd a color de alta resolución que capta la imagen en la misma punta del endoscopio y la envía a la unidad de control a través de la



Img. 3.15. Videoendoscopio de la Diputación Foral de Álava empleado en los trabajos de consolidación de fábricas de la Catedral Santa María.

lanza al sistema cerrado de televisión que recoge la imagen. Esta tecnología, que capta la imagen vídeo en la misma punta, permite realizar aparatos de hasta 16 m de longitud, ya que ésta no influye para nada en la calidad de la imagen. La sección del aparato depende únicamente del haz no coherente de fibras ópticas para la transmisión de la luz y de la sección operativa de trabajo, fabricándose solo aparatos de secciones que varían entre 6 y 8,4 mm.

3.2.2.2.- La utilización de los endoscopios en arquitectura

Es difícil realizar una selección del endoscopio idóneo entre la variedad de aparatos que se comercializan, dada la casuística tan variada de situaciones que van a presentarse en los trabajos de restauración arquitectónica. Entre las aplicaciones para arquitectura la más común

será la definición de las secciones constructivas de muros, pilares, forjados, vigas, etc. a través de perforaciones de pequeño diámetro realizadas *ex profeso*, o a través de juntas o fisuras en los elementos constructivos. La utilización de estos aparatos permitirá también observar elementos constructivos, sistemas de anclaje, instalaciones, cámaras de aire, etc. ocultos por tabiques, revestimientos o falsos techos o por otros elementos constructivos más modernos superpuestos, como muros, forjados, etc. La utilización del endoscopio también es imprescindible para realizar controles de calidad y comprobar la idoneidad y la ejecución de muchas partidas de obra como las inyecciones de lechadas en el interior de los muros, los cosidos, diversas obras de recalce, la ejecución de cámaras de aire, la colocación de aislamientos o impermeabilizantes etc. En definitiva, la utilización del endoscopio en las obras de restauración permitirá realizar todo un abanico de inspecciones visuales remotas que permitirán la definición precisa de la construcción del edificio sobre el que hay intervenir y el control de calidad de las unidades ejecutadas.

A la hora de elegir un endoscopio se deben definir las características de: longitud, sección, flexibilidad, dirección de la visión, angular de la visión, profundidad de enfoque y fuente de luz más adecuada a la inspección que se pretende realizar. Alguna de estas características está en relación directa con el precio y parece obvio que a menor sección, mayor longitud, mayor flexibilidad, mejor calidad de imagen e iluminación el precio se multiplica exponencialmente.

Longitud. Las secciones de muros, forjados, pilares etc. no suelen superar en la arquitectura el metro, pero en edificios monumentales pueden presentarse secciones de muros con rellenos que superan con creces esta longitud, llegando a alcanzar espesores de hasta tres metros. Es cierto que, si se puede acometer un muro de estas características desde sus dos caras con un aparato de un metro de longitud, el alcance se duplica. También hay que considerar la posibilidad de inspeccionar sondeos realizados para determinar las características de la cimentación y su encuentro con el suelo, o de los posibles rellenos arqueológicos en cuyo caso pueden ser necesarias longitudes mayores.

Sección. Dadas las secciones con las que se fabrican estos aparatos, en la inspección de arquitectura no es un dato significativo que condicione la elección. Hay que elegir las secciones mayores que se fabrican para la longitud elegida, pues normalmente son más económicas y más robustas. Sin embargo, pueden darse casos excepcionales en los que sea necesaria la utilización de secciones pequeñas, fundamentalmente en la inspección de elementos muebles en los que haya que atravesar agujeros existentes o sea necesario la realización de éstos con la mínima incidencia en el bien inspeccionado. En arquitectura puede igualmente ser necesario en la inspección de fisuras o grietas en las fábricas sin necesidad de realizar agujeros previos.

Flexibilidad. La inspección de arquitectura se realizará normalmente en agujeros que previamente han de ser realiza-

dos perpendicularmente a la sección que se quiere observar. El recorrido de estos agujeros, realizados ex profeso para la inspección, será recto y por tanto se podrán utilizar boroscopios para la misma. Sin embargo, los taladros que se efectúen para la inspección pueden atravesar cavidades que no eran visibles y que, por este motivo, puede ser útil un endoscopio flexible que permita al usuario introducirse en las irregularidades no previstas en el recorrido realizado. Los endoscopios denominados flexibles en realidad son flácidos, a excepción de unos diez centímetros de su punta donde se encuentra el objetivo que es direccionable por el observador. Esta flaccidez puede resultar un inconveniente cuando se quiera salvar un gran hueco, tratando de alcanzar el lado opuesto del mismo. En general, los endoscopios flexibles pueden provisionalmente entubarse y convertirse en rígidos. Otro dato a tener en cuenta son las longitudes de la lanza que, en los rígidos -no extensibles-, no puede sobrepasar un metro y cuarenta centímetros.

Dirección de la visión. Para la inspección de arquitectura es imprescindible contar simultáneamente con objetivos montados en la dirección de la lanza y en perpendicular a esta. El objetivo de visión frontal proporciona una visión global del hueco que se está inspeccionando y permitirá, si se introduce una cinta métrica en el agujero, controlar la escala de los objetos que se están observando y la profundidad en la que se encuentra el usuario. La inspección perpendicular permite observar con precisión la composición de los materiales y la sección del muro

que se está inspeccionando, además en el caso de cámaras de aire, falsos techos, etc. permitirá ver los elementos que existen en los mismos.

Objetivo. El ángulo de la visión y la profundidad del enfoque estará directamente relacionado con la dirección de la visión elegida. Cuanto mayor sea el angular de visión, mayor será la imagen recibida pero ésta estará también más distorsionada y por tanto será más difícil de interpretar. El más común de los ángulos es el de 60° tanto en visión frontal como en visión perpendicular. En visión frontal este angular marcará la distancia, desde la punta del endoscopio, a partir de la cual se empezará a observar la sección del agujero. En la visión perpendicular este ángulo marcará el área que se está observando, en función de la distancia desde el objetivo del endoscopio a la pared del agujero que observamos.

La distancia de enfoque. Hay que elegirla en función de la dirección de la visión elegida. En la visión frontal no se necesita normalmente enfocar a distancias muy cortas pues el mismo ángulo de visión del objetivo -a excepción de los ángulos de visión de 100° -impedirá la visión, sin embargo se necesitará que enfoque hasta distancias muy largas. En la visión perpendicular se necesitarán por el contrario enfoques a distancias muy cortas.

Calidad de la imagen. La calidad de la imagen es un dato evidentemente básico de la observación endoscópica y en cualquier caso se le presupone. Sólo

comentar que los boroscopios y los fibroscopios transmiten la imagen ópticamente, a través de lentes o fibra óptica, desde la punta hasta el observador. Estos aparatos tienen una utilización semejante a unos prismáticos, o más concretamente a un catalejo, y lo único que precisan como complemento es la iluminación del agujero que se observa que puede realizarse a través del propio endoscopio o por otros medios. Los videoendoscopios exigen para la observación la conexión con un sistema cerrado de televisión que, por muy portátil que sea éste, tiene ciertas limitaciones de utilización y exige para la observación en campo, en lugares de difícil acceso, unos medios auxiliares y más de una persona para realizar la observación. Los endoscopios ópticos pueden acoplarse a una cámara y convertirse de este modo en videoendoscopios, obteniéndose la visión a través de un sistema cerrado de televisión. La calidad de imagen obtenida por los boroscopios es probablemente la mejor de todos los aparatos, debido a que ésta se transmite exclusivamente por lentes. La imagen conseguida por un boroscopio conectado por un video (que se sitúa donde el observador) a un sistema cerrado de televisión, es similar a la de un videoendoscopio. Boroscopios y videoendoscopios son los equipos recomendados para la observación de la arquitectura. Los fibroscopios tienden a desaparecer y a ser sustituidos por los videoendoscopios, ya que las únicas ventajas que presentan es la posibilidad de la observación directa por el operador y un precio inferior que cada vez está más igualado por los videoendoscopios. Sin embargo, los videoendoscopios

superan a los fibroscopios en calidad de la imagen, longitud de la lanza y dureza lo que facilita la accesibilidad y movilidad durante la observación.

Fuente de luz. La selección de la fuente de luz apropiada para la observación es probablemente tan importante como la elección del endoscopio adecuado. Es fácil comprender que cuanto mayor sea la intensidad y el rendimiento de color de la luz utilizada, mejor y mayores posibilidades se tendrá con la imagen obtenida. También es cierto que la calidad de la luz va en relación directa con el precio, peso y dimensiones de la fuente de luz. Si se va a realizar con frecuencia la inspección de grandes cavidades será necesario elegir una de las fuentes de luz de xenón o metal haloide de 250 W, pero para la mayoría de las inspecciones de arquitectura será suficiente una fuente de luz halógena de tungsteno de 150 W.

Para confirmar y completar la información obtenida de los testigos extraídos y evaluar con más detalle el nivel de huecos y la composición de los morteros y los materiales del interior del muro, las perforaciones realizadas se han inspeccionado con un equipo de exploración remota (endoscopio). Para la realización de la inspección se introducía primero una cinta métrica a lo largo de toda la perforación, lo que permite medir la profundidad de la perforación y en consecuencia valorar la longitud de la inspección y de la lanza necesaria para realizarla. La colocación de la cinta a lo largo de la perforación permite también controlar durante la inspección tanto la profundidad a la que se encuen-

tran los elementos observados como la escala de los mismos. Durante la inspección con el endoscopio de la perforación se registra en una ficha cada alteración, hueco o cambio de material que se rellena durante la ejecución de la inspección. Para poder revisar posteriormente en gabinete el resultado de la inspección ésta se grababa en vídeo. Para la realización de las dos primeras campañas de inspección se utilizaron dos boroscopios rígidos y para la última un videoendoscopio.

Este trabajo, debido al número limitado de perforaciones que es posible realizar, tiene siempre un valor estadístico que deberá extenderse a la totalidad de los elementos constructivos que se puedan considerar similares al explorado. Con este objetivo será necesario realizar previamente una clasificación tipológica de los muros y pilares existentes, de tal modo, que se pueda planificar una campaña en la que se haga una selección de por lo menos un punto de inspección por tipo definido. La definición de esta tipología deberá realizarse en función a tres factores determinantes: la superficie del elemento estudiado, aparejo y composición litológica de los materiales que aparecen en superficie; las dimensiones de la sección y por último el momento histórico en el que se encuadra el elemento constructivo.

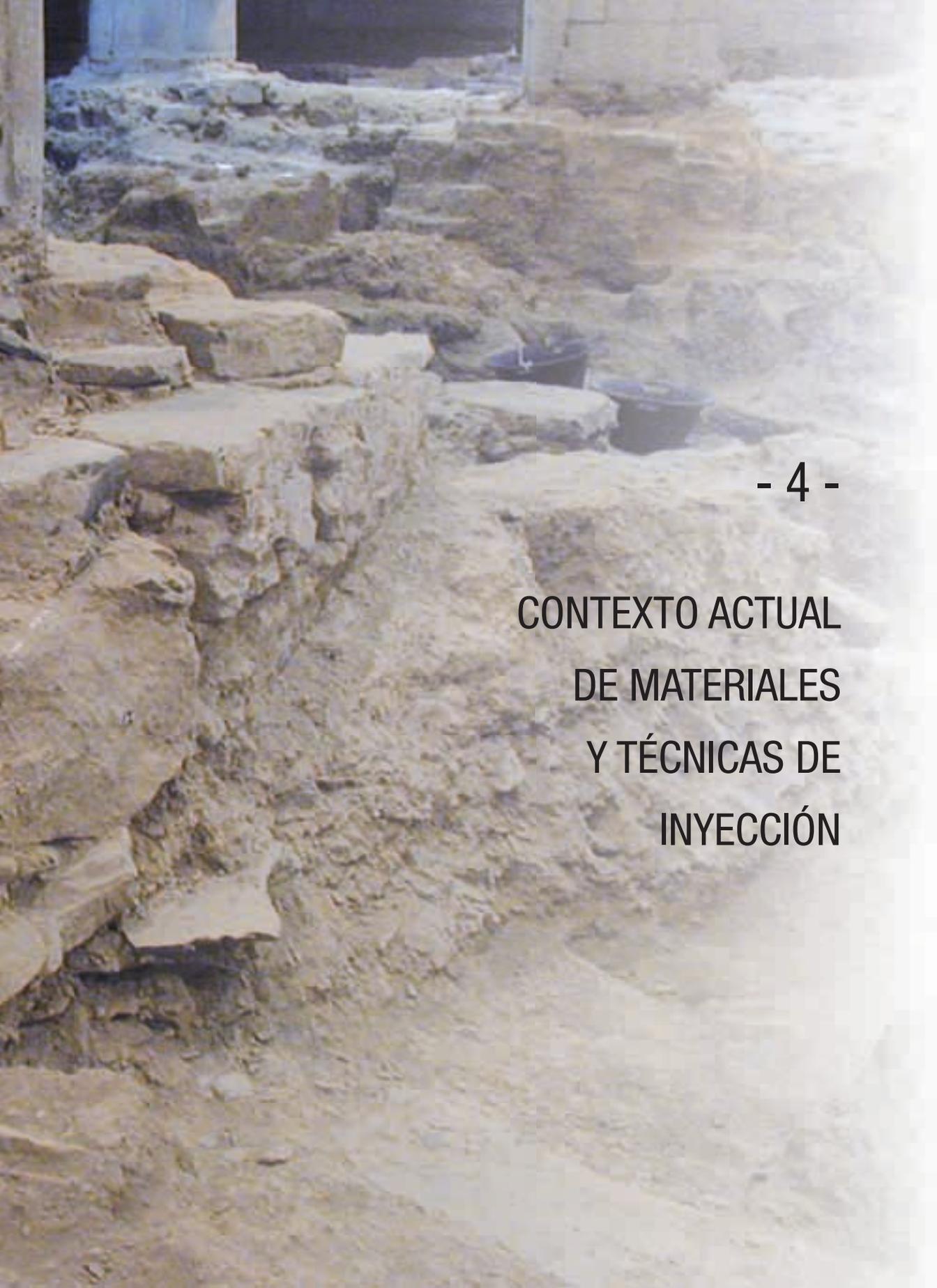
3.3.- VALORACIÓN FINAL

Mediante el análisis cruzado de datos de perforación, testigo y endoscopia se obtendrá una idea bastante clara de la composición y estado de conservación

interna de los diferentes elementos constructivos. No obstante estos resultados tienen un carácter local, circunscritos a las inmediaciones del lugar donde se ha realizado el sondeo, ya que la heterogeneidad de materiales en el interior de un muro puede ser tal que será cauteloso no extrapolar directamente los datos de un único sondeo a todo un elemento constructivo.

Los métodos no destructivos, a pesar de ser potencialmente más adecuados a los trabajos de restauración en el patrimonio construido, no han sido lo suficientemente exhaustivos para poder determinar el volumen de oquedades y el estado interior de las fábricas. Por ello la combinación de éstos con los sondeos ha resultado ser el método que de un modo simple, barato y rápido, mayores certezas y datos fiables ha aportado en el caso de la catedral entre todos los que hasta ahora se han comentado.





- 4 -

**CONTEXTO ACTUAL
DE MATERIALES
Y TÉCNICAS DE
INYECCIÓN**

4.1.- ANTECEDENTES

Las construcciones históricas han llegado hasta la actualidad como una suma de intervenciones constructivas que han configurado el aspecto actual de las mismas. Uno de los aspectos más relevantes consiste en observar cómo se han ido produciendo dichas transformaciones mediante la alteración de la configuración inicial en algunos casos o la consolidación de esa misma configuración en otros.

La actividad constructiva de cada época vinculada a las técnicas, materiales y criterios de intervención ha sido y es variable a lo largo del tiempo, y de alguna manera ha marcado el devenir constructivo de cada edificio. Hasta mediados del siglo XIX, donde los nuevos materiales como el acero, el vidrio y el cemento hacen su aparición vinculados a la revolución industrial, las construcciones básicamente se materializaban mediante el empleo de piedra, madera, materiales cerámicos y morteros de cal, sobre todo, para la ejecución de los elementos estructurales. Pero es a partir de esta fecha donde se produce una gran interacción entre las técnicas y materiales existentes con los nuevos.

En el caso particular de las intervenciones en edificios históricos la restauración se podría entender a nivel general como apunta Cesare Brandi en su *Teoría del Restauro* como *recuperar un producto arquitectónico, una obra de arte o una realización humana, por medio de cualquier intervención posible*. Los criterios

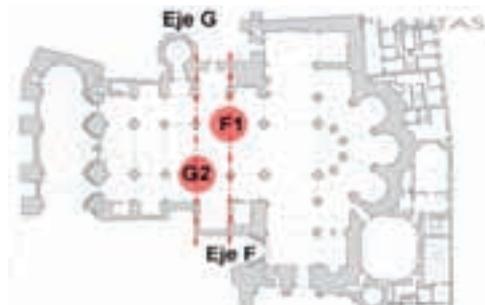
de restauración en la segunda mitad del siglo XIX se movían en Europa entre las teorías restauracionistas de Viollet le Duc y las antirrestauracionistas de Ruskin a las cuales España no es ajena. De hecho en poco tiempo se pasa de restaurar sustituyendo los elementos constructivos en mal estado por unos nuevos con formas idénticas pero que funcionen mejor que los anteriores (restauración en estilo). A lo que se conocerá como *restauración arqueológica* donde la intervención será la mínima imprescindible para poder mantener en pie todo lo que quede del edificio.

En este contexto, en el último tercio del siglo XIX surge una novedosa técnica de restauración de elementos constructivos de fábrica mediante la inyección de lechadas y morteros de cemento que se utilizarán para consolidar aquellos elementos estructurales que debido a su composición habían perdido su cohesión interna.

Siglo y medio después, en 1994, la Catedral de Santa María cierra sus puertas debido a problemas estructurales que ponían en peligro la estabilidad de sus fábricas. El *Plan Director de Restauración. Catedral de Santa María. Vitoria-Gasteiz*, en el que se incluyen los diferentes estudios previos en el edificio, apuntaba como uno de los principales problemas el estado interior de los muros, pilares y sobre todo de las cimentaciones. Por ello se remarcaba la necesidad de realizar su consolidación estructural, pero no se definía en aquel momento el modo concreto de llevarlos a cabo.



Img. 4.1. Cimentación de pilares de la nave norte durante la excavación arqueológica.



Img. 4.2. Planta de la catedral indicando la nomenclatura utilizada.

4.1.1.- EL PROBLEMA DE LA CATEDRAL

Las primeras excavaciones arqueológicas en el interior del templo vitoriano realizadas en 1997 (zona del sotocoro) por el Grupo de Investigación de Arqueología de la Arquitectura de la Universidad del País Vasco (GIAA) ya habían dejado claro el grave estado de la cimentación de los pilares (Img. 4.1). Ello determinó que el plan director apuntara como necesario la excavación arqueológica de toda la catedral con dos fines principales, comprobar el estado de los cimientos para poder repararlos en su caso, y realizar un estudio histórico arqueológico de la historia constructiva de la catedral y la ciudad de Vitoria-Gasteiz, mediante esa gran excavación en área.

Desde la elaboración de los primeros estudios estructurales se pudo apreciar que algunos de los pilares entre las naves central y laterales de la iglesia presentaban serios desplomes provocados por un giro hacia el eje principal de la iglesia. Estos giros eran especialmente acusados en los dos pilares más próximos al crucero

-ejes F y G de estructura, tercero y cuarto en la serie de las arcadas-, y más en el lado norte que en el sur (Img. 4.2).

El conocimiento de la naturaleza rocosa del terreno en la que asienta el edificio y el estudio del equilibrio estático de las distintas secciones constructivas pusieron de manifiesto que habían de ser los cimientos de los pilares los miembros estructurales *debiles* cuya gran deformabilidad arrastraba al resto de la construcción.

Además, se dedujo por anticipado que esa cimentación habría de ser muy heterogénea, tanto en su composición material y constructiva como en su comportamiento mecánico, pues las distintas deformaciones padecidas por secciones que en todo lo demás eran muy similares sólo se podían explicar en aquello que no estaba a la vista. También la experiencia general dice que es habitual encontrar restos de construcciones anteriores, arruinadas o demolidas, reaprovechados en los cimientos de las que ahora están en pie.



Img. 4.3. y 4.4. Año 2003. Encamisado de pilares, F1 con hormigón y G2 con anillo de mampostería.

Y en efecto, ya durante la primera campaña de excavaciones arqueológicas, en el tramo inmediato al sotocoro, segundo tramo de las naves, se pudieron ver dos tipos distintos de cimentación en correspondencia con los dos tipos de pilares cuyas cimentaciones se descubrieron. Las zapatas de los pilares del coro aparecían de muy buena calidad, con una mampostería regular bien aparejada y careada, apoyadas sobre restos de una iglesia anterior que eran también de buena calidad. Por el contrario, bajo los pilares siguientes se encontraban otras zapatas, en parte fabricadas con material reutilizado, apoyadas sobre los mismos restos antiguos pero efectuadas sin regularidad ni en la forma ni en la construcción de sus hiladas.

Esta constatación clara de las hipótesis que se habían planteado en los estudios preliminares sobre la catedral fue llevando a la necesidad de descubrir el resto de las cimentaciones, tanto de los pilares como de los muros de cierre norte y sur. Con el doble ánimo de tener un mayor conocimiento de la historia del edificio y

de la propia ciudad de Vitoria-Gasteiz, y poder acometer con resolución una reparación completa de los cimientos.

Esta reparación debería ejecutarse como una obra en continuidad con las fábricas antiguas, que se limitaría a una mejora de sus condiciones constructivas y a un encadenado y acodalado entre todas ellas que ayude al equilibrio global de la estructura utilizando los mismos sistemas constructivos de arcos y empujes del resto de la catedral.

Sin embargo, la aparición de algunas fisuras en dos de los cimientos hallados, especialmente preocupantes en el caso del cuarto pilar del lado norte -F1-, obligó a modificar puntualmente este criterio durante la obra de reparación anterior. Se recurrió a un sistema más rápido de consolidación mediante un encamisado con hormigón armado y a un castillete metálico, con el fin de que si se producía un asentamiento importante, el castillete entrara en carga quedando el pilar y su maltrecha cimentación descargados totalmente (Img. 4.3 y 4.4).

En el resto de los casos el encamisado ejecutado fue de mampostería con una base de sillares encajada en el terreno. En el caso del pilar G2 además se construyó un segundo castillete metálico igual al situado en el F1 (Img. 4.5). De este modo quedaba pendiente la consolidación interna de los restos disgregados de las cimentaciones de los pilares y su unión con los encamisados, que habrían de realizarse mediante inyección.

4.1.2.- ESTADO DE LA CUESTIÓN

Son conocidas entre los diferentes profesionales de la restauración arquitectónica las intervenciones en las cuales se consolida el relleno interior de las fábricas mediante morteros y lechadas de inyección. De hecho cualquier enciclopedia o manual de restauración explica brevemente las bases del sistema general. Las dudas surgen cuando se ha de aplicar el método a un caso real como se planteaba en la catedral. Tres grandes cuestiones se planteaban encima de la mesa:

- ¿Cuál era la composición interna y el estado real del interior de las fábricas?
- ¿Qué producto y con qué dosificación habría de inyectarse?
- ¿Cómo se inyectaba, es decir, cuál era la metodología de inyección más apropiada?

Y por último, y como consecuencia final de todas las anteriores:

- ¿Será eficaz la consolidación planteada mediante inyección?



Img. 4.5. Año 2004. Castilletes de apeo en pilares F1 a la izquierda y G2 a la derecha.

Para responder a la primera de las cuestiones el plan director ya había previsto y recogido una serie básica de sondeos y endoscopias en puntos concretos del edificio que habían confirmado el mal estado de muchas de las fábricas de la catedral. Además se habían realizado las caracterizaciones de las litologías exteriores, así como de la composición de los morteros. Por otro lado, los análisis estructurales, sistema de monitorización y la estática del edificio habían determinado serios problemas en algunos puntos como en los dos cruceros con las resultantes desplazadas en cimentación en los pilares y en algunos de la zona central de la nave. Por todo ello la conclusión era bastante clara,

efectivamente había que consolidar las fábricas.

En el caso de cuál era el fluido más apropiado para inyectar y la metodología para hacerlo no quedaba más remedio que tratar de buscar experiencias similares en otros edificios históricos. Al comenzar con el primer volcado de información enseguida aparece un gran problema. Se conocían experiencias similares en algunos trabajos de restauración, pero la documentación relativa a ellos era en general muy escasa y poco definida. Las recomendaciones eran bastante generalistas y no había un método demasiado riguroso por el que gobernar la intervención de la inyección.

Respecto a los fluidos inyectados no aparecían en la bibliografía general dosificaciones exactas, y en la mayoría de los casos siempre se hacía referencia a la inyección de fluidos con cemento como ligante hidráulico principal. Este último dato generaba un montón de dudas ya que la restauración en estilo efectuada en la catedral en los años 60 del siglo XX había empleado sistemáticamente las lechadas, morteros y hormigones de cemento que habían ocasionado más de un problema: compatibilidad de materiales por diferencias de rigidez, problemas de transpirabilidad de los elementos de fábrica generando condensaciones, así como una aportación excesiva de sales solubles que derivaba en una cristalización de las mismas haciendo estallar poco a poco la piedra. Por ello las pocas certezas sobre todo el sistema se volvían a convertir en dudas razonables al descubrir en general

que había un conocimiento general de la técnica pero un gran oscurantismo en los detalles de su aplicación, dosificaciones, resistencias, etc. y sobre todo de sus efectos secundarios y por tanto de la eficacia a medio largo plazo.

Desde la citada comisión de cales en colaboración con el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava se comenzó a trabajar con diferentes dosificaciones teniendo como ligantes el cemento, la cal aérea aditivada para darle hidraulicidad y la cal hidráulica natural cuyos resultados más relevantes se comentarán más adelante.

4.1.3.- LAS CONSOLIDACIONES HISTÓRICAS MEDIANTE INYECCIÓN

Ya en la introducción, en el apartado 1.2, se apuntaba a la temprana aparición en las revistas de construcción españolas, de referencias a diversas intervenciones realizadas en Inglaterra mediante inyección de cementos. Experiencias que se trasladaron a España a finales del siglo XIX. Asimismo apunta varios datos importantes sobre el estado de la cuestión, la concepción teórica y los orígenes del sistema con algunas referencias a intervenciones documentadas de este tipo llevadas a cabo en España e Inglaterra desde el siglo XIX, entre las que destaca San Vicente de Ávila, la Catedral de Sevilla, Santa María de Castro Urdiales o la Catedral de Winchester en Inglaterra.

Parece claro pues que se plantea la dicotomía de restaurar los edificios antiguos

con materiales modernos que mejoren sustancialmente sus funciones constructivas sin alterar la configuración estilística del mismo. Algo que normalmente se hacía con la técnica de la reposición o anastilosis, que se podría definir como la sustitución de un elemento por su reproducción exacta tanto en forma como en materia.

Desde principios del siglo XX hasta los años 90 prácticamente escasea la documentación sobre este tipo de intervenciones en España, en lo que se puede calificar como un cierto oscurantismo motivado seguramente por la dificultad de demostrar la eficacia de una solución que lleva implícita una importante carga de irreversibilidad. No hay que olvidar que se trata de inyectar un fluido en el relleno interior de las fábricas, estructurales en general, y que una vez introducido la idea de retirarlo resulta, si no imposible, prácticamente inviable.

La escala de inyección es otro factor a tener en cuenta. En la práctica actual esta técnica se emplea en varios campos de la construcción especialmente en geotecnia y cimentaciones para la mejora de suelos, en restauración artística para rellenar microfisuras u oquedades intersticiales y en restauración arquitectónica para la consolidación interna de fábricas, pero es esta escala la que menor documentación y desarrollo a priori ha tenido. Por todo ello parece interesante retomar los estudios sobre la consolidación mediante inyección aprovechando la necesidad de realizar esta intervención en la Catedral de Santa María y siguiendo de alguna

manera las pistas de las intervenciones mencionadas anteriormente.

El presente estudio tiene como finalidades principales los siguientes puntos:

- a) Realizar una primera aproximación histórica a las consolidaciones mediante inyección realizadas en restauraciones de edificios históricos en España y Europa. Para ello se realizará un repaso general a los diferentes tipos de fábrica constituidos por tres hojas, dos exteriores y un relleno interior. Comentando su composición, la patología más habitual y sus formas de reparación.
- b) Recopilar en la medida de lo posible la bibliografía y documentación relativa a la consolidación mediante este sistema de otros edificios históricos con problemas y soluciones similares a los que se plantean en la catedral.
- c) Establecer una metodología de inyección acorde con la técnica actual aplicable a la restauración de las fábricas de la catedral mediante inyección. Especialmente para la consolidación de las cimentaciones de los pilares de la nave y de las fábricas compuestas de tres hojas, que presentan pérdida de cohesión de su relleno interior. Para ello se realizará un estudio exhaustivo de la aplicación real en obra de los fluidos de inyección.
- d) Comprobar la eficacia de este sistema analizando los pros y los contras del mismo desde diferentes puntos de vista: dificultad de su aplicación, coste económico, mejora constructiva del elemento consolidado y su posible evolución a medio o largo plazo.

e) En su caso, establecer un pliego de condiciones técnicas particulares que han de regir la consolidación de fábricas mediante inyección que sean aplicables.

Los objetivos son quizás demasiado ambiciosos para este trabajo en el que se han analizado los datos de una pequeña parte de las inyecciones llevadas a cabo en la zona del pórtico, las naves, pilares y el crucero sur que han de servir de base para obtener conclusiones interesantes aplicables a otras situaciones similares y tratar de entender a su vez las primeras intervenciones similares planteadas hace ya unos 140 años.

Las primeras inyecciones, Sir Francis Fox

Cuando la transformación física de la materia original hacía inservible para cumplir la función para la que estaba destinada en el edificio, el procedimiento habitual había sido la sustitución de aquella. Pero la difusión del concepto de “restauración estilística” significó en muchos casos una coartada, procediendo a las sustituciones sistemáticas de elementos “originales” por otros más próximos al elemento “como debía haber sido”.

La técnica del hormigón armado, y sobre todo la aparición de los ligantes hidráulicos como el cemento y las cales hidráulicas, representarán una aportación de capital importancia en cuanto significará una posible sustitución de la “estructura”, salvando el “aspecto” y sin aceptar otras soluciones que rompan la unidad figurativa, esta técnica abre un nuevo camino.

Según la documentación escrita consultada hasta el momento es el ingeniero inglés Sir Francis Fox el pionero en la técnica de consolidación de edificios antiguos, es decir, restauración mediante la inyección de morteros de cemento a presión. El fin era reforzar el interior de las descohesionadas fábricas del antiguo muro y Torre del Agua de Chester en Inglaterra hacia 1870 (Img. 4.6).

El alcance de este trabajo no da para estudiar en profundidad los casos ejecutados por el ingeniero inglés. No obstante, en los últimos años del siglo XIX en España se realizaron otras intervenciones donde se utilizaron sistemas de consolidación con inyecciones de cemento. Destacan la Basílica de San Vicente de Ávila con Enrique Repullés y Vargas como arquitecto, la iglesia Santa María de Castro Urdiales, donde hay que mencionar a Eladio Laredo, y la Catedral de Sevilla en el que se visualiza el cambio en las técnicas de restauración.

El caso de la Catedral de Sevilla

El arquitecto Adolfo Fernández Casanova renovará un pilar desmontándolo y construyéndolo nuevo, macizo y con piedra de calidad. Su sucesor Joaquín Fernández Ayarragaray propondrá la consolidación de las fábricas de los pilares mediante inyección de mortero de cemento después de que el pilar adyacente al restaurado por Casanova colapsara en agosto de 1888, provocando el derrumbe de una cuarta parte del crucero. Finalmente, y tras manifiestas desavenencias entre el arquitecto y la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, no parece



Figura. 4.6. Hacia 1870. Fotografía de Sir Francis Fox, Chester (Inglaterra), antiguo muro y torre de agua. La máquina de inyección de Greathead (James) siendo aplicada por primera vez en la salvación de edificios antiguos.

que se llevara a cabo ningún tipo de inyección.

En 1887 presentó Adolfo Fernández de Casanova el *Proyecto de formeros, ventanajes y semibóvedas de colaterales del costado Oeste del brazo Sur del crucero*. La idea era cortar el pilar sobre el que cargaban todos estos elementos de atado y contrarresto por presentar quiebras, agravadas por recientes terremotos, y reconstruirlo con material más sólido, así como los ventanales y semibóvedas secundarias en mal estado, prefiriendo Casanova dejar por el momento la reconstrucción de la bóveda alta del lado de la Epístola.

El trabajo de reconstrucción se ejecutó tras idear el arquitecto un complicado sistema de andamios y apuntalamientos del elemento estructural en cuestión y de los adyacentes. En abril del año 1888 se culmina con éxito la reconstrucción del pilar en lo que fue considerado un ejemplo de restauración de la época. Casanova había sustituido la sillería exterior del pilar y su relleno por un macizado de piedra nueva de estepa mucho más resistente, teniendo en cuenta que las juntas de mortero entre sillares fueran lo más pequeñas posibles para evitar asentamientos al entrar en carga.

El pilar reconstruido es de fábrica homogénea de sillería, constituido por 55

hiladas. Consta de un núcleo interior o corazón, de un solo sillar en las 49 hiladas inferiores, y de dos y de tres en las superiores. En torno a este núcleo, un revestido de cantería de hiladas alternas de mayor y menor, de diez sillares las hiladas impares y de nueve las pares. Para dotar de trabazón y rigidez se establecieron cuatro líneas verticales de enlace en los principales ángulos del pilar, colocando también una de sillares engrapados cada seis hiladas, quedando enlazadas las nuevas fábricas en sentido horizontal y vertical. Las juntas son más finas que las de las antiguas fábricas. Las de lecho han quedado a nivel y son muy delgadas, y las montantes son encontradas.

El 1 de agosto de 1888 se produjo inesperadamente el derrumbamiento del pilar Sudoeste de la parte central del crucero, que arrastró consigo las cuatro semibóvedas que cargaban sobre él, destruyendo el órgano, la reja del coro y gran número de vidrieras. Casanova escribirá una monografía sobre ello en la que deja sentado que ya lo había advertido hacía años restándose responsabilidad en lo ocurrido. Rápidamente ideó un sistema de acodalamiento para salvar de la ruina las fábricas más en peligro; al mismo tiempo informó sobre la Capilla Real que se temía también por su estado, proponiendo reforzar las fundaciones del ábside.

Casanova pensaba además que el problema que había derivado en el derrumbamiento del pilar del crucero se hallaba en el resto de los pilares de la catedral, y por ello proponía la sustitución paulatina de todos ellos para evitar futuros problemas.

Sin embargo, el informe de una Comisión enviada por la Academia, formada por Miguel María Campos, Miguel Aguado y Ricardo Velázquez Bosco, fue la causa de que Fernandez Casanova dimitiera el 27 de agosto de 1889. El motivo sería el desacuerdo con el dictamen sobre la conservación de las semibóvedas externas. Su retirada no fue bien acogida, como ya había ocurrido en 1886 cuando intentó dejar las obras al ser nombrado catedrático de la Escuela de Arquitectura de Madrid; entonces el Cabildo, la Junta de obras de la Catedral e incluso el vicepresidente Boute-lou en nombre de la Comisión provincial de Monumentos de Sevilla, insistieron en que no abandonase la dirección “por haber aunado a maravilla lo nuevo con lo viejo y crear escuelas de canteros”, por su trabajo en la reconstrucción del pilar.

Joaquín Fernández Ayarragaray sustituye a Casanova al frente de las obras de restauración de la Catedral. Casanova no contempló en ningún momento la utilización del sistema de inyección en su proyecto, pero Ayarragaray como veremos posteriormente redactó una interesante memoria para justificar su propuesta.

En 1890 presenta los proyectos de reconstrucción del pilar derrumbado y de las semibóvedas que cargaban en él, que son aprobados en marzo y mayo de 1890. Sin embargo, se impone la condición de que no sean ejecutadas las obras de trace-ría de ventanales y detalles ornamentales sin que previamente se presenten los modelos o diseños correspondientes para su aceptación. Para el pilar más peligroso, el del coro, que había sido afectado en ma-

yor medida por ser el inmediato hacia el oeste del pilar derruido, propone su derribo y posterior reconstrucción, para lo que se le exige que presente un proyecto de medios auxiliares.

Evidentemente el proceso de desmontaje y posterior reconstrucción resultaba caro como ya lo había sido el trabajo ejecutado por su antecesor. Con posterioridad, Joaquín Fernández rectifica su decisión anterior, pues ha llegado a la conclusión de que no es necesaria ni conveniente la reconstrucción de ninguno de los pilares del templo. Finalmente decide probar un

completo proyecto de inyecciones con lechadas de Cemento Portland un año más tarde a que lo hiciera Repullés en Ávila, en el que utilizará barras cruzadas a modo de tirantes que se quedarán en el interior de la fábrica para su refuerzo, tratando de coser las tres hojas de la fábrica. De este modo presenta el *Proyecto de Rectificación y Adición al Proyecto de Reconstrucción del pilar y semi-bóvedas derruidos y del pilar denunciado del coro*.

Se extraen aquí algunos de los datos transcritos más interesantes de la memoria, firmada el 8 de julio de 1893.

pag. 1 y 2

“...y en cuanto a los morteros me propongo usar los cementos en lugar de morteros ordinarios a fin de evitar en todo lo posible los asientos; pues tratándose de una obra nueva, que ha de enlazar con la antigua. Cualquier asiento de alguna importancia que aquellas hicieran, traería consecuencias muy deplorables para ambas fábricas”.

“Para realizar esta difícil operación la cual propongo ejecutar por la hilada de capiteles, es preciso aparear y encimbrar fuerte y convenientemente las bóvedas que sobre el mismo descansan, así como levantar el pilar derruido del crucero a fin de proporcionar por aquel lado punto de apoyo más resistente que los armazones de carpintería que hoy lo sostiene... El mismo emparrillado de hierros en T descansando sobre 8 grandes postes de madera de pino de la mejor calidad, de Cuenca, Zea o Biga compuestos cada uno de tres vigas de 40x30 cm, de escuadrán que son una superficie de 360 cm, bastante mayor que la media de los empleados en el corte del ya citado pilar del brazo oeste del crucero y cuya resistencia ha de aumentar considerablemente el sistema de encimbrados que adopto. Cuyos árboles centrales prolongados hasta el suelo, permite acodalar fuertemente los citados pies derechos evitando de este modo la flexión de los mismos... estos pies derechos han de ir convenientemente enlazados con cadenas de madera”.

pags. 3 y 4

“Después de haber con todo detenimiento la estructura interior de los pilares y bóvedas, al desenvolver sus fábricas para las operaciones de acometimiento de la obra nueva con la vieja, tengo la gran satisfacción de manifestar, por que así me impone mi conciencia profesional que ... el estado general del templo metropolitano no era tan deplorable como generalmente se creía , yo tengo la certeza de que ese estado es aún mucho mejor de lo que aquella Comisión juzgó ...

no estimo necesaria ni conveniente la reconstrucción de ninguno de los pilares del templo, y sí únicamente una reparación especial en los términos que expresaré después”.

“He dicho y repito que no estimo necesaria ni conveniente la reconstrucción de ningún pilar siquiera por las siguientes razones:

“1ª, No es necesaria la reconstrucción por que los cimientos de los pilares son perfectamente sólidos y robustos ... esta verdad se comprobó a virtud de la excavación que mi antecesor hizo alrededor del cimiento del pilar hundido con una profundidad próximamente de 5 metros y se vio que la cimentación se hallaba en perfecto estado de solidez”.

pag. 5

“2ª, No es necesaria la reconstrucción por que el estado general de los pilares como de todas las fábricas de la insigne Basílica es mucho mejor de lo que generalmente se supone”.

pag. 6

“3ª, No es necesaria la reconstrucción de un pilar porqué tienen dimensiones excesivas y solidez bastante para resistir los pesos que han venido soportando y habrán de recibir”

pag. 10

“Ahora bien, como el único defecto que a los pilares se atribuye es la falta de cohesión en las masas interiores de la región inferior de los mismos, y como todos los del templo deben obedecer a las mismas reglas de construcción, parece lógico estudiar la manera de corregir su estabilidad y firmeza, mediante el empleo de una sustancia que ligue la mampostería interior entre sí y con la sillería exterior; y esto creo que se conseguirá por el procedimiento, breve, fácil y económico, que he de someter a la aprobación de la Superioridad (A.BB.AA. de San Fernando).”

“4ª, No es conveniente la reconstrucción de ningún pilar por las siguientes razones. El R.D. de mayo de 1890 ordenó que antes de proceder a la demolición del pilar denunciado del coro presentara el proyecto de medios auxiliares necesario para realizarla”

pag. 11

“Dicho pilar ha experimentado un descenso aproximadamente de 12 cm por efecto de las argamasas empleadas en el asiento de los sillares y como consecuencia lógica de esta disminución de volumen, han sufrido los movimientos consiguientes, las cuatro semibóvedas que en él se apoyan, los dos arcos formeros, la ventana intermedia con la Capilla de la Antigua, los dos arcos que dan frente a la nave de San Cristobal, y el arco botarel correspondiente a este mismo pilar”.

pag. 12

“buscando siempre sólidos apoyos ... logrando conseguir que cesen ... las alteraciones que constantemente acusaban los registros de cristal y escayola y que tanta alarma habían producido y que

motivaron el acodamiento hecho por mi antecesor en la mayor parte de las naves laterales del templo y que yo no tengo dificultad en hacerlos desaparecer por innecesarios ... Por ello decide probar un completo proyecto de inyecciones con lechadas de Cemento Portland un año más tarde a que lo hiciera Repullés en Ávila, en el que utilizará barras cruzadas a modo de tirantes que se quedarán en el interior de la fábrica para su refuerzo, tratando de coser las tres hojas de la fábrica”.

pag. 13

“REPARACIÓN DEL PILAR DENUNCIADO DEL CORO. Se practicarán dos taladros diagonales en un mismo plano horizontal, y en dirección encontrada, es decir, un taladro normal al otro, teniendo cada taladro seis centímetros de diámetro en sección transversal y realizado por medio de una barrena en forma de berbiquí. Empezarán estos taladros en el centro de los sillares correspondientes a la hilada inmediatamente superior a las molduras del pedestal y se continuará taladrando el pilar en planos distantes unos de otros, dos metros próximamente y buscando siempre en los taladros el centro del sillar en la hilada que corresponda”.

“Una vez realizados los taladros de un mismo plano horizontal, se introducirán lechadas de cemento Portland, precedidas de inyecciones de agua clara, y se irán espesando cada vez más en las lechadas sucesivas, hasta que no reciba más la mampostería interior. Se pasa luego a los taladros del segundo plano procediendo en la operación con la misma regla de agua clara ... hasta que salga por los taladros del plano inferior en cuyo momento se introducirán las lechadas de cemento con espesor gradual ... Y se continuará de esta manera hasta la altura de los primeros capiteles o enjarjes de las bóvedas de las naves laterales del templo”.

“Convendrá dejar una tiranta de bronce en el espesor del pilar, cuyo diámetro en sección transversal sea de tres centímetros, en uno solo de los taladros que se practicarán en cada plano horizontal y la tiranta inmediata en los taladros del plano superior en dirección encontrada con la tiranta anterior. La longitud de estas tirantas con inclusión de las llaves que llevarán en sus dos extremos, con arreglo al diseño que se acompaña, será igual a la de los barrenos horizontales menos 30 centímetros para que los extremos queden ocultos en el espesor de la sillería del pilar; de este modo, se continuará alternando las tirantas hasta la altura de los capiteles, en cuyo plano quedarán dos tirantas, una en cada barreno, como base del arranque de los enjarjes”.

“Una vez logrado el macizo interior de los pilares de la manera que se lleva manifestado, se procederá a sustituir los sillares fracturados y faltos por completos de los nervios exteriores con sillares nuevos, teniendo también la previsión de que estos sillares nuevos sean sentados con lechadas de cemento y no de argamasa como ordinariamente se procede ... pues con este cambio de lechada en el asiento de cada sillar se trata de corregir la disminución de volumen de los elementos nuevos que se ingieren en el pilar, sino también que no se quite un sillar sin que sea reemplazado y ajustado perfectamente, antes de tocar otro. Este procedimiento llevado a cabo con los demás pilares denunciados y también con todos los de la nave central del templo hasta el presbiterio, evitará los daños que son consiguientes en fábricas viejas al sustituirlas con

elementos que son completamente nuevos, pues estos tienen que obedecer a las leyes que no son siempre favorables a las fábricas viejas”.

pags. 15 y 16

“Gastos que ocasionará y tiempo que se invertirá en la reparación del pilar ... La reparación del pilar denunciado del coro se calcula en 11.000 pesetas próximamente ... La reconstrucción de ese mismo pilar se presupuestó en treinta y seis mil ochocientos doce pesetas setenta y cinco céntimos: Luego la diferencia es importante ... Como la reconstrucción de un pilar no puede, ni debe acelerarse, a fin de evitar las disminuciones de volúmenes simultáneas de todas las hiladas de argamasas que producirían movimientos en los arcos y bóvedas, en la reconstrucción se invertirá mucho más tiempo que en la reparación que puede acelerarse cuanto se quiera ... Es muy importante también la economía de tiempo ... Y de la solidez de la reparación no puede dudarse, toda vez que por el procedimiento antes explicado, todos los elementos que constituyen el pilar quedarán ligados entre si formando un solo cuerpo sin que puedan sobrevenir asientos de obra ni movimientos de ninguna clase ... Por esas razones no he vacilado un momento en someter , como someto, a la aprobación de V.E. el proyecto de reparación del pilar denunciado del coro, en vez del de reconstrucción como rectificación de mi proyecto anterior, previo al informe de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando”.

Posteriormente habla de los defectos encontrados en las bóvedas que acometían al pilar del crucero, sobre todo que los nervios no aguantaban los elementos por no tener tizón de apoyo suficiente. Además, había antiguas reparaciones defectuosas a base de ladrillo y yeso, grapas metálicas, cinchos metálicos puestos por Casanova.

Es evidente la similitud entre el problema y la solución planteada en Sevilla con la planteada en la catedral de Vitoria-Gasteiz con la diferencia de 110 de años, lo que evidencia, por un lado, que previamente a nosotros, ya otros restauradores se habían enfrentado al mismo problema y por otro que las ideas que estábamos manejando empezaban a tener una base sólida de actuación en relación a la documentación histórica.

En general podemos deducir que estas soluciones iniciales de consolidación no son muy bien aceptadas ni por el propio arquitecto ni por la opinión pública en general, pues las entienden como soluciones prácticas y económicas, remedios de urgencia para evitar males mayores, pero siempre pensando que no es la solución óptima del problema.

No obstante estas primeras intervenciones en su conjunto marcan las pautas de una nueva forma de entender la restauración tratando de alterar lo mínimo, no sólo el aspecto exterior, sino el propio funcionamiento del elemento constructivo. No obstante, nos falta información sobre toda la problemática de la puesta en obra, así como la exactitud de las dotificaciones.

4.2.- MATERIALES UTILIZABLES EN EL PROCESO DE INYECCIÓN

4.2.1.- PLANTEAMIENTO GENERAL

El objetivo de esta investigación es establecer qué material, mortero o lechada es el más adecuado para la realización de inyecciones pilares y muros para lograr su cohesión y conseguir que las fábricas trabajen de forma conjunta.

El criterio básico de restauración es la durabilidad frente a la resistencia y, por consiguiente, la compatibilidad de los materiales nuevos con los históricos. El mortero nuevo deberá ser más deformable que el original para no transmitir sobreesfuerzos, más poroso o permeable evitando modificaciones en el comportamiento hídrico de la fábrica... pero además cuando hay riesgo estructural de la fábrica se le exigirá la capacidad mecánica suficiente y en la mayor brevedad posible.

Desde el inicio de la investigación se ha descartado la utilización de morteros de inyección cuyo ligante principal sea el cemento Portland. Ello es debido a la degradación que provoca en los elementos pétreos la aparición de sales que afloran a la superficie con el paso del tiempo, y también a la degradación que puede sufrir un cemento Portland ya que en la composición de la caliza margosa, que conforma la roca de asiento del edificio, aparece un contenido en sulfuros de un 5%. Igualmente resulta especialmente importante valorar el hecho de que el obje-

tivo a conseguir no es tanto el de inyectar un material que alcance una resistencia muy elevada, sino el de conseguir cohesionar las fábricas. Incluso se apunta que no es aconsejable introducir un elemento excesivamente rígido en una fábrica de características mucho más plásticas, haciendo una valoración de la resistencia mínima siempre superior a las resistencias mínimas requeridas por la fábrica. Como consecuencia de todo ello el campo de investigación se estableció en los morteros y lechadas de cal, a priori totalmente compatibles con los materiales originales piedra y mortero de cal.

4.2.2.- LA CAL COMO LIGANTE

Hasta finales del siglo XVIII, el conglomerante empleado en morteros, lechadas etc. estaba basado en la cal aérea obtenida por la calcinación de calizas para formar, fundamentalmente, el hidróxido cálcico que con un cierto contenido de humedad y en contacto con el CO_2 atmosférico se transforma en el carbonato original. La temperatura teórica de disociación de un carbonato cálcico puro, a presión atmosférica, es de 875 °C.

Partiendo de calizas con alto contenido en carbonato cálcico y mediante calcinación, se conseguirá su transformación en anhídrido carbónico y óxido de calcio. Esta cal viva se apaga, en un proceso lento, formando el hidróxido correspondiente que reacciona con el anhídrido carbónico atmosférico, regenerando la caliza de origen, adquiriendo dureza y resistencia. Esta cal se llama aérea porque para en-

CaCO_3	$\Delta \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OCa}$	(cal viva)
$\text{OCa} + \text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$	(apagado)
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2$	$\rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	

Tabla 4.1. Proceso químico en el “apagado” de la cal viva.

endurecer necesita el CO_2 del aire (carbonatación). Por tanto no fragua bajo el agua, luego no es un ligante hidráulico.

Durante el siglo XVIII, Vicat expone su teoría de la hidraulicidad, definiendo su índice i_v como el cociente entre la suma de los óxidos de silicio y aluminio y el contenido en óxido de calcio. Bajo esta perspectiva simplista se puede considerar la cal hidráulica como un Portland de menor hidraulicidad. La aparición de las cales hidráulicas a finales de siglo y, de los cementos naturales y Portland a principios del XIX, ocasiona la paulatina desaparición de las cales aéreas.

Los factores que contribuyeron al predominio de estos ligantes hidráulicos frente a los aéreos son la capacidad de fraguado en un medio saturado de humedad, incluso bajo el agua, la facilidad de amasado y aplicación, el desarrollo de resistencias iniciales y la adherencia a casi todos los materiales.

El posterior desarrollo del conocimiento de las cinéticas de estos nuevos ligantes hidráulicos generó una patología en el uso de los cementos para morteros y hormigones, que originó una mejor y más adecuada utilización de los mismos pero también su rechazo en el campo de la restauración. Los posibles problemas de ataques por sulfatos, reacciones árido-álcali, eflorescencias,...- se agravarían por su coexistencia con bases tradicionales de cal más débiles y alteradas.

Hoy en día se propone el uso alternativo de las cales hidráulicas admitiéndose que presentan muchas de las ventajas y

Indice de Vicat	$i_v = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{CaO}$	$t \text{ } ^\circ\text{C}$	
Cal aérea	0 - 0,1	900	apenas formación de fases hidráulicas morteros duros romanos
Cal Hidráulica		1.200	ausencia de C_3S , no hay sintetización presencia de C_3A y C_4AF ($t > 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$)
débil	0,10 - 0,16		
mediana	0,16 - 0,31		
normal	0,31 - 0,42		
eminente	0,42 - 0,50		
Portland	> 0,50	1.250 - 1.450	

Tabla 4.2. Clasificación de los tipos de cal según la teoría de la hidraulicidad expuesta por Vicat en el siglo XVIII.

pocos de los inconvenientes tanto de las cales aéreas como de los cementos. En este sentido añadir que si bien un mortero de cal aérea o en pasta será ideal y altamente compatible con las piedras y ladrillos erosionados y debilitados, capaz de adaptarse a los movimientos menores de la edificación y con consistencia ideal para rejuntados etc., se deberá recordar que las cales aéreas no son muy adecuadas para situaciones expuestas (alturas o pavimentos) junto con su limitación de uso en los meses con heladas, incluso algunos autores limitan su empleo en ambientes norteños y marinos.

La utilización de cal aérea carece de sentido para las inyecciones en el interior de muros ya que la dificultad de contacto con el CO_2 atmosférico podría prolongar durante años la carbonatación. De igual manera, en inyecciones de morteros de cal aérea y de elevada fluidez la escasa solubilidad del CO_2 en el agua limita la cinética de carbonatación del hidróxido, originando planos no carbonatados entre tongadas. En general, los morteros puros de cal históricamente son morteros de sacrificio y, por tanto, con un estado de conservación malo y con un alto riesgo de desintegración.

Estas características ya eran conocidas desde antiguo y, por ello, la adición de puzolanas a los morteros de cal romanos para aportar la hidraulicidad necesaria a la mezcla, morteros que persisten en la actualidad. Retomando la clasificación establecida por Vicat, se puede considerar la cal hidráulica como un Portland de menor hidraulicidad o, mejor, considerarla como

un cemento belítico de bajo contenido en sales. Así, las cales hidráulicas presentan en su composición fases de silicatos y aluminatos cálcicos que al hidratarse forman productos estables insolubles del tipo gel CSH, CAH y CASH pero conservando al mismo tiempo una fase aérea más o menos abundante que endurecerá por carbonatación.

Este doble comportamiento es el que le da sus principales cualidades, por un lado la parte hidráulica se hidrata, fragua y endurece. Estará menos afectada en su fraguado por las condiciones ambientales (lluvia, bajas temperaturas, escasa aireación...) y endurecerá más rápidamente (estabilizando las fábricas, facilitando la superposición de tongadas) alcanzando mayor resistencia tanto a los agentes de deterioro como a los esfuerzos mecánicos.

Por otro lado, la parte aérea carbonatará más lentamente, permitiendo los movimientos del mortero para su adaptación a los esfuerzos internos y externos (retracciones de fraguado, formación de productos expansivos...), y formando una estructura macroporosa que facilitará los balances de humedad entre el muro y el ambiente.

Indicar también que la cal libre existente podrá actuar como estabilizante de aquel material arcilloso que pudiera existir en el relleno. La cal actuará sobre las cargas eléctricas de las partículas finas, por debajo de las dos micras, modificando los campos eléctricos interparticulares, lo que conlleva su floculación. Esta

floculación se traduce en una reducción del límite plástico del material y, por tanto, favoreciendo su estabilización.

4.2.3.- PROPUESTAS PARA LA INVESTIGACIÓN

En base a estos principios se inició el estudio de cales para la consolidación de las diferentes fábricas de la Catedral Santa María, de acuerdo con la UNE-EN 459 en sus apartados 1, 2 y 3, contemplando inicialmente la utilización de cales aéreas e hidráulicas. Por un lado se parte de una cal aérea como ligante y se le da propiedades hidráulicas utilizando un aditivo hidráulico como puede ser la puzolana o la escoria siderúrgica, incluso un bajo contenido en cemento. Por otro lado se utiliza como ligante del mortero una cal hidráulica natural.

En la primera fase se comienza a realizar ensayos químicos a diferentes cales:

- Cal dolomítica que denominan cal morena.
- Cal aérea activada hidráulicamente con un bajo contenido en cemento. Realmente en este caso lo que el fabricante ofrece es un mortero mixto de cal aérea, cemento y arena.
- Cal hidráulica natural.

Se descarta la utilización de la cal morena debido a que se trata de un producto no sometido a un proceso de industrialización que permita garantizar una homogeneidad en su composición durante las distintas fases de suministro. Además, una vez obtenidos los resultados procedentes de su análisis químico, se detecta

un bajo índice de hidraulicidad y un alto contenido en magnesio.

Se descarta igualmente el uso de adiciones de escorias siderúrgicas de alto horno puzolanas a las cales aéreas para dotarlas de hidraulicidad debido a que se trata igualmente de productos escasamente homogéneos y, además, en el caso de la escoria de alto horno habría que conseguir un grado de molienda muy alto. De igual manera la escoria resulta un material muy poroso que absorbe todo el agua y luego la suelta. Esta característica hace que sea imposible controlar la relación agua-conglomerante y que siempre existan variables que no se pueden controlar.

Una vez realizados estos descartes la decisión que se toma es empezar a realizar ensayos físicos y mecánicos con los siguientes materiales:

1.- Cal aérea activada hidráulicamente con cemento. En todos los casos ensayados se detectó una caída de resistencias entre las edades de 90 y 180 días, con pérdida de material. Problema generado por la lixiviación del hidróxido en las condiciones de curado.

2.- Cal hidráulica natural. Lechadas y morteros de cal para inyección en los que se detecta un incremento en las resistencias de 28 a 90 días (C_2S) similares a los morteros de cemento entre las edades de 7 a 28 días (C_3S).

La perfecta utilización de aditivos fluidificantes para reducir la relación agua / cal y su cinética de reacción favorecida por la presencia de aluminatos y ferritoaluminatos, junto con la adecuada utilización de

cohesionantes, hacen posible la fabricación de lechadas y morteros de fluideces adecuadas para su inyección en fábricas.

4.3.- METODOLOGÍA DE INYECCIÓN

Se podría definir la inyección como aquella técnica de consolidación mediante la cual se introduce un fluido en un elemento con el fin de mejorar sus condiciones, especialmente la cohesión interna. En la práctica esta técnica se emplea en varios campos de la construcción, especialmente en geotecnia y cimentaciones para la mejora de suelos, en restauración artística para rellenar microfisuras u oquedades intersticiales y en restauración arquitectónica para la consolidación interna de fábricas. No obstante, todas estas técnicas están más o menos relacionadas con las inyecciones a ejecutar en las fábricas de la catedral, tal y como se ha comentado anteriormente.

4.3.1.- GEOTECNIA Y CIMENTOS ⁽¹⁾

En el primer caso la inyección se utiliza para la mejora de suelos y recalce de cimentaciones con varios métodos o particularidades de aplicación. *Habitualmente el material inyectado es lechada de cemento, a veces con adición de bentonita, en dosificaciones agua/cemento de 1/2. Son las denominadas inyecciones convencionales.*

Refuerzo mediante inyección de cimentaciones superficiales

Consiste en rellenar con lechada o mortero de cemento los huecos existentes en

el macizo de cimentación. Esta inyección al fraguar formará un hormigón de mayor resistencia y el cemento ganará cohesión suficiente. Esta inyección a presión es una buena solución para mejorar cimientos de baja calidad, los cuales deben poseer espacios comunicados para poder progresar. El mayor problema se halla en la incertidumbre de que no haya sido correctamente inyectada toda la masa a consolidar. Además, se necesita un cuidadoso estudio de todo el terreno que rodea el cimiento ya que, si éste es permeable, el fluido puede perderse en huecos innecesarios y no producirse la inyección donde interesa. Por ello se recomienda crear una caja estanca alrededor del cimiento, mediante muretes, tablestacas, etc. La inyección se realizará de abajo arriba controlando el volumen de fluido consumido. En algunas ocasiones las inyecciones del cimiento se suelen combinar con la introducción de armaduras, anclajes o zunchos metálicos, elementos que no se comentan por quedar fuera del alcance de esta publicación.

Intervenciones sobre el terreno

Las inyecciones en el terreno mediante lechada de cemento, gel de sílice, resinas, bentonita-cemento, poliuretanos o materiales viscosos tienen uno o varios de los siguientes objetivos: reducir la compresibilidad, aumentar la resistencia, rellenar oquedades y disminuir la permeabilidad de los suelos. Se realizan bombeando el fluido a través de pequeños taladros dispuestos en la superficie lateral, en extremo de un trépano o bien por las paredes de un tubo que se introduce en el interior de una perforación previa.

Inyecciones de la base de cimentación

Consisten en hacer penetrar en el terreno a través de taladros de menos de 100 mm de diámetro el fluido adecuado que adquiere rigidez por fraguado hidráulico o reacción química formando con el terreno un material de alta resistencia y cohesión. (...) Las inyecciones hidráulicas de cemento son apropiadas para suelos granulares; las inyecciones químicas con gel de sílice o resinas son apropiadas para terrenos cohesivos, de escasa permeabilidad y penetración.

Inyecciones de relleno

Estas inyecciones muy similares a las anteriores se utilizan para colmatar y sellar capas de terreno o rellenos flojos en los que existan huecos importantes. La finalidad fundamental es sustituir los huecos por un material de resistencia suficiente para el conjunto resultante soporte de las cimentaciones. (...) Se utilizan mezclas con gran capacidad de absorción de agua como las lechadas de bentonita-cemento, o productos químicos con estructura alveolar como los poliuretanos.

Inyecciones de compactación

Consisten en la introducción en el terreno de un mortero plástico de cemento a elevadas presiones. Debido a su viscosidad, el mortero en lugar de rellenar los huecos desplaza el terreno como un gato hidráulico, lo densifica y crea una estructura final mucho más resistente. Al quedar los productos muy próximos a la embocadura de inyección se controla mejor todo el proceso. Este método es especialmente aplicable en suelos arenosos ya que en limos y arcillas el lento drenaje puede dar

lugar a fenómenos de inestabilidad o rotura. (...) Para reducir la disolución del fluido inyectado, las mezclas han de ser densas y poco permeables como los morteros de baja relación agua cemento. (...) Para uniformar las características del terreno, y dado que la zona de influencia es pequeña, las distancias entre los taladros de inyección ($d=50-75$ mm) han de estar comprendidas entre 1,5 y 3 m. (...) Este tipo de inyecciones se realiza en la recuperación de asientos diferenciales, rectificación o levantamiento de rasantes en soleras, (...) reformas en el apoyo de zapatas o mejoras en el terreno en torno a cimentaciones por pilotaje.

Jet-Grouting

Se trata de un sistema de inyección que utiliza presiones muy altas y que se traducen en altas velocidades de salida del fluido. Estas altas velocidades de corte, consiguen romper el suelo, desplazan las partículas hacia fuera y mezclan el suelo adyacente con una lechada de cemento. El resultado final es un nuevo suelo, más o menos cilíndrico con una resistencia y permeabilidad mejoradas respecto del original. Esta serie de columnas de nuevo suelo, y el espacio confinado entre ellas, originan un terreno adecuado para una nueva cimentación o corregir defectos de otra existente.

Este método junto con el de micropilotes es uno de los más utilizados para tratar lesiones en los cimientos de edificaciones. Siendo un sistema que no genera impactos ni grandes vibraciones, permite atravesar todo tipo de terrenos y además está diseñado para su empleo en espacios de

reducidas dimensiones. El Jet-grouting se emplea en: *recalce de estructuras con problemas de cimentación, refuerzo de cimentaciones existentes por aumento de cargas o redistribución, cimentación de edificios de nueva planta con dificultad de acceso de equipos, refuerzo de excavaciones en la realización de sótanos adyacentes a otras construcciones, construcción de obras subterráneas con necesidad de un protección adicional del terreno, protección de excavaciones en particular cuando hay influencia del nivel freático.*

Inyecciones de rectificación

Un caso especial de inyección es el empleo de esta técnica para rectificar la inclinación o levantar un cimiento. Mediante la inyección controlada de un mortero expansivo se colmata la parte baja del cimiento previamente acotado. Las propiedades expansivas del mortero inyectado provocarán unos empujes verticales que rectificarán la posición del cimiento desplazándolo a su nueva posición.

4.3.2.- RESTAURACIÓN ARTÍSTICA

En restauración artística el empleo de inyecciones para la consolidación de pinturas, maderas o elementos pétreos es una práctica habitual. Se podría señalar la escala como factor fundamental en este tipo de actuaciones. Por ello en el texto se hace referencia a ellas como microinyecciones, que se ejecutan en la mayoría de los casos mediante jeringuillas manuales. La intervención en esta escala de restauración se desarrolla de manera específica en el capítulo 6 de esta publicación ya

que ha constituido una parte fundamental como consecuencia directa de la comisión de cales.

4.3.3.- RESTAURACIÓN ARQUITECTÓNICA

Se ha hecho referencia a la metodología de inyección pasando por dos polos tan opuestos como la consolidación de cimientos y la intervención artística de restauración. La restauración arquitectónica, entendida como la consolidación de un elemento constructivo de fábrica, queda por tanto en una situación intermedia, como es el caso de la catedral.

A la hora de abordar un proceso de inyección hay que contemplar tres variables principales intrínsecamente relacionadas entre sí que van a determinar la forma de actuar.

Fluido a inyectar, ¿Qué se inyecta?

Características de fluidez, resistencia y facilidad de puesta en obra. Lo primero que se debe plantear es qué se debe inyectar ya que hay que ser conscientes de la escasa reversibilidad de la intervención. Se deberán buscar fluidos que resuelvan las necesidades de dar cohesión interna a las fábricas, que alcancen una resistencia suficiente y sean lo más compatibles posibles con el resto de materiales y técnicas empleados originalmente en su construcción. Por otra parte, destacar la facilidad de puesta en obra del fluido, de manera que sea fácil su dosificación y tenga una fluidez adecuada para introducirse con facilidad sin provocar obturaciones en los canales de inyección. Este primer pará-

dificultad suele estar precisamente en la presurización del circuito.

¿Por qué se inyecta?

Ya se han comentado las diversas patologías que sufren los elementos constructivos de fábrica de la catedral, especialmente sus muros y cimientos. Tan sólo señalar que toda la metodología de inyección se deberá ajustar a cada caso específico teniendo en cuenta las particularidades del estado de conservación de cada elemento constructivo que debe ser consolidado. El fin último es garantizar la mejora de una de las dos condiciones que rigen toda construcción de un elemento

de fábrica: la cohesión entre los diferentes elementos que la componen.

En el caso de la catedral, y una vez ensayadas diversas metodologías de inyección, se decidió emplear el sistema de inyección por presión con la introducción principalmente de lechadas y morteros de cal hidráulica natural que mejoren las condiciones de cohesión interna del muro en aquellas zonas donde los estudios de análisis y composición de las fábricas arrojaban resultados de pérdida de material o de cohesión interna.

NOTAS:

⁽¹⁾ Todas las referencias en cursiva de este apartado han sido obtenidas de la Enciclopedia Broto de patologías de la construcción. Autor: Broto i Comerma, Carles. ISBN: 978-84-96424-37-1. Editorial: Links Internacional 2005. Páginas 1311 a 1317.

BIBLIOGRAFIA

ADAM, J. P. *La construcción romana, materiales y técnicas*. Ed. Los Oficios. León 1996.

AZKARATE, A., CÁMARA, L., LASAGABASTER, J. I., LATORRE, P. *Plan Director de Restauración de la Catedral Santa María de Vitoria-Gasteiz*. Ed. Diputación Foral de Álava. Vitoria-Gasteiz 2001.

BRANDI, C. *Teoría de la Restauración*. Ed. Alianza Editorial. Madrid 1988. Título original: *Teoría del Restauo*. Torino 1977.

BROTO I COMERMA, C. *Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción*. Ed. Links Internacional. 2005.

CHOISY, A. *El arte de construir en Roma*. Ed. Santiago Huerta, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera. Madrid 1999.

CHOISY, A. *El arte de construir en Egipto*. Ed. Santiago Huerta, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera. Madrid 2006.

CHOISY, A. *El arte de construir en Bizancio*. Ed. Santiago Huerta, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera. Madrid 1997

ERLANDE-BRANDENBURG, A. *The Cathedral Builders of the Middle Ages*. Ed. Thames & Hudson, London 1995.

FOX, F. *Sixty-Three tares of Engineering Scientific and Social Work*. Member Institution of Civil Engineers, Hon. Associate Royal Institute Of British Architects. Ed. John Murray, Londres 1924.

GÓMEZ DE TERREROS, M. V. *Protection and Conservation of Cultural Heritage of Mediterranean Cities*. Ponencia: The History of art in the restoration of monuments: the case of the pillars of Seville Cathedral. Ed. Galán and Zezza. 2002.

HEYMAN, J. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Ed. Santiago Huerta, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera. Madrid 1995.

HEYMAN, J. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Ed. Santiago Huerta, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera. Madrid 1999.

HUERTA, S. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Ed. Santiago Huerta, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera. Madrid 2004.

JIMÉNEZ, A., Gómez de Terreros, M. V. *El Espíritu de las Antiguas Fábricas. Escritos de Adolfo Fernández de Casanova sobre la Catedral de Sevilla 1888-1901*. Ed. FIDAS. Sevilla 1999.

LAREDO, E. *Obras de restauración de la Iglesia Monumental de Santa María de Castro-Urdiales: memoria descriptiva*. Imprenta de El Sol de Castro, 1891.

MAILLET, J. *Mortars and injection grouts for conservation*. ICCROM. Mural painting conservation course 1993. Part III: Treatment methods & materials.

ORDIERES DÍEZ, I. *Historia de la Restauración Monumental en España 1835-1936*. Ed. Ministerio de Cultura. Instituto de Restauración de Bienes Culturales. Madrid 1995.

ORTIZ Y SANZ, J. *Los diez libros de arquitectura de M. Vitrubio*. Madrid 1787. Edición Facsimil. Ed. Akal 1992.

REPULLÉS Y VARGAS, E. M. *La Basílica de los Santos Mártires, Vicente, Sabina y Cristeta en Ávila*. Madrid 1894. Edición Facsimil. Consejo de Fábrica de San Vicente 1997.

RIVERA BLANCO, J. *De varia restauratione*. Ed. Abada Editores. Madrid 2008.

VIOLLET-LE-DUC, E. *La construcción medieval*. Ed. Santiago Huerta, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera. Madrid 1996. Título original: *Construcción*, del *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*.

VV.AA *Guía práctica para los morteros con cal*. Ed. ANCADE Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España. Madrid.

WILLIS, R. *The Architectural History of Winchester Cathedral*. Ed. Archaeological Institute, Winchester 1845.

YVES-MARIE, F. *Techniques de l'Architecture Ancienne*. Ed. Mardaga. Sprimont (Belgique) 1986.

FUENTES DOCUMENTALES

INSTITUCIÓN COLOMBINA. ARCHIVO DE LA CATEDRAL DE SEVILLA. FONDO: JUNTA DE OBRAS.

- *Proyecto de Restauración de varios pilares, bóvedas y ventanas*. Año 1882-1884. Adolfo Fernández Casanova. Planos (gran folio) N° 441-442. Leg 41. Exp 2.
- *Proyecto Adicional al, aprobado por R.D. de 30 de mayo de 1890 para la Restauración de la Catedral*. AÑO 1893. Joaquín Fernández Ayarragaray Leg 44, Planos de N° 453 a 478.
- Materiales Especiales. Mapa y Planos Catedral. Signatura 306.
- Materiales Especiales. Mapa y Planos Catedral. Signatura 525.



- 5 -

**SELECCIÓN DEL
MATERIAL
A INYECTAR**



Los ensayos se inician en el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava en octubre de 2003 mediante la búsqueda de ligantes de marcada hidraulicidad, diferentes del cemento Portland, capaces de soportar formulaciones que sean aptas para su inyección, tanto en forma de lechadas como de morteros y en las condiciones solicitadas. Estos ensayos se realizaron tomándose como norma de referencia la normativa europea normalizada para cales para la construcción, UNE-EN 459.

5.1.- ENSAYOS CON MORTEROS

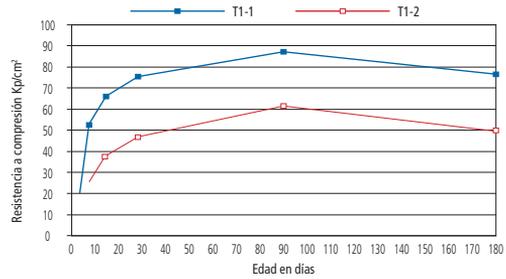
5.1.1.- MORTEROS CON CAL AÉREA

Se recurre a este material por ser un producto existente en el mercado, distribuido en sacos de 25 a 30 kg y de composición aproximada:

- Cal aérea activada hidráulicamente con adiciones de cemento.
- Arena caliza de granulometría 0/2 mm.

Muestra tipo 1

La recepción de la primera partida de material se realizó el 4 de octubre de 2003. Sobre esta muestra se realizan los correspondientes ensayos de recepción, mesa de sacudidas y penetración. Asimismo se establece una relación agua/mortero (a/m) de 0,30 con la que se fabrican probetas prismáticas de mortero de 4x4x16 cm para los ensayos de resistencia a flexotracción y compresión según EN 196-1, a edades de 3, 7, 14, 28, 90 y 180 días. (T1-1 en Img. 5.1).



Img. 5.1. Resistencias a compresión. Muestra tipo 1.

agua/mortero	saco nº	% pasa # 0,063 mm	fluidez (s)
0,4	1	76,1	25
0,4	3	46,5	8
0,4	2	38,5	5

Tabla 5.1. Variación de la fluidez con el contenido en finos de la muestra tipo 1.

Para su empleo en forma de morteros de inyección se estudian distintas relaciones de agua/mortero en el cono de Marsh, obteniéndose con a/m= 0,40 fluideces de 21 segundos con la que se confeccionan, igualmente, probetas para ensayos de resistencia (T1-2 en Img. 5.1).

Las curvas representadas se asemejan a las convencionales de rotura a compresión de un mortero de cemento, con subidas rápidas a edades de 7 y 28 días y moderadas a edades avanzadas. Se observa que las altas resistencias alcanzadas permitirán, en principio, disminuir el porcentaje de cemento en el mortero. Sin embargo en ambos casos se observa la caída de resistencias de 90 a 180 días.

Los morteros así obtenidos presentan una densidad media en rotura de, aproxi-



Img. 5.2. Árido 18/25 mm Relación a/m=0,35.



Img. 5.3. Árido 18/25 mm Relación a/m=0,40.

madamente, 1.300 kg/m^3 . Las elevadas resistencias a compresión alcanzadas, junto con las dificultades para obtener fluideces más acordes para su inyección, aconsejan solicitar al fabricante una nueva partida de material con menor contenido en cemento.

Muestras tipo 2

Se continúa el estudio con una nueva remesa de material fechado el 5 de noviembre de 2003 en la que se ha disminuido el contenido inicial de cemento. Los ensayos realizados en recepción, mesa de sacudidas, penetración y fluideces detectan falta de homogeneidad. Relaciones de $a/m=0,30$ proporcionan fluideces de 7 y 8 segundos.

Se reciben nuevas partidas en fechas 12 y 14 de noviembre y 1 de diciembre de 2003 en las que se ha duplicado el

tiempo de amasado en fábrica. Con estas nuevas partidas se pone de manifiesto la dificultad existente para el mantenimiento de fluideces definidas con una relación dada de agua/mortero.

Las diferencias de texturas entre los sacos recepcionados, la falta de homogeneidad aparente, que se manifiesta por la dispersión de las fluideces obtenidas entre los distintos sacos de la misma partida, con igual relación de agua/mortero, aconsejan el muestreo personalizado de la misma, realizándose ensayos granulométricos de la totalidad de los sacos de la partida.

Se observa que las dispersiones se cuantifican nuevamente por el diferente contenido en finos (material que pasa por el tamiz de $0,063 \text{ mm}$) de los sacos ensayados. Tanto por ciento que oscila entre



Img. 5.4. Árido 18/25 y 12/18 mm al 50%



Img. 5.5. Cayuelas sin lavar.

un mínimo de 34,3% y un valor máximo obtenido del 76,1%.

No obstante, y a fin de comprobar cómo rellenarían, teóricamente, un núcleo con gran volumen de huecos, se comienzan a realizar los ensayos de vertido de morteros por gravedad que se describen a continuación.

Se procede al llenado de moldes cilíndricos de hormigón de 15x30 cm con gravas calizas de tamaños 12/18, 18/25 y mezcla de ambas para, y a continuación, rellenar por gravedad el molde con la mezcla. Para ello, la amasada deberá tener la relación a/m que proporcione una fluidez óptima.

Se realiza una amasada con relación $a/m=0,35$ y fluidez de 14 segundos y con ella se rellena el molde. Desmoldado a las 24

horas, el resultado (Img. 5.2) es una proliferación de coqueas y un llenado deficiente en general, que obliga a solicitar mezclas mucho más fluidas.

Ensayando nuevos sacos se alcanzan valores de fluidez de 7 segundos con relación $a/m=0,40$. Con esta relación se realizan 3 amasadas de mortero que se vierten, por gravedad, sobre moldes rellenos de grava de tamaño 18/25 mm.

Tras su desmoldado a las 24 horas las probetas no presentan coqueas. A los 28 días de curado en cámara húmeda se sierran a lo largo de su generatriz presentando ausencia de huecos por ambas caras (Img. 5.3).

Se repiten amasadas con materiales procedentes de diferentes sacos con los que se pretende obtener fluideces com-

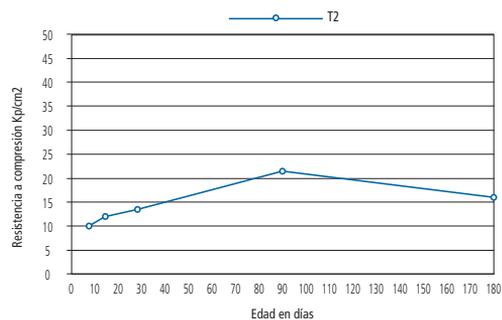
prendidas entre 5 y 8 segundos, manteniendo la relación de $a/m=0,40$, rechazándose aquellos sacos que no cumplen la condición de fluidez establecida. De esta forma, se comprueba la estrecha relación existente entre el contenido de finos y la fluidez. Con estas nuevas amasadas se rellenan moldes que contienen gravas de tamaño 18/25, 12/18 y mezcla al 50% de ambas (Img. 5.4).

En todos los casos los resultados son óptimos. Tras el desmoldado no se observan coqueras y una vez serradas por su generatriz, tras el proceso de curado correspondiente, no se aprecian huecos en ninguna de sus caras vistas.

A continuación, se ensaya el efecto que tendrían estos morteros de alta fluidez en el relleno de los huecos contenidos entre cayuelas sin lavar procedentes de acopios situados en Ibaiondo-Lakua, sector 8 B2. Para ello se fabrican moldes de madera para probetas prismáticas de 20x20x40 cm, rellenándose, a continuación, los moldes por gravedad. Dichas amasadas se realizan con una relación $a/m=0,40$.

Desmoldadas a las 24 horas no se observan coqueras en ninguna de sus caras perimetrales. A los 28 días de curado en cámara húmeda se sierran las probetas a lo largo de su dimensión mayor, presentando, ambas caras serradas, ausencia apreciable de huecos (Img. 5.5).

De las amasadas confeccionadas con esta relación $a/m=0,40$ se fabrican probetas prismáticas de 4x4x16 cm para los ensayos de resistencia s/EN 196-1, con rotu-



Img 5.6. Resistencia a compresión muestra tipo 2.

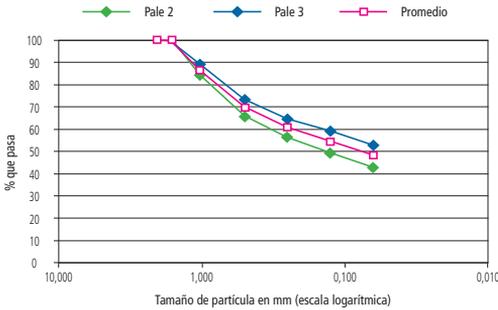
ras a flexotracción y compresión a edades de 7, 14, 28, 90 y 180 días (T2 en Img. 5.6).

Las dispersiones encontradas en los análisis granulométricos realizados a los sacos que componen la muestra, junto con la caída en las resistencias a compresión, motivada por la disminución realizada en el contenido de cemento respecto a la muestra tipo 1, aconsejan la producción de una nueva partida, con contenido intermedio en cemento y mayor homogeneidad. De igual manera que en la muestra denominada tipo 1, las resistencias a compresión caen de 90 a 180 días. Los morteros así obtenidos presentan una densidad seca en rotura comprendida entre 1.340 y 1.450 kg/m^3 .

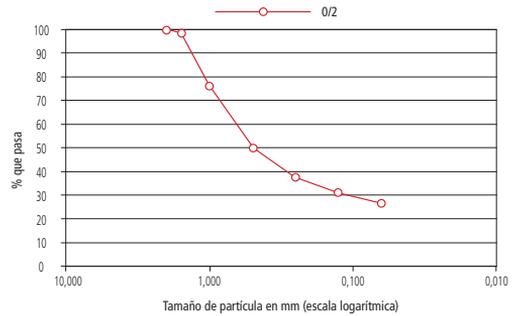
Muestras tipo 3

Se realiza una nueva producción de mortero con un ligero aumento del contenido de cemento con fecha de recepción del 12 de enero de 2004. De la misma, se seleccionan dos palés, tomando aleatoriamente 10 sacos de cada uno.

Los 20 sacos seleccionados son examinados minuciosamente, realizándose



Img. 5.7. Valores medios de granulometrías de la muestra tipo 3.



Img. 5.8. Curva granulométrica media de la arena empleada en la muestra tipo 3.

Tamaño mm	Palé 2	Palé 3	Palé 4
0,063	43,6	52,8	48,2
0,125	49,8	59,1	54,4
0,250	56,4	64,9	60,7
0,500	66,7	73,6	70,2
1,000	85,7	88,9	87,3
1,600	99,6	99,6	99,6
2,000	100,0	100,0	100,0

Tabla 5.2. Tabla con los valores medios de las granulometrías de la muestra tipo 3.

Tamaño mm	0 / 2
0,063	26,1
0,125	31,1
0,250	37,3
0,500	50,7
1,000	76,3
1,600	98,8
2,000	100,0

Tabla 5.3. Tabla con la granulometría de la arena empleada en la muestra tipo 3.

análisis granulométricos de todos ellos. Se admiten para la realización de sucesivos ensayos sólo aquellos cuyo contenido en pasa (tamiz UNE de 0,063 mm) esté comprendido entre el 35 y el 50%, lo que representa aproximadamente un 20% de rechazo. (4 de los 20 iniciales).

La Img. 5.7 representa los valores medios de las 10 granulometrías realizadas en cada palé 2 y 3, junto con la curva granulométrica media de los 20 análisis realizados. En la Img. 5.8 se puede observar la curva granulométrica media de la arena caliza empleada en la mezcla y suministrada por el fabricante durante el año 2003.

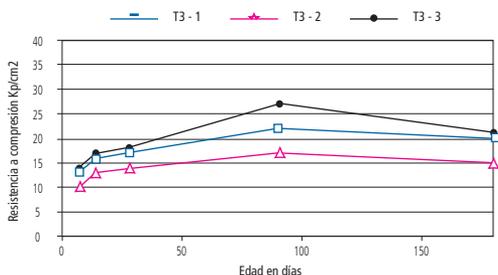
De los sacos seleccionados se realizan ensayos de fluidez para relaciones de a/m comprendidas entre 0,30 y 0,40 con resultados entre 10 y 5 segundos de cono Marsh. Se elaboran probetas cilíndricas de 15x30 cm, se rellenan con gravas calizas de tamaño 18/25 mm y se vierte por gravedad mortero fabricado con relación a/m=0,30. Desmoldadas a las 24 horas, no se aprecian coqueras en su exterior. Transcurridos 28 días de curado en cámara húmeda se sierran a lo largo de su generatriz, presentando ausencia apreciable de huecos en sus caras vistas (Img. 5.9).



Img. 5.9. Probetas desmoldadas y serradas con árido 18/25 mm.



Img. 5.10. Probetas desmoldadas y serradas con árido de cayuelas lavadas.



Img. 5.11. Evolución de las resistencias a compresión de la muestra 3.

	T3-1	T3-2	T3-3
Saco nº	3	2	5
agua/mortero	0,3	0,3	0,3
Fluidez (s)	11	9	13

Tabla 5.4. Distintas fluideces a igual relación agua/mortero.

Se preparan igualmente amasadas para su vertido en moldes prismáticos de 20x20x40 cm, rellenos con cayuelas de

Ibaiondo-Lakua, sector 8 B2, sin lavar y lavadas. Transcurridos los 28 días de curado en cámara se sierran según su longitud mayor presentando, también, ausencia apreciable de huecos (Img. 5.10).

De las amasadas confeccionadas con esta relación a/m=0,30 se fabrican probetas prismáticas de 4x4x16 cm para los ensayos de resistencia s/EN 196-1, con roturas a flexotracción y compresión a edades de 7, 14, 28, 90 y 180 días (T3 en Img. 5.11). El resultado es que a iguales contenidos de agua se generan morteros con valores de fluidez distintos y diferentes resistencias a compresión. Otra conclusión es que en todos los morteros realizados con muestra tipo 3 se detecta la caída de resistencias de 90 a 180 días. Los morteros así obtenidos presentan una densidad seca en rotura comprendida entre 1.560 y 1.650 kg/m³.

Conclusiones

Los análisis granulométricos realizados manifiestan la falta de homogeneidad requerida en el producto ensacado. Las diferencias existentes en el contenido en finos (material que pasa por el tamiz UNE 0,063 mm) obliga a prescindir de aquellos sacos cuyo contenido esté fuera del intervalo señalado.

Con el material seleccionado se puede establecer un rango limitado de relaciones agua/mortero para fabricar mezclas con fluideces óptimas para su inyección y que proporcionen las resistencias a flexotracción-compresión deseadas.

Las diferencias en los contenidos de cemento en las muestras se pone en evidencia por la evolución de las resistencias. Así, en las muestras tipo 1 las curvas de rotura se asemejan a las de un mortero convencional de cemento, con un rápido desarrollo de resistencias a corto plazo y lento a edades avanzadas. Priorizando, lógicamente, las cinéticas de hidratación, fraguado y endurecimiento, propias del cemento, que las de carbonatación del hidróxido.

En las siguientes muestras ensayadas, tipos 2 y 3, el pico de resistencias se de-

sarrolla a los 90 días, predominando las fases belíticas del cemento y las carbonataciones del hidróxido de la cal y del propio cemento.

Respecto a la posibilidad de utilización de aditivos para reducir la relación agua/mortero, manteniendo la fluidez de la muestra, se considerará que éstos actuarán en función del contenido en cemento que, como adición, lleve la cal aérea base del mortero. El aditivo actuará sobre los mecanismos de hidratación del cemento, nunca sobre los de carbonatación del hidróxido cálcico de la cal aérea.

De los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el Laboratorio General de la Diputación Foral Álava con los morteros de cal se desprende que las escasas mejoras en fluidez observadas no aconsejan la utilización del aditivo, alcanzándose rápidamente la saturación del mismo (Tablas 5.5 y 5.6).

En todos los casos ensayados se detectó una caída de resistencias entre las edades de 90 y 180 días con pérdida de material, problema generado por la lixiviación del hidróxido en las condiciones de curado. Según el apartado 5.1.2.3 de la Norma EN 459-2:2002 las probetas se conservarán

Muestra tipo 1

agua/mortero	Aditivo (g)	Aditivo%	Fluidez (s)
0,40	0	0	15,0
0,40	18	1	12,7
0,40	36	2	12,1

Tabla 5.5. Acción del aditivo en Muestra tipo 1.

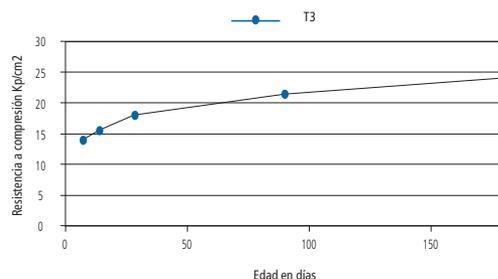
Muestra tipo 3

agua/mortero	Aditivo (g)	Aditivo%	Fluidez (s)
0,30	36	2	9
0,30	0	0	10,9
0,35	0	0	7,6

Tabla 5.6. Acción del aditivo en Muestra tipo 3.

tras su desmoldado en cámara húmeda (de acuerdo con el apartado 4.1 de la EN 196-1:1994) manteniendo continuamente una temperatura de 20 ± 1 °C y una humedad relativa igual o superior al 90%.

Por la composición del material, cal aérea activada hidráulicamente con cemento, se puede imaginar que las condiciones de conservación según norma pudieran inhibir el mecanismo-proceso de carbonatación del hidróxido, traduciéndose en la caída de resistencias observadas a los 180 días de conservación en cámara húmeda. En este punto conviene recordar que carece de sentido realizar inyecciones de cal aérea en el interior de muros en los que la dificultad de contacto con el CO_2 atmosférico podría prolongar durante años la carbonatación. De igual manera, en inyecciones de mortero de cal aérea y de elevada fluidez (altas relaciones a/m) conviene apuntar el carácter altamente limitante que en la cinética de carbonatación del hidróxido tiene la escasa solubilidad del CO_2 en el agua. Este fenómeno podrá originar planos no carbonatados (no fraguados) entre tongadas. Esta caída de resistencia, unida al fuerte incremento en la humedad de rotura, aconseja la fabricación de una nueva serie de probetas, de forma que modificando su sistema de conservación se pueda comprobar si éste afecta a las resistencias a largo plazo. Este tipo de morteros se incluirá en los definidos como morteros de albañilería y, por tanto, se debe seguir la norma UNE-EN 1015-11:2000 siendo su conservación la indicada en la tabla 1 de la citada norma: 7 días a $95 \pm 5\%$ de humedad relativa seguido de 21 días (o hasta rotura), a $65 \pm 5\%$.



Img. 5.12. Resistencias a compresión de la Muestra tipo 3 siguiendo la norma correspondiente a "Mortero de albañilería" para su conservación.

Se confeccionan probetas prismáticas de $4 \times 4 \times 16$ cm con mortero procedente del saco número 15 del palé 3 (recepción el 12 de enero de 2004). Relación a/m=0,30 y fluidez de 11 segundos para su rotura a las edades de 7, 14, 28, 90 y 180 días (Img. 5.12).

Desmoldadas y conservadas según la norma indicada, se observa que las modificaciones realizadas en la conservación afectan a los resultados en las resistencias finales. Controlando la humedad relativa al límite del $65 \pm 5\%$ no se limita la carbonatación.

Como conclusión indicar que, tras más de 450 probetas ensayadas, este tipo de materiales no son los más adecuados para alcanzar los objetivos marcados, es decir, para su uso en inyecciones de fluidez elevada en el interior de muros y espacios confinados en general.

Se necesitarán ligantes hidráulicos que fragüen bajo el agua pero sin alcanzar resistencias iniciales altas, adaptándose a la fábrica, cohesionándola y que sean

permeables al vapor de agua para evitar condensaciones perjudiciales. Estos ligantes hidráulicos pueden ser cales hidráulicas naturales con adecuado índice de Vicat que, por composición, participen tanto de las propiedades asociadas a la sílice (hidráulicas) como de aquellas proporcionadas por el hidróxido de calcio (aéreas).

En la calcinación de calizas con impurezas silíceas o arcillosas se obtenían una serie de compuestos en un intervalo creciente de temperaturas. De forma que, además de la cal viva presente en el rango de los 900 °C, aparecerán los silicatos bicálcicos (belita), aluminatos tricálcicos y ferritoaluminatos finalizando en rangos próximos a los 1.200 °C. No aparecerán las fases tricálcicas del silicato al no alcanzar la temperatura de clinkerización-sinterización (aprox. 1.400 °C). Es decir, las cales hidráulicas naturales obtenidas mediante procesos similares proporcionarán tanto los precursores que por hidratación generarán las fases microcristalinas del gel CHS, como la fase aérea que por hidratación generará la portlandita (hidróxido cálcico) que aportará la tan deseada permeabilidad al vapor de agua y plasticidad a la mezcla, evitando aquellas propiedades directamente relacionadas con las fases tricálcicas del silicato (alita); fraguados rápidos, excesiva cristalización del mortero, altas resistencias iniciales, impermeabilidad, etc. También se evitarán aquellos componentes que, como adiciones, llevan los cementos en su composición y que pudieran ser potencialmente perjudiciales a largo plazo para las fábricas.

En resumen, las cales hidráulicas naturales fraguan en sentido inverso a los cementos, de dentro hacia fuera, por lo que el agua necesaria quedará fijada y la sobrante se expulsará como vapor al exterior. Este mecanismo elimina la posibilidad de condensaciones, disminuyendo la aparición de fenómenos de fisuración y agrietamiento.

5.1.2.- MORTEROS CON CAL HIDRÁULICA NATURAL

De igual manera que en el apartado anterior, se inicia el estudio confeccionando morteros de cal hidráulica natural y arenas calizas seleccionando como cal una NHL-5.

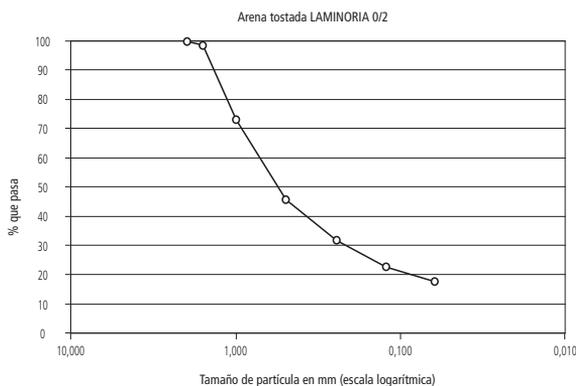
Selección de la arena

El estudio comparativo, realizado con arena normalizada del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (Consejo Superior de Investigaciones Científicas -CSIC-) con distintas arenas calizas locales, concluye que la caliza local de granulometría 0/2 y coloración de mortero adecuado a la fábrica es la más idónea (Tabla 5.7).

Para mantener una homogeneidad adecuada en productos ensacados comercialmente es aconsejable realizar las amasadas adicionando los productos por separado. De esta manera, los controles granulométricos de la arena proporcionarán un margen estrecho de relaciones agua/mortero suficiente para mantener fluideces adecuadas a la inyección por gravedad de la mezcla (Tabla 5.8 e Img. 5.13).

Tamiz	0,063	0,125	0,250	0,500	1	1,6	2
% Pasa	17,8	22,7	32,0	46,0	73,1	98,8	100,0

Tabla 5.7. Análisis granulométrico medio.



Img. 5.13. Gráfico correspondiente a Arena Tostada Laminoria 0/2.

ANÁLISIS QUÍMICO	
R.I.%	1,30
SO4= solubles en H2O%	0
Carbonatos (CO3Ca)%	98,53
SO4= solubles en ClH%	0,016
Sílice (SiO2)%	0,53
Óxido de Aluminio (Al2O3)%	0,60
Óxido de Hierro (Fe2O3)%	0,74
Óxido de Magnesio (MgO)%	0,08
Óxido de Calcio (CaO)%	54,58

Tabla 5.8. Análisis químico medio de la Arena Tostada Laminoria 0/2.

Morteros bastardeados

De forma análoga a como se inició el estudio de morteros con cal se comenzará bastardeando las cales hidráulicas naturales con cemento CEM II/A-V 42.5 R., en proporciones 2:1 y posteriormente 8:1 (cal/cemento).

Con el ligante anteriormente citado se construyen morteros en proporciones 1:3 (ligante/arena) y una relación agua/mortero=0,25 que proporcionan mezclas de fluidez perfecta para el llenado de probetas de 15x30 cm de gravas. Desmoldadas y serradas a lo largo de su generatriz, tras su curado de 28 días, presentan un relleno perfecto sin huecos ni coqueas.

La acción de aditivos plastificantes cobra una gran importancia en este tipo de materiales al comprobar que su aporte en cantidades en torno al 1% proporciona incrementos cuantificables en el diámetro

de la mesa de sacudidas y disminuciones del tiempo de fluidez del cono Marsh. Así, el uso del 1% de aditivo en peso de ligante consigue que la fluidez de la amasada pase de 20 a 10 segundos.

Con estas amasadas se confeccionan probetas de mortero de 4x4x16 cm para los ensayos de resistencia s/ EN 196-1, con roturas a flexotracción y compresión a edades de 7, 14, 28, 90 y 180 días. Los resultados de las roturas a compresión de las probetas curadas, según norma, se representan en la Img. 5.14.

Las condiciones de curado son las adecuadas para los ligantes hidráulicos y, en consecuencia, no se manifiestan las caídas de resistencias de 90 a 180 días observadas en el capítulo anterior. Con los morteros de cal hidráulica el incremento de resistencias se obtiene en el intervalo de 28 a 90 días (C₂S), que es similar al

experimentado por los morteros de cemento a edades más tempranas, de 7 a 28 días, debido a la existencia de las fases tricálcicas del silicato (C_3S).

No obstante, tanto el elevado valor alcanzado en las resistencias a compresión, como la peligrosidad potencial que a largo plazo pueden presentar las adiciones presentes en la composición de determinados cementos, hace que se rechace el bastardeo de los morteros de cal hidráulica con cemento.

Morteros de cal Hidráulica Natural NHL-5 de alta fluidez (MAF)

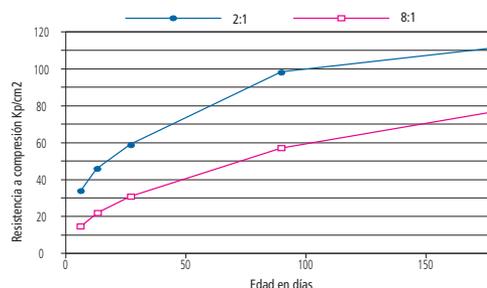
Se ha definido morteros de alta fluidez a aquellos morteros de resistencia suficiente y fluidez adecuada para su vertido por gravedad o en las condiciones de presión previstas (inferiores a 2 kg/cm^2). Se inicia el ensayo confeccionando probetas prismáticas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ para evaluación de las resistencias con una relación de a/m que proporcione fluidez idónea para su vertido por gravedad.

Estos morteros se confeccionan con una relación 1:2 (ligante/arena) para evitar problemas de decantación de la arena en las condiciones de fluidez elevada.

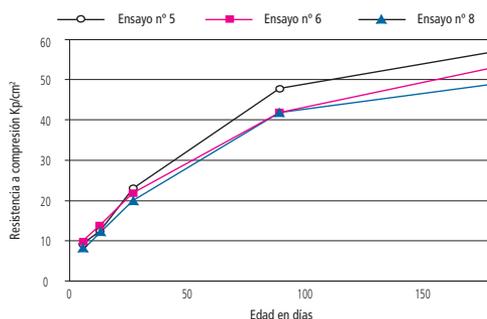
La aportación de aditivos fluidificantes en un 1% en peso, respecto al contenido de NHL-5, proporciona fluideces óptimas para su inyección, conservando una relación agua/mortero que aporta resistencias satisfactorias a flexotracción y compresión. Se aprecia cómo las resistencias a compresión doblan su valor al pasar de 28 a 90 días de curado en cámara húmeda.

	2:1	8:1
Aditivo (%)	1	1
Relación agua/mortero	0,25	0,25
Fluidez (s)	10	11

Tabla 5.9. Características de morteros para diferentes relaciones de cal/cemento.



Img. 5.14. Resistencia a compresión para diferentes relaciones cal/cemento.

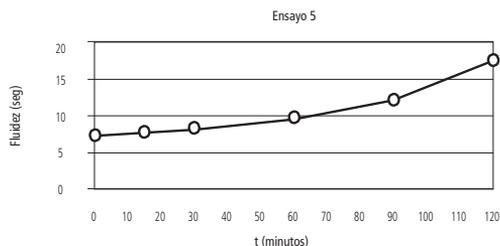


Img. 5.15. Resistencias a compresión para diferentes morteros de alta fluidez.

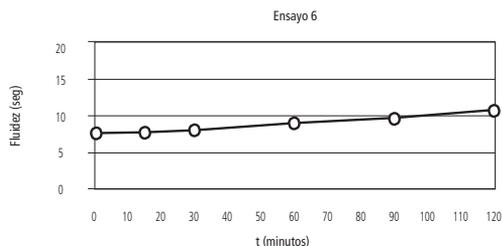
Ensayo nº	5	6	8
agua/mortero	0,28	0,28	0,28
fluidez (s)	10	7,6	7,7
aditivo nº1% s.cal	0,5	1	1

Tabla 5.10. Características de las muestras empleadas.

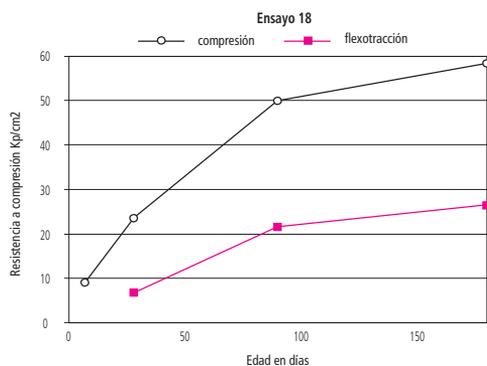
Resulta interesante analizar la evolución de la fluidez (cono Marsh) con el tiempo en cada uno de los ensayos número 5 y número 6. Mientras que en el número 5



Img. 5.16. Evolución de la fluidez con el tiempo en el ensayo 5.



Img. 5.17. Evolución de la fluidez con el tiempo en el ensayo 6.



Img. 5.18. Resistencias a compresión y flexotracción. Ensayo 18.

Ensayo n°	18	19
cal/arena	1:2	1:2
agua/mortero	0,26	0,26
aditivo n°1% s.cal	1,0	1,0
aditivo n°2% s.cal	1,0	1,0
Fluidez cono Marsh :	8,3 s	7,6 s
Temperatura ambiente	21,8 °C	22,5 °C
Temperatura amasada	19,6 °C	24,8 °C

Tabla 5.11. Características de las amasadas de los ensayos 18 y 19.

y con un 0,5% de aditivo s/cal la fluidez pasa de 11 a 18 segundos en 2 horas, en el ensayo número 6 con un 1% la fluidez de la mezcla pasa de 8 a 11 segundos en el mismo intervalo (Img. 5.16 e Img. 5.17). Por tanto, el incremento de aditivo hace que la mezcla sea aún inyectable al cabo de las 2 horas. No obstante, el empleo de aditivos que actúen como inhibidores/estabilizadores de los procesos de hidratación de la cal hidráulica permitirá un control completo sobre los tiempos de fraguado.

El ensayo número 8 se realiza en amasadora de 140 litros. Se aprecia una disgregación y decantación del mortero que

no se observaba en las mezclas realizadas con la amasadora de laboratorio (según la norma). Esto obligará a considerar aditivos del tipo cohesionantes que en aquellos morteros de fluidez elevada eviten riesgos de exudación o asentamiento del mortero. Será importante que el cohesionante sea compatible con el superplastificante utilizado.

Se realizan distintas pruebas con el objetivo de optimizar la cal hidráulica con los aditivos y las arenas empleándose diferentes cohesionantes, así como arenas y mezcla de arenas con distintas granulometrías. Como consecuencia de ello se establece como dosificación óptima la



Img. 5.19. Caras serradas de las probetas del ensayo 18.

empleada en los ensayos anteriores número 6 y 8 con la adición de un 1% del cohesionante seleccionado.

Se realizan nuevas amasadas de 140 litros incorporando el cohesionante seleccionado a la mezcla inicial. Del ensayo 18 se fabrican probetas de 4x4x16 cm para control de resistencias a 7, 28, 90 y 180 días, destacándose que la incorporación del aditivo cohesionante seleccionado elimina totalmente el efecto de decantación aparecido, mejorando las resistencias obtenidas en el ensayo número 8 (Img. 5.18). Las probetas ensayadas presentan una densidad seca en rotura comprendida entre 1.650 y 1.700 kg/m³.

Con el material de los ensayos 18 y 19 se confeccionan probetas cilíndricas de



Img. 5.20. Cayuelas lavadas NHL-5.

Días	7	14	28	90
Fluidez (s)	7	7	7,2	7
Densidad (kg/m ³)	2.120	2.090	2.170	2.200
%Huecos	3,2	4	4,2	4,3
kp/cm ²	6	9	12	23

Tabla 5.12 Resultados de la muestra ensayada.

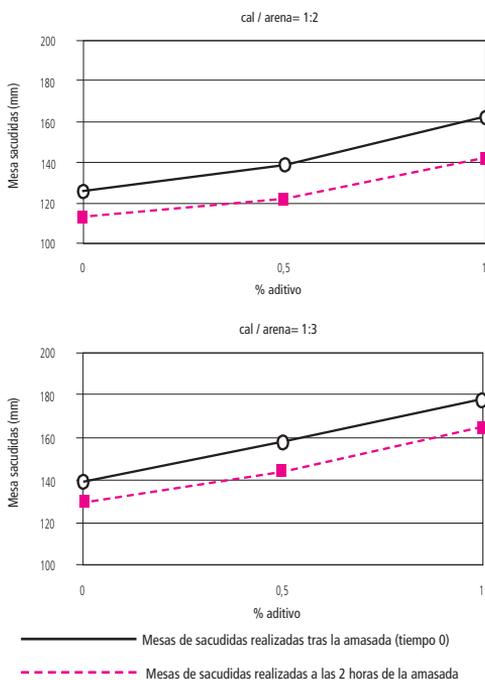
40 cm de altura por 5 cm de diámetro mediante vertido por gravedad de la amasada en el molde fabricado al efecto (Tabla 5.11). Las probetas se mantienen en posición vertical y se desmoldan a los 14 días de curado. Se sierran a continuación a lo largo de su generatriz. La acción del cohesionante seleccionado se manifiesta por la homogeneidad y buena distribución de la arena en las caras serradas de las probetas confeccionadas (Img. 5.19).

Resuelto el problema de la decantación en morteros de elevada fluidez se realizan amasadas para comprobar el contenido de huecos que se obtendría por vertido del mortero en distintos moldes rellenos con gravas. Para ello, se confeccionan 12 probetas de 15x30 cm rellenas de gravas calizas 18/25 y 12/18 al 50% para su rotura a compresión y cálculo de huecos en mezcla. Se obtiene un resultado aproximado del 4% de huecos (Tabla 5.12). Las resistencias alcanzadas sobre probeta cilíndrica de 15x30 cm con mezcla de gravas son del orden de la mitad de las conseguidas con morteros del ensayo 18.

De manera análoga a lo realizado con mezclas anteriores se confeccionan pro-

betas cilíndricas de 15x30 cm, rellenas con gravas y prismáticas de 20x20x40 cm, rellenas con cayuelas que, tras el vertido por gravedad del mortero y una vez curadas y desmoldadas, son serradas por su generatriz o por su longitud mayor, presentando ausencia apreciable de huecos (Img. 5.20).

Como conclusión al estudio se puede afirmar que morteros 1:2 de cal hidráulica natural con relaciones agua/mortero inferiores a 0,3 y aditivados al uno por ciento, en peso de cal, con fluidificantes y cohesionantes adecuados, proporcionan morteros de alta fluidez (MAF) idóneos para los fines propuestos, alcanzándose las resistencias requeridas a flexotracción y compresión.



Img. 5.21. Mesa de sacudidas para el mortero 1:2.

Img. 5.22. Mesa de sacudidas para el mortero 1:3.

Morteros de cal Hidráulica Natural NHL-5 convencionales

Los morteros analizados a continuación son de aplicación convencional, no de inyección, por lo que se comienza dosificando a mesa de sacudidas. Para ello, se ensayan morteros con relación cal/arena de 1:2 y 1:3, estableciendo relaciones agua/mortero próximas a 0,20. Se ensayan las amasadas sin y con aditivo plastificante al 0,5% y al 1% en peso de cal, obteniéndose los resultados en mesa de sacudidas que de las Img. 5.21 e Img. 5.22 y la Tabla 5.13.

A continuación, y con morteros 1:3, se realizaran amasadas a 140 mm de mesa de sacudidas, disminuyendo la relación a/m mediante la incorporación de aditivo. Se realizan distintas amasadas confeccionándose probetas prismáticas de 4x4x16

cal/arena	agua/mortero	Mesa de Sacudidas (mm)					
		% aditivo=0		% aditivo=0,5		% aditivo=1,0	
		0 h	2 h	0 h	2 h	0 h	2 h
1:2	0,20	126	113	139	122	162	142
1:3	0,20	140	130	159	145	178	165

Tabla 5.13. Resultados de la mesa de sacudidas. Los morteros 1:3 con relación a/m= 0,20 proporcionan amasadas de excelente trabajabilidad.

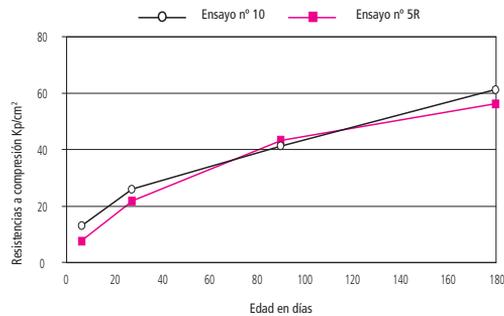
Ensayo nº	cal/arena	agua/mortero	% aditivo	Mesa de Sacudidas (mm)		
				0 h	1 h	2 h
5R	1:3	0,20	0,00	137	134	128
10	1:3	0,18	0,50	138	133	124

Tabla 5.14. Resultados mesa de sacudidas.

cm para el control de las resistencias, obteniéndose los resultados de la Tabla 5.14.

La incorporación de aditivo a la amasada no mejora sustancialmente la mezcla en lo referente a la trabajabilidad de la misma. Si se atiende a la evolución de resistencias y según se desprende de los resultados obtenidos y representados en el siguiente gráfico, tampoco se manifiesta mejora que justifique la incorporación de aditivos a este tipo de mezclas. Las probetas presentan una densidad seca en rotura comprendida entre 1.720 y 1.770 kg/m³.

La plasticidad que aporta como característica la propia cal hidráulica es suficiente para proporcionar morteros de trabajabilidad excelente sin necesidad de aditivo alguno, salvo que se pretendan tiempos abiertos superiores. En este sentido, y como se ha tratado anteriormente, el empleo de aditivos que actúen como in-



Img. 5.23. Gráfico de resistencia a compresión incorporando aditivos a la muestra.

hibidores/estabilizadores de los procesos de hidratación permitirán controlar los tiempos de fraguado.

5. 2.- LECHADAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-5

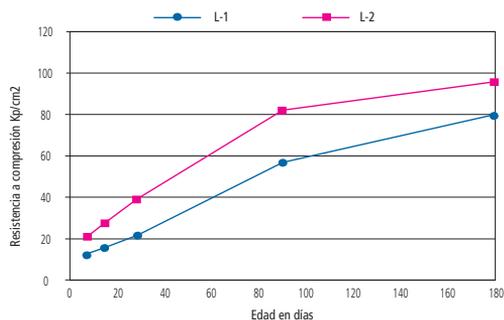
Con el fin de mejorar las condiciones de cohesión interna en aquellas zonas donde los estudios de análisis y composición de las fábricas arrojaban resultados de pérdida de material o de cohesión interna,

es necesario aportar material en forma de inyección. Además hay que considerar que con inyecciones de morteros de granulometría definida no se alcanzaría a rellenar y cohesionar zonas con tamaño de hueco limitado y porosidad asequible. Por ello, se decide continuar confeccionando lechadas de cal hidráulica natural, estudiándose básicamente la fluidez adecuada para su inyección, resistencias obtenidas y tiempos abiertos de aplicación.

5.2.1.- ANÁLISIS DE FLUIDECES

Se comienza a trabajar buscando relaciones de agua/cal (a/c) que proporcionen fluideces inferiores a 10 segundos y, conseguida ésta, incorporar el superplastificante - fluidificante de forma que, a igualdad de cono Marsh, rebajar el agua de aportación y mantener las resistencias alcanzadas. Se confeccionan series de probetas prismáticas de dimensiones 4x4x16 cm mediante lechadas de NHL-5 con relación a/c que proporcionen conos inferiores a 10 segundos (Tabla 5.15). Se observa que la aportación del 1% en peso de aditivo sobre la cal satisface los requisitos como se ve a continuación.

Se sigue apreciando el fuerte incremento de resistencias entre 28 y 90 días característico de este tipo de aglomerantes hidráulicos, con predominio de las fases bicálcicas del silicato (belitas). Las probetas se conservan hasta rotura en las condiciones definidas en norma, presentando una densidad seca en rotura comprendida entre 1.080 y 1.100 kg/m³.



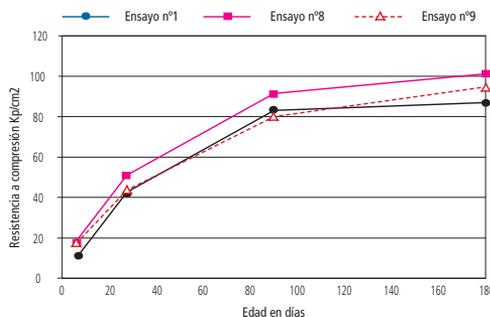
Img. 5.24. Gráfico de resistencia a compresión.

	L - 1	L - 2
Aditivo (%)	0	1
agua/cal	0,666	0,59
Fluidez (s)	8	9

Tabla 5.15. Composición de las muestras.

Días	7	14	28	90
Fluidez (s)	10	9	8	9
Densidad(kg/m ³)	1.850	1.850	1.890	1.870
%Huecos	1,8	2,0	0,9	0,3
kp/cm ²	10	16	24	40

Tabla 5.16. Resultado de los ensayos.



Img. 5.25. Gráfico de resistencia a compresión.

Ensayo nº	1	8	9
agua / cal	0,59	0,53	0,53
aditivo% s.cal	1	1	1

Tabla 5.17. Composición de las diferentes muestras.

Se confeccionan lechadas tipo L-2 con las que se rellenan por gravedad 12 probetas cilíndricas de 15x30 cm que contienen gravas calizas de tamaño 12/18 mm. Desmoldadas y rotas a compresión a las edades indicadas se observa que presentan un contenido en huecos inferior al 2%, con resistencias a compresión de 40 kg/cm² a 90 días. Obsérvese que este valor es aproximadamente la mitad del obtenido en las lechadas a la misma edad de rotura (Tabla 5.16).

Se continúan ensayando amasadas de lechadas con aportación de fluidificante comprobando la estabilidad en las resistencias y la homogeneidad en tiempos abiertos de aplicación de las mezclas.

En los ensayos de referencia números 1, 8 y 9 se realizan probetas para la evaluación de las resistencias y de la estabilidad en el tiempo de la fluidez para la aplicación de la lechada por gravedad, es decir, mantenimiento de tiempo abierto. Se mantienen los valores de resistencias alcanzadas, con una densidad seca media en rotura comprendida entre 1.100 a 1.200 kg/m³ (Img. 5.25 y Tabla 5.17). El ensayo número 9 es una amasada de 140 litros que mantiene perfectamente las características de las realizadas con la amasadora definida en norma.

5.2.2.- TIEMPO DE UTILIZACIÓN DE LA LECHADA

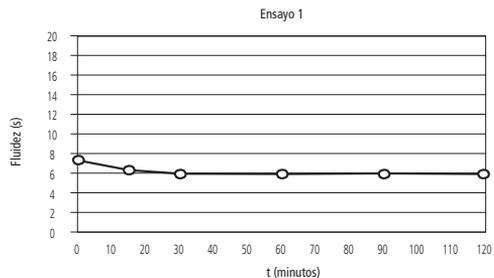
Analizando la evolución en el tiempo de las fluideces en cono Marsh de las amasadas de los ensayos 1 y 8, se desprende que, sin necesidad de aportar inhibido-

res de fraguado, se dispone de tiempos abiertos de 2 horas en los que la fluidez de ambas lechadas se mantiene prácticamente constante y, por tanto, es útil para su inyección en las condiciones previstas (Tabla 5.26 y 5.27).

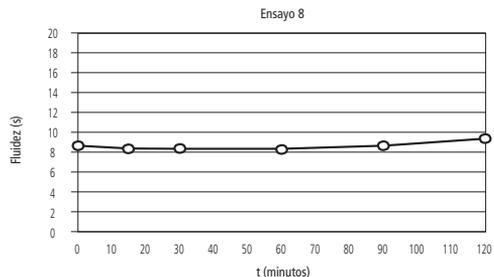
La necesidad de disponer la mezcla para la inyección durante periodos de tiempo más prolongados obliga al empleo de aditivos que actúen como inhibidores / estabilizadores de los procesos de hidratación y permitan controlar los tiempos de fraguado.

En este sentido se realizan nuevos ensayos certificando periodos abiertos superiores a las 8 horas. Se observa en la Img. 5.28, un incremento en la fluidez del ensayo 1 que se manifiesta a partir de las 2

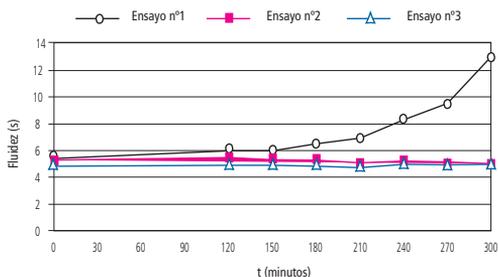
149



Img. 5.26. Gráfico de fluidez.



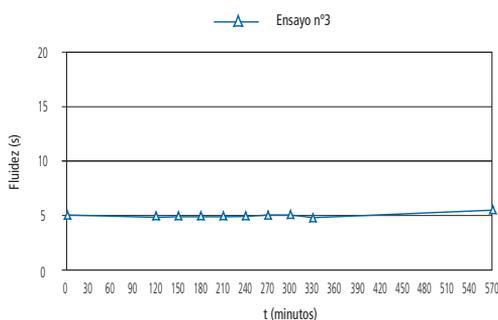
Img. 5.27. Gráfico de fluidez.



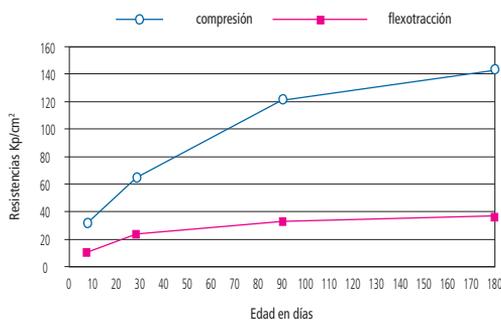
Img. 5.28. Gráfico de fluidez.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
agua/cal	0,53	0,53	0,53
aditivo 1% s.cal	1	1	1
aditivo 2% s.cal	--	0,5	0,5
Fluidez (s)	5	5	5

Tabla 5.17. Composición de las diferentes muestras.



Img. 5.29. Gráfico de fluidez.



Img. 5.30. Evolución de las resistencias a flexotracción y compresión.

horas del inicio, mientras que en los ensayos 2 y 3 aditivados la fluidez permanece invariable. Según se observa en la Img. 5.29, la aportación del aditivo regulador de fraguado, dosificado al 0,5% en peso s/cal, proporciona tiempos abiertos superiores a las 8 horas, no modificando las resistencias alcanzadas en ensayos anteriores.

5.2.3.- ANÁLISIS DE RESISTENCIAS

Del ensayo 3 se confeccionan probetas prismáticas de 4x4x16 cm para la realización de los ensayos de resistencias a flexotracción y compresión, obteniendo los resultados que se observan en la Img. 5.30. Las probetas realizadas presentan resistencias a flexotracción y compresión ligeramente más elevadas que las alcanzadas sin aditivar el estabilizador, con densidades secas medias en rotura comprendidas entre los valores de 1.250 y 1.300 kg/m³.

5.2.4.- CONTROL DE INYECCIONES EN OBRA

Solucionados los problemas planteados de tiempos abiertos mediante la incorporación a las mezclas del aditivo regulador de fraguado, se procede a la ejecución de las inyecciones en obra, pasando a realizar el control de la misma mediante conos de las amasadas, temperaturas y toma de muestras para el control de las resistencias.

Así, durante el periodo comprendido entre septiembre de 2005 y febrero de 2006 se realizan las inyecciones con lechadas de cal hidráulica natural NHL-5 de los contra-

fuerzas Q1 y Q3 del pórtico de la Catedral de Santa María (Ver capítulo 6) con los resúmenes de resultados de control que se adjuntan en Tabla 5.19 e Img. 5.31.

Las densidades alcanzadas en las probetas de control (densidad seca en rotura) alcanzan los valores de 1.150 y 1.300 kg/m³. Los valores medios alcanzados a 90 días resultan comparables a los alcanzados a 180 días en los ensayos iniciales. Se detecta, por tanto, un incremento en las resistencias a largo plazo.

Durante el periodo comprendido entre enero y marzo del 2007 se continúa con las inyecciones en el pórtico de la catedral, siendo los resultados de los ensayos de control que se muestran en la Tabla 5.20 e Img. 5.32.

Se ve cómo se repiten los valores medios encontrados, permaneciendo el ligero in-

cremento en resistencias ya detectado. Los valores de densidad seca en rotura de probetas se mantienen.

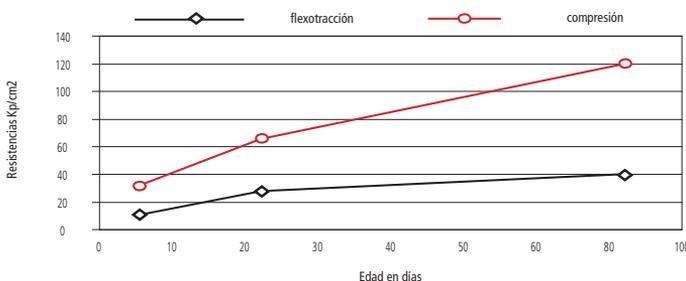
Finalmente se procede a inyectar las zapatas de los pilares de la nave central durante el periodo comprendido entre mayo y octubre del 2008, registrándose los valores control mostrados en la Tabla 5.21 e Img. 5.33.

La densidad seca en rotura de las probetas de control ensayadas alcanza valores comprendidos entre los 1.200 y 1.300 kg/m³.

Se detectan valores medios de rotura a compresión excesivamente altos, si se atiende a aquellos obtenidos en el inicio del estudio. Durante el año 2004 se obtenían resistencias a compresión a 180 días de 100 kg/cm² para alcanzar durante los años 2006 y 2007 resistencias similares a 90 días e incluso superar los 120 kg/cm²

Valor	Fluidez segundos	Flexotracción - kg/cm ²			Compresión - kg/cm ²		
		7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días
Mínimo	7	7	18	27	19	51	92
Máximo	12	54	40	53	45	90	155
Medio	9	13	29	45	33	68	125
dstd	2	5	7	7	6	8	15

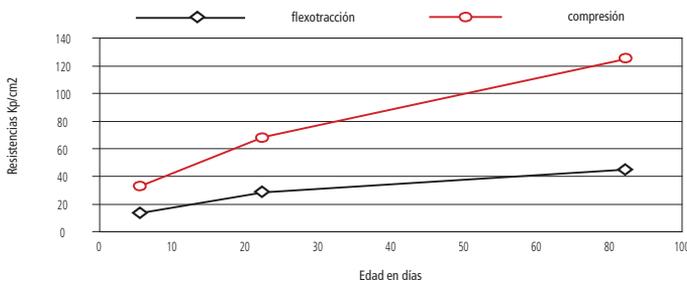
Tabla 5.19. Resultados de control de inyecciones en obra.



Img. 5.31. Resistencias a flexotracción y compresión.

Valor	Fluidez segundos	Flexotracción - kg/cm ²			Compresión - kg/cm ²		
		7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días
Mínimo	6	9	23	30	25	51	104
Máximo	10	16	35	44	39	77	128
Medio	7	12	29	40	32	66	120
dstd	1	3	5	5	6	10	10

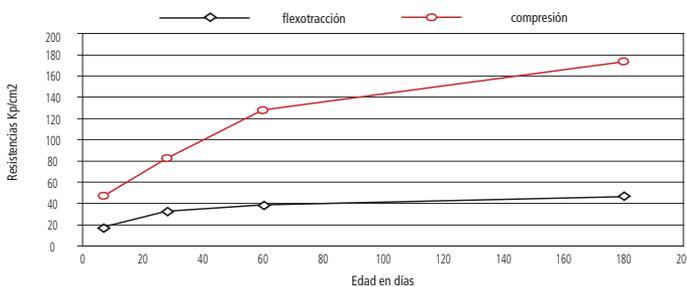
Tabla 5.20. Resultados de control de inyecciones en obra.



Img. 5.32. Resistencias a flexotracción y compresión.

Valor	Fluidez segundos	Flexotracción - kg/cm ²				Compresión - kg/cm ²			
		7 días	28 días	60 días	180 días	7 días	28 días	60 días	180 días
Mínimo	6,1	7	23	25	35	29	62	93	147
Máximo	8,8	26	41	47	60	65	103	161	202
Medio	7	18	33	39	47	47	82	128	174
dstd	1	6	6	6	8	12	16	27	26

Tabla 5.21. Resultados de control de inyecciones en obra.



Img. 5.33. Resistencias a flexotracción y compresión.

a edad de 60 días en el 2008, alcanzando finalmente resistencias de 170 kg/cm² (Tabla 5.22).

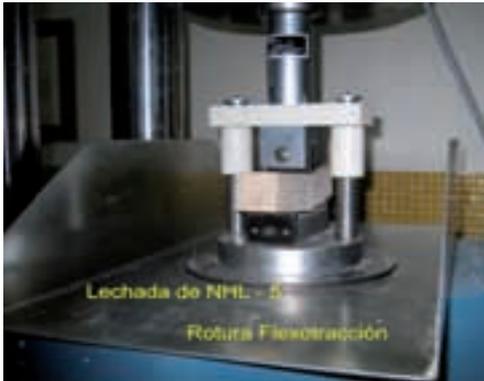
Este incremento constante en las resistencias aconseja un análisis más detallado del material. Incidiendo en el control de la materia prima y las temperaturas en los

procesos de fabricación, y retomando el estudio inicial con cales hidráulicas naturales NHL-3,5 pues las resistencias alcanzadas con la NHL-5 superan ampliamente las previstas en el estudio original.

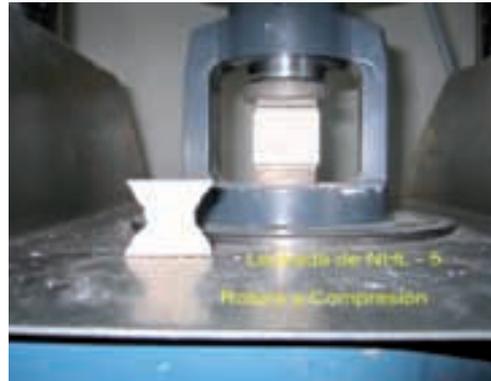
Cada una de las probetas prismáticas fabricadas de dimensiones 4x4x16 cm se

Año	2004			2006 / 2007			2008		
Edad	28	90	180	28	90	180	28	60	180
kg/cm ²	50	90	100	65	120	140	80	120	170

Tabla 5.22. Resultados de valores medios de rotura a compresión.



Img. 5.34. Rotura a flexotracción



Img. 5.35. Rotura a compresión.

rompen a flexotracción a su edad correspondiente y a continuación se rompen a compresión cada una de las mitades resultantes de la rotura a flexotracción anterior (Img. 5.34 y 5.35).

5.3.- HORMIGONES DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-5

Para completar el estudio realizado en el que se ha tomado como ligante hidráulico la cal hidráulica natural NHL-5 se ha realizado el estudio de dosificación de un hormigón de cal a 350 y 400 kg/m³. Por las características del material se han obtenido hormigones de plasticidad extraordinaria sin necesidad del empleo de aditivos plastificantes.

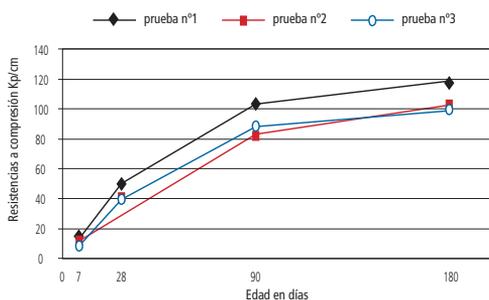
A partir de dosificaciones de áridos conocidas y con adecuadas compacidades

se procede a realizar amasadas de 100 litros en la amasadora existente en el laboratorio. Se realizan pruebas de control de resistencia y trabajabilidad de las amasadas realizadas sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm, fabricadas, conservadas y rotas según serie de normas UNE-EN 12350 y UNE-EN 12390.

Dosificación empleada:

Árido calizo 12/18 Nanclares	630 kg/m ³
Árido calizo 6/12 Nanclares	240 kg/m ³
Arenas 0/5 + L105 Laminoria	1.030 kg/m ³

En base a esta dosificación se realizan las amasadas correspondientes modificando la relación agua/ligante con dosificaciones de 350 y 400 kg de cal por metro cúbico dosificado. Los resultados obtenidos se reflejan en la Img. 5.36 y Tabla 5.23.



Img. 5.36. Resistencias a compresión.

Prueba n°	NHL - 5 kg/m ³	Docilidad cm	Trabajabilidad
1	350	4,5	Escasa - nula
2	350	9,0	Buena
3	400	14,5	Excelente

Tabla 5.23. Trabajabilidad de las amasadas.

NHL-5	350 kg / m ³ - a/c=0,8			
Edad (días)	7	28	90	180
kg/cm ²	13	28	62	76

Tabla 5.24. Valores de roturas a compresión. Probetas conservadas en cámara húmeda hasta rotura.

Se alcanzan resistencias de 100 kg/cm² a 180 días con unas docilidades, sin aditivo, que permiten una trabajabilidad excelente sin asomo de disgregación ni exudación. El hormigonado realizado en fecha 13 de marzo de 2007 en la bóveda de la sacristía, dosificando a 350 kg/m³, con una relación a/cal =0,8 y docilidad de 22 cm de una trabajabilidad excepcional, proporcionó los resultados mostrados en la Tabla 5.24.

Una línea futura de estudio consistiría en la incorporación de fibras de polipropileno al objeto de mejorar las propiedades de flexotracción de la mezcla.

5.4.- LECHADAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5

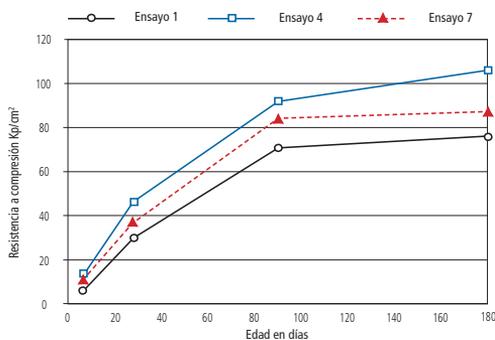
Las resistencias alcanzadas con la NHL-5 superan ampliamente las previstas en el estudio original y se ha continuado el estudio inicial con cales hidráulicas naturales NHL-3,5. De acuerdo con lo indicado, se retoman los ensayos iniciados en septiembre de 2004 sobre material NHL-3,5 denominado Normal (Ensayo 1), Pure (Ensayo 4) y Blanche (Ensayo 7). Los ensayos normalizados realizados sobre probetas prismáticas convencionales arrojaban los resultados de resistencias a compresión que a continuación se indican en la Tabla 5.25 e Img. 5.37.

Lechadas que, aditivadas con superplastificante al 1% en peso sobre la cal, presentan una fluidez idónea para su inyección. Manifestando un fuerte incremento de las resistencias a compresión entre los 7 y 90 días de curado (70-90 kg/cm²) y moderado de 90 a 180 días (80-110 kg/cm²). Las probetas se conservan en cámara húmeda hasta rotura.

La densidad seca de las probetas en rotura alcanza valores comprendidos entre 1.070 y 1.250 kg/m³, en función de la relación a/c empleada.

A partir de marzo de 2010 se recibieron nuevas partidas de NHL-3,5 con las que se realizan una serie de ensayos destinados a obtener lechadas de fluideces óptimas y resistencias adecuadas para su inyección, según los requisitos establecidos.

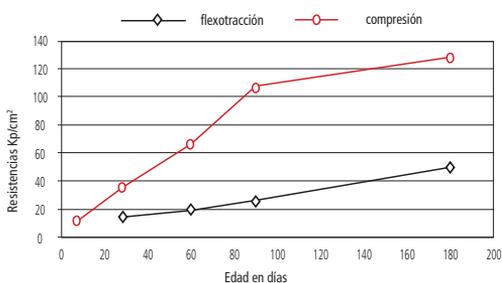
Se realizan distintas amasadas con un doble objetivo. Por un lado, se elaboran probetas prismáticas de 4x4x16 cm a efectos de comprobar la evaluación de las resistencias a flexotracción y compresión



Img. 5.37. Resistencias a compresión.

Ensayo nº	1	4	7
agua / cal	0,59	0,49	0,63
aditivo% s.cal	1	1	1
Fluidez (s)	8	9	9

Tabla 5.25. Composición de las muestras.



Img. 5.38. Resistencias a flexotracción y compresión.

Fecha de fabricación	Edad - Fecha Rotura				
	7 días	28 días	60 días	90 días	180 días
15/4/2010	22/4/2010	13/5/2010	14/6/2010	14/7/2010	12/10/2010
Flexión	--	16	20	27	51
Compresión	13	37	67	109	129

Tabla 5.26. Valores de resistencias a flexión y compresión.

de las lechadas con relaciones de a/c comprendidas entre 0,53 y 0,63 con el superplastificante conocido aditivadas al 1% (en peso de cal). En segundo lugar, se fabrican otras 9 probetas cilíndricas de 15x30 cm rellenas con gravas calizas de tamaño 18/32,5 mm, y se vierte por gravedad la lechada realizada con el objetivo de comprobar su rotura a compresión y calcular el volumen de huecos de la mezcla.

Ensayos de roturas a flexotracción y compresión sobre probetas de lechada de cal NHL-3,5 de 4x4x16 cm (Tabla 5.26 e Img. 5.38).

Esta amasada fue realizada con una relación a/c=0,53 y fluidez de 8 segundos y aditivada al 1% (en peso sobre cal) con superplastificante. Las densidades secas en rotura están comprendidas entre 1.180 y 1.230 kg/m³.

Se observa que las resistencias a 90 y 180 días son un poco más elevadas que las alcanzadas a la misma edad en 2004, con densidades similares y relación a/c ligeramente inferior a igualdad de fluidez. Se sigue apreciando el fuerte incremento de resistencias entre 28 y 90 días característico de este tipo de aglomerantes hidráulicos con predominio de las fases bicálcicas del silicato (belitas).

Días	28	90	180
Fluidez (s)	10	11	8
Densidad(kg/m3)	1.855	1.896	1.861
%Huecos	--	6,1	8,8
kp/cm2	30	51	54

Tabla 5.27. Característica de la muestra.



Img. 5.39. Probeta desmoldada y serrada.

Desmoldadas y rotas a compresión a las edades indicadas se observa que presentan un contenido en huecos del orden del 6%, con resistencias a compresión de 51 kg/cm² a 90 días (Tabla 5.27). Obsérvese que este valor es ligeramente inferior a la mitad del obtenido en las lechadas a la misma edad de rotura.

Las gravas calizas de tamaño 18/32,5 mm empleadas presentan un coeficiente de absorción del 1,6% y densidad de 2.683 kg/m³, y las roturas a 180 días no aportan resistencias a compresión, presentando un ligero incremento de huecos y débil caída en cuanto a la densidad alcanzada (Img. 5.39).

Sobre la probeta cilíndrica de 15x30 cm desmoldada y serrada a lo largo de su generatriz, se aprecia la perfecta distribución de la lechada de cal en la misma y ausencia de huecos vistos.

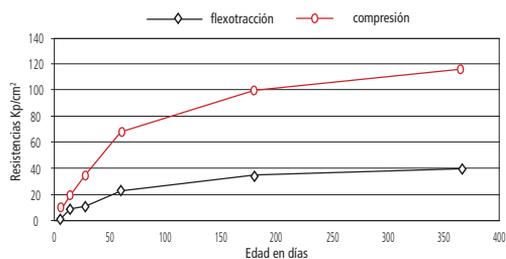
Con el resto de las amasadas realizadas se rellenan, por gravedad, 9 probetas cilíndricas de 15x30 cm que contienen gravas calizas de tamaño 18/32,5 mm.

Valor	Fluidez segundos	Flexotracción - kg/cm ²					
		7 días	28 días	60 días	180 días	365 días	730 días
Mínimo	7	0	3	9	19	34	
Máximo	10,9	10	21	41	55	54	
Medio	8	1	11	22	34	39	
dstd	1	2	5	7	10	8	

Tabla 5.28 Resultados a flexotracción.

Valor	Fluidez segundos	Compresión - kg/cm ²					
		7 días	28 días	60 días	180 días	365 días	730 días
Mínimo	7	3	22	49	70	99	
Máximo	10,9	24	56	88	133	140	
Medio	8	9	35	68	99	116	
dstd	1	6	9	11	16	16	

Tabla 5.29 Resultados a compresión.



Img. 5.40. Evolución de las resistencias a flexotracción y compresión.



Img. 5.41. Probetas de lechada de cal hidráulica natural NHL-3,5 conservadas en cámara húmeda hasta su rotura a edades de 365 y 730 días.

Durante el periodo comprendido entre febrero y abril de 2010 se realizan las inyecciones con lechadas de cal hidráulica natural NHL-3,5 en la capilla de los Reyes con los resúmenes de resultados de control que se adjuntan en las Tablas 5.28 y 5.29 y en la Img. 5.40. Los resultados obtenidos hasta la fecha presentan valores que se corresponden con las pruebas realizadas.

Las densidades alcanzadas en las probetas de control (densidad seca en rotura) alcanzan valores comprendidos entre 1.000 y 1.180 kg/m³ en función de las relaciones de a/c empleadas.

Queda pendiente la evolución de las resistencias a edades de dos años.

5.5.- MORTEROS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5 ALTA FLUIDEZ (MAF)

De manera análoga al estudio de morteros de alta fluidez realizado con cal hidráulica natural NHL-5 se retoma el procedimiento con la partida nueva de cal NHL-3,5 de marzo de 2010, dosificando morteros 1:2 (cal/arena) aditivados con los correspondientes reguladores de fraguado, superplastificante y cohesionante correspondiente.

El comportamiento de la mezcla en cuanto a fluidez, tiempo abierto de la amasada y acción del cohesionante es similar al de los MAF fabricados con la NHL-5. Posteriormente se procede a la confección de probetas prismáticas convencionales para estudio de la evolución de las resistencias de estas amasadas de mortero de alta fluidez, aptas para su inyección (Tabla 5.30 e Img. 5.42).

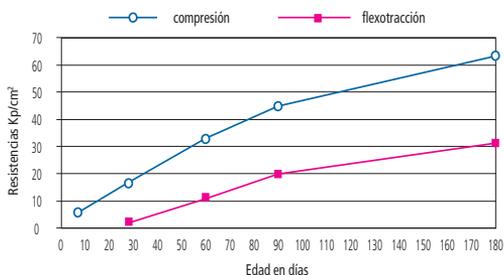
Las densidades secas en rotura, hasta la fecha, alcanzan valores comprendidos entre 1.620 y 1.680 kg/m³.

Con esta amasada se confeccionan probetas cilíndricas de 40 cm de altura por 5 cm de diámetro mediante vertido por gravedad de la misma en el molde fabricado al efecto. Las probetas se mantienen en posición vertical y se desmoldan a los 14 días de curado. Se sierran a continuación a lo largo de su generatriz. La acción del cohesionante seleccionado se pone de manifiesto al observar la buena distribución de la arena en las caras serradas de las probetas confeccionadas (Img. 5.43).

Se realiza una probeta cilíndrica (5x40 cm) de mortero de alta fluidez, fabricada con cal hidráulica natural NHL-3,5 desmoldada y serrada a lo largo de su generatriz tras 14 días de curado en cámara húmeda donde se aprecia la perfecta distribución de la arena del mortero en toda la longitud de las caras serradas de la probeta debido a la acción del aditivo cohesionante empleado en la mezcla (Img. 5.43). Probeta cilíndrica (5x40 cm) de mortero de alta fluidez, fabricada con cal hidráulica natural NHL-3,5 desmoldada y serrada a lo largo de su generatriz

tras 14 días de curado en cámara húmeda. Se mantiene el comportamiento del cohesionante aditivado, no hay decantación de la arena del mortero, presentando una distribución homogénea en toda la altura de la probeta.

Los problemas planteados de escasez de tiempo abierto se solucionan mediante la incorporación a las mezclas del aditivo regulador de fraguado. El aditivo seleccionado presenta un comportamiento excelente y resulta absolutamente compatible tanto con el cohesionante como con el su-



Img. 5.42. Resistencias a flexotracción y compresión.

cal/arena	1:2
agua/mortero	0,28
aditivo nº1% s.cal	1
aditivo nº2% s.cal	1
aditivo nº3% s.cal	0,25
Fluidez Marsh (s)	6

Tabla 5.30. Composición de mortero.



Img. 5.43. Probeta desmoldada y serrada.

Fecha Rotura				
7 días	28 días	60 días	90 días	179 días
19/04/2010	10/05/2010	11/06/2010	11/07/2010	08/10/2010
--	2	11	20	31
6	17	33	45	63

Tabla 5.31. Resistencias a compresión y flexotracción.

perplastificante utilizado. De ésta forma, se sigue disponiendo de ligantes que proporcionan morteros de alta fluidez perfectos para su utilización en inyecciones, con resistencias ligeramente inferiores a las obtenidas con la cal hidráulica NHL-5 a la edad de 90 días que, no obstante, terminan equiparándose, tanto en densidad como en resistencias a flexotracción y compresión, tras los 180 días de curado en cámara húmeda.

5.6 HORMIGONES DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5

Para completar el estudio retomado en el que se ha elegido como ligante la cal hidráulica natural NHL-3,5 se realiza el estudio de dosificación de un hormigón de cal a 350 y 400 kg/m³. Por las características del material se sigue disponiendo de hormigones de plasticidad extraordinaria sin necesidad del empleo de aditivos plastificantes. A partir de dosificaciones de áridos conocidas que presentan compatibilidades adecuadas se procede a fabricar amasadas de 100 litros en la amasadora existente en el laboratorio, y se realizan pruebas de control de resistencia y trabajabilidad de las amasadas sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm fabricadas, conservadas y rotas según UNE – EN 12350 y UNE – EN 12390.

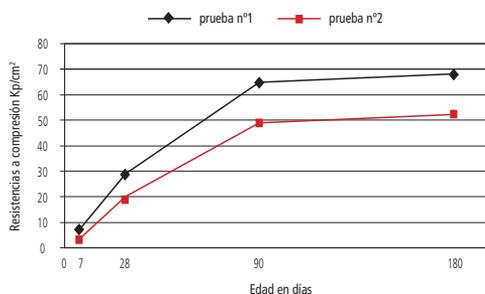
Dosificación empleada:

Árido 6/18 calizo Laminoria	875 kg/m ³
Arena 0/5 caliza Laminoria	900 kg/m ³
Arena L105 sílicea Laminoria	210 kg/m ³

En base a esta dosificación se realizan las amasadas correspondientes modificando la relación agua/ligante con dosificaciones de 350 y 400 kg de cal por metro cúbico dosificado. Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 5.32 e Img. 5.44.

Con relaciones de a/c comprendidas entre 0,8 y 1 se obtienen docilidades de 16 y 24 cm respectivamente. Estas consistencias aportan una trabajabilidad excelente sin asomo de exudación y disgregación de la amasada.

Las resistencias alcanzadas a 90 días oscilan entre los 50 kg/cm² para la prueba número 2 (cono 24) y los 65 kg/cm² de la



Img. 5.44 Resistencias a compresión.

Prueba	NHL -3, 5 kg/m3	Docilidad cm	Resistencia compresión kp/cm2				Trabajabilidad
			7	28	90	180	
1	350	16	7	29	65	68	Excelente
2	400	24	4	20	49	52	Excelente

Tabla 5.32. Características de las dos pruebas.

prueba número 1 (cono 16). El incremento de resistencias alcanzado a los 180 días de curado en cámara húmeda es mínimo (3 kg/cm² en ambos casos). Las densidades secas en rotura alcanzadas varían entre los 1.980 y 1.890 kg/m³ respectivamente.

Las relaciones a/c=1 deberán tomarse como límite superior a efectos de evitar segregaciones sobre mezclas sin aditivar. Los valores superiores podrán generar exudaciones y segregaciones perjudiciales.

La continuidad del estudio pasa por la adición de fibras de polipropileno para mejorar las propiedades del hormigón. Para ello habrá que realizar los ensayos correspondientes sobre probetas prismáticas de hormigón de cal, a efectos de optimizar-dosificar el contenido de fibras.



Img. 5.45. Detalle de cono de Abrams realizado al hormigón de cal NHL-3,5.



Img. 5.46. Detalle de conservación de probetas prismáticas de cal hidráulica natural NHL-3,5 (lechadas y morteros) de dimensiones 4x4x16 cm, conservadas en cámara húmeda a 20±1 °C y Humedad relativa >95%.



Img. 5.47. Vista general de la cámara húmeda existente en el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava.





- 6 -
GUÍA DE ACTUACIÓN.
EJEMPLO PRÁCTICO

6.1.- METODOLOGÍA, DOCUMENTACIÓN PREVIA Y DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN INTERIOR

6.1.1.- INTRODUCCIÓN AL EJEMPLO PRÁCTICO

En este punto de la investigación, y una vez comprobado la insuficiente fiabilidad de los métodos no destructivos de análisis para el conocimiento del estado interior de las fábricas, se ha decidido continuar el estudio comprobando el comportamiento y la puesta en obra de los fluidos de inyección, pasando del laboratorio a la ejecución in situ. Para ello se consideró necesario realizar la consolidación completa de un elemento constructivo del edificio con cinco objetivos fundamentales:

1. Comprobar mediante las perforaciones necesarias para la inyección la

composición y el estado interior de las fábricas.

2. Experimentar los problemas que la puesta en obra de las inyecciones plantearía durante su ejecución.
3. Comprobar in situ el correcto funcionamiento de los distintos fluidos de inyección ensayados en el laboratorio.
4. Analizar los resultados de todo el proceso viendo distintas alternativas y posibilidades de mejora.
5. Desarrollar una metodología de trabajo aplicable a otras situaciones análogas que se dan en las fábricas de la catedral.

Con los objetivos claros de esta fase la siguiente decisión a tomar consistió en la elección de una fábrica de la catedral adecuada a los intereses del estudio. Es en estas situaciones donde las sinergias



Img. 6.1. Situación de los pilares Q1, Q2 y Q3.

1/07/1997	DIÁMETRO: 36 mm. PROFUNDIDAD: 357 cm. RECUPERACIÓN DE TESTIGO: 285 cm. POROSIDAD: 20%
0-50	0-38 calcarenita de Olárizu. 38-50 morteros y rellenos.
50-100	50-105 morteros y rellenos.
100-150	105-125 calcarenita de Olárizu. 125-150 morteros y rellenos.
150-200	150-165 morteros y rellenos. 165-182 Calcarenita de Olárizu. 182-200 morteros y rellenos.
200-250	200-240 morteros y rellenos. 240-250 calcarenita de Olárizu.
250-300	250-300 morteros y rellenos.
300-350	250-330 morteros y rellenos. 330-357 calcarenita de Olárizu.

Tabla 6.1. Datos del testigo extraído del sondeo Q2CF-E-N-00.

de trabajo acotan el campo de elección y, aprovechando que se estaba abordando la restauración del pórtico occidental, se decidió acometer la consolidación de los estribos designados como Q1 y Q3 correspondientes a la zona noroeste del mismo. Estos elementos estructurales parecen estar diseñados para soportar la estructura de una torre gemela a la existente que nunca llegó a construirse, por lo que estaban sobredimensionados para la estructura que estaban soportando en la actualidad.

La estabilidad de la propia fábrica para soportar los ensayos estaba garantizada, y además se multiplicaba la posibilidad de control sobre todo el trabajo por la presencia constante del equipo de restauración en la zona. Un control que se antojaba fundamental en esta primera fase de prueba, que posteriormente se extendería a la consolidación del resto de fábricas del pórtico.

Los sondeos y endoscopias realizados durante el desarrollo del plan director fueron sondeos horizontales ejecutados para ver el estado de los muros. No se ha-

bían ejecutado en ninguno de estos dos elementos, pero sí en el estribo Q2, situado en la misma zona un poco más al sur. Los resultados indicaban la presencia de algunos huecos y una porosidad apreciable de un 20% aproximadamente. Se planteó entonces la posibilidad de comprobar si elementos constructivos análogos presentaban características comunes en cuanto a la composición y estado interior de sus fábricas.

Con estos datos a priori se iniciaba un planteamiento de puesta en obra en el que había que decidir los sistemas de ejecución más adecuados, tanto para las perforaciones, la toma y el registro de datos, como para las técnicas de inyección. De los sondeos y registro ya se tenía un conocimiento teórico práctico avanzado ya que se habían realizado anteriormente para los estudios previos del plan director. Además, el sistema de información geográfica de la catedral (SIM) ya estaba parcialmente alimentado en la parte correspondiente a los sondeos, por lo que la metodología de registro debía ser la misma o similar. No obstante, surgía ahora la posibilidad de revisión del registro informático de datos

1/10/1997	DIÁMETRO: 36 mm. PROFUNDIDAD: 357 cm. OPERADOR: D.F.A. Laboratorio General POROSIDAD: 20%
0-50	0-32 mampuesto exterior de calcarenita de Olárizu. 32-42 hormigón de cal. 42-50 agujero.
50-100	50-75 hormigón de cal. 75-100 agujeros en la parte superior de hormigón.
100-150	100-115 agujeros en la parte superior de hormigón. 115-137 gran mampuesto de caliza. 137-150 hormigón de cal compacto con bolos de caliza.
150-200	150-179 hormigón de cal compacto con bolos de caliza. 179-200 mampuesto.
200-250	200-219 hormigón. 219-235 mampuesto. 235-239 agujero sin mortero entre mampuesto. 239-250 mampuesto con algunas fracturas.
250-300	250-259 mampuesto con algunas fracturas. 259-293 hormigón compacto. 293-297 agujero en hormigón. 297-300 mampuesto.
300-350	300-305 mampuesto. 305-309 hormigón. 309-350 mampuesto de caliza negra. 350-357 mampuesto de caliza negra. 357 fin del muro.

Tabla 6.2. Datos de la endoscopia realizada en el sondeo Q2CF-E-N-00.

para permitir un análisis de resultados más dinámico, tema que se desarrolla más adelante. El problema fundamental consistía en elegir una metodología de inyección adecuada, ya que a pesar de tener una amplia información bibliográfica eran escasas las experiencias prácticas llevadas a cabo para una escala de intervención de estas características.

6.1.2.- LA ELECCIÓN DE LA TRAMA Y EL SISTEMA DE PERFORACIÓN

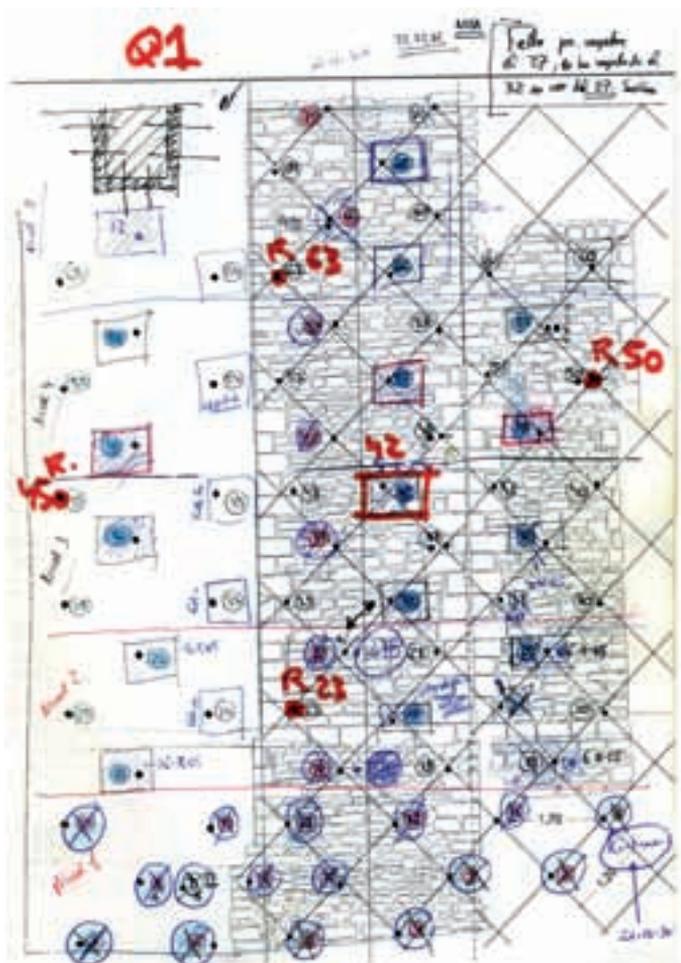
6.1.2.1.- La elección de la trama

Hasta aquí el planteamiento era claro, pero ¿cómo dibujar y ejecutar la trama de perforaciones? ¿Serían necesarias multitud de perforaciones, o bastaría con una trama menos tupida para consolidar el elemento constructivo?

El conocimiento real del estado de la fábrica y su heterogeneidad compositiva

habían resultado prácticamente imposibles con los métodos no destructivos empleados. Los sondeos con recuperación de testigo y las endoscopias eran hasta el momento los sistemas más fiables, pero no dejan de ser pequeñas catas en puntos concretos y cuyos resultados no parecen, a priori, extrapolables para generalizarlos a todo un elemento constructivo. Quizás sí para determinar la composición, pero no para establecer un volumen de huecos general mediante ese único sondeo.

Además, se da la paradoja de que un elemento muy degradado interiormente se consolidará eficazmente con menos perforaciones ya que se supone que éstas estarán comunicadas entre sí. Por el contrario, para consolidar una fábrica no muy degradada serán necesarios un mayor número de sondeos por la ausencia de comunicación interior entre los mismos. Sin olvidar que si el elemento no presenta demasiadas oquedades, casi es mejor no intervenir en él porque no se justifica el fin.



Img. 6.2. Esquema de obra de sondeos e inyecciones previstos en los alzados exteriores del contrafuerte Q1.

Dicho con otras palabras, si se necesitan muchas perforaciones para consolidar interiormente una fábrica en realidad es que no está tan mal como se pudiera pensar a priori, y por tanto no necesita consolidación mediante inyección. En definitiva, resulta complicado establecer un equilibrio adecuado entre el número de perforaciones a ejecutar y las verdadera-

mente necesarias, sin dejar la fábrica por su cara exterior como un queso *gruyère*.

Se decidió por ello plantear una primera trama de perforaciones que alcanzasen la totalidad de los huecos que pudieran existir en el volumen de los estribos definidos. Entendiendo en todo caso que los primeros resultados obtenidos de testigos y

endoscopias podrían variar las distancias predefinidas entre perforaciones. Esto es, la trama tenía que adaptarse a los resultados obtenidos en cada zona particular, haciéndola más densa en aquellas zonas con menos volumen de huecos y más dispersa en el resto de zonas más porosas.

La trama base planteada consistía en una red cuadrada al tresbolillo donde las perforaciones estaban separadas 150 cm entre columnas y 120 cm en altura entre filas. El hecho de que se ejecuten al tresbolillo responde a la doble necesidad de no debilitar en exceso el muro con las perforaciones creando líneas o planos débiles y, por otra parte, para tratar de llegar de una manera más eficaz a todo el volumen interior de las fábricas. No se debía olvidar que las perforaciones se tienen separar una distancia prudencial de unos 50 cm de cualquier esquina o rincón para no debilitar ésta. Además, se consideró oportuno establecer como límite esa distancia como la mínima de separación entre perforaciones para evitar daños locales. Recalcando la absoluta necesidad de establecer esa distancia mínima de seguridad para todo elemento decorativo, tanto escultura como pinceladura.

Hay que recordar que uno de los condicionantes principales a la hora de realizar los trabajos era la restauración ejecutada en el pórtico. Ya que por un lado servía como control del proceso de puesta en obra, pero condicionaba los frentes de actuación. Una parte importante de la restauración artística del interior del pórtico se había ya ejecutado, fundamentalmente en lo referente a la escultura monumental

y al tratamiento superficial de las fábricas desde el interior. Al estar ejecutado gran parte del rejuntado de la sillería del pórtico, había ciertas garantías de que el fluido de inyección no rebosaría por dichas juntas, trabajando a unas presiones adecuadas. Por el contrario servía como límite a la hora de decidir desde donde perforar, descartándose desde el primer momento cualquier perforación desde el interior del pórtico. De este modo se ejecutaría la trama de perforaciones desde las caras norte, oeste y sur de los contrafuertes Q1 y Q3, dejando intacta la cara este correspondiente al interior del pórtico ya restaurado.

El esquema final planteado de perforaciones es con una separación entre los taladros al tresbolillo de 120 cm en diagonal y 170 cm en horizontal (Img. 6.2).

169

6.1.2.2.- La elección del sistema de perforación

En lo que respecta al sistema de perforación había dos posibilidades principales: la perforación con corona de diamante y recuperación de testigo, y la perforación por rotopercusión, ya explicadas en el apartado 3.2.

En esta ocasión se optó, a pesar de ser más caro, por que todos los sondeos se ejecutarán con recuperación de testigo. La ventaja principal es que proporcionaba un mayor conocimiento del estado y composición del pilar. Por un lado se lograba tener un mayor alcance de perforación, obteníamos directamente los testigos recuperados (pudiendo analizar los mate-

riales y la porosidad), y además permitía tomar muestras para cualquier ensayo. Por otro lado, proporcionaba mayor comodidad en la ejecución de endoscopias en dichas perforaciones, puesto que se realizan con mayor campo de visión, libertad de movimiento y el agujero queda exento de polvo.

El proceso resultaría más largo, pero los datos a obtener eran mucho más interesantes empleando este sistema. De todas maneras, en esta fase se creyó conveniente realizar pruebas perforando mediante el sistema de rotopercusión, ya que a pesar de tener un alcance limitado los diámetros de perforación son casi imperceptibles en la fábrica y son sistemas de perforación en seco. Característica importante ya que empleando el sistema de recuperación de testigo la presencia de agua es constante para refrigerar la corona de diamante. El agua lava la perforación facilitando el camino para la posterior inyección, pero a su vez reduce la cohesión que el mortero y la argamasa dan a la fábrica, sobre todo con morteros muy arenosos de baja calidad.

Utilizando los dos sistemas de perforación en el estudio se podrían comprobar los rendimientos de trabajo de ambos sistemas que permitieran hacer una valoración adecuada para su integración en futuros proyectos similares. Se tendría, además, la oportunidad de comprobar posteriormente las especificidades de inyección derivadas de perforar con un sistema u otro, resultando en definitiva un estudio mucho más completo de todas las variables del proceso.



Img. 6.3 Inicio de perforación de en el centro de un sillar.

Independientemente del sistema de perforación empleado, se establecieron unos criterios de perforación añadidos a los derivados de la propia elección de la trama.

- Era conveniente no iniciar la perforación entre junta y piedra, de manera que se iniciara la perforación entera en la piedra y preferiblemente en la junta, evitando en todo momento perforar las dos a la vez. La razón fundamental deriva de la posible inyección del sondeo con un sistema a presión. En estos casos garantizar la estanqueidad y la presurización es fundamental y resulta mucho más sencillo obtener en un único material. Las posibles fugas de aire, y por tanto la despresurización del agujero a inyectar, son más probables que se produzcan en las zonas que afectan a la superficie intersticial entre junta y piedra.
- En el mismo sentido se plantearon unas inclinaciones de perforación respecto a la vertical que debían estar en un rango de 20° a 50° de inclinación. Una inclinación por debajo de ese rango sería una



Img. 6.4 Control calibrado de inclinación de la perforación.

perforación cuasi horizontal que, en el caso de inyectar por presión, produciría un empuje con una componente horizontal excesiva. Un sondeo demasiado vertical en principio dificulta el acceso a las zonas centrales de las fábricas, ya que necesita para ello una longitud de perforación muy elevada y, por tanto, aumenta notablemente el coste de cada perforación.

- Por último, señalar la importancia que se otorgaba en el proceso a la buena ejecución de los sondeos y por tanto a los profesionales que los ejecutan. El sondeo es el inicio del proceso de puesta en obra, y es la clave para poder conocer el estado de la fábrica y para el correcto desarrollo posterior de la inyección. La persona que lo ejecuta debe ser hábil en la recuperación de testigos, evitando en la medida de lo posible que se queden restos obturando el canal de inyección. Además, las sensaciones que el operario experimenta respecto a la resistencia que opone la fábrica a ser perforada son un dato relevante que se debía tener en cuenta.

6.1.3.- LA IDENTIFICACIÓN DE LOS SONDEOS, LAS FICHAS Y REGISTROS

Como parte fundamental de la intervención en el patrimonio edificado, una buena documentación de las intervenciones realizadas y su justificación para posibles revisiones o reversiones en el futuro es una tarea obligatoria. Además de la necesidad de registrar todo el proceso para el objeto del estudio, la toma de datos se debía englobar dentro del Sistema de Información Monumental (SIM) de la catedral. Este sistema de información geográfica consiste en un modelo vectorial en tres dimensiones de toda la catedral, conectado a unas bases de datos, tal y como se recoge en el siguiente punto de esta publicación.

Dentro de ese marco más amplio de la intervención restauradora en la catedral se debía plantear un sistema de fichas, que registrara todos los datos en obra para su posterior volcado al SIM. En este caso concreto se pensaba en una ficha relativamente fácil de cumplimentar por cada uno de los agentes que intervenían, especialmente para aquellos menos familiarizados con esta tarea. Las fichas resultan útiles en la medida que son claras y sencillas. Una toma de datos demasiado exhaustiva genera tal volumen de información que es muy complicado y costoso de manejar, por lo que un análisis de necesidades inicial era básico.

Evidentemente se tenía como base las fichas tipificadas, utilizadas para registrar un sondeo cualquiera, empleadas por cualquier empresa de geotecnia. Pero,

Catedral Santa María de Vitoria. X

Proyecto de consolidación de muros. **Nº DE REGISTRO:**

Elemento Constructivo: **PILAR Q1** Situación General: Pórtico exterior

PUNTO N°: 11

CARA de PERFORACION: SUR

PROFUNDIDAD SONDEO: 4.40

FECHA de PERFORACION: 14 IX 2005

DIAMETRO DE SONDEO: 45 mm

EQUIPO UTILIZADO: [Handwritten]

NIVEL: FOTO [Handwritten] **CARA:** R

Observaciones operario: A 2m (50%) 2.4m 2.8m 3.2m (60%) 3.6m (75%)

Planta

Sección

TESTIGO	ENDOSCOPIA
Fecha 01-08-08	Fecha 28-10-08
Diámetro 110	Diámetro 110
Profundidad 100	Profundidad 100
Descripción	Descripción
0-30 Colocación de bita para con medidas de esp. de los muros muy desiguales	Se detecta [Handwritten]
30-40 Anclaje de cable [Handwritten] para un grupo de 2 [Handwritten]	[Handwritten]
40-50 Colocación de bita para [Handwritten]	[Handwritten]
50-60 Anclaje de cable [Handwritten] para un grupo de 2 [Handwritten]	[Handwritten]
60-70 Colocación de bita para [Handwritten]	[Handwritten]
70-80 Anclaje de cable [Handwritten] para un grupo de 2 [Handwritten]	[Handwritten]
80-90 Colocación de bita para [Handwritten]	[Handwritten]
90-100 Anclaje de cable [Handwritten] para un grupo de 2 [Handwritten]	[Handwritten]

Conclusiones: [Handwritten]

Tamaño de foto: 110 mm (Anchura de foto)

Img. 6.5 Ficha con datos de perforación, testigo y endoscopia.

como se trataba de un estudio muy concreto, habría que modificarla para adaptarla a la obtención de información valiosa para el estudio de la fábrica y su posterior consolidación.

Una de las claves de todo sistema de información geográfica es la identificación unívoca de cada uno de los elementos principales. En nuestro caso se utilizó la estructura de designación de elementos

constructivos prevista en el SIM para identificar cada perforación a realizar en los contrafuertes Q1 y Q3 del pórtico, de manera que cada sondeo tuviera una denominación única y diferente del resto, tal y como se explica en el apartado 6.2.2.1. Sería conveniente la identificación in situ al lado de la perforación, ya que esto ayuda de manera notable a identificar las perforaciones sin tener que volver a ubicarlas en el plano.

La estructura de la ficha se divide en dos partes principales que se adecuan a las distintas fases de puesta en obra de la consolidación. Básicamente, este proceso se puede resumir por orden de ejecución en las siguientes fases: perforaciones, análisis de las perforaciones, inyección, análisis de la inyección y control final de la consolidación. Las fichas se dividen en:

1. Datos previos a la ejecución de la inyección
 - Datos de perforación.
 - Datos de testigos.
 - Datos de endoscopias.
 - Conclusiones.
2. Toma de datos y control de la inyección
 - Datos del fluido a inyectar.
 - Datos de volumen de inyección y ejecución.
 - Conclusiones.

Todo ello servirá de base para analizar el estado de las fábricas y si la consolidación mediante inyección del elemento constructivo ha resultado eficaz o no. Pero, ¿cómo se rellena la ficha? En los apartados sucesivos se especifican los diferentes registros que han de ser cumplimentados por cada uno de los agentes que participan en la consolidación.

6.1.3.1.- Datos previos a la inyección

Datos de perforación

El operario que ejecuta la perforación puede y debe aportar datos relevantes sobre la fábrica en el momento que ejecuta la perforación. Un operario experimentado

sabe detectar zonas con oquedades, zonas más blandas etc..., en función de cómo se desarrolle el proceso de perforación. En caso de perforar mediante corona de diamante y recuperación de testigo, observar la recuperación o pérdida de agua de la perforación es un indicador importante del estado de la fábrica. En ausencia de grietas u oquedades se recuperará la totalidad del agua empleada para la refrigeración de la corona de diamante, puesto que no encontrará un camino por donde salir.

Los datos a rellenar por tanto son:

- Elemento constructivo donde se sitúa la perforación.
- Número del sondeo.
- Fecha de perforación.
- Orientación de la cara desde la que se perfora.
- Profundidad real en cm del sondeo ejecutado, medido una vez finalizada la perforación.
- Diámetro del sondeo en mm.
- Equipo y sistema utilizado para la perforación.
- Número de la caja en la que se localiza el testigo extraído.
- Inclinaciones en grados, en planta y perfil del sondeo.
- Observaciones de operario.

En este apartado de gran importancia, el operario perforador debe cuantificar el porcentaje de agua que se pierde en las distintas profundidades del sondeo. Asimismo, deberá constatar la posible presencia de huecos o zonas de distinta dureza en la perforación tratando de localizarlas en profundidad. Del mismo modo, debe registrar aquí cualquier anomalía o

suceso acaecido durante la perforación que considere oportuno.

Datos de testigo

Un técnico cualificado, preferentemente geólogo será el encargado de rellenar la descripción estratigráfica visible en el testigo. Para ello es necesario que el perforador haya ordenado secuencialmente e identificado en cajas preparadas al efecto todo el testigo recuperado. Deberán estar marcadas todas y cada de las maniobras realizadas a diferentes profundidades, procurando que el testigo quede totalmente inmovilizado ante cualquier manipulación normal de la caja.

Los datos a rellenar por tanto son:

- Fecha de la descripción del testigo.
- Diámetro del testigo recuperado.
- Constatación de si se ha fotografiado el testigo en la caja e identificación del archivo de la misma.
- Nombre de la persona que realiza la descripción del testigo.
- Recuperación o índice porcentual de porosidad del sondeo, relacionando la

profundidad total del sondeo, con la longitud de testigo recuperado.

- Litotipos o litologías reconocidas.
- Porosidad = $((\text{medida de testigo recuperado en cm.} / \text{profundidad de perforación en cm.}) - 1) * 100$.
- El signo negativo indica falta de material.
- Por otra parte, se debe de registrar fotográficamente cada testigo en su caja correspondiente. En la propia fotografía debe aparecer la identificación del sondeo con los siguientes datos mínimos:
 - Fecha de ejecución de la perforación.
 - Localización del sondeo: Unidad constructiva, su número de perforación y la orientación de la cara desde la que se perfora.
 - Profundidad de perforación.

Datos de endoscopia

Los técnicos encargados de la realización de endoscopias tomarán y registrarán en el momento de su ejecución unos datos básicos que debieran ser revisados



Img. 6.6. Documentación de caja con identificación de testigo recuperado.



Img. 6.7. Endoscopia. Se aprecia la junta de mortero de cal con caliches en perfecto estado. A la derecha el flexómetro para control de profundidad.

en un posterior visionado de la grabación. No se trata de repetir los datos litológicos obtenidos en el testigo, sino de comprobar posibles anomalías y la presencia de oquedades importantes para la inyección, así como de relacionar los datos obtenidos por ambos estudios. Se describirá la endoscopia relacionando materiales y profundidad. Se prestará especial atención a la presencia de grietas, desmoronamientos, obturaciones, etc. Se constatará igualmente:

- Fecha de realización de la endoscopia.
- Nombre del archivo digital en el que se guarda la inspección. Este nombre deberá coincidir con el número de registro del sondeo.
- Equipo y lente utilizados.
- Profundidad de la endoscopia.
- Profundidades a las que se observan oquedades o anomalías.

Es importante advertir que la profundidad de perforación del testigo está tomada de la parte exterior a la interior del muro, de manera que se indica en centímetros el alcance máximo obtenido en la perforación. Por el contrario, en la endoscopia se introduce el flexómetro en el orificio apareciendo como valor 0 cm, justo la parte de mayor profundidad del sondeo. Esto obliga a convertir las profundidades registradas en la endoscopia en profundidades reales de perforación o viceversa para obtener unos datos relacionables en profundidad.

Conclusiones

Una vez cumplimentados todos los datos anteriores en el orden descrito con-

viene apuntar en la ficha algún dato o conclusión evidente que ayude a la hora de realizar la intervención. Por ejemplo se puede indicar si la porosidad es baja o inferior a un 15% , y no se aprecian grietas en la endoscopia que aparentemente el sondeo realizado no es un buen canal de inyección, ya que el estado de la fábrica parece correcto a priori. Para este fin se reserva el apartado de conclusiones.

6.1.4.- EL PROCESO DE INYECCIÓN

La confluencia de todo lo experimentado hasta ahora pasaba por la última fase del proceso de ejecución de la consolidación: la inyección. En este momento ya se disponía de unos datos mínimos ordenados y registrados en fichas que indicaban una porosidad media del 16% aproximadamente en los contrafuertes objeto de estudio. Era relativamente previsible que no fuera una porosidad elevada, ya que no era esa zona de la catedral la que presentaba un volumen de huecos elevado según los sondeos ejecutados durante el plan director.

No obstante, llegaba la hora de comprobar cómo funcionaba todo el proceso de inyección. Para comenzar, lo primero que había que hacer era evaluar el volumen teórico de inyección en base a la perforación realizada. Era fundamental volver a medir la profundidad del sondeo ya que en multitud de ocasiones la longitud de perforación es ligeramente inferior a la realmente ejecutada. Esto se debe a ligeros desprendimientos en el interior que pueden dificultar la tarea de inyección.



Img. 6.8. Preparación de la mezcla con la introducción de los componentes en la hormigonera.



Img. 6.9. Llenado de probeta para la comprobación de fluidez.

En cualquier caso se debe preparar una ficha de inyecciones en la que queden reflejados la capacidad de las perforaciones previstas a inyectar y el orden que se va a seguir.

Se apuntaba también la imposibilidad de rellenar todo el interior de la fábrica de una sola vez, por lo que se decidió poner un límite en altura, de manera que se evitase un empuje excesivo debido al fluido de inyección. En base a la documentación consultada, tal y como se ha podido comprobar en la Img. 4.11 (Capítulo 4), la altura de cada tongada de inyección rondaba el metro, por lo que se estableció un límite de 120 cm. Esto suponía que no se podía inyectar en una misma fase de inyección más de esa altura, y que habría que esperar aproximadamente una semana entre una tongada y otra.

6.1.4.1.- La mezcla

En una pequeña hormigonera se realizaba la mezcla en el estricto orden marcado en el laboratorio: introducción del agua, seguidamente el aditivo y por último la cal. Una de las cuestiones principales para que un proceso detallado llegue a realizarse con exactitud en la propia obra pasa por la conversión de las medidas y dosificaciones utilizadas en el laboratorio a medidas lógicas utilizables en la obra. De este modo, y teniendo en cuenta que los sacos de cal utilizada se comercializan en formato de 35 kg, las dosificaciones empleadas quedaban de la siguiente manera.

- 18 litros de agua (51% sobre el peso de la cal).
- 33 cl de aditivo
- 1 saco de cal NHL-5.



Img. 6.10. Introducción del fluido en el cono Marsh normalizado taponando la parte inferior.



Img. 6.11. Medición de fluidez de la lechada.

La mezcla de los componentes se debía realizar a baja revolución para evitar que se disgreguen los componentes, por lo que el tiempo de mezcla variaba entre 6 y 12 minutos. Con el fin de agilizar los trabajos se introdujo la posibilidad de utilizar una batidora manual conectada a un taladro que ayudara a diluir la cal en el agua antes de comenzar con el amasado en la hormigonera (Img. 6.8). Esta ayuda resultó muy eficaz ya que, como luego se comentará, las condiciones de almacenamiento de los sacos de cal derivaban en la aparición o no de grumos que dificultaban la ejecución correcta de la mezcla.

¿Cómo saber que la mezcla estaba lista para comenzar la inyección? La respuesta está en el estricto control de la fluidez de la misma. Por cada amasada se debía comprobar la fluidez exacta. Para ello, y

siguiendo las directrices del Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava, se cronometraba lo que tardaba en pasar $\frac{1}{2}$ litro de agua por el cono Marsh (Img. 6.9, 6.10 y 6.11). El resultado óptimo tenía que estar entre 7 y 11 segundos, ya que de este modo no se modificarían las resistencias finales del fluido ni se producirían obturaciones que dificultaran todo el proceso de inyección.

El control de las fluideces también debía registrarse en las fichas de inyección y en cada una de las probetas llevadas al laboratorio para el control de calidad de las mismas.

La realidad fue que en muchas ocasiones la cal estaba aparentemente caducada o había sufrido un almacenamiento inadecuado, por lo que no se conseguía una

FICHA DE INYECCIONES					
Fecha: 7-06-2015		Un. Constructiva: C. FERRER 6.2			
Id. Inyección:		Observaciones: 2ª Inyección de 1.5% de solución para la bomba de agua			
Nivel: 5		Agujeros: 27, 28, 29, 30, 31			
Inyectable: <i>Acetato de Na</i>		Composición:		Agua	Sal
Sistema: <i>Ferrera</i>		Presión Max:		Probetas: <i>6"</i>	
Numero Agujero	Capacidad	Fluidez	P. Max	V. Inyectado	Observaciones
27	2.5L	3.5L	2.50	2.5L + 1.5L = 4.0L	Fluidez en el momento de inyección, al completar 2.5L se volvió a inyectar 1.5L para completar los 4.0L.
28	2.5L	3.5L	2.50	2.5L	Fluidez en el momento de inyección, al completar 2.5L se volvió a inyectar 1.5L para completar los 4.0L.
29	2.5L	3.5L	2.50	2.5L + 1.5L = 4.0L	Fluidez en el momento de inyección, al completar 2.5L se volvió a inyectar 1.5L para completar los 4.0L.
30	2.5L	3.5L	2.50	2.5L	
31	2.5L	3.5L	2.50	2.5L	
MEDIO litro AGUAFRÍAS ANTES DE CERRAR, CERRAR!!					
SE Pasa la inyección en el 30 y 31 que pasan por ser de agua					
Se le añade:					
<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 5px;"> Inyección = 4.33 L </div> DIFERENTE					
Notas varias al reverso de esta hoja					

Img. 6.12. Ficha de inyección con el orden seguido y todos los datos referidos.

fluidez óptima ni siquiera utilizando previamente la batidora. En otras ocasiones el problema se solucionaba con la incorporación paulatina de agua, en proporciones de medio litro, hasta un máximo de 21 litros. Esto ocurría en días bastante fríos en los que la temperatura inicial del agua era baja. Por ello se consideró conveniente no ejecutar inyecciones con temperaturas inferiores a 5°C.

6.1.4.2.- La inyección

Todos los datos del proceso de inyección se registran en la ficha preparada al efecto (Img. 6.12). Los datos anteriormente indicados y previos a la inyección deben completarse con el relleno de los siguientes campos, durante y posteriormente a la inyección, por parte del equipo de inyectores.

- Fecha de inyección.
- Fluideces medidas en segundos, empleadas por cada agujero inyectado.
- Presión máxima empleada por agujero, medida en kg/cm².
- Volumen inyectado por agujero, medido en litros.
- Constatación de la recogida de probetas para laboratorio.
- Observaciones. Donde se reflejarán todas las incidencias considerables acaecidas por cada agujero inyectado, tales como salida de lechada por otros agujeros o juntas, medidas correctoras, problemas de obturación encontrados, variación de la composición del inyectable y su justificación, etc.

Ya se había decidido que el sistema de inyección a emplear iba a ser el de presión, tal y como lo planteó en su día Sir Francis Fox, pero adaptado a la tecnología actual. No obstante, se hicieron algunas pruebas in situ utilizando la inyección por gravedad, y enseguida se constató la ineficacia del sistema por su lentitud y por la mayor fluidez necesaria para evitar obturaciones. Además, mediante este sistema se complicaba toda la operación al tener que disponer de andamio por encima de las zonas a inyectar, y debido a la imposibilidad de rellenar zonas por encima del punto de inyección.

El sistema contaba con los siguientes elementos: un compresor para la generación de presión unido a un calderín presurizado donde se situaría el fluido de inyección, mangueras desde el calderín hasta el punto de inyección y, finalmente, un obturador que garantice la presurización del

encuentro con la perforación y por tanto del sistema (Img. 6.13). Además se debía disponer de toda la valvulería necesaria, especialmente de llaves de corte tanto a la salida del calderín como a la entrada del obturador.

Si toda la inyección va bien a la primera (sin obturaciones, inyección continuada desde un punto con control de salida del fluido etcétera), el tiempo abierto durante el cuál se podía utilizar el fluido no cobra mayor importancia. Como el mejor de los casos no suele darse, en las primeras inyecciones había problemas con las paradas técnicas (almuerzo, descanso etc.) en las que o se tiraba la lechada sobrante en ese momento o se continuaba la inyección sin saber exactamente hasta cuando se prolongaría. Planteado el problema al laboratorio se mejoró la composición del fluidificante para tener tiempos abiertos de hasta 8 horas por amasada con lo que se solucionaba el problema.

Por otro lado, en las primeras inyecciones también se pudo comprobar cómo se generaban depósitos en el calderín de inyección que, tras varias amasadas, acababan obturando la manguera y producían importantes parones y el consecuente retraso. Se decidió entonces incorporar al calderín una batidora manual que moviera de manera constante y a baja revolución el fluido introducido (Img. 6.14). Rápidamente se comprobó que el fondo quedaba limpio tras la inyección ya que, de alguna manera, la fluidez inicial se mantenía gracias al movimiento constante y paulatino de la mezcla en el interior del recipiente presurizado.



Img. 6.13. Sistema de inyección con compresor en primer plano, calderín en verde y manguera sin llave de corte ni obturador.



Img. 6.14. Imagen del calderín con la mejora introducida al disponer de una batidora de longitud el vaso, accionado con un taladro simple a baja revolución.

En cuanto a los obturadores era necesario disponer de al menos uno por cada diámetro de perforación utilizado. Había que asegurar además la posibilidad de cortar el flujo del fluido y garantizar que no se produjeran huecos entre el obturador y el orificio de inyección. De otro modo, tal y como se puede apreciar en la Img. 6.15, la lechada saldría por el hueco entre el obturador y la fábrica y durante el tiempo de corte se mancharía inevitablemente.

La solución a esta nueva eventualidad pasaba por la incorporación de una sencilla llave de corte y una derivación en T para comprobar si la manguera estaba presurizada (Img. 6.16) pero, sobre todo, por la inclusión de un sistema roscado que, con una goma, se abriera en la punta del obturador para ajustar y sellar el orificio garantizando la estanqueidad.

Una variante más sencilla a priori consistía en plantear un obturador simple con manguera ajustada al máximo y sellar el perímetro con yeso (Img. 6.17), pero había que tener en cuenta la eliminación del mismo una vez acabada la consolidación. En cualquier caso ambos sistemas demostraron ser eficaces.

Por último, una última observación derivada de los primeros ensayos resultó ser la longitud y el diámetro de la manguera. Se comenzó con una de diámetro 40 mm y longitud 7 m pero no funcionaba bien ya que se producían pérdidas de carga y por tanto bajada de presiones, se obturaba con facilidad por fraguado de lechada en el interior de la misma y era de difícil manejo en la obra. La solución fue limitar la longitud a 3-4 m y disminuir el diámetro poniendo un máximo de 30 mm.



Img. 6.15. Obturación defectuosa sin llave de corte en punta y sin sellado perimetral.



Img. 6.16. Apretado del obturador metálico para ajuste y sellado del orificio.



Img. 6.17. Variante de obturador de goma con sellado perimetral de yeso.



Img. 6.18. Manómetros de control en tapa de calderín.

6.1.4.3.- El control de presiones

Una vez resueltos los primeros problemas técnicos del sistema de inyección al que se refería el apartado anterior, el objetivo era el control de presiones y a la forma de tener la seguridad de si se estaba realmente inyectando o no el orificio. ¿Cómo hacerlo?

El principal método de comprobación y control consiste en la observación sistemática del manómetro del calderín (Img. 6.18). Una vez fijada la presión máxima $2,5 \text{ kg/cm}^2$, y con el inyectable dentro del sistema presurizado, se abren todas las válvulas de corte y se comprueba el funcionamiento del manómetro.

Si el manómetro permanece más o menos constante significa que la inyección se está realizando correctamente, incluso si la presión baja, debido a que en el recorrido del fluido se pierde algo, se sigue inyectando. Incluso puede entrar en funcionamiento el grupo compresor para que la presión se mantenga constante. Sin embargo, cuando poco a poco la presión comienza a subir se debe a que el agujero ya está completamente inyectado o bien a que se ha vaciado completamente el calderín, y es necesario volver a rellenarlo para continuar con la consolidación.

La sistemática es relativamente sencilla y con un mínimo manejo del control de la presión máxima fijada no se deben producir mayores problemas. Cada vez que se vacía el calderín no queda más que contabilizar el número de litros empleados y hacer la suma total por cada taladro de inyección.

6.2.- GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

6.2.1.- INTRODUCCIÓN

En este apartado se realiza una descripción pormenorizada del tratamiento digital de todos los datos referidos a los sondeos realizados en el ejemplo práctico descrito en este libro.

Como consideración previa se debe recordar que cuando se planifica cualquier intervención en restauración de patrimonio histórico (o en cualquier otro ámbito), es importante conocer lo más precisamente posible el objeto de estudio. Todo este conjunto de estudios, ensayos, pruebas, análisis, observaciones, catas, etc. aportan documentación. Una parte de esta información tiene valor en sí misma, otra sólo en contraste con otros resultados, pero se puede afirmar que previamente a una intervención en restauración es necesario conocer y relacionar los resultados de los diferentes estudios.

Una intervención puede generar decenas de investigaciones, centenares de muestras, miles de fotografías e infinidad de fichas. La gestión de ese volumen de

información requiere una normalización de todos los resultados obtenidos. Para ello la sistematización de los procesos de adquisición de datos orientada a la digitalización de todos los resultados es imprescindible. Hoy en día es viable registrar digitalmente la información generada. Todo ello requiere una cuidadosa planificación pero no repercute de forma importante ni en el tiempo empleado ni en el presupuesto dedicado. Este asunto no es ajeno al análisis expuesto. A continuación se explica la metodología de registro realizada, su materialización en una base de datos relacional y las posibilidades de gestión desarrolladas.

La información susceptible de ser registrada pertenece a una de las siguientes categorías:

- a) Alfanumérica. Es toda la información literal referida al objeto de estudio tanto a los valores numéricos como literales. Todo lo que se puede escribir en una ficha.
- b) Audiovisual. Es aquella información que hace referencia a una representación del objeto estudiado.
- c) Geométrica. Hace referencia a la posición geométrica que tiene el objeto en el espacio.
- d) Material. Es una parte del material estudiado.

A continuación se debe establecer el equipamiento y los programas (software y hardware) necesarios para el registro y gestión de los diferentes tipos de información.

- a) Equipamiento necesario.

Ordenador personal, cámara fotográfica

ca digital, endoscopio y tarjeta capturadora de video.

b) Programas de ordenador.

Gestor de base de datos, programa de edición de fotografías, programas de dibujo asistido por ordenador (CAD) y visualizador multimedia (imágenes y videos).

Se ha establecido una metodología para la gestión eficiente de toda la información generada en los diferentes sondeos mecánicos realizados. Esto no quiere decir que el resultado haya sido un modelo cerrado y comercializable, sino una aplicación que utiliza programas y estándares habituales en cualquier oficina técnica. Se ha partido del sistema de gestión de base de datos Microsoft Access, fotografías en formato jpg y grabaciones de video en formato mpeg.

Se describen a continuación los detalles de la metodología. El número de tablas, la información de los campos, etc. responden a las necesidades concretas de este trabajo y no tienen la pretensión de ser universales. Será cada trabajo el que marque la conveniencia o no de cada campo.

6.2.2.- BASE DE DATOS RELACIONAL

Como se ha indicado anteriormente en el punto 6.1.2.1 sobre un plano se realiza una cuadrícula con todos los puntos en los que pueden realizarse sondeos. Sobre este esquema se va decidiendo la localización concreta del sondeo. Es en este momento donde se añadirán los registros correspondientes en la tabla prin-

cipal, la tabla *tbl_sondeos*. En esta tabla se describen las características generales, independientemente de qué procesos se hayan ejecutado o en qué fase del trabajo se encuentren.

A medida que se realizan (o no) la perforación, la recuperación de testigo, la endoscopia y finalmente la inyección se irán incorporando los registros a las tablas secundarias (*tbl_perforaciones*, *tbl_testigos*, *tbl_endoscopias* y *tbl_inyecciones*).

Con esta estructura todos los registros de las tablas secundarias siempre tendrán una correspondencia en *tbl_sondeos* aunque no todos los registros de sondeos tienen que aparecer en estas tablas.

6.2.2.1.- Denominación única de cada sondeo

La clave dará información de 3 tipos. La primera parte hace referencia a la unidad constructiva en la que se realiza el sondeo, la segunda a la orientación del muro que se perfora y la tercera es el número indicado en la planificación previa.

Ejemplo: **Q1CF-E-N-07** → Unidad Constructiva **Q1CF-E**, Cara de Muro **NORTE** y número previsto **07**.

Esta clave única e irrepetible de cada sondeo es lo que relaciona todas las tablas. Todo sondeo tiene una tabla. Si existe perforación tiene un registro abierto en la tabla de perforaciones con la misma denominación que aparece en la *tbl_sondeos*, de igual manera sucede con los testigos, endoscopias e inyecciones.

6.2.2.2.- Descripción de los campos de las tablas

tbl_Sondeos: Contiene toda la información del sondeo

Campo	Descripción	Tipo
IDSONDEO	Código identificador de sondeo	CHAR(50)
Información relativa a la metodología del sondeo		
FECHA	Fecha de la perforación	DATETIME
NUMERO	Número de perforación	CHAR(50)
Información relativa a la situación geométrica y a sus dimensiones		
COORDX	Coordenada X del centro de la boca del sondeo	REAL
COORDY	Coordenada Y del centro de la boca del sondeo	REAL
COORDZ	Coordenada Z del centro de la boca del sondeo	REAL
PROFUNDIDAD	Profundidad de la perforación en cm	CHAR(8)
DIAMETRO	Diámetro exterior del testigo recuperado en mm	CHAR(50)
ORIENT_PLANTA	Grados de inclinación respecto de la pared en planta	INT
ORIENT_SECCION	Grados de inclinación respecto de la pared en sección	LONGBLOB
ESPESOR_MURO	Espesor del muro perforado en cm	INT
CARA_UNIDAD	Orientación de la cara desde la que se perfora	CHAR(50)
SITUACION	Situación general de la perforación dentro del edificio	CHAR(50)

Información relacionada con el Sistema de Información Monumental de la Catedral de Santa María

NOMBRE_PD	Código identificador del sondeo en el plan director	INT
UN_CONSTR	Clave de la unidad obtenida por conversión del listado de archivos de VT14\INTERIOR y VT14\EXTERIOR. Qué se perfora	CHAR(50)
IDFABRICA	Nombre del tipo de fábrica estudiado	CHAR(50)

Cualquier información relevante que se quiera añadir

COMENTARIOS	Comentarios relativos a la perforación
-------------	--



Img. 6.19. Formulario de sondeos utilizado identificando las características comunes.

tbl_Perforaciones: Contiene la información específica del proceso de perforación

Campo	Descripción	Tipo
IDPERFORACION	Identificador de perforación, elemento de relación entre tablas. Es el mismo que el IDSONDEO	CHAR(50)

Descripción del proceso de perforación

0-50	Porcentaje de pérdida de agua, relativa a la profundidad indicada en cm	FLOAT
50-100	Porcentaje de pérdida de agua, relativa a la profundidad indicada en cm	FLOAT
100-150	Porcentaje de pérdida de agua, relativa a la profundidad indicada en cm	FLOAT
150-200	Porcentaje de pérdida de agua, relativa a la profundidad indicada en cm	FLOAT
200-250	Porcentaje de pérdida de agua, relativa a la profundidad indicada en cm	FLOAT
EQUIPO	Equipo utilizado para la perforación	CHAR(50)

Información relevante de la ejecución de la perforación

SISTEMA	Sistema de perforación empleado	CHAR(50)
EMPRESA	Nombre de la empresa adjudicataria de las perforaciones	CHAR(50)
OBSERVACIONES	Observaciones realizadas por el operario durante la perforación	LONGBLOB

The image shows a screenshot of a software application window titled "Perforación". The window has a menu bar with "Inicio" and "Ayuda". Below the menu bar, there are several input fields: "Fecha" (10/10/2008), "Ejecutor" (Jorge), "Empresa" (SIA), "Sistema" (Rotación), and "Estado" (SI). Below these fields is a text area for "Observaciones" containing the text "Pérdida de agua a 140, 150 y 200 cm. Ya no lo repite". At the bottom of the form is a table with five rows, each representing a depth range and its corresponding percentage of water loss:

0-50	0%
50-100	0%
100-150	75%
150-200	75%
200-250	100%

At the bottom of the window, there is a status bar with the text "Registros: 0 - 0 00:00:00" and a "Salir" button.

Img. 6.20. Formulario de sondeos utilizado referido a perforaciones.

tbl Testigos: Contiene la información específica de los testigos extraídos

Campo	Descripción	Tipo
IDTESTIGO	Identificador de testigo, elemento de relación entre tablas	CHAR(50)

Localización del testigo

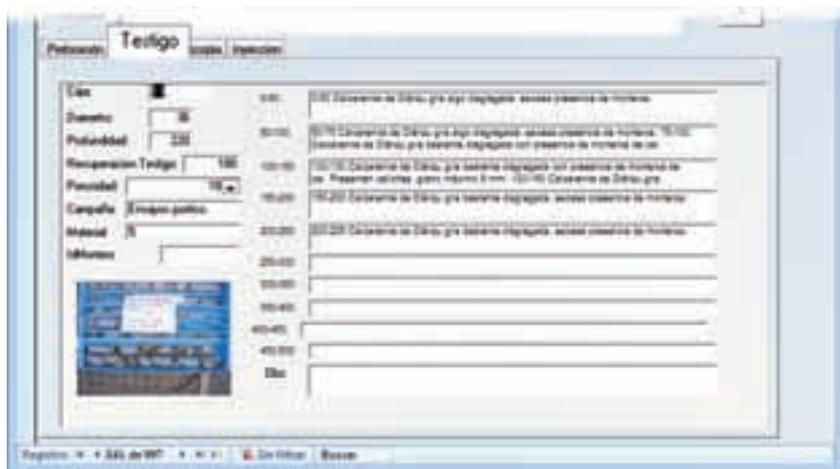
CAMPAÑA	Campaña en la que se engloba la inspección	CHAR(10)
CAJA	Número de la caja en la que se guarda el testigo	SMALLINT

Descripción del testigo

DIAMETRO	Diámetro exterior del testigo recuperado en mm	INT
REC_TESTIGO	Recuperación de testigo en cm	SMALLINT
POROSIDAD	Relación porcentual entre recuperación de testigo y profundidad de perforación	CHAR(50)
0-50	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
50-100	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
100-150	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
150-200	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
200-250	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
250-300	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
300-350	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
350-400	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
400-450	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)
450-500	Descripción estratigráfica del testigo, relativa a la profundidad indicada en cm	CHAR(250)

Información relevante del testigo

OBSERVACIONES	Observaciones a considerar en el testigo	LONGLOB
---------------	--	---------



Img. 6.21. Formulario de sondeos utilizado referido a testigos.

tbl_Endoscopia: Contiene la información específica de las endoscopias realizadas

Campo	Descripción	Tipo
IDENDOSCOPIA	Identificador de endoscopia, elemento de relación entre tablas	CHAR(50)

Información sobre la realización de la endoscopia

FECHA	Fecha de la perforación	DATETIME
PROFUNDIDAD	Profundidad de la endoscopia en cm. No tiene que coincidir obligatoriamente con la profundidad de perforación	SMALLINT
OPERADOR	Nombre del operador u operadores del endoscopio	CHAR(50)
EQUIPO	Equipo utilizado en la endoscopia	CHAR(150)
LENTE	Lente utilizada en la endoscopia	CHAR(50)

Información sobre los resultados de la endoscopia

0-50	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
50-100	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
100-150	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
150-200	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
200-250	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
250-300	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
300-350	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
350-400	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
400-450	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB
450-500	Observaciones de endoscopia, relativa a la profundidad indicada en cm	LONGBLOB

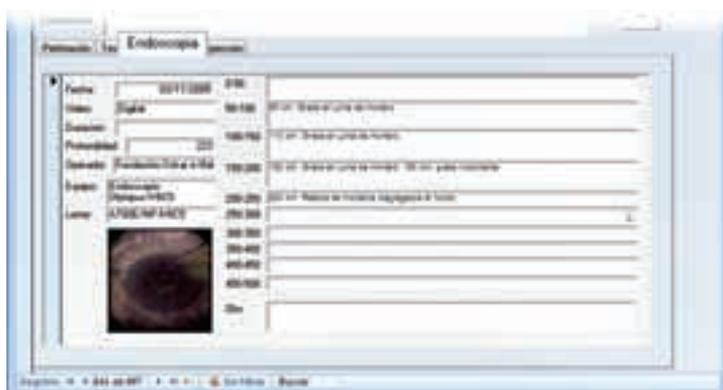
187

Archivo de video

archivovideo	Hipervínculo con la dirección del archivo de video de la endoscopia	Hipervínculo
--------------	---	--------------

Observaciones a considerar

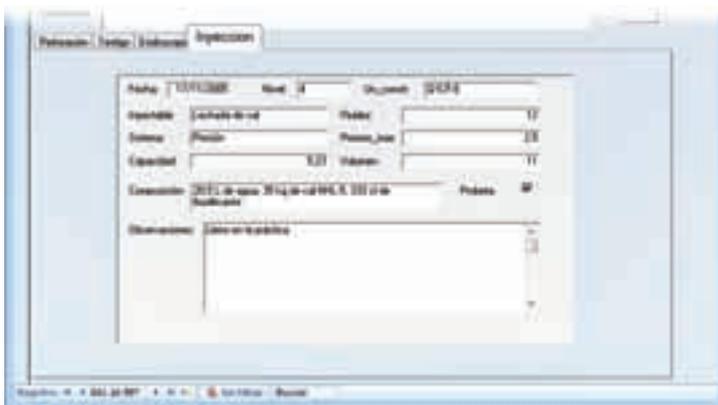
Observaciones	Observaciones a considerar en el testigo	LONGBLOB
---------------	--	----------



Img. 6.22. Formulario de sondeos utilizado referido a endoscopias.

tbl_Inyeccion: Contiene la información específica de las inyecciones realizadas

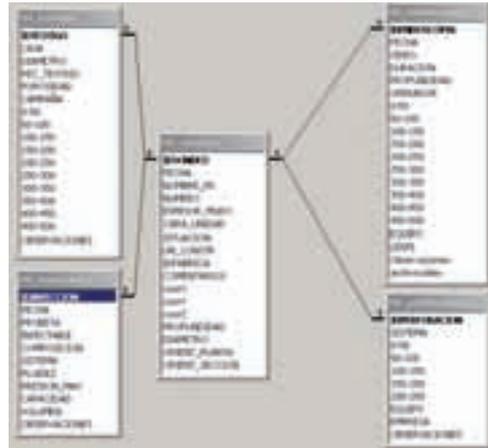
Campo	Descripción	Tipo
IDINYECCION	Clave de la inyección, contiene la unidad constructiva y el nivel de inyección	CHAR(50)
Descripción del desarrollo de la inyección		
FECHA	Fecha de la inyección	DATETIME
PROBETA	Probeta de control de la inyección para el laboratorio	TINYINT
INYECCIONABLE	Elemento a inyectar	CHAR(50)
COMPOSICION	Composición porcentual de los distintos elementos que componen el inyector	CHAR(200)
SISTEMA	Sistema de inyección empleado	CHAR(50)
Descripción de los resultados de la inyección		
FLUIDEZ	Fluidez del fluido inyectado, en segundos	DECIMAL(20,4)
PRESION_MAX	Presión máxima utilizada en la inyección kp/cm^2	DECIMAL(20,4)
CAPACIDAD	Capacidad teórica de inyección del sondeo, en litros	DECIMAL(20,4)
VOLUMEN	Volumen real inyectado en el sondeo, en litros	DECIMAL(20,4)
OBSERVACIONES	Observaciones relativas a la inyección	LONGBLOB



Img. 6.23. Formulario de sondeos utilizado referido a inyecciones.

6.2.2.3.- Relaciones entre tablas. Cuadro resumen

Las relaciones entre las diferentes tablas son muy sencillas. Se establece una relación de uno a uno entre las diferentes tablas con la tabla matriz Sondeos. En este tipo de relación cada registro de la tabla principal sólo puede tener un registro coincidente en la tabla secundaria. Se podrían agrupar todos los datos en una única tabla pero teniendo en cuenta el objeto de documentación es más operativo separar en diferentes tablas.



Img. 6.24. Esquema de las relaciones existentes entre las diferentes tablas de datos.

6.2.2.4.- Formularios de datos

La información de una base de datos se guarda en las tablas de datos. Sin embargo la presentación de estos datos se realiza de la misma manera que se guarda, es decir en la típica cuadrícula de campos y registros. La introducción y visualización de los datos directamente en las tablas resulta incómoda, tanto más cuanto mayor cantidad de campos tenga una tabla.

Los formularios son máscaras para trabajar con los datos de una tabla y permiten clasificar y disponer de la información de los registros de forma intuitiva. De esta forma se utilizan los formularios para introducir y visualizar los datos de las tablas.

Además, permiten ver los datos de diferentes tablas de una vez, siempre y cuando se definan en el formulario los campos vinculados.

Para este caso se ha realizado un formulario para visualizar los datos de todas las

tablas. Los resultados de las diferentes intervenciones (perforaciones, testigos, endoscopias e inyecciones) se muestran en sucesivas pestañas, lo que permite disponer de toda la información desde un único interfaz (Img. 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 y 6.23).

6.2.2.5.- Informes de datos

La gestión digital de los datos no implica la renuncia a utilizar otro tipo de soportes tradicionales para la presentación de datos. Por ello uno de los objetivos de esta metodología es la presentación final de un informe en papel con toda la información gráfica y alfanumérica referida a este estudio.

Su estructura es similar a la de los formularios, un encabezamiento con todas las características generales del sondeo y a continuación la descripción de las diferentes partes de las que consta el sondeo.



Img. 6.26. Vista generada en el Sistema de Información Monumental en el que se aprecia el modelo tridimensional de la catedral y los sondeos realizados en la consolidación de muros y pilares.

del Monumento (SIM). Este sistema permite acceder a la información asociada a cada piedra del monumento y también realizar planos temáticos en función de una característica concreta (tipo de piedra, unidad constructiva, unidad estratigráfica...).

El modelo de la catedral no está concebido como algo estático e inmutable, sino que a medida que avanza la restauración el modelo se va actualizando permitiendo ver la evolución en el tiempo. El SIM no se limita a organizar la información recopilada sobre el monumento, sino que también incorpora los datos relativos a los tratamientos realizados sobre la fábrica de la catedral y su caducidad. De esta manera se puede establecer un plan de fechas de las diferentes intervenciones

realizadas. Así, el SIM engloba la información sobre el monumento y la gestión en su restauración y mantenimiento.

Este estudio se integra dentro de este sistema de información monumental utilizado. Esto posibilita disponer de un modelo tridimensional en el que se pueden georreferenciar los sondeos realizados. La reconstrucción tridimensional de las perforaciones puede servir para visualizar la consolidación a la que han sido sometidos los pilares del pórtico de la catedral. El SIM permite realizar consultas y visualizarlas directamente en el modelo tridimensional o la realización de planos temáticos (Img. 6.27).

El proceso seguido para el registro en el SIM es el siguiente:

- En la realización del sondeo se señala sobre un plano el lugar exacto del orificio. En el estadillo se indican la profundidad, la dirección horizontal y vertical.
- Sobre el modelo tridimensional se identifica las coordenadas X,Y,Z del sondeo y se incorporan a la tabla correspondiente de la base de datos.
- Un programa informático se encarga de leer registro a registro los sondeos que se desean filtrar y los incorpora al modelo tridimensional. Para ello utiliza el código de sondeo *IDSONDEO*, las coordenadas X,Y,Z, la profundidad y las direcciones horizontales y verticales para generar una entidad gráfica (línea para sondeos realizados por rotopercusión, cilindro para los sondeos con recuperación de testigo) que es enlazada automáticamente a la base de datos mediante el código *IDSONDEO*.

6.2.4.- GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN REFERIDA A LOS SONDEOS

La clasificación de la información en bases de datos relacionales permite realizar consultas complejas sobre cualquier característica definida previamente. Es decir, se puede consultar los sondeos realizados en un periodo de tiempo determinado, aquellos sondeos que hayan sido inspeccionados visualmente, aquellos que tengan una inyección superior a un determinado número de litros o cualquiera de las anteriores combinadas. Para el diseño de estas consultas se utilizarán las posibilidades del programa gestor o se programarán directamente en lenguaje de consulta estructurado SQL.

Como se tienen vinculados los registros a sus entidades gráficas se podrá visualizar sobre el modelo 3D aquellas consultas que se estimen oportunas, permitiendo la posibilidad de crear mapas temáticos a partir de los resultados obtenidos.

6.3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.3.1.- INTRODUCCIÓN Y COMISIÓN DE CALES

Todo el proceso de puesta en obra de la consolidación mediante inyección estuvo sometido al control colegiado de los integrantes de la comisión de cales. Dado el carácter interdisciplinar de la misma existía la oportunidad de analizar estos primeros resultados desde puntos de vistas distintos. De este modo, el consenso entre las partes indicaba el camino a seguir, estableciendo los parámetros de la investigación que habían funcionado y proponiendo mejoras en aquellas fases en las que se habían detectado problemas.

La ventaja de tener un control permanente permitía cada semana redirigir todo el proceso. Por ejemplo, se abandonó enseguida el sistema de inyección por gravedad, y posteriormente se constató que no sería necesario ejecutar toda la trama de perforación, sobre todo en las partes bajas, debido a la buena ejecución y estado de conservación de los cimientos. No obstante los resultados principales de la investigación y las consecuencias derivadas de la misma se exponen en el apartado final de conclusiones.

La consolidación de los pilares Q1 y Q3, realizada durante los meses de septiembre a diciembre de 2005, permitió detectar un nivel de huecos importante en las esquinas NW y SW de estos elementos, aquellas que configuran su cara exterior y que lógicamente se encuentran más expuestas. Esta porosidad, que implica una pérdida importante de la masa total del estribo, aumenta a medida que nos acercamos a la cubierta y, por tanto, a las zonas más expuestas a la humedad procedente del agua que escurre desde el alero. Por otro lado, este primer trabajo permitió comprobar la eficacia de las inyecciones de lechadas de cal hidráulica natural NHL5 y experimentar de forma práctica diferentes procesos de puesta en obra.

La experiencia obtenida con esos primeros ensayos permitió elaborar a finales del año 2006 el *Proyecto de consolidación de las fábricas del pórtico*, donde se incluía un apartado específico de consolidación de fábricas mediante inyección. Se trabajó con la hipótesis de realizar la inyección sobre sondeos realizados por rotación simple y con extracción de testigo de 50 mm de diámetro. La lentitud del proceso de perforación y el coste que supone la extracción del testigo llevó a proponer la ejecución de la mayoría de las perforaciones por rotopercusión y con un diámetro de 30 mm e inferiores. Habría un pequeño número de perforaciones de control con extracción de testigos. Por otro lado, para garantizar la penetración de las lechadas y acelerar también el proceso de ejecución de las inyecciones se decidió realizarlas con una presión siempre inferior a los 3 kg/cm² en la boca de la inyección.

Con todos los datos obtenidos tras acabar la consolidación de las fábricas del pórtico en el año 2007, la comisión de cales pudo establecer las conclusiones más relevantes de este estudio, en aras a aplicarlas a los siguientes trabajos de consolidación que se iban a desarrollar, especialmente aquellos que tenían que ver con las zonas inestables de la catedral: los pilares de la nave y el crucero sur.

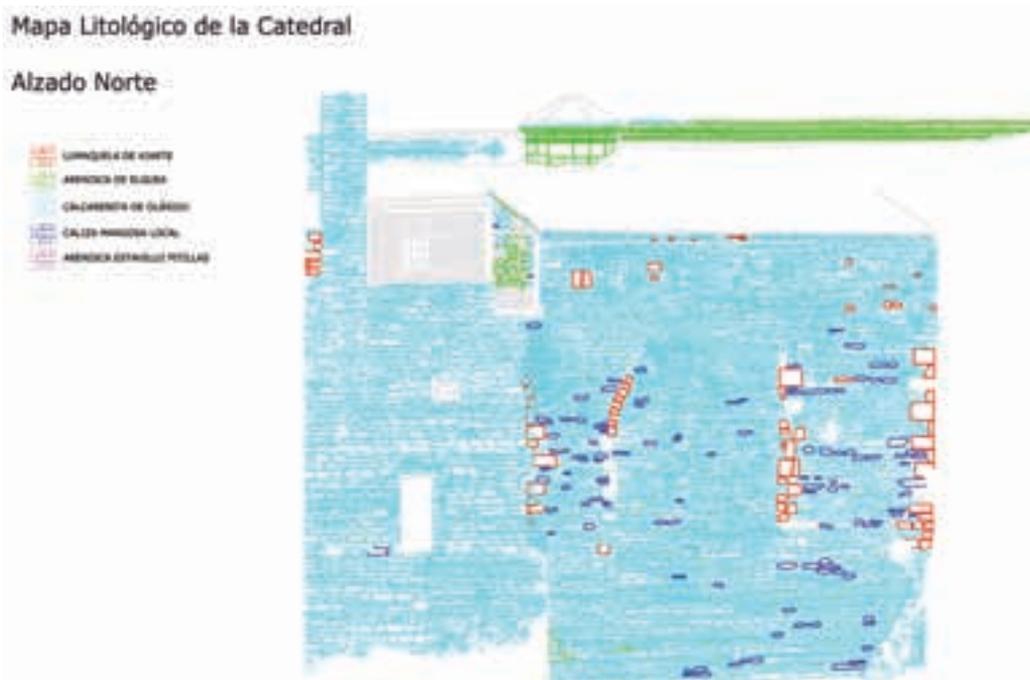
6.3.2.- LA CONSOLIDACIÓN DEL PÓRTICO

En este apartado se realizará una reordenación de todos los resultados obtenidos de la inyección en la zona del pórtico. Lo primero que hay que señalar es que se han obviado los datos de la zona interior ya que las fábricas aparecían en buen estado a medida que se realizaban los primeros taladros con recuperación de testigo. Además para evitar posibles daños a las portadas monumentales se descartaron finalmente todas las inyecciones desde el interior. Por ello los resultados se refieren a las fábricas exteriores del pórtico.

Se presentan inicialmente los alzados de las fases constructivas de la catedral así como los de litologías (Img. 6.27 a 6.30); posteriormente los planos de inyección previstos en el *Proyecto de consolidación de las fábricas del pórtico* (Img. 6.31 a 6.34) y, por último, los resultados de inyección agrupados por elementos y tablas obtenidos directamente de las fichas de control de obra, todo ello con el fin de cruzar datos y poder extraer conclusiones.



Img.6.27. Alzado exterior norte del pórtico con las fases constructivas derivadas del estudio arqueológico.

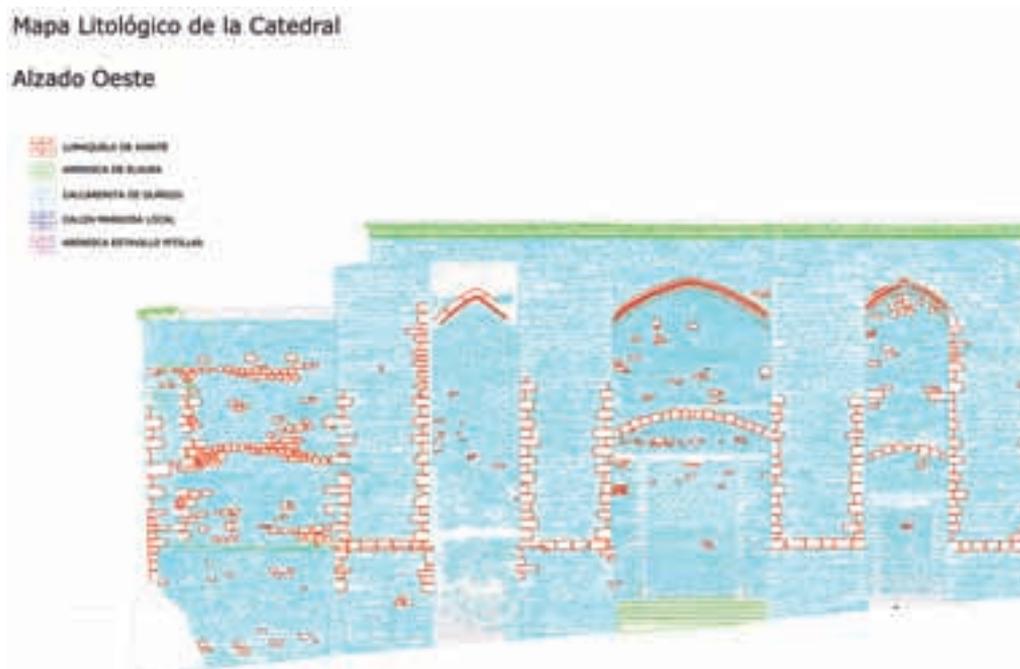


Img.6.28. Alzado exterior norte del pórtico con las diferentes litologías apreciables desde le exterior.

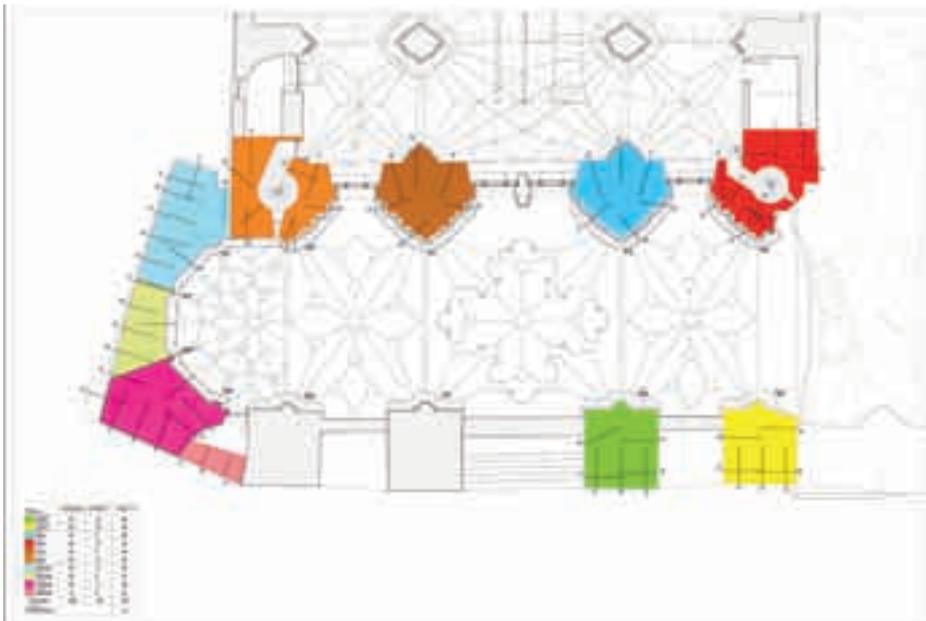


Img.6.29. Alzado exterior este del pórtico con las fases constructivas derivadas del estudio arqueológico.

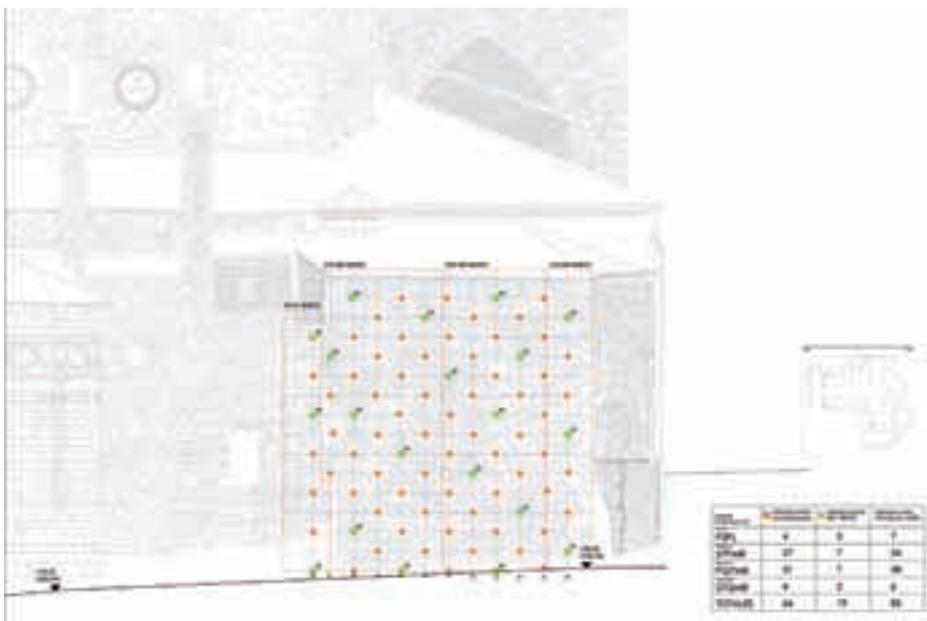
195



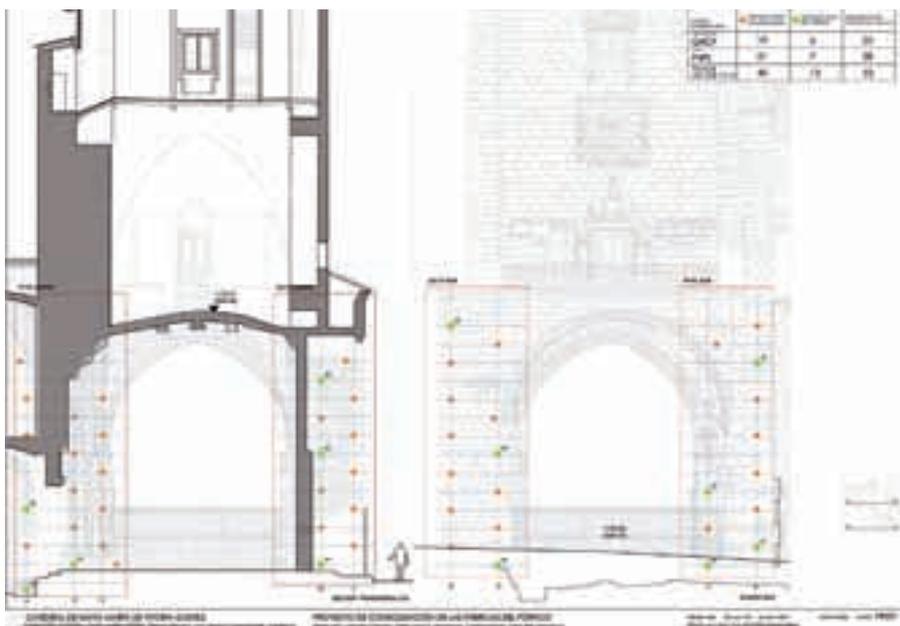
Img.6.30. Alzado exterior oeste del pórtico con las diferentes litologías apreciables desde le exterior.



Img. 6.31. Plano en planta de los pilares a inyectar en el pórtico. Los coloreados en blanco representan los pilares Q1 y Q3 ya inyectados en la primera fase de la investigación.

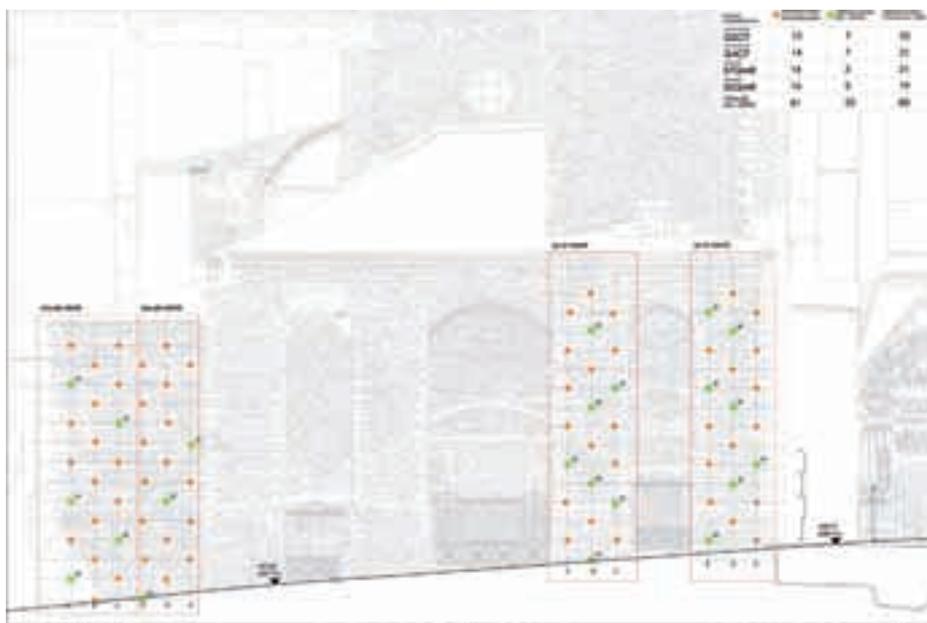


Img. 6.32. Plano del alzado oeste del pórtico con las perforaciones previstas para la inyección de los contrafuertes y muros.



Img.6.33. Plano de alzado sur y sección transversal del pórtico con las perforaciones previstas para la inyección de los contrafuertes.

197



Img.6.34. Plano del alzado oeste del pórtico con las perforaciones previstas para la inyección de los contrafuertes y muros.

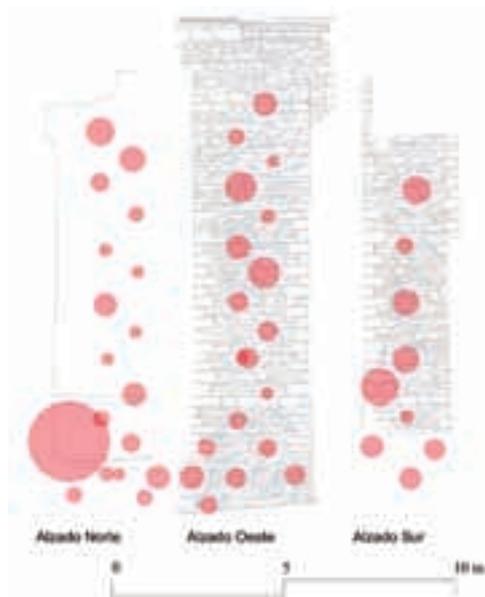
6.3.3.- GEORREFERENCIACIÓN DE RESULTADOS DE INYECCIÓN

Se representan a continuación los alzados exteriores del pórtico desde los cuales se ha ejecutado la inyección (Img. 6-35 a 6.40). El cálculo del radio del círculo representado se ha realizado según la siguiente fórmula: $r = ((\text{volumen inyectado} / \pi) * 0,5) / 7$. En caso de que el radio obtenido sea menor a 0,2m se ha representado un círculo de 0,2m de radio.

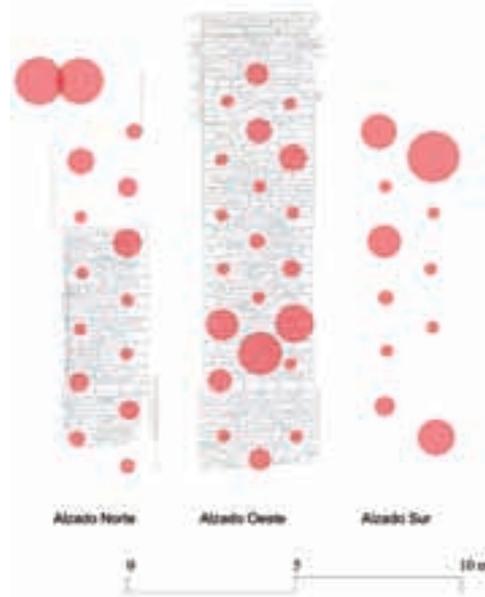
En las Tabla 6.1 se recogen los datos principales del sondeo y su porosidad medida según el grado de recuperación del testigo, así como la capacidad teórica del volumen a inyectar, el volumen realmente inyectado y la diferencia entre ambos parámetros. Además se ha establecido un índice para evaluar la eficacia de la inyección sobre cada perforación. Para ello se divide el volumen realmente inyectado entre la capacidad teórica.

6.3.4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

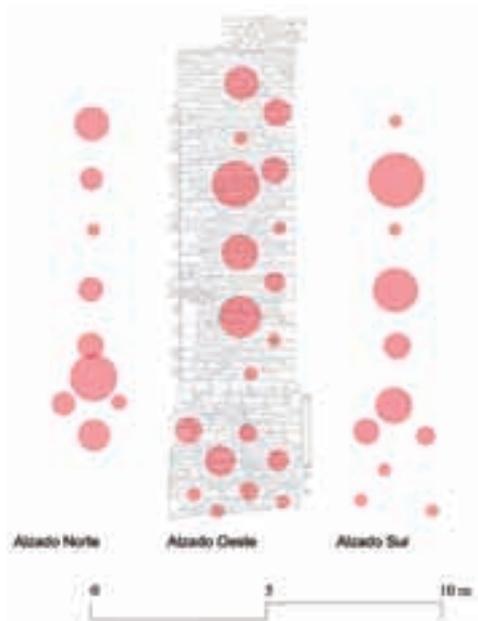
Tras casi tres años de trabajo, los resultados de la experiencia obtenida en la puesta en obra, control y análisis de los datos de la consolidación mediante inyección han arrojado muchas luces con respecto a un tema que padecía de cierto oscurantismo. Era conocida su aplicación sistemática en restauración, especialmente con morteros y lechadas de cemento, pero en la mayoría de los casos sin un estudio más exhaustivo que permitiera reconocer la validez y funcionalidad de todo el sistema.



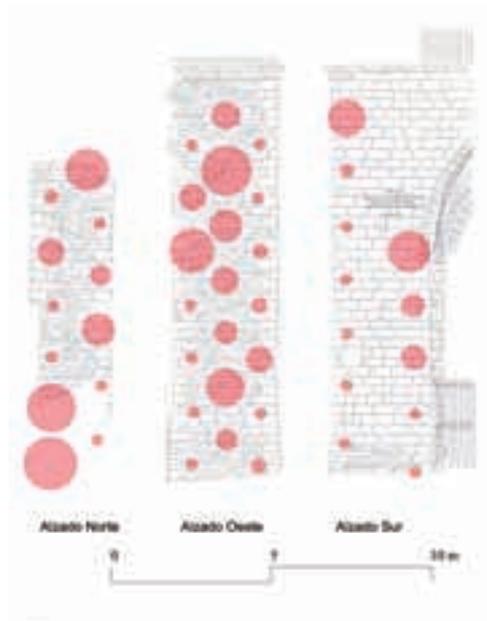
Img. 6.35. Plano de los alzados del pilar-contrafuerte Q1, con representación del volumen inyectado por perforación.



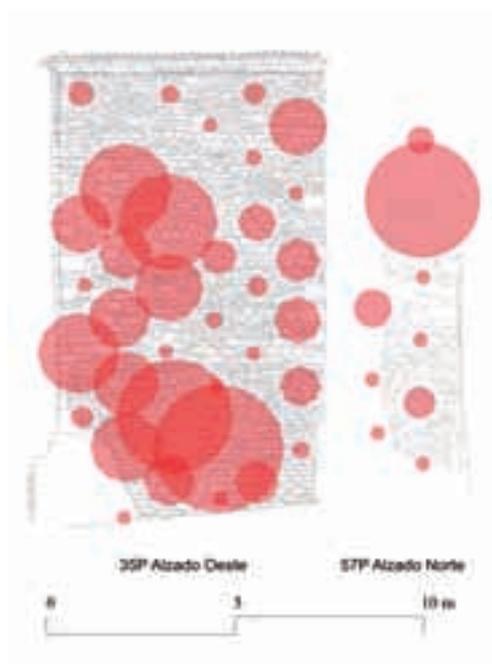
Img. 6.36. Plano de los alzados del pilar-contrafuerte Q2, con representación del volumen inyectado por perforación.



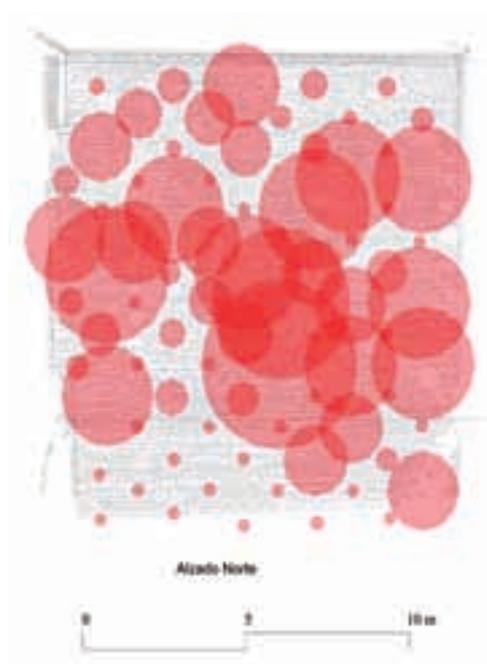
Img. 6.37. Plano de los alzados del pilar-contrafuerte Q3, con representación del volumen inyectado por perforación.



Img. 6.38. Plano de los alzados del pilar-contrafuerte Q4, con representación del volumen inyectado por perforación.



Img. 6.39. Plano de los alzados del muro 35Q, con representación del volumen inyectado por perforación.



Img. 6.40. Plano de los alzados del muro PQ7, con representación del volumen inyectado por perforación.

	Capacidad (A)	Volumen Inyectado (B)	Porosidad	(B-A)	(B/A)
Resumen Q1	115,50	1.039,29	16,04	923,79	9,00
Resumen Q2	36,63	910,50		873,87	24,86
Resumen Q3	113,20	838,93	16,87	725,73	7,41
Resumen Q4	35,24	1.095,00		1.059,76	31,07
Resumen 35Q	25,90	2.804,50		2.778,60	108,28
Resumen 57P	8,68	493,50		484,82	56,85
Resumen PQ7	65,95	8.560,60		8.494,65	129,80
Resumen GENERAL	401,10	15.742,32	16,46	15.341,22	52,47

Tabla 6.1. Resumen de los datos de inyección referidos a todas las inyecciones del pórtico.

Como conclusiones de este trabajo, hay que destacar la enorme visión de los pioneros en la aplicación del sistema para consolidar el relleno interior de los muros de tres hojas, sin alterar a priori el funcionamiento ni el aspecto de las fábricas. Sir Francis Fox no sólo aplicó las inyecciones por primera vez, sino que en su planteamiento de ejecución y puesta en obra están las claves de todo un proceso: relleno de abajo a arriba, utilización de presión, distancia entre tongadas, etc, todo ello bastante artesanal, como se ha podido comprobar en la catedral, y que ha servido como guía general en multitud de ocasiones. La labor restauradora de Fox merecería la dedicación de tiempo y recursos económicos para el estudio detallado de sus intervenciones que están fuera del alcance del presente trabajo.

En cuanto a los primeros arquitectos españoles en aplicar el método allá por el siglo XIX, cabe destacar por encima del resto a Joaquín Fernández Ayarragaray, que curiosamente no llegó a ponerlo en práctica en la Catedral de Sevilla por la negativa

a su propuesta de parte de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. No obstante, su planteamiento destila confianza en un sistema que va defendiendo con una serie de argumentaciones lógicas tanto estructural como constructivamente. No dudaba en transmitir la necesidad de no alterar la configuración exterior del elemento constructivo, sino además su forma de trabajo. Quizás no tenía tan claro la forma de obtener una presión de trabajo adecuada, pero por otra parte introducía una *tiranta* de bronce, que no de hierro, para el atado de las tres hojas que asegurara el comportamiento solidario de las mismas. Es una pena que la fama de su antecesor en el cargo, Casanova, no permitiera llevar a cabo sus planteamientos de inyección, que quizás hubieran evitado 120 años más tarde (2008-2009) la reconstrucción otra vez de varios pilares en la zona oeste de la catedral sevillana. Lo que es común a las intervenciones del siglo XIX es la utilización del cemento como principal ligante hidráulico del fluido de inyección así como no aportar datos empíricos sobre el funcionamiento del sistema, lo cual generaba

multitud de incertidumbres sobre su eficacia real.

En las actuaciones llevadas a cabo en la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz ya se ha visto que la elección del ligante hidráulico ha sido la cal hidráulica natural. Los resultados de los análisis efectuados con las muestras tomadas del fluido a pie de obra han arrojado resistencias a la rotura por compresión a 180 días, de más de 100 kg/cm² y menores de 170 kg/cm², con lo que se garantiza un comportamiento plástico del fluido con respecto a las piedras y se logra evitar algunas de las menos interesantes características del cemento como su baja transpirabilidad, excesiva rigidez y su alto contenido en sales solubles fundamentalmente. En posteriores inyecciones se propone además la utilización como ligante base la cal hidráulica natural NHL-3,5 en vez de la NHL-5, con el fin de obtener un material todavía más plástico pero con resistencia suficiente en el interior de las fábricas.

La necesidad de ejecución de taladros con recuperación de testigo sirve para evaluar la porosidad y, en su caso, obtener información directa sobre el estado interno de las fábricas. Si éste es bueno no es necesario la inyección por lo que se debe comprobar localmente cada zona con este tipo de perforaciones y además hacer un seguimiento permanente con el fin de realizar perforaciones innecesarias en los muros.

Hay que destacar la no necesidad de aplicación de morteros de inyección ya que se han utilizado únicamente lecha-

das. Los morteros dieron problemas de obturaciones en la puesta en obra y ello, unido a una menor fluidez, obligaba al empleo de aditivos para asegurar que llegara a todos los sitios. Un mayor número de componentes complica la puesta en obra por parte de los operarios. Siendo una virtud del proceso la sencillez para memorización de dosificaciones y el orden de la mezcla. De hecho tiene importancia capital dosificar adecuándose a los formatos de los sacos de cal, bien sean de 25 o de 35 kg, siendo éstos menos manejables.

La lechada de inyección ha demostrado tener una capacidad de adherencia excepcional a las litologías y morteros previos, como se ha podido comprobar cuando se ha desparramado por el paramento, así como en las reperforaciones efectuadas en los pilares Q1 y Q3. En los testigos obtenidos reperforando los canales de inyección se obtenía la lechada endurecida y una parte del relleno interior original. Es evidente que la reperforación exacta implicaba colocar la máquina exactamente en la misma posición que la primera vez, algo que resultaba en la práctica imposible a pesar de haber apuntado la orientación de la misma. No obstante el testigo, mezcla de la lechada solidificada y el relleno original, estaban perfectamente unidos, lo que atestiguaba su capacidad cohesionante, que era al fin y al cabo uno de los objetivos principales de la consolidación.

En cuanto al funcionamiento del sistema cabe destacar la necesidad de utilizar la presión para inyectar. Esto implica te-

ner que emplear obturadores como boca de inyección que sean capaces de adaptarse al orificio efectuado, que muchas veces es irregular. De este modo se garantiza la presurización de todo el sistema y la capacidad de llegar a consolidar zonas por encima del nivel de inyección. En cuanto a las presiones han variado de 1 kg/cm² a 5kg/cm², quedando demostrado que con presiones en torno a 2,5 kg/cm² es suficiente para rellenar huecos por encima del nivel de inyección y no se pone en peligro el relleno existente. Las presiones elevadas pueden provocar el efecto de disgregar aun más el descohesionado relleno interior, y provocar asientos imprevistos y peligrosos durante el propio proceso de inyección. Con el nivel de presión indicado se han podido solventar incluso pequeñas obturaciones del orificio sin necesidad de encamisados que dificultarían y encarecerían sobremanera todo el proceso.

El sistema como tal es bastante artesanal: un compresor, un calderín presurizado, una manguera, un obturador y las llaves de corte correspondientes, con lo que es manejable y relativamente barato. El mayor problema que se puede dar durante el proceso es la obturación del sistema, bien por restos de fluido que fragua en su interior, bien porque el propio fluido no esté en condiciones de ser inyectado. Una obturación del sistema supone la pérdida del canal de inyección, con lo que supone hacer otro taladro a la fábrica y comenzar de nuevo. Para evitarlo es imprescindible mantener limpio todo el sistema (después de cada inyección) y sobre todo comprobar la fluidez de la muestra,

que en este caso tenía que estar entre 7 y 11 segundos, midiendo lo que tarda en pasar medio litro por el cono *marsh*. Además, la modificación del fluidificante para obtener unos tiempos de trabajo abiertos durante más tiempo (5-6 horas) facilita enormemente la puesta en obra ya que la inyección se puede desarrollar de manera continua.

Quizás lo más difícil es evaluar la eficacia de la consolidación como tal por la dificultad de saber exactamente dónde va el fluido de inyección. Para paliar en parte ese problema es interesante que a la hora de inyectar desde un orificio se tenga salida del fluido por otro de los canales previstos. Esto asegura la intercomunicación interna de los poros de la fábrica, y es un dato que debe quedar reflejado en las fichas de inyección para evaluar el alcance de la misma.

En los planos de los alzados exteriores del pórtico se reflejan elemento por elemento las zonas donde mayor inyección ha habido, de manera que a simple vista uno puede deducir en qué zonas se ha producido mayor volumen de inyección y por tanto cuál era la zona con mayor porcentaje de huecos y oquedades. De este modo la esquina noroeste inferior, así como todo el alzado norte correspondiente a PQ7 y a 35Q, son las que mayor volumen de inyección han soportado, 2.772 litros que suponen prácticamente la mitad del total. Este dato se puede relacionar con los diacrónicos cuerpos de fábrica que han ido configurando esta zona, que en su día era la entrada principal de la ciudad y hoy día es el testero de

cierre del ábside del pórtico, con lo que es de suponer que los huecos existentes entre ambas fábricas, rellenos de cascote, han quedado colmatados.

Otro dato del que se puede extraer una conclusión es la poca inyección de volumen desde las zonas de sillería de la fachada sur, así como la prácticamente nula necesidad de consolidar los pilares interiores del pórtico. Parece que la mampostería, que debería estar recubierta por una capa de mortero de sacrificio o revo-co, al no estarlo ha filtrado más humedad al interior de los muros. No es el caso de las zonas protegidas del pórtico como debajo de los aleros, el interior en la zona de las portadas o la propia sillería de la fachada sur. Con ello parece clara que una de las principales causas del deterioro del relleno interior de los muros de fábrica es la presencia de humedad.

Hay que destacar que faltaría realizar un control mediante un estudio no destructivo que permitiera visualizar el relleno y la consolidación de huecos. Los métodos como las radargrafías, termografías, rayos X, etc. son caros y no tienen la precisión suficiente para detectar pequeños huecos a escala arquitectónica, que son los que se necesitan conocer en el relleno interior de los muros. Relleno que, además, está constituido por una heterogeneidad de materiales que imposibilitan la obtención de resultados fiables empleando muchos de esos sistemas.

El trabajo de investigación ha dado como resultado, aparte de la redacción de un pliego de condiciones técnicas parti-

culares para la consolidación de fábricas de la Catedral Santa María, todas las pautas de inyección para consolidar otras zonas. Destacan especialmente los pilares y pilastras de la nave, sobre todo aquellos que se encontraban apeados debido a la posibilidad de asientos. En el transepto sur, otra de las operaciones importantes era la consolidación del contrafuerte de Santa Ana y la capilla de los Reyes. Ambas zonas eran consideradas como las principales zonas inestables de la catedral.

6.4.- APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

Una vez concluida la fase principal del estudio de consolidación de fábricas mediante inyección, y tras la aplicación de todo el sistema a la consolidación de fábricas del pórtico, llegó la hora en el año 2009 de actuar en las zonas más sensibles de la catedral, los pilares de la nave y las zonas inestables de la cabecera. Se describen a continuación de manera breve los aspectos más relevantes en la consolidación de ambas actuaciones que han contribuido a implementar toda la investigación.

6.4.1.- INYECCIONES EN LOS PILARES DE LA NAVE

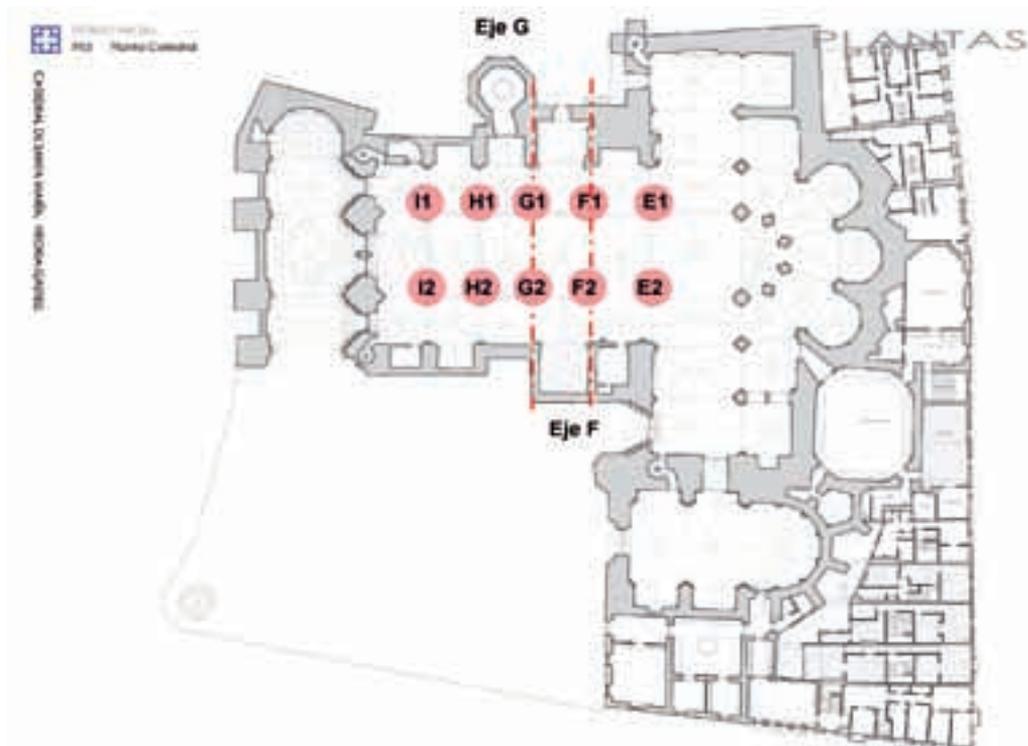
Se extraen aquí los datos más relevantes del análisis hecho por los arquitectos Pablo Latorre y Leandro Cámara para el proyecto de *Restauración de las naves: cimientos y forjados*, redactado en el año 2007.

6.4.1.1.- Introducción

Como desarrollo de las propuestas de intervención planteadas en el plan director y en el anteproyecto de restauración, se acometió la excavación arqueológica del área ocupada por las naves, durante el año 2002, continuando con las ya efectuadas en el año 1997 en el segundo tramo entre pilares -contando desde los pies-. En esta primera excavación se pudo constatar, no sólo el mal estado de los cimientos, sino también que cada uno de ellos presentaba problemas puntuales diferentes: mala ejecución del cimiento, lavado de morteros o destrucción parcial

de las cimentaciones debido a la ejecución de enterramientos una vez colmataada la planta de la catedral. El resto de las excavaciones no vino más que a constatar de nuevo los mismos problemas y las heterogeneidades del resto de cimentaciones de la nave, que eran especialmente graves en los pilares F1 y G2 (Img. 6.41).

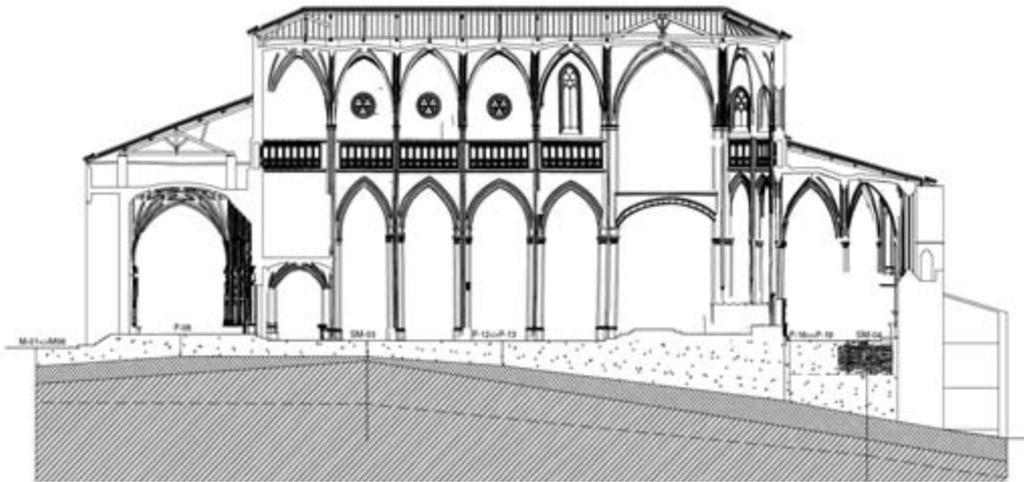
Durante los años 2003 y 2004 se acometió la primera intervención de refuerzo de las cimentaciones halladas, correspondiente a la mejora de las condiciones constructivas y a la estabilidad de las zapatas de los pilares, además del apeo preventivo de dos de éstos.



Img. 6.41. Esquema con la nomenclatura de los pilares de la nave central.

Como ya se preveía por los informes geotécnicos efectuados para el plan director, la potencia de la excavación varía entre algo más de un metro a los pies y algo más de dos metros en el límite con el transepto (Img. 6.42 y Tabla 6.2). Esto, entre otras cosas, provoca una gran heterogeneidad de los elementos constructivos de cimentación, lo que contribuirá al distinto comportamiento de las diferentes secciones constructivas de la catedral, explicando con mejores datos lo ya descrito en el análisis estructural efectuado en el plan director.

Con todo ello se presentó el proyecto de consolidación y obras de reparación de los cimientos de las naves de la catedral y sus capillas adosadas lateralmente, incidiendo tanto en la reparación constructiva de los cimientos como en la mejora de su estabilidad ante los empujes de la iglesia, mediante la disposición de un sistema de acodalamiento de las zapatas a través de arcos de cantería sobre los que habrá de apoyar el forjado que permitirá la recuperación del uso de esta zona. Previamente a la ejecución de los acodalamientos definitivos, era necesaria de nuevo la con-



Img. 6.42. Sección longitudinal por la nave con los niveles de rellenos bajo el suelo de la catedral.

Sondeo	Profundidad	H _a (%)	Y _a (t _n /m ³)	LL	LP	IP	S (%)	PH (kg/cm ²)	CASG.
SM-04	1.55-2.15	11	1.663	29.4	23.3	5.1			CL/ML
SM-04	5.00-5.60	17.7	1.991	36.4	22.4	14	0.036		CL
SM-05	5.00-5.55	12.8	1.938	35.6	22.0	13.5	0.020	0.2	CL
SM-06	3.10-3.60	12.8	2.004	36.3	21.7	14.5		0.15	CL
SM-07	1.10-1.60						0.015	0.4	

Tabla 6.2 Resultados de los sondeos geotécnicos.

solidación interior de las cimentaciones mediante inyección, tarea para la cual se había desarrollado toda la metodología empleada en las inyecciones efectuadas en el pórtico.

6.4.1.2.- Un poco de historia. Evolución del problema

Desde la elaboración de los primeros estudios estructurales durante la redacción del plan director, se pudo apreciar que algunos de los pilares entre la nave central y las laterales de la iglesia presentaban serios desplomes provocados por un giro hacia el eje principal de la iglesia. Estos giros eran especialmente acusados en los dos pilares más próximos al crucero, ejes F y G de estructura, tercero y cuarto en la serie de las arcadas, y más en el lado norte que en el sur.

El conocimiento de la naturaleza rocosa del terreno en que asienta el edificio y el estudio del equilibrio estático de las distintas secciones constructivas pusieron de manifiesto que los cimientos de los pilares eran los elementos estructurales más débiles, cuya gran deformabilidad arrastraba al resto de la construcción. Además, se dedujo por anticipado que esa cimentación habría de ser muy heterogénea, tanto en composición material y constructiva como en comportamiento mecánico, pues las distintas deformaciones padecidas por secciones que en todo lo demás eran muy similares sólo se podían explicar en aquello que no estaba a la vista. También la experiencia general, y la nuestra propia, dice que es habitual encontrar restos de construcciones anteriores, arruinadas o

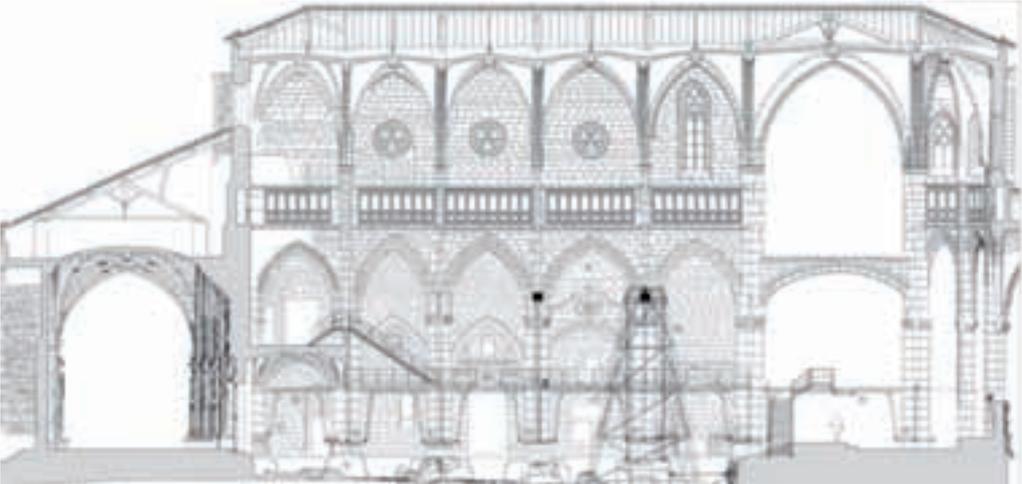


Img. 6.43. Excavación arqueológica de la nave de la catedral en el año 2002 (Quintas fotografías).

demolidas, reaprovechados en los cimientos de las que ahora están en pie.

Y en efecto, ya durante la primera campaña de excavaciones arqueológicas en el tramo inmediato al sotocoro, segundo de las naves, se pudieron ver dos tipos distintos de cimentación, en correspondencia con los dos tipos de pilares cuyas cimentaciones se descubrieron. Las zapatas de los pilares del coro parecían de muy buena calidad, con una mampostería regular bien aparejada y careada, apoyadas sobre restos de una iglesia anterior que, por su parte, eran también de buena calidad. Por el contrario, bajo los pilares siguientes se encontraban otras zapatas, en parte fabricadas con material reutilizado, apoyadas sobre los mismos restos antiguos pero efectuadas sin regularidad ni en la forma ni en la construcción de sus hiladas.

Esta constatación clara de las hipótesis que se había planteado en la primera aproximación a la catedral evidenció la necesidad de descubrir el resto de las



Img. 6.44. Sección longitudinal con la estructura del castillete colocado en el pilar F1.

cimentaciones, tanto de los pilares como de los muros de cierre norte y sur, con el doble ánimo de, primero, tener un mayor conocimiento de la historia del edificio y de la propia ciudad de Vitoria-Gasteiz, y, segundo, poder acometer con resolución una reparación completa de los cimientos. Esta reparación habría de ser una obra en continuidad con las fábricas antiguas que se limitaría a una mejora de sus condiciones constructivas y a un encadenado y acodalado entre todas ellas que ayude al equilibrio global de la estructura utilizando los mismos sistemas constructivos de arcos y empujes del resto de la catedral.

Sin embargo, la aparición de algunas fisuras en dos de los cimientos hallados (F1 y G2) obligó a la colocación de sendos castilletes metálicos de apeo (Img. 6.44 y 6.45). Especialmente preocupante fue el caso del cuarto pilar del lado norte F1 que obligó a modificar puntualmente el cri-



Img. 6.45. Castilletes de apeo en los pilares F1 y G2 de la nave central.

terio de consolidación establecido, recurriendo a un sistema más rápido de consolidación mediante un encamisado con



Img. 6.46. Armadura de acero inoxidable utilizada para la consolidación de urgencia del pilar F1 (Quintas fotografías).

hormigón armado y armaduras de acero inoxidable (Img. 6.46). En los apartados que siguen se da explicación detallada de todo ello.

Dentro de esa variedad de tipos de cimentación descubiertos se puede hacer una primera clasificación entre los que se construyeron como fábricas enteramente nuevas al erigir la cabecera de la catedral según el primer proyecto, de Alfonso VIII, los ejecutados para las naves, siglos XIII-XIV, y los que reaprovechan total o parcialmente los restos más antiguos. Se realiza una descripción somera de todos ellos, que se acompaña con una memoria fotográfica, con un apartado dedicado al estado anterior a la obra precedente, una vez finalizada la excavación arqueológica,

y otro al estado actual, una vez ampliadas las zapatas de cimentación de los pilares y efectuados los apeos provisionales.

6.4.1.3.- Estado de las cimentaciones

El uso como cementerio del aula de la iglesia durante un largo periodo de tiempo, más algunas reformas litúrgicas y de funcionalidad efectuadas entre los siglos XIX y XX, han venido a alterar en algunas partes la calidad constructiva de los cimientos, rompiéndolos parcialmente en algún caso y desnudándolos temporalmente en casi todas partes. Afortunadamente, las roturas y desmontajes parciales sólo afectan a las partes más altas de las zapatas, más cercanas a la superficie

del suelo y por tanto expuestas a continuas intervenciones.

No sucede así con el desnudamiento de los cimientos por excavación en sus laterales, que han venido provocando que las fábricas quedarán descomprimidas lateralmente. Esto en una construcción bien ejecutada no tendría mayor importancia, pero en una zapata irregular sin lecho de asiento horizontal bien efectuado, o con sus límites irregulares por ser parte de un resto anterior semi-demolido, el confinamiento bajo tierra es importante para darle estabilidad.

Otro aspecto favorable es que todas las zapatas, ya sean reutilizadas o de nueva construcción, llegan a asentar en su fondo sobre la roca. No obstante, no se puede asegurar que lo hagan sobre una parte sana de ella, ya que los constructores originales podrían no haber retirado la capa superficial degradada antes de iniciar su construcción.

Contemplar la peor de las posibilidades obligará a considerar una menor resistencia de la roca, si bien sólo el delgado estrato degradado será altamente compresible, encontrándose pronto el estrato más rígido de la roca sana. Este posible asiento del estrato débil habrá sucedido ya históricamente aunque ahora, con la excavación arqueológica reciente, se podría reactivar un ligero asiento si, al desnudar la zapata y el terreno en todo su contorno, se provoca una desecación del material y su pérdida de cohesión. Esto obligó durante los trabajos a una de las intervenciones provisionales previstas, la

cubrición del fondo rocoso con una capa de zahorra de unos 10-15 cm de espesor sobre una malla geotextil que amparase los restos encontrados y, finalmente, condujera a su protección definitiva con una capa de mortero de cal extendida con un espesor de unos diez centímetros sobre todo el fondo rocoso, con el fin de evitar en el futuro esa degradación de la roca y ofrecer además una superficie de acabado del “suelo” de la excavación.

Revisión estructural de los cimientos hallados

A partir de los cálculos estáticos efectuados en el estudio estructural del plan director se hacen ahora unas estimaciones de los esfuerzos globales a los que se encuentran sometidos los distintos cimientos y los estados tensionales que se pueden estimar a los que corresponden esos esfuerzos.

En la tabla 6.3 se da signo positivo a los sentidos oeste-este y sur-norte de cada dirección, tomando como referencia el sistema de coordenadas empleado para la planimetría de la catedral. La vertical descendente se considera positiva, se expresan entre paréntesis los valores estimados por simetría o igualdad de sección, los valores dobles corresponden a los obtenidos en los cálculos estáticos de las secciones que se cruzan en el mismo punto.

En las tablas 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 se recogen las tensiones sobre los planos superior (contacto con el pilar) e inferior (contacto con el suelo) de cada zapata, estimadas a partir de los esfuerzos calculados.

ZAPATA	RESULTANTE	Componente vertical	Componente N-S	Componente E-W
E1	273, 227.6	272.4, 227.4	-15.8	8.0
E2	259.6	259.2	15.6	(8.0)
F1	254.6, 250,1	254.6, 250.0	-21.4	-2.2
F2	234.2	233.6	15.6	(-2.2)
G1	250.8	250.8	(-15.6)	-6.6
G2	(250.8)	(250.8)	(15.6)	(-6.6)
H1	193.4	193.4	(-15.6)	-2.8
H2	(193.4)	(193.4)	(15.6)	(-2.8)
I1	296.8	294.6	(-15.6)	35.2
I2	(296.8)	(294.6)	(15.6)	(35.2)

Tabla 6.3. Tabla con las acciones resultantes sobre el cimiento.

ZAPATA	Resultante iglesia t	Área sup m ²	Área eficaz m ²	Compresión media plano sup. kg/cm ²	Compresión mín/max diagrama kg/cm ²	Empuje horiz. t	Tracción med plano sup. kg/cm ²	Tracción mín/max diagrama kg/cm ²
E1	272,4	2,16	2,16	12,6	11 // 14,3	17,71	0,8	0,6 // 0,9
E2	259,2	2,16	2,16	12	11 // 13,1	17,53	0,8	0,6 // 0,8
F1	254,6	1,57	0,79	16,2	0 // 64,5	21,51	1,4	0 // 5,5
F2	233,6	1,57	1,16	14,9	0 // 40,3	15,75	1,0	0 // 2,7
G1	250,8	1,57	1,34	16	0 // 37,4	16,94	1,1	0 // 2,5
G2	[250,8]	1,57	1,02	16	0 // 49,2	16,94	1,1	0 // 4,2
H1	193,4	1,57	0,84	12,3	0 // 46,0	15,85	1,0	0 // 3,94
H2	[193,4]	1,57	1,49	12,3	0 // 15,7	15,85	1,0	0 // 1,56
I1	294,6	2,49	1,98	11,8	0 // 29,8	15,6	0,6	0 // 2,6
I2	[294,6]	2,49	2,49	11,8	8,3 // 15,4	15,6	0,7	0,6 // 1,1

Tabla 6.4. Esfuerzos y tensiones en el plano superior del cimiento, dirección norte-sur.

ZAPATA	Peso del cimiento t	Resultante total t	Área inf m ²	Área eficaz m ²	Altura zapata m	Compresión media plano inf. kg/cm ²	Compresión plano inferior kg/cm ²	Tracción mín // max plano inf. kg/cm ²
E1	40,1	312,5	5,66	5,66	3,54	5,52	0 // 11	0 // 0,7
E2	25,5	284,7	5,66	5,66	2,25	5,0	0 // 10,1	0 // 0,6
F1	9,8	264,4	2,93	0,82	1,67	9,0	0 // 64,5	0 // 5,5
F2	21,5	255,1	5,63	4,6	1,91	4,5	0 // 11,1	0 // 0,7
G1	13,3	264,1	8,37	3,5	1,58	3,2	0 // 15,1	0 // 1,3
G2	10,9	261,7	4,20	3,0	1,30	6,2	0 // 17,5	0 // 1,2
H1	14,7	208,1	4,99	4,99	1,47	4,2	0 // 8,4	0 // 0,7
H2	8,5	201,9	3,37	3,37	1,26	6,0	0 // 12,0	0 // 0,8
I1	7,2	301,8	4,29	3,42	0,84	6,9	0 // 17,3	0 // 1,5
I2	6,6	301,2	3,42	3,42	0,77	8,6	6,1 // 11,2	0,4 // 0,8

Tabla 6.5. Esfuerzos y tensiones en el plano inferior del cimiento, dirección norte-sur.

ZAPATA	Resultante iglesia t	Área sup m ²	Área eficaz m ²	Compresión media plano sup. kg/cm ²	Compresión mín // max diagrama kg/cm ²	Empuje horiz. t	Tracción med plano sup. kg/cm ²	Tracción mín/max diagrama kg/cm ²
E1	227,6	2,16	2,16	10,54	0 // 21,07	8,1	0,38	0 // 0,75
F1	254,6	1,57	1,57	16,21	15,63// 16,8	-2,2	0,14	0,13// 0,15
G1	247,4	1,57	1,57	15,76	11,82// 19,7	-6,7	0,43	0,3 // 0,5
H1	193,8	1,57	1,47	12,34	0 // 26,37	-2,8	1,78	0 // 0,4
I1	304,8	2,49	2,23	12,24	0 // 27,34	35,2	1,41	0 // 3,3
E2	[227,6]	2,16	2,16	10,54	8,53// 12,54	8,1	0,38	0,3 // 0,46
F2	[254,6]	1,57	1,57	16,21	14,61//17,82	-2,2	0,14	0,12// 0,15
G2	[247,4]	1,57	1,38	15,76	0 // 35,86	-6,7	0,43	0 // 1,0
H2	[193,8]	1,57	0,64	12,34	0 // 60,56	-2,8	1,78	0 // 0,9
I2	[304,8]	2,49	2,28	12,24	0 // 26,74	35,2	1,41	0 // 3,15

Tabla 6.6. Esfuerzos y tensiones en el plano superior del cimiento, dirección este-oeste.

ZAPATA	Peso del cimiento t	Resultante total t	Área inf m ²	Área eficaz m ²	Altura zapata m	Compresión media plano inf. kg/cm ²	Compresión plano inferior kg/cm ²	Tracción mín // max plano inf. kg/cm ²
E1	40,1	267,7	5,66	5,66	3,54	4,73	4,15// 5,31	0,14// 0,2
F1	9,8	264,4	2,93	2,93	1,67	9,02	8,55// 9,5	0,7// 0,8
G1	13,3	260,7	8,37	5,40	1,58	3,12	3,77// 5,89	0,11// 0,16
H1	14,7	208,5	4,99	5,24	1,47	4,18	0 // 7,96	0 // 0,12
I1	7,2	312,0	4,29	3,24	0,84	7,28	0 // 19,26	0 // 2,38
E2	25,5	[253,1]	5,66	5,66	2,25	4,47	4,11// 4,83	0,14// 0,18
F2	21,5	[276,1]	5,63	5,63	1,91	4,91	4,1// 5,70	0,03// 0,05
G2	10,9	[258,3]	4,20	3,18	1,30	6,15	0 // 16,25	0 // 0,42
H2	8,5	[202,3]	3,37	2,06	1,26	6,00	0 // 19,64	0 // 0,3
I2	6,6	[311,4]	3,42	3,02	0,77	9,11	0 // 20,62	0 // 2,43

Tabla 6.7. Esfuerzos y tensiones en el plano inferior del cimiento, dirección este-oeste.

En ellos, los valores entre corchetes son para las resultantes estimadas por simetría o igualdad de secciones con las realmente calculadas. En una columna se han anotado los valores de la superficie realmente eficaz a efectos de resistir las acciones de los pilares y zapatas, siguiendo los esquemas funiculares presentados.

Los valores de las tensiones en cada plano, mínima y máxima, se expresan separadas por barras inclinadas y corres-

ponden a los diagramas triangulares o trapezoidales que responderán a la situación excéntrica de la carga.

Los valores medios se obtienen de dividir los esfuerzos por el área completa de la sección. Como quiera que la situación real de ésta se calculan en los diagramas de descenso de cargas con ciertos márgenes de error, no deben tomarse los valores extremos como reales sino como una estimación que permita evaluar el estado de



Img. 6.47. Cimentación de los pilares F1 y E1.

solicitaciones. De hecho, si las resultantes hubieran de encontrarse aún más descentradas de lo supuesto en los cálculos, los valores máximos podrían aumentar al reducirse las áreas eficaces.

Análisis del estado tensional

De los anteriores cuadros se deben desprender algunos comentarios sobre la relación entre los estados tensionales obtenidos en el cálculo, con las salvedades ya expresadas, y la situación de fisuración y deformación en que están las zapatas y los pilares. Se analizarán uno por uno. Para cada zapata o pareja de ellas se realiza un análisis sobre las dos secciones estudiadas, longitudinal y transversal, con las consecuencias que cabe sacar de la combinación de ambos.

Zapatas E1 y E2 (Img. 6.47 y 6.48). Debido a la distinta profundidad del plano de apoyo en la roca y al descentramiento del pilar sobre la cabeza de las zapatas,

éstas no son exactamente simétricas en su construcción ni en el estado tensional. Sin embargo, se pueden estudiar conjuntamente porque esas diferencias sólo marcan grados en los fenómenos que cualitativamente son los mismos.

Siguiendo la sección transversal de la iglesia, correspondiente al descenso de cargas de la (Img. 6.56), aparecen en el plano superior tensiones de compresión muy moderadas, de entre 11 y 14 kg/cm², muy por debajo de lo que se puede estimar muy prudentemente, como admisible en la fábrica de mampostería que las conforma, unos 100 kg/cm². En el plano inferior las tensiones están en torno a los 5 kg/cm², aun más moderadas.

Sin embargo, en la dirección este-oeste, las tensiones que se alcanzan sí llegan, en el plano superior, a 21 kg/cm², lo cual ya debe suponer la aparición de asientos en la masa del cemento.



Img. 6.48. Cimentación de los pilares E2 y F2.

Las tensiones de tracción que estos diagramas de compresiones producen no alcanzan 1 kg/cm^2 , ni en el plano superior ni en el inferior, en cada una de las direcciones, lo que da tensión diagonal hacia el centro del crucero, de entre 1 y $1,5 \text{ kg/cm}^2$. Esto sin ser una magnitud de importancia, ya llega a provocar la aparición de fisuras de dirección sub-vertical que cortan el cimiento en toda su altura. La dirección de esos planos de corte, pues parecen afectar a toda la sección de la zapata, es perpendicular a la de las tensiones diagonales estimadas, es decir, que son también ellos diagonales respecto a las direcciones principales de la catedral.

Zapata F1 (Img. 6.47). Se trata de la zapata que se encuentra en peor estado, con la aparición repentina de un plano de corte sub-vertical afectando a toda la altura, aproximadamente sobre el eje del pilar, con dirección este-oeste. Este corte co-

rresponde perfectamente a las tensiones halladas en el cálculo.

Sobre la dirección este-oeste (Img. 6.55) no aparecen grandes excentricidades de la carga (que provocarían una fuerte concentración puntual de tensiones), ni acusadas inclinaciones de la resultante (que provocan la aparición de tracciones), por lo que se encuentran compresiones de entre 15 y 17 kg/cm^2 , con tracciones de entre $0,13$ y $0,15 \text{ kg/cm}^2$ en el plano superior, y de entre $8,5$ y $9,5 \text{ kg/cm}^2$ de compresión y $0,7-0,8 \text{ kg/cm}^2$ de tracción en el plano inferior. Todas ellas se encuentran en rangos aceptables, cuando no son simplemente despreciables, como las tracciones en el plano superior.

En cambio, en la dirección norte-sur se presenta tanto una gran excentricidad como una gran inclinación de la resultante, debida a la existencia en este pórtico de los contrafuertes más gruesos de las

naves superiores. La gran excentricidad provoca que se concentren las tensiones de compresión sólo en la mitad de la zapata hacia la nave principal, con un valor máximo nada menos que de $64,5 \text{ kg/cm}^2$. Por su parte, la gran inclinación de ese esfuerzo hace que las componentes horizontales de las tensiones para resistirlo también crezcan hasta los $5,5 \text{ kg/cm}^2$, valor a todas luces excesivo para las capacidades que deben estimarse como seguras en una fábrica de mampostería como ésta.

El diagrama que expresa esa distribución de tensiones es de forma triangular y no comprende el área completa de la sección, pues de otra manera la resultante de las tensiones no anularía a la carga. Esto significa que no se respeta la regla del tercio medio de la sección, que exige que la resultante de las cargas se encuentre en esa zona para que toda la sección se encuentre comprimida y no aparezcan tracciones en la fibra opuesta. Lo cierto es que se podría ajustar el esquema funicular de cargas para cumplir con ese criterio, lo que debe estar haciendo la fábrica por sí misma, pero no se podría comprender hasta qué punto se puede encontrar en el límite de su capacidad de ajuste de las tensiones esta zapata y el pilar.

El hecho cierto es que no se han apreciado fisuras horizontales en el pilar que podrían responder a esa aparición de tracciones, presentándose, en su caso, en la cara que mira a la nave lateral, opuesta a la más cargada.

Lo peor del caso es que al tratarse de una zapata de gran altura, casi dos me-

tros, y de planta poco más amplia que la del propio pilar, esas tensiones no consiguen distribuirse en un área considerablemente mayor durante su descenso. De este modo, tanto las compresiones como las tracciones en el plano sobre la roca alcanzan los mismos valores que arriba.

Estas tracciones sobre toda la altura del cimiento son las que han provocado la aparición de las fisuras de corte tras la excavación. Sin embargo, se puede estimar que una vez rota la sección el soporte ha encontrado una posición de equilibrio centrando la resultante en el área fracturada (la semizapata que da a la nave central) y reduciendo las tracciones hasta llegar al plano del suelo, donde la inclinación de la resultante debe ser resistida adecuadamente por la roca, sin deslizamiento de la zapata.

Aun así, esta hipótesis de comportamiento sirve para explicar lo sucedido tras la finalización de la excavación y al iniciarse el ciclo de dilatación global del edificio, pero no con absoluta seguridad. Para reforzar esta zapata e impedir ese posible deslizamiento de su base se ha efectuado un encamisado con hormigón armado, a pesar de los inconvenientes que este material presenta.

Zapata F2 (Img. 6.48, 6.58 y 6.63). Es una zapata constituida por tres fábricas distintas: la más antigua, un resto de la primitiva muralla de la ciudad de Vitoria-Gasteiz y de un torreón de la misma; la siguiente, coetánea a la catedral, completa los restos anteriores hasta conformar una base aproximadamente rectangular;

la tercera, una ampliación de esa base hacia la nave central para dar apoyo al arco codal desaparecido posteriormente. La trabazón entre las distintas fábricas es bastante deficiente, presentando numerosas coqueras y mampuestos mal trabados, probablemente también por los sucesivos destrozos causados por los enterramientos.

En ella también se produce un gran descentramiento e inclinación de la carga que da lugar a un diagrama triangular de tensiones, si bien no tan forzado como el de la zapata simétrica, F1.

Las tensiones de compresión alcanzadas en la cara superior son de hasta 40 kg/cm², bastante altas aunque dentro de lo admisible, y las de la cara inferior de 11 kg/cm², pues aquí sí aparece un notable ensanchamiento de la base del cimiento.

Sin embargo, esa gran base inferior de apoyo es un tanto discutible dada la gran diversidad de materiales y fábricas presentes. Sin duda, se producirán concentraciones de tensiones sobre algunos puntos, mientras que otras partes no trabajarán de forma adecuada por impedirse la incorrecta trabazón. De hecho, se acusaban en la cara sur y en orientación hacia la nave lateral algunas fisuras de reciente aparición, seguramente debidas al reacomodo de las fábricas tras la excavación.

En cuanto a las tensiones de tracción, éstas son de unos 2,7 kg/cm² arriba y de 0,7 en la base, ésta última calculada con las mismas salvedades.

Al considerar la sección longitudinal, las compresiones se moverían entre 15 y 18 kg/cm², muy inferiores a las calculadas antes, mientras que las de tracción serían de entre 0,12 y 0,15 kg/cm², en el plano superior. En el inferior se encontrarían compresiones de 4 a 6 kg/cm² y tracciones prácticamente nulas (0,05 kg/cm²).

Esta divergencia entre las tensiones encontradas viene a significar que el diagrama, si se considera en sus dos direcciones, tendría una zona de trabajo nulo en la cara orientada hacia la nave lateral, y un crecimiento hacia el centro de la iglesia hasta un límite quizá no tan alto como los 40 kg/cm² pero de ese orden, pues el estudio de la otra sección considera que toda la superficie de la zapata es igualmente eficaz, lo que es desmentido por la sección transversal con su diagrama triangular.

En resumen, habrá una alta concentración de tensiones de compresión, con una magnitud por debajo de lo admisible en la cara norte de la parte alta del cimiento, con unas tracciones considerables que pueden provocar el agrietamiento de la fábrica. Pero que al descender hasta el terreno se irán difundiéndose y reduciendo su magnitud hasta valores muy bajos, sobradamente admisibles tanto por el suelo rocoso como por la propia zapata en tracción y compresión.

Zapata G1 (Img. 6.49, 6.59 y 6.62). Se trata también de una zapata compuesta de varios restos anteriores de construcción, si bien más homogéneos y de mejor



Img. 6.49. Cimentación de los pilares H1 y G1.

calidad constructiva que los de la zapata F2. Hay fábrica muy extensa hacia el oeste que por excesivamente amplia no se puede considerar que llegue a trabajar en toda su sección, al menos en su zona más alta, completada hacia el este por un resto de la misma muralla anterior que también se encuentra degradado por la semi-demolición que se hizo de ella, quizá para el reaprovechamiento del material en la obra de cimentación de las naves, y con un recrecido hacia el sur, nave central, que sirvió para apoyo del arco codal demolido en los años sesenta del siglo XX.

Existe en la parte alta de esta zapata un diagrama de tensiones triangular en la dirección norte sur y otro trapezoidal pero muy variable, en dirección este-oeste. Esto significa que el área más cargada es el cuadrante suroeste de la zapata, provocado esto por la doble componente horizontal de la resultante, con dirección final en diagonal hacia esa orientación.

Los máximos calculados para esas compresiones son de 37 kg/cm^2 en la dirección norte-sur y 20 kg/cm^2 en dirección este-oeste. El máximo en la zona mencionada será de unos 40 kg/cm^2 pues, como en el pilar F2, la suposición de que todo el área es igualmente eficaz para el cálculo en esta dirección se contradice con el diagrama triangular que se obtiene para la otra dirección.

Es una compresión admisible para la fábrica, a pesar de su heterogeneidad, si bien también en la cara oriental de la zapata se han presentado algunas fisuras de poca entidad, debidas también seguramente al reacomodo de esta parte de la fábrica de peor calidad.

En ese plano superior se encuentran, en correspondencia con esos empujes laterales, unas tracciones de hasta $2,5 \text{ kg/cm}^2$ en la dirección norte-sur, con otra componente de $0,5 \text{ kg/cm}^2$ en la este-oeste. Ambas vendrían a suponer una tracción en



Img. 6.50. Cimentación de los pilares G2 y H2.

dirección diagonal de unos $2,8$ a 3 kg/cm^2 , bastante alta para la fábrica.

En el plano inferior, en el contacto con el terreno, las tensiones vuelven a ser de pequeña entidad, con diagrama triangular con máximo de 15 kg/cm^2 en dirección norte-sur y diagrama trapezoidal con máximo de 6 kg/cm^2 en dirección este-oeste. Son tensiones de muy pequeña magnitud dado el apoyo sobre una roca relativamente sana.

Las tracciones que corresponden a esos diagramas vienen a dar una tensión diagonal resultante de las dos calculadas en la tablas 6.5 y 6.7, de $1,5 \text{ kp/cm}^2$.

Zapata G2 (Img. 6.50, 6.59 y 6.63). Se trata de una construcción hecha para la cimentación del pilar, sin reaprovechamiento de fábricas anteriores, a la que se añade en su flanco norte orientado hacia la nave central el cimiento de la pilastra que soportaba el arco codal demolido. Es

igual a la cimentación del pilar F1, pero con una altura mucho menor, lo que hace que las tensiones se reduzcan algo al llegar al suelo.

En el plano superior se alcanzan máximos de compresión de 50 kg/cm^2 en dirección norte-sur y de 36 kg/cm^2 en dirección este-oeste, ambas sobre sendos diagramas triangulares de tensiones. Esto significa que es el cuadrante noroeste el que está más cargado, con una tensión de hasta 50 kg/cm^2 . Es justamente en este lado oeste de la zapata donde se han visto aparecer algunas fisuras tras la excavación y el rejuntado provisional de la fábrica.

Corresponden a estas compresiones inclinadas componentes de tracción de hasta $4,2 \text{ kg/cm}^2$ en la dirección norte-sur y de 1 kg/cm^2 en la este-oeste, lo que da una tensión conjunta diagonal hacia el noroeste de $4,3 \text{ kg/cm}^2$, muy alta para las capacidades de una fábrica.



Img. 6.51. Cimentación de los pilares I1 y H1.

En el plano inferior, sobre la roca, se obtienen tensiones de unos 17 kg/cm^2 en compresión en el cuadrante noroeste, sobre ambos diagramas triangulares, norte-sur y este-oeste y tensiones de tracción de entre 0,4 y 1,2, con un vector diagonal de $1,3 \text{ kg/cm}^2$ hacia el noroeste.

Estas tracciones en toda la altura, aún con la disminución de su magnitud al descender hacia el suelo, son las responsables de que hayan aparecido las fisuras mencionadas, no tienen la amplitud de las del pilar F1 y no justifican una intervención tan rígida como el encamisado de hormigón propuesto allí, pero sí un refuerzo inmediato con fábrica de mampostería ligeramente armada envolviendo todo el cimiento antiguo.

Zapatas H1 y H2 (Img. 6.49 a 6.52 y 6.60, 6.62 y 6.63). Aunque no son enteramente simétricas ni en su forma ni en las tensiones que llegan a soportar, estas dos zapatas tienen en común una construcción

similar consistente en una zapata de poca altura y ejecución no muy lograda, irregular y con material pétreo de poca calidad, erigida sobre los restos del cimiento de la iglesia anterior, obra que tiene, en cambio, mejor consistencia al estar fabricada con lajas bien asentadas con sus juntas horizontales y tomadas con un mortero de muy buena calidad. Sin embargo, esas zapatas sobresalen en planta del perímetro de los muros anteriores, cimentándose esta parte sobre la roca pero de manera más deficiente.

Las tensiones son muy variables, si bien la estimación hecha para la dirección norte-sur parte de los valores obtenidos en la sección de los pilares F1-F2 –sección transversal 6-, en la que se da el grave problema de los gruesos contrafuertes superiores, que no se da en la sección 18b que muestra los pilares H1 y H2.

Eso quiere decir que el cálculo en esa dirección es probablemente excesivo en



Img. 6.52. Cimentación de los pilares H2 e I2..

la evaluación tanto de la magnitud de la carga como sobre todo de su excentricidad, por lo que deben tomarse con precaución esos valores.

Los valores más fiables, en definitiva, se corresponden con los de la sección longitudinal en la que sí se da simetría a ambos lados de la nave. Para estos dos pilares dan un máximo de compresión de hasta 60 kg/cm^2 en el H2 sobre un diagrama triangular provocado por la gran excentricidad del esfuerzo, pero con una componente de tracción muy pequeña, de tan sólo $0,9 \text{ kg/cm}^2$.

En el otro lado, H1, la tensión de compresión no es tan grande, llegando sólo a 46 kg/cm^2 , pero la de tracción sí llega hasta 4 kg/cm^2 . Sin embargo, la buena calidad de la zapata y, sobre todo, su pequeña altura hasta llegar al muro antiguo han hecho que resista muy bien esas tensiones sin que hayan aparecido fisuras en las zapatas.

En el plano del cimiento las tensiones llegan a ser en el H2 de hasta 60 kg/cm^2 , muy grandes para la fábrica aunque admisibles con tracciones muy pequeñas, de sólo 1 kg/cm^2 , al tratarse de una carga muy excéntrica pero prácticamente vertical.

En resumen, aunque las tensiones llegan a ser altas la relativamente buena calidad y la pequeña altura de estas zapatas han hecho posible que no aparezcan fisuras y que se puedan considerar en buen estado.

Zapatas I1 e I2 (Img. 6.51, 6.52, 6.61, 6.62 y 6.63). Son las fábricas mejor ejecutadas de las cimentaciones de las naves, formadas con unos aparejos de mampostería regular, bien concertada y homogénea, careada exteriormente -lo que denota su construcción aérea, no en zanja- con una planta octogonal regular aunque no equilátera, bien adaptada a los pilares que han de soportar.



Img. 6.53. Anillos de mampostería colocados sobre la cimentación de los pilares F2, G2 y H2.

A pesar de ello, la presencia del coro apoyado sobre los pilares induce una gran carga sobre ellas y una fuerte componente horizontal en la dirección este-oeste, donde no hay contrarresto a las bóvedas del coro.

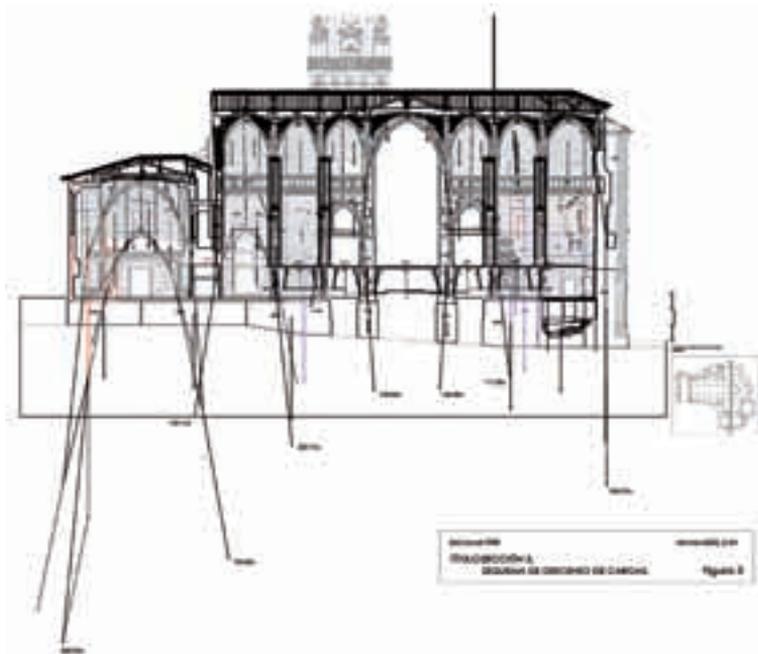
Así, las tensiones en la cara superior llegan a ser en esa dirección de hasta 30 kg/cm^2 con un diagrama triangular. Aunque en las tablas se recogen tensiones similares para la sección norte-sur, lo cierto es que aquí estos diagramas son muy irrealistas al aplicarse los correspondientes al tramo donde no hay coro y las cargas son menores. Por ello se aceptan como un aumento de la seguridad del cálculo.

A esas compresiones corresponden tracciones de hasta $3,3 \text{ kg/cm}^2$, bastante

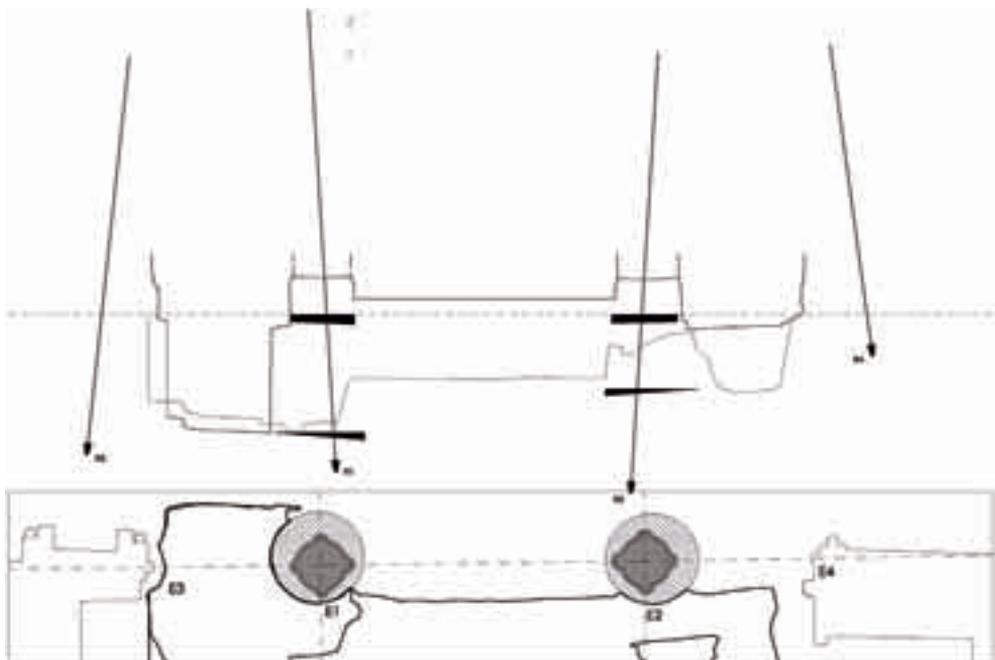
altas para las capacidades de una fábrica pero admisibles en este caso por la buena calidad de éstas.

En el plano de asiento, las compresiones se reducen a unos 20 kg/cm^2 , dado que no es mucha la ampliación de la sección resistente que se produce respecto a la planta del pilar. Las tracciones quedan en $2,5 \text{ kg/cm}^2$.

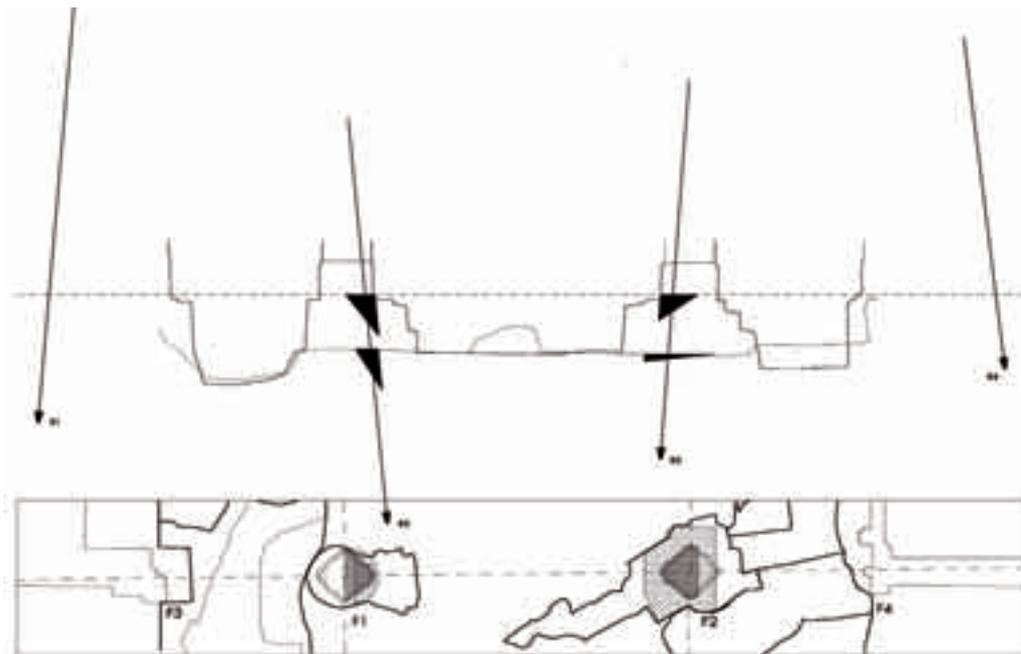
Estado previo a la inyección (Img. 6.53 y 6.54). Tras la primera consolidación de urgencia efectuada en torno a las zapatas de los pilares de la nave mediante anillos de mampostería, quedaba pendiente la consolidación interior de su núcleo mediante inyección (imágenes anillos de mampostería).



Img. 6.56. Esquema de descenso de cargas en la sección transversal hacia oeste.

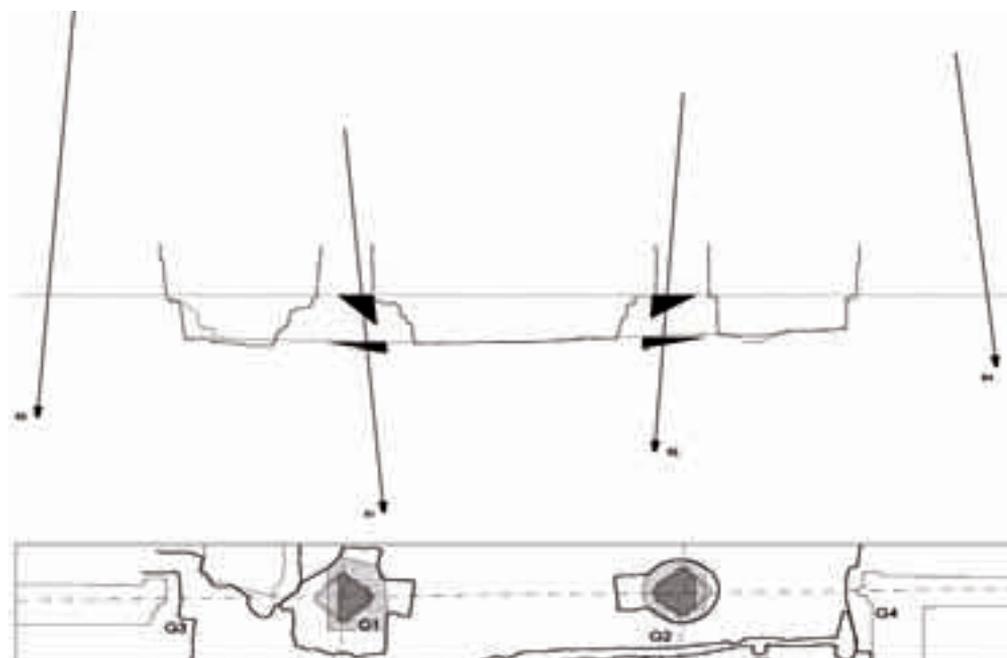


Img. 6.57. Solicitaciones en las zapatas de los pilares E1 y E2.

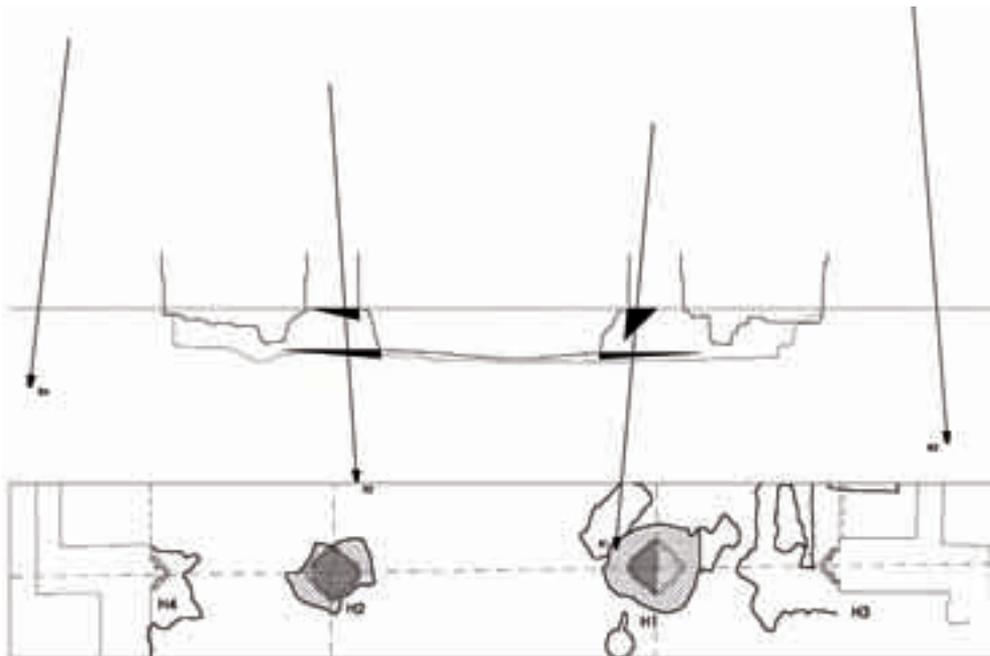


Img. 6.58. Solicitaciones en las zapatas de los pilares F1 y F2.

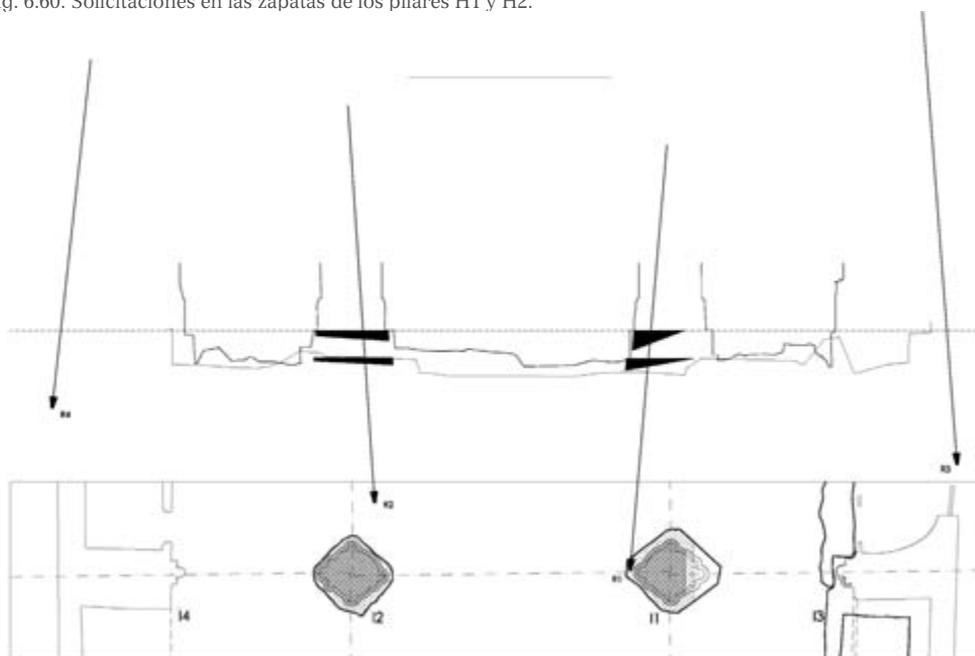
223



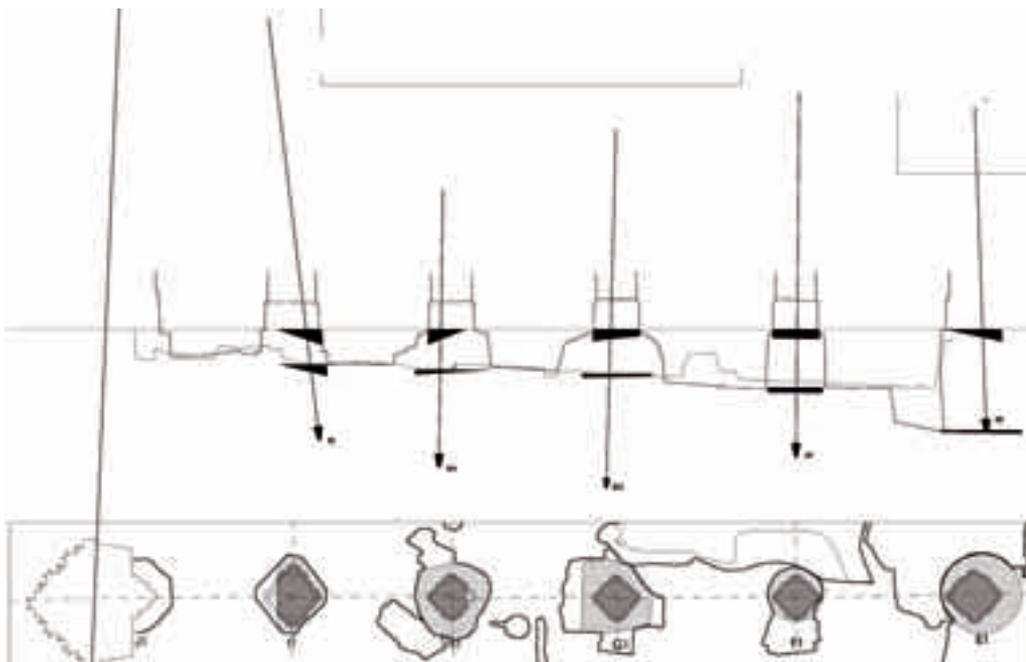
Img. 6.59. Solicitaciones en las zapatas de los pilares G1 y G2.



Imq. 6.60. Solicitaciones en las zapatas de los pilares H1 y H2.

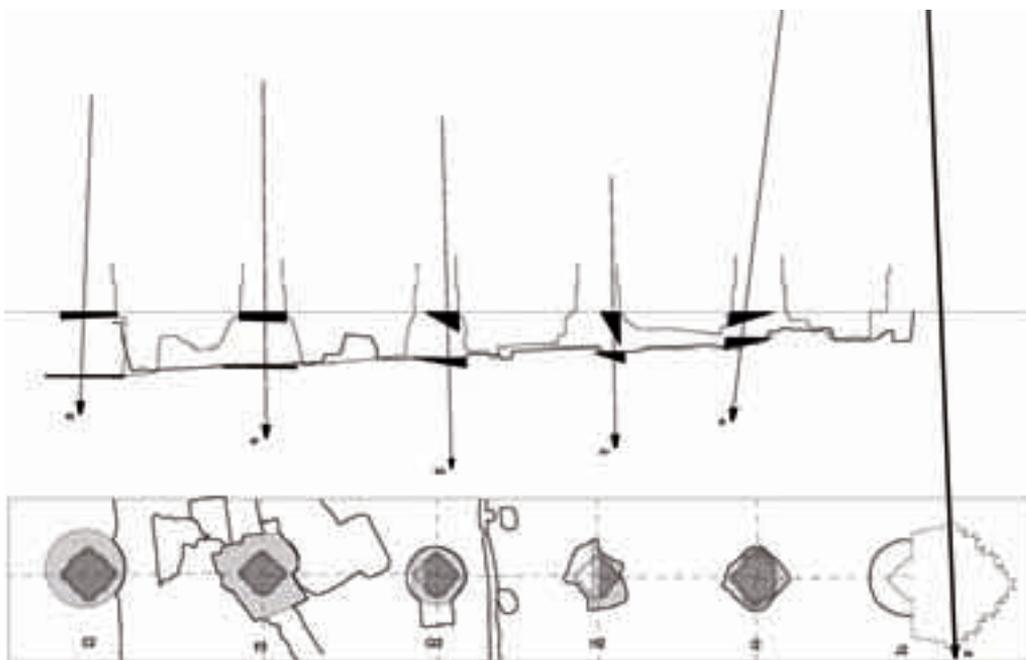


Imq. 6.61. Solicitaciones en las zapatas de los pilares I1 e I2.



Img. 6.62. Solicitaciones en las zapatas de los pilares I1, H1, G1, F1 y E1.

225



Img. 6.63. Solicitaciones en las zapatas de los pilares E2, F2, G2, H2 e I2.

6.4.1.4.- Consolidación de los cimientos de los pilares

Antes del refuerzo estructural definitivo mediante encadenados de cantería y arcos planos de arriostramiento entre cimentaciones, las obras pasaban por la consolidación del núcleo interior de las fábricas con la metodología utilizada en la consolidación de fábricas del pórtico.

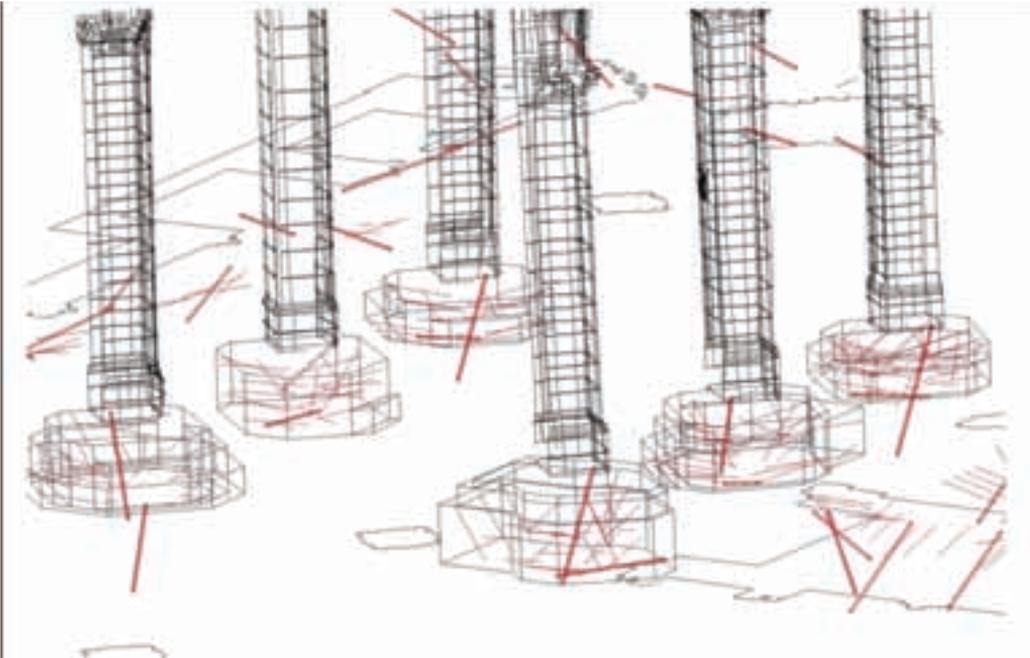
Una vez aumentada la sección resistente en la obra anterior, y tras esperar más de los seis meses en que se puede considerar que los morteros de cal han alcanzado su resistencia final, se podía proceder al refuerzo interior de los cimientos inicialmente existentes. En algunos casos, como en el encamisado de hormigón del pilar F1, se dejaron preparados unos bebederos, dos en los lados largos de los octógonos y uno en los lados cortos, por donde se podría inyectar una lechada de cal hidráulica natural hasta el núcleo interior.

Ante la duda de si asentarían los cimientos al introducir un consolidante que de alguna manera fluidificara el relleno interior durante la propia inyección, se tomaron varias decisiones.

- Se empezó el proceso de inyección por los dos pilares que en peor situación inicial se encontraban, F1 y G2, ya que eran los que tenían un castillete de apeo ejecutado *ex profeso* para entrar en carga descargando el pilar y su cimentación ante cualquier eventualidad. Si la inyección se ejecutaba sin problemas en el resto de los pilares no

serían necesarios otros apeos similares; en caso contrario toda la consolidación se retrasaría notablemente.

- Aparte de la propia monitorización estructural de la catedral se instaló una monitorización específica en ambos pilares para comprobar si, en tiempo real durante la inyección, se producía algún tipo de movimiento.
- La inyección debía ejecutarse de abajo arriba con presiones iniciales más bajas 1Kp/cm^2 . Y para evitar un posible deterioro del núcleo interior durante la inyección se debían ejecutar varios taladros verticales y laterales que sirvieran de salidas de despresurización y control de la inyección. Si la lechada introducida saliera por estos “respiraderos” se podría certificar cómo y por dónde se estaba ejecutando la inyección.
- Se debía minimizar el número de taladros ejecutados con corona de diamante y recuperación de testigo para de este modo evitar la introducción de agua que alterara las condiciones de humedad del interior del cimiento.
- Como quiera que la inyección de las lechadas suponía un aporte de agua muy grande que podría degradar momentáneamente la capacidad portante de los morteros existentes, se hizo necesario esperar a que los refuerzos fueran totalmente eficaces. Y puesto que había que esperar hasta seis meses a que esas lechadas alcanzasen su resistencia máxima para poder hacer las obras de cantería finales, la propuesta de este proyecto fue la de acometer previamente éstas para después realizar las inyecciones. De este modo,



Img. 6.64. Imagen tridimensional con las perforaciones ejecutadas en los cimientos de los pilares para su inyección. En primer plano a la derecha el pilar F1, se distinguen además los taladros ejecutados por rotoperusión más finos.

227

el proceso constructivo se inició con la colocación de los zunchos de cantería que continuaría con las inyecciones de lechadas y terminaría con la construcción de los arcos que soportarán el forjado de piso de las naves.

En lo que respecta a las resistencias obtenidas de las lechadas, se seguían obteniendo unas resistencias finales que sobrepasaban con creces los 100 kp/cm^2 , por lo que se estableció para inyecciones futuras trabajar con NHL-3,5 en vez de NHL-5. Destacar además que más que en las propias cimentaciones de los pilares, salvo los 1.617 litros del pilar F2, se produjo una mayor inyección en las pilastras de las naves laterales más acusada hacia

la cabecera. De todas maneras se volvía a constatar, a tenor del volumen inyectado en los pilares, la propia heterogeneidad en el estado de conservación de las fábricas. Los pilares I1 e I2 presentaban unos testigos tan consistentes que se desestimó su consolidación interna.

Por suerte las inyecciones se realizaron según las previsiones establecidas, salvo en lo relativo a la rapidez de ejecución. Por seguridad y prudencia ante posibles movimientos no se ejecutó ninguna inyección en el resto de los pilares a consolidar, hasta tener la certeza total de que no se habían producido anomalías y que el propio edificio había encontrado su nuevo equilibrio. De hecho, un pe-

queño trozo de dovela del arco toral de la nave lateral que confluía al arco F1 se desprendió una vez quitado los castilletes de apeo. En cualquier caso, fue un alivio no necesitar más castilletes ya que hubiesen supuesto un retraso importante en la obra. Una vez concluidos los trabajos de inyección (Img. 6.64) se ejecutaron los nuevos forjados de madera sobre los arcos de arriostramiento en toda la superficie de las naves.

6.4.2.- INYECCIONES EN LAS ZONAS INESTABLES DE LA CABECERA. LA CAPILLA DE LOS REYES

6.4.2.1.- Introducción

En el año 1991 un trozo de plemento de una de las bóvedas del brazo sur del transepto cayó al interior del templo provocando una alarma general en relación al precario estado de conservación del edificio.

En el año 2010 dentro del *Proyecto de restauración y consolidación de las zonas inestables de la girola y transepto* se procedió a la actuación estructural más relevante hasta la fecha. Consistió en levantar los tres arcos de las bóvedas del transepto sur que confluyen en el contrafuerte del portal de Santa Ana, punto de origen de todo este proceso. Se trató de una operación compleja y delicada pero absolutamente necesaria para volver a dotar a esta parte de la estructura de la catedral de una capacidad de deformación en los años venideros que no implicara el colapso de las bóvedas.

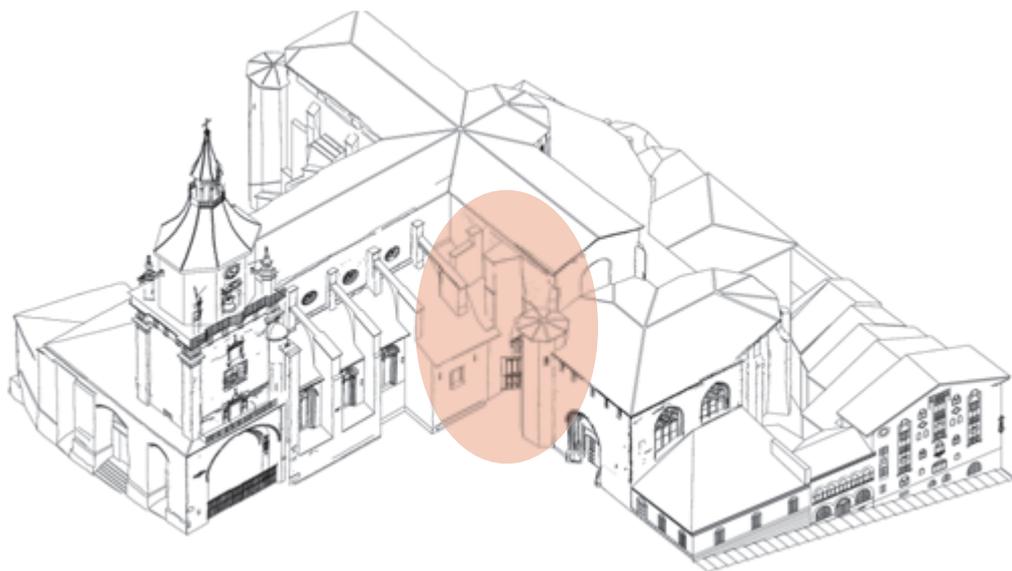
6.4.2.2.- Un poco de historia. Evolución del problema

Ya desde el plan director se apuntaba a esta zona como uno de los puntos calientes del movimiento estructural de la catedral. Ello se debe a un proceso histórico de sucesivas intervenciones constructivas que han venido incidiendo en el contrafuerte por diversos motivos y que se explican a continuación.

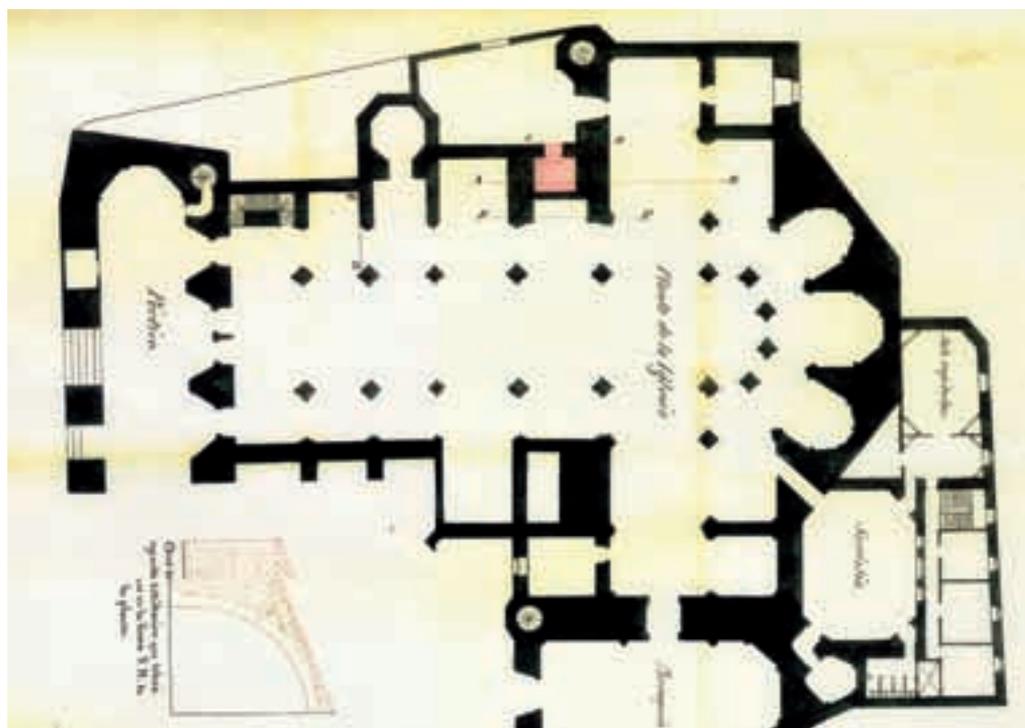
Tras la construcción de las bóvedas de piedra de la catedral en el siglo XVI se abre la capilla de los Reyes en el lateral sur del primer tramo de la nave de la Epístola (Img. 6.65). Esta actuación debilita el muro de carga hasta tal punto que provoca una seria inclinación de la pilastra en que apoya el arco de la nueva capilla, la gran deformación de apertura de éste y seguramente el agrietamiento inmediato del plemento.

Todo ello desembocó en el llamado *pleito del crucero* que enfrentó a la Iglesia Colegial de Santa María con la familia Garibay promotora de la obra de la capilla y que concluye con la condena de esta última. La capilla debe ser clausurada y desmontada su bóveda, restituyendo el muro cortado en el lado sur de la nave. A pesar de toda esta obra parece no resolver definitivamente el problema.

En el siglo XIX el arquitecto Martín de Saracibar se vió obligado a reforzar el contrafuerte lateral de la portada, tapando ésta y cerrando un espacio delante de ella, quedando como una capilla con acceso desde el interior de la catedral (Img. 6.66). Saracibar se encontró con un contrafuerte



Img. 6.65. Axonometría desde el suroeste de la manzana de la catedral con la zona de intervención.



Img. 6.66. Detalle del plano original dibujado por el arquitecto Martin de Saracibar en el siglo XIX.



Img. 6.67. Desmontaje de la mitad del contrafuerte construido en 1856, durante la restauración de Manuel Lorente. (Archivo Municipal de Vitoria-Gasteiz, autor S. Arina. Ref. LFM 397_4(3)).

te completamente reventado y a punto de provocar el colapso en esta parte del edificio. No obstante, el cimientado de este refuerzo se realizó sobre unos rellenos en vez de apoyar sobre la roca, por lo que ha asentado a lo largo del tiempo.

En los años 60 del siglo XX durante la obra de restauración dirigida por el arquitecto Manuel Lorente se decidió recuperar tanto la visión de la portada como su funcionalidad de acceso a la catedral, desmontándose para ello una parte considerable del contrafuerte y reponiéndose su lateral sur con una fábrica de cantería, mampostería y hormigón, poco afortunada y no suficientemente trabada con la



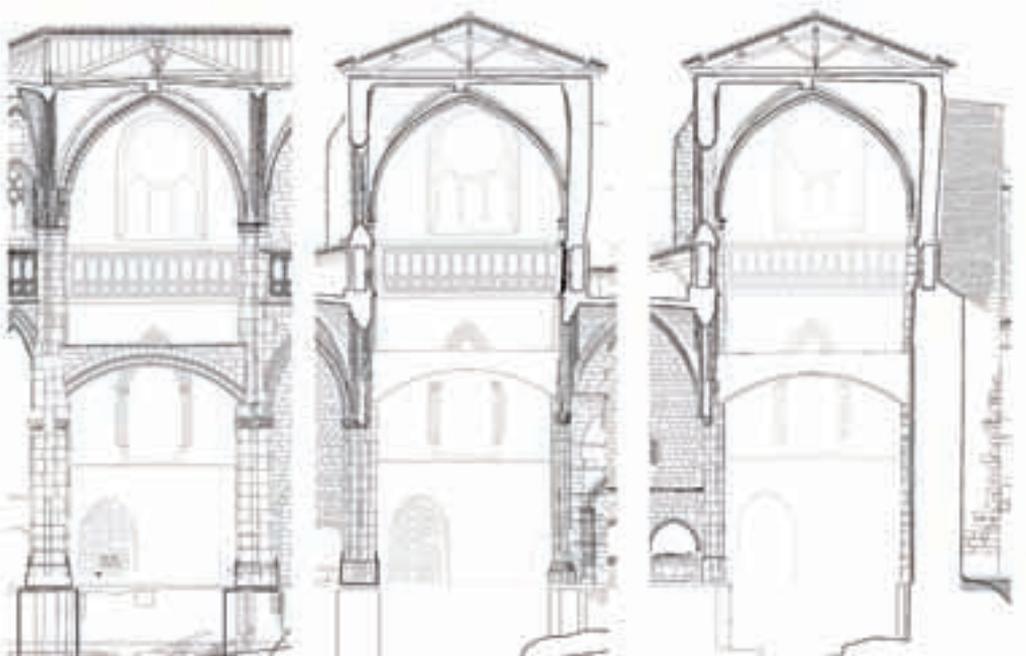
Img. 6.68. Imagen exterior del crucero norte con los castilletes de apeo colocados en el año 2003.

existente. En esa misma obra se realizó una completa eliminación y sustitución de los revestimientos interiores de las fábricas, bóvedas y muros que selló todas las grietas existentes y dejó un testigo temporal muy claro de la evolución posterior de la obra, un punto cero desde el que se puede contar las nuevas deformaciones y apertura de grietas (Img. 6.67).

En 1994 se instala el sistema de monitorización de movimientos, y su evolución hasta la fecha indica una apertura progresiva de alrededor de 1mm por año aparentemente hasta el año 2003. Ese año, la colocación de dos estructuras metálicas de apeo sujetando el muro en el exterior de la catedral parece haber ralentizado el movimiento de apertura del arco (Img. 6.68).

6.4.2.3.- Estado de los arcos

Todo ese proceso de progresiva inclinación hacia el exterior de la parte alta del contrafuerte y de la pilastra interior que soporta los tres arcos que confluyen



Img. 6.69. Secciones transversales de sur a norte de los arcos confluyentes en el contrafuerte de Santa Ana.

en este punto ha venido a provocar una deformación de los mismos caracterizada por:

- Una gran separación de sus puntos de apoyo, es decir, una apertura total de unos 38 cm en su estado actual en comparación a su luz inicial de 825 cm, un 4,6%.
- Descenso de las claves que se puede estimar en:
 - a) Unos 5 cm para el arco perpiaño -DE6- y el ojivo-diagonal más al norte de la portada -el D4E6-.
 - b) Unos 10 cm para el ojivo más al sur -el D6E8-.

En resumen, los tres semi-arcos que vienen a descargar en el contrafuerte de

la portada de Santa Ana han sufrido un cambio de curvatura que prácticamente ha provocado su “enderezamiento”, es decir, la pérdida casi total de curvatura en sus tramos centrales, especialmente en los dos arcos ojivos y no tanto en el perpiaño. Además y de manera lógica, las dovelas del arco se han acomodado a una nueva posición de equilibrio generando articulaciones o rótulas allí donde se concentran mayores esfuerzos (Img. 6.69).

6.4.2.4.- Consolidación de los arcos

Como consecuencia de todo lo anterior, la única forma de conseguir una mayor seguridad de los arcos es mejorar su capacidad de absorber distintas líneas de

presión, lo que pasa por aumentar y regularizar su curvatura acercándola a la que inicialmente tuvieron. De ese modo se evitan los problemas debidos a la asimetría de las cargas o de la traza del arco y se consigue un comportamiento más homogéneo y estable.

La propuesta ejecutada pasaba por una serie de intervenciones que inciden en todos los puntos tratados:

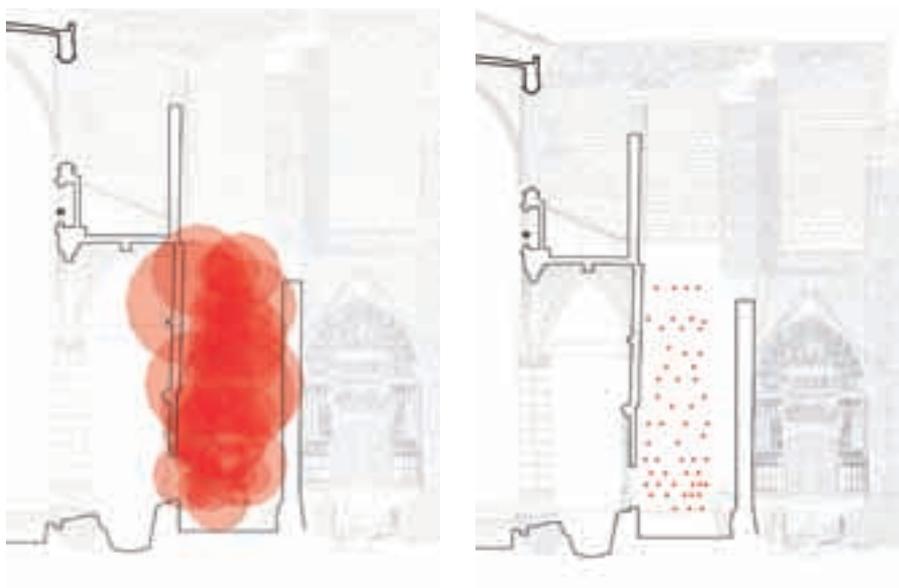
- La reparación y mejora de la consistencia del contrafuerte de Santa Ana, a partir de su cimentación, mediante la sustitución de la fábrica de mala calidad realizada en los años 60 del siglo XX por otra de cantería de piedra caliza con un espesor suficiente para resistir por sí sola los empujes y cargas de las bóvedas.
- Una mejora de la resistencia del propio contrafuerte histórico mediante la inyección de lechadas de cal que reduce el volumen de huecos de su interior y le da mayor consistencia.
- Una recolocación de los arcos de manera que recuperen en lo posible la curvatura original.

La consolidación de fábricas propiamente dicha se centraba por tanto en mejorar mediante inyección tanto el contrafuerte como el muro de la capilla de los Reyes cuya consolidación se debía ejecutar previamente a cualquier movimiento de los arcos. Tras haber determinado en las obras realizadas que las resistencias obtenidas en las lechadas de inyección eran extremadamente elevadas, se optó en esta ocasión por utilizar cal NHL-3,5 en lugar

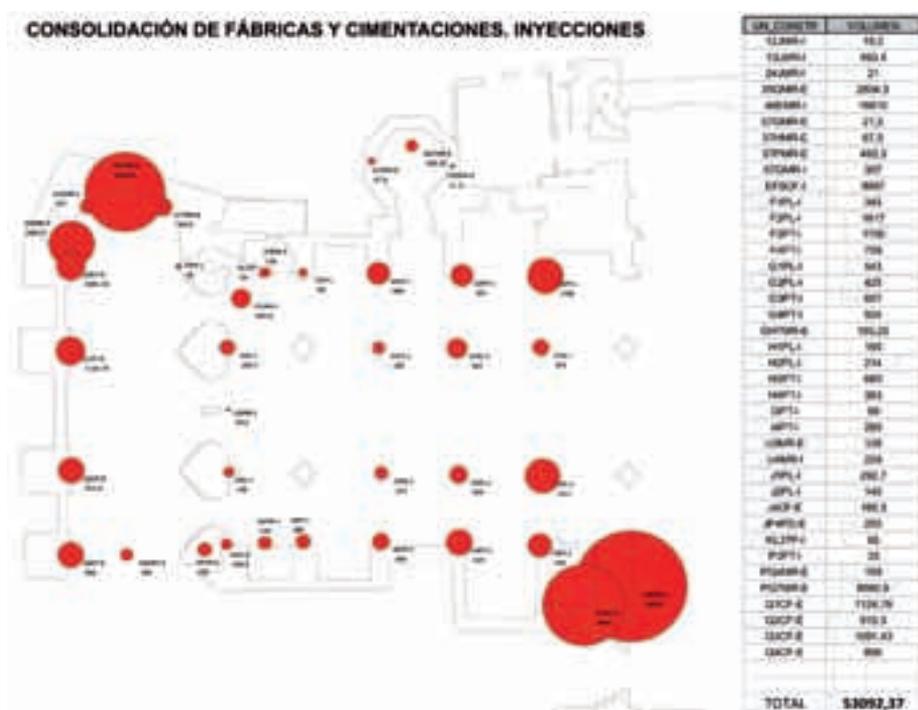
de la NHL-5 empleada en todos las intervenciones anteriores (Img. 6.70). De este modo se pretendía alcanzar unas resistencias finales en torno a los 100 kp/cm², que era lo que se había planteado al inicio de todo el proceso de investigación.

La consolidación fue completada utilizando el sistema descrito, y como resultado destacar los más de 25.000 litros de lechada de inyección, 16.000 litros en el muro y 9.000 litros en el contrafuerte (Img. 6.71). Además, de forma complementaria se han apuntalado provisionalmente los muros junto al contrafuerte mediante sendas estructuras metálicas, que han impedido desde el año 2003 el avance de la inclinación del contrafuerte.

Después de 8 años desde la creación de la comisión de cales el volumen de litros de lechada de cal hidráulica natural inyectados para la consolidación de fábricas, alcanza la cifra de 53.092 litros (Img. 6.72). Dos zonas destacan por encima del resto, la noroeste del pórtico donde se sitúa la fábrica de cierre que tapa la antigua entrada a la ciudad y la capilla de los Reyes, y el contrafuerte de Santa Ana, donde los problemas estructurales a lo largo de los años han devenido en la superposición de fábricas de muy diversa calidad constructiva.



Img. 6.70. Inyecciones ejecutadas en el muro de la capilla de los Reyes.



Img. 6.71. Plano resumen del volumen de litros inyectados en las obras de consolidación ejecutadas hasta finales de 2010.





- 7 -

LA CAL APLICADA A
LA RESTAURACIÓN
DE LA OBRA
ARTÍSTICA
VINCULADA A LA
ARQUITECTURA

7.1.- INTRODUCCIÓN

Los movimientos estructurales de las fábricas del edificio, las filtraciones de humedad que siempre introducen sales solubles y las intervenciones anteriores que intentaron solucionar muchos de los problemas aplicando morteros y lechadas de cemento son factores que influyen en todos los elementos que configuran el edificio, entre ellos los elementos artísticos tales como sepulcros, escudos, capiteles, claves, nervios y plementos. Todo ello deriva en daños de diverso tipo: piezas descolgadas, disgregación de morteros y material pétreo hasta crearse grandes huecos de separación entre los elementos, grietas y fisuras, juntas abiertas, desgastes, erosión en la superficie pétreo y revestimientos desprendidos.

Como es conocido, el cemento se ha estado empleando profusamente en todas las modalidades de lechadas y morteros, para la restauración de monumentos antiguos desde principios del siglo XX, y se generalizó a mediados de siglo, época de posguerra en Europa, probablemente debido a esa urgencia por reparar todo lo destruido en la guerra y a la propiedad del cemento de fraguar rápidamente. Las nuevas restauraciones que en estos últimos años se están realizando a edificios ya restaurados permiten la revisión de las antiguas intervenciones, y se han observado varios problemas que a largo plazo han surgido debido a su empleo. De forma genérica se podrían resumir en la mayor rigidez y menor elasticidad de los morteros y lechadas de cemento que los materiales originales del monumento, su menor porosidad -lo

cual los hace menos transpirables-, y su aporte de sales solubles, cuyo tipo variará en función del cemento empleado, además de las diferentes reacciones de éstas con los componentes de los materiales de uso tradicional como la piedra o el mortero de cal o yeso.

Siendo conscientes de la importancia primordial que los elementos artísticos tienen para la singularidad del conjunto del monumento y de la necesidad de que evolucionen de forma similar al resto del edificio, se ha continuado la misma línea de trabajo que la seguida para toda la catedral, buscando soluciones con un material como la cal, tanto aérea como hidráulica natural, compatible con el material original.

A continuación se describirán los principales problemas encontrados, que son las piezas descolgadas, los huecos y grietas profundas, las juntas y morteros de acabado, las fisuras, desgastes y erosión de la superficie y los revestimientos desprendidos, exponiendo la solución adoptada para su consolidación y la metodología de trabajo llevada a cabo.

7.2.- PIEZAS DESCOLGADAS

Las bóvedas son especialmente sensibles a los movimientos periódicos de un edificio, a su asentamiento, a las filtraciones de humedad o a la falta de cohesión de los materiales. Ello puede dar lugar al desplazamiento de alguna de las piezas que lo componen, llegando a descolgarse en ocasiones. El problema se produce

cuando el movimiento es aún activo y la pieza no ha acabado de asentar.

En el pórtico estaban descolgadas algunas dovelas de los nervios de la bóveda de la capilla renacentista de Los Paternina y también algunas, aunque menos, de la bóveda de la portada del Evangelio. La separación entre dovela y plemento variaba entre 1 y 5 cm aproximadamente.

Tratamiento

Para rellenar la separación entre las piezas descolgadas y la plementería se empleó el mortero de inyección utilizado para la consolidación de las fábricas, y se elaboró en el laboratorio una lechada de cal hidráulica que lleva en su composición árido de menor granulometría a la que se añadió un fluidificante para que discurriera mejor y poder así acabar de llenar los posibles vacíos o huecos más pequeños.

Para cerrar las zonas de separación se aplicó un mortero de relleno, de cal hidráulica y árido grueso, similar al que se empleó para huecos y grietas profundas.

Como en el resto del monumento, sobre ellos se aplicó un mortero de acabado, de cal aérea y áridos que entonarían bien con la piedra del pórtico, mortero que será descrito más adelante en el apartado de juntas y morteros de acabado.

Aplicación

En primer lugar se aparearon aquellas dovelas que se habían descolgado recientemente, con una separación al plemento de más de 2 cm. Fue un apeo sencillo realizado con puntales y madera.

Realizado esto, se rellenaron las aberturas grandes entre plemento y dovela con el mismo mortero que el empleado para la consolidación de las fábricas hasta que dejó de penetrar para introducir después la lechada de cal hidráulica, completando así el llenado de vacíos.

El mortero de inyección se introdujo con jeringuillas cortadas a las que se les añadió un tubo de plástico flexible de 1 cm de diámetro y 50 cm de longitud aproximadamente, o con mangas manuales a las que se les añadió el mismo tubo. Con este último sistema se obtuvo un mejor resultado.

La lechada de inyección se introdujo con una jeringuilla a la que se le añadió en su salida una cánula de entre 3 y 5 cm de diámetro y entre 15 y 20 cm de longitud.

La ejecución del trabajo fue metódica, comenzando siempre desde la confluencia de los nervios hasta el punto central, tapando de antemano los huecos para evitar escapes de material, es decir, realizando pequeñas “presas” y también dirigiendo el material mediante pequeños embudos o bocas. Esto se realizó con pasta de modelar, menos grasa y más resistente que las “plastilinas” comerciales, aunque a pesar de todo con algún aporte al de residuo de grasa. El empleo del yeso para este trabajo no es práctico porque mancha mucho toda la superficie y todos los restos que deja son difíciles de eliminar.

En su momento existían dos grandes inconvenientes a la hora de poner en práctica este sistema que creaban una altísima dependencia del laboratorio.



Img. 7.1. Imagen de pieza descolgada junto a la clave.



Img. 7.2. Imagen de pieza descolgada junto al arranque de la bóveda.



Img. 7.3. Inyección de mortero y lechada de cal hidráulica mediante jeringuillas cortadas, con una prolongación de un tubo de 1cm de diámetro aproximadamente.



Img. 7.4. Inyección de mortero y lechada de cal con manga.

En primer lugar, los aditivos de las mezclas se empleaban en cantidades muy pequeñas que sólo podían medirse con instrumentos de gran precisión, de los que no suele disponerse en el andamio de una obra. También era fundamental el batido del mortero de inyección para evitar problemas de decantación, y para ello se precisaba una batidora industrial.

Y en segundo lugar, el inicio de fraguado en morteros y lechadas es relativamen-

te corto, entre 2'5 y 4 horas, lo cual complicaba mucho la organización del trabajo en el andamio. No se podían preparar con antelación grandes cantidades de material, pues no daba tiempo a introducirlo. Esto obligaba a que en cada jornada de trabajo hubiera que acercarse al menos en dos ocasiones al laboratorio, lo que no lo hacía muy operativo.

Esta preocupación se trasladó al laboratorio, y en la actualidad se ha solucio-

nado esperando hasta el momento de su empleo para añadir la cal hidráulica y el árido a la disolución preparada por el laboratorio, que contiene un cohesionante para evitar la decantación de las arenas.

7.3.- HUECOS Y GRIETAS PROFUNDAS, ZONAS CON EXCESO DE HUMEDAD

En algunas zonas había huecos de gran tamaño, pero no tanto como para admitir la colocación de una pieza de cantería; también había grietas profundas y juntas muy abiertas con bastante fondo que cuando estaban cerca del suelo eran espacios muy húmedos. Se cerraron para evitar que se depositara y acumulara el polvo, la humedad, la contaminación u otros elementos que pudieran afectar a la conservación del edificio, como nidos o colonización biológica.

Tratamiento

Se elaboró un mortero de cal hidráulica natural con árido grueso para el llenado de estos huecos y grietas que, al no precisar CO_2 para su fraguado, era adecuado para introducir grandes cantidades en lugares húmedos y confinados. En estos casos conviene seleccionar un árido cuya granulometría se encuentre entre 0/4 y 0/6 mm, pero con gran proporción de áridos finos para evitar la tendencia a fisurarse, que aporte cuerpo y estructura a la masa.

Este mortero tenía que tener una consistencia suficiente para poder introducirse con espátula o manualmente, sin utilización de fluidificante.



Img. 7.5. Ejemplo de junta en la que tras eliminar la junta de cemento han quedado grandes huecos.



Img. 7.6. Resultado tras la aplicación de mortero de relleno. El mortero se ha rallado y se ha dejado entre 1-2 cm por debajo del nivel del material pétreo para permitir colocar los morteros de acabado.

Puesto que estos morteros no iban a estar a la vista no se tuvo en cuenta el color de la cal hidráulica ni del árido elegidos.

Como el resto de los morteros de fondo, éstos se cubrieron con otro mortero de cal aérea. Esto mismo se ha ido haciendo en el resto del edificio en función del acabado final decidido.

Aplicación

Previamente se humedece el hueco para después introducir el mortero a mano o con espátula. Las manos han de estar siempre protegidas con guantes adecuados. Los huecos y fisuras se rellenan sin llegar hasta el borde de la superficie, dejando alrededor de 1'5 cm para aplicar encima la capa de mortero de acabado.

En estos casos los morteros no precisan esponjarse, sino que conviene que su textura final sea rugosa, que puede ser aportada por el árido grueso o conseguirse mediante el rayado de la masa antes de que endurezca. Esto permite el “agarre” de la capa de mortero de acabado que se aplique posteriormente.

7.4.- JUNTAS Y MORTEROS DE ACABADO

Una junta es el espacio que queda entre las caras adyacentes de las piedras, ladrillos o componentes de una pared de fábrica, que suele rellenarse con mortero.⁽¹⁾

Las juntas variarán en función del acabado que se le quiera dar al edificio o del tipo de construcción del muro. Así, no será lo mismo el rejuntado de un muro de mampostería que el de un muro de sillarejo o de sillares colocados a hueso, por lo que hay muchas modalidades de juntas diferentes.

En la Catedral de Santa María, probablemente en la anterior intervención en la de la década de los 60 del pasado siglo, la mayoría de las juntas fueron picadas y rejuntadas posteriormente con morteros

de cemento. Ésta solía ser una de las labores habituales que se realizaba cuando se acometía la restauración de un edificio histórico, “sanear” las juntas eliminando las anteriores. En dicha operación se perdían o rompían muchos morteros históricos, y las juntas quedaban muy abiertas y desiguales al haber golpeado con el cincel la mayoría de los cantos de los sillares.

En la catedral la mayoría de estas nuevas juntas de cemento estaban fisuradas, separadas del material pétreo original e incluso habían arrancado parte de él. La masa de cemento que se empleó para las juntas tenía una tonalidad gris oscura y no siempre había sido aplicada con suficiente cuidado, de modo que en ocasiones desbordaba sobre los sillares tapando sus cantos, redibujando así el aspecto final de los muros de la catedral, con una presencia estética contundente en el acabado del edificio.

Por todos estos factores, y los explicados en la introducción del capítulo, se tomó la decisión de eliminarlas, salvo en los casos en que esta operación pudiera dañar al material pétreo original. Para ello se emplearon cinces pequeños, de menor anchura que las juntas, y vibroincisores para eliminar las rebabas o restos de cemento que quedaban sobre el material original.⁽²⁾

La eliminación de las juntas de cemento permitió comprobar que los sillares de la fachada principal y el pórtico habían sido colocados prácticamente a hueso, es decir, los sillares estaban casi en contacto, con muy poca cantidad de mortero entre



7.7. Juntas de cemento fisuradas y separadas del material pétreo original, que ya no cumplen su función.



7.8. Muro al que se le han eliminado la juntas de cemento.

ellos. Pero para colocar las nuevas juntas de cemento en la intervención anterior se abrieron superficialmente las juntas cortando en bisel con el cincel los cantos de los sillares. De modo que había una apertura entre sillares de alrededor de 1-2 cm de anchura por 1'5 cm de profundidad.

No sólo las juntas, sino que el resto de acabados como el tapado de alveolos o la reconstrucción de algunos sillares, habían sido realizados también con diferentes tipos de mortero de cemento.

Tratamiento

Los morteros aplicados para juntas y acabados fueron morteros de cal y arena, en proporción 1:3, en los que se varió el árido en función del color y textura que se deseaba conseguir, y se buscó que tuvieran la plasticidad adecuada para adaptarse bien a toda la superficie sin dejar huecos. Como árido se eligieron arenas de la zona cuyo color fuera cercano al del material pétreo de la catedral y con finos suficientes para que los morteros tuvieran una buena estructura y no fisurasen. Teniendo en cuenta que serían determinantes en el aspecto final del edificio, fue necesario realizar multitud de pruebas.

Aunque el tipo de mortero elaborado para juntas y acabados fue bastante similar, había pequeños matices entre ellos en función de su ubicación y, sobre todo, del aspecto final que se quisiera obtener.

Por ejemplo, el pórtico estaba completamente policromado, y para ello se necesitaba una superficie lisa, por lo que se supuso que los morteros deberían ir al mismo nivel que el sillar.

En el caso de la fachada sur algunos sillares tenían graves problemas de alveolización, existiendo grandes lagunas de material pétreo en superficie que podían abarcar a varios sillares. Para hacerlas menos confusas se decidió marcar con otro mortero la junta en las lagunas. Se elaboraron dos morteros, uno para el acabado de lagunas de material pétreo y otro para las juntas. Ambos morteros son de composición similar, pero se varió la granulometría de los áridos seleccionados.

Aplicación

Para conseguir buenos resultados es determinante trabajar bien la masa quitando grumos de la cal para evitar los *caliches*, cuidar su forma de aplicación y finalizar esponjando los morteros. Tras el llenado de huecos, grietas profundas y alveolos con los morteros de relleno, tal y como se ha explicado en el apartado correspondiente, se aplicaron los morteros de junta y acabado.

En primer lugar se humedeció bien la zona con un pulverizador para facilitar el acople del mortero a la rugosidad de la superficie para, después, ir colocando con una espátula la cantidad justa de mortero y al mismo nivel que los sillares, nunca más altos ni sobre el material pétreo, dejando siempre sus bordes a la vista. Se alternaron espátulas de diferente tamaño en función del trabajo a realizar. Cuando comenzaban a *tirar* los morteros se esponjaban, presionando y limpiando con esponjas aclaradas en agua muy limpia y bien escurridas para evitar manchar los bordes y crear velos blanquecinos de cal. Con esta operación se consigue que los morteros queden prietos, bien adheridos y además aflore el color de las arenas.

En el caso del pórtico se colocaron sin que sobrepasaran el nivel de los sillares y de color cercano al tono de éstos.

7.5.- FISURAS, DESGASTES Y EROSIÓN DE LA SUPERFICIE

Por toda la superficie del material pétreo se encontraron pequeñas fisuras y



Img. 7.9. Colocación de mortero de acabado de cal aérea en juntas y alveolo.



Img. 7.10. Detalle de una junta con su mortero de acabado.

zonas bastante desgastadas. Los elementos más expuestos de las fachadas exteriores como pináculos, cornisas y molduras, y en el interior del pórtico las zonas más afectadas por el exceso de humedad, como las bóvedas y el basamento, son las más erosionadas y desgastadas. También el rascado que se realizó entre 1960 y 1964 para eliminar los revestimientos y capas de policromía afectó al soporte pétreo arañándolo y debilitándolo.

Se evitó la aplicación de consolidantes sintéticos salvo en aquellos casos en que fuera imprescindible porque la piedra hubiera perdido su cohesión y fuese imposible realizar cualquier tratamiento sobre ella. Los consolidantes sintéticos empleados hasta el momento no siempre evolucionan adecuadamente. El momento y el modo de aplicación son fundamentales para obtener buenos resultados de modo que factores como las condiciones meteorológicas -sol, hielo o lluvia-, o cómo se realiza la aplicación -brocha, pulverizado, húmedo sobre húmedo, disuelto o no- son determinantes para lograr un buen resultado final. Son muchos los factores combinados que entran en juego en el deterioro del material pétreo de los edificios, y son muy difíciles de reproducir en laboratorio.

El cerrado de todas estas fisuras y desgastes con morteros de cal natural es un buen método de consolidación sin consecuencias negativas aunque, eso sí, precisen ser aplicados por restauradores especialistas.

Tratamiento

En la Catedral de Santa María la mayor labor de consolidación se ha realizado cerrando todas las zonas abiertas de la piedra: fisuras, rotos, desgastes y erosión, introduciendo primero una lechada de cal hidráulica en fisuras y acabando con un cerrado de éstas y protección de desgastes con un mortero de cal aérea muy fino, de la misma composición que el mortero de juntas pero con arenas de granulometría muy fina, 0/0'5, que quepa en las fisuras finas.

Inicialmente se empleó para este trabajo una lechada de cal hidráulica natural que se comercializa actualmente, PLM A, pero, como ya se ha comentado anteriormente, se aprovecharon los trabajos de investigación que se estaban desarrollando en la comisión de cales y se trabajó en la elaboración de una lechada de cal hidráulica natural que tuviera las propiedades necesarias para rellenar pequeños huecos y fisuras. Se precisaban conseguir unos "micro morteros" de cal que atravesaran la aguja hipodérmica y avanzasen a través de los huecos mediante materiales que cumplieren el factor limitante del diámetro de la aguja, es decir, granulometrías de tamaño máximo menor de 0,063 mm.

Fueron muchas las pruebas realizadas hasta que finalmente se consiguió una lechada que pudiera pasar por el diámetro de la aguja hipodérmica, fluyera sin atasarse en la entrada del orificio o fisura y pudiera prepararse en el momento de su empleo. Finalmente se elaboró en laboratorio una lechada de cal hidráulica con nano sílice en disolución.

Aplicación

Antes de proceder a los trabajos de consolidación con micro inyección de lechada se eliminó la suciedad y el exceso de sales solubles.

Hecho esto, se realizaba una primera inyección con alcohol que despejara el camino que recorrería la lechada para, posteriormente, inyectar la lechada de cal hidráulica con jeringuillas y agujas hipodérmicas. Para cerrar en la medida de



Img. 7.11. Fisura en escultura.

lo posible las vías de escape de la lechada de inyección, y evitar así manchas difíciles de eliminar, se utilizaron esponjas, morteros, algodones o plastilinas.

Tras las micro inyecciones se aplicó el mortero con espátulas muy finas y se esponjó al final con mucho cuidado, pues al ser cantidades tan pequeñas se podían perder en el esponjado.

Se ha evitado la aplicación de consolidantes sintéticos salvo en aquellos casos en que era imprescindible pues la piedra había perdido su cohesión y era imposible realizar cualquier tratamiento sobre ella. Se ha comprobado en otros edificios históricos que su empleo puede dar problemas a largo plazo. Son muchos los



Img. 7.12. Cerrado de fisuras con mortero de cal aérea y áridos muy finos.

factores combinados que entran en juego en el deterioro del material pétreo de los edificios que son muy difíciles de reproducir en laboratorio.

7.6.- REVESTIMIENTOS DESPRENDIDOS

Según el *Diccionario de Arquitectura y Construcción* dirigido por Juan Monjo Carrió y Santiago Vega Amado, se entiende por acabado el último tratamiento que sufre un elemento constructivo, y revestimiento el elemento superficial que, aplicado a un paramento, está destinado a mejorar sus propiedades o aspecto, siendo el revestimiento exterior el especialmente preparado para resistir la acción de la intemperie.



Img. 7.13. Superficie con desgaste y erosión.



Img. 7.14. Cerrado de desgastes y erosión de superficie con mortero de cal aérea y áridos muy finos.

Este apartado se dedicará a la consolidación de los revestimientos de la plementería de las bóvedas por ser los directamente relacionados con la investigación llevada a cabo en la comisión de cales.

Los revestimientos de la plementería de las bóvedas tuvieron varios cambios de policromía y fueron reparados en multitud de ocasiones debido a la gran cantidad de filtraciones de agua que han sufrido las bóvedas que, según los documentos encontrados, parece ser que era un problema casi constante. En la intervención dirigida por Manuel Lorente se intentó solucionar el problema encapotando el trasdós de las bóvedas con una capa de cemento de aproximadamente 10 cm, lo que agravó aún más la situación. Antes de la restauración actual se encontró una plementería muy desigual, con grietas, lagunas de material, restos de intervenciones de diferentes épocas a la vista y, sobre todo, muchas zonas de separación entre las diferentes capas de mortero, sobre todo entre el enfoscado y el soporte.

Se pensó que quizás pudiera trasladarse el estudio de consolidación de las fábricas del edificio a la consolidación de los revestimientos de la plementería de las bóvedas, efectuando para ello un cambio de escala, pero realmente este cambio de escala era lo que dificultaba hallar una solución.

De hecho se comenzó investigando las lechadas de micro inyección para el relleno de huecos entre el mortero y el soporte de la plementería, debido a que hasta entonces siempre se había empleado una lechada de cal hidráulica que se comercializa, PLM A, pero de la cual no se conocía el total de sus componentes.

Se elaboraron variedad de lechadas en el laboratorio que luego se iban aplicando para la consolidación de los revestimientos de la plementería y, en función de los resultados, fue desarrollándose la investigación. Con todo, fue complicado y lento encontrar el material adecuado que se ajustase a las necesidades planteadas.

Tratamiento

Se comenzó empleando el producto PLM A hasta que se logró elaborar una lechada de cal hidráulica para que fraguara en el interior, con consistencia para llenar los huecos de separación, que no decantara, y que pudiera atravesar la aguja hipodérmica y que no se detuviera en el orificio de acceso al hueco.

Finalmente fue durante los trabajos de consolidación de fisuras del material pétreo cuando se logró en el laboratorio un material que atendiera a las necesidades planteadas: una lechada de cal hidráulica con nano sílice en disolución, ya descrita en el apartado anterior sobre fisuras, desgastes y erosión de la superficie.

Aunque finalmente la lechada empleada fue la misma que para el relleno de fisuras, su problemática y la metodología de trabajo tiene ciertas particularidades que merecen otro apartado.

Aplicación

En las zonas donde enfoscado y soporte estaban separados se realizaron pequeños agujeros en el mortero, de forma controlada, con un berbiquí manual, y se eliminó la mayor cantidad posible de polvo del interior para facilitar la entrada de la lechada.

Se realizó en la zona a llenar una primera inyección de alcohol que limpiase el camino y permitiera calcular la cantidad de lechada que pudiese penetrar. Tras ello, se procedió a introducir con una jeringuilla y aguja hipodérmica, o cánula de goma de unos 3 – 4 mm de diámetro, la lechada de cal hidráulica natural.



Img. 7.15. Inyección en revestimientos desprendidos.



Img. 7.16. Inyección en revestimientos desprendidos.

Es conveniente realizar las inyecciones partiendo del hueco que está en la zona inferior hasta llegar a la superior para evitar la obstrucción de las vías de acceso a los huecos.

7.7.- DOSIFICACIONES

En este apartado se describen las dosificaciones básicas empleadas en función del tipo de problema a resolver y, aunque de forma orientativa se refieren a apartados concretos, generalmente es necesario combinar varios de estos morteros para dar una mejor solución.

Consolidación de piezas descolgadas, colocación de nuevas piezas.

En ambos casos (morteros y lechadas) se puede incrementar la fluidez de la inyección al no ser característica fundamental la resistencia aportada, comportándose ambas mezclas según los requisitos deseados.

Ustillaje empleado: jeringuillas cortadas, manga, cánulas de 0,5 cm de diámetro, tubo de plástico flexible de 1 cm de diámetro.

Morteros para primer relleno de huecos, volúmenes, grietas profundas y zonas con exceso de humedad.

Morteros con una relación cal/arena de 1:3, consiguiendo una consistencia capaz de ser aplicados con espátula o manualmente y sin utilización de fluidificante. Según requerimiento, existe la posibilidad de utilización de arenas 0/4 mm o de 0/6 mm. Se pueden introducir a mano o con espátula, sin esponjar.

Morteros para juntas, acabados y cerrado de fisuras y zonas desgastadas o erosionadas.

Morteros con una relación cal/arena de 1:3, consiguiendo una consistencia capaz

Mortero de cal hidráulica natural NHL-5	
Relación cal/arena	1:2
Relación arena/mortero	0,26
Aditivo 1 (fluidificante)	1% s/cal
Aditivo 2 (cohesionante) <i>*Es necesario añadir un cohesionante para evitar la decantación de las arenas</i>	1% s/cal
Dosificación Laboratorio	
Cal NHL-5	726 g
Arena 0/2 tostada Laminoria	1.452 g
Agua	566,3 g
Aditivo 1	7,26 g
Aditivo 2	7,26 g

Tabla 7.1. Composición del mortero de cal hidráulica natural NHL-5.

Lechada de cal hidráulica natural NHL-5	
Relación arena/cal	(0,53-0,60)
Aditivo 1 (fluidificante)	1% s/cal
Dosificación Laboratorio	
Cal NHL-5	1.800 g
Agua	954 g– 1.080 g
Aditivo 1	18 g

Tabla 7.2. Composición de la lechada de cal hidráulica natural NHL-5.

de ser aplicados con espátula o manualmente y sin utilización de fluidificante.

Según requerimiento, posibilidad de utilización de arenas 0/0'5, 0/4 mm o de 0/6 mm. En función de la granulometría de los áridos seleccionados tendrán una u otra función.

Para conseguir buenos resultados es determinante trabajar bien la masa quitando grumos de la cal para evitar los *caliches*,

Mortero de cal hidráulica natural para relleno	
Relación cal/arena	1:3
Relación arena/mortero	0,2
Dosificación Laboratorio	
Cal NHL-3'5 ó NHL-5	720 g
Arena 0/4 ó 0/6 tostada Laminoria	2.160 g
Agua	576 g

Tabla 7.3. Composición del mortero de cal hidráulica natural para relleno.

Mortero de cal aérea	
1 parte de cal aérea	La cal debe haber sido apagada hidratándola con agua, al menos seis meses antes de su uso, pero cuanto más tiempo lleve apagada en agua mejor calidad y plasticidad tendrá.
3 partes de arena	Los áridos se variarán en función del color, textura y consistencia deseados. Suele ser aconsejable emplear áridos de la zona.

Tabla 7.4. Composición del mortero de cal aérea.

Lechada de cal hidráulica natural NHL-3,5 micro inyección		
Ensayo	1	2
NHL - 3,5 (g.)	500	500
Agua (ml.)	1.450	1.455
R a/cal	3	3
Aditivo 1 (ml.)	50	45
% aditivo s/agua	3,45	3,1
Aditivo 2 (g.) s / cal	2,5	1,25
% aditivo	0,5	0,25
Fluidez (s.)	3,2	3,4

Tabla 7.5. Composición del mortero de cal hidráulica natural NHL-3,5 para micro inyección.

cuidar su forma de aplicación y finalizar esponjando los morteros.

Lechada de cal hidráulica con nanosílice en disolución para microinyecciones.

La dosificación del mortero será similar al mortero de juntas o acabado, cal y arena en proporción 1:3, pero con áridos de granulometría muy fina, 0/0,5.

7.8.- CONCLUSIONES

Con los ejemplos prácticos presentados se pretende describir la diversidad de variables, problemas, tratamientos, modo de aplicación y dosificación de materiales que forman parte del proceso de microinyecciones descrito.

En la práctica restauradora una de las mayores dificultades reside en seleccionar la solución más adecuada para cada caso concreto, teniendo en cuenta que en cada caso se combinan multitud de factores.

No siempre se tiene la posibilidad de trabajar estrechamente con un laboratorio para buscar soluciones a problemas muy específicos, aunque es muy difícil reproducir en el laboratorio la complejidad de los factores que intervienen a pie de obra. Esto obliga a adaptar las aportaciones de cada una de estas dos visiones con resultados, por lo general, más que satisfactorios.

Estos trabajos han quedado reflejados en los informes correspondientes y en la publicación de los trabajos realizados en el pórtico de la Catedral de Santa María.

NOTAS

- ⁽¹⁾ MONJO CARRIÓ, Juan; VEGA AMADO, Santiago, (Drs.), *Diccionario de Arquitectura y Construcción*. Ed. Munilla - Lería, Madrid, 2001.
- ⁽²⁾ *Apuntes del conocimiento 1. Estudios y Restauración del pórtico. Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz*.
- ⁽³⁾ Las dosificaciones empleadas en este capítulo han sido aportadas por Blanca Narbona y Santiago Tamayo del Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava.

BIBLIOGRAFÍA

BRUQUETAS GALÁN, R., *Técnicas y materiales de la pintura española en los Siglos de Oro*, Fundación de Apoyo a la Historia del Arte Hispánico, 2ª edición, Madrid, 2002.

CABRERA GARRIDO, J. M. *Estudios de recubrimientos de fachadas antiguas: la pátina de la piedra y el color de la arquitectura*. En: XI Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Castellón, Diputación de Castellón, Servicio de Publicaciones, 869-876, 1996.

CALVO, A., *Conservación y Restauración. Materiales, técnicas y procedimientos. De la A a la Z*, Ediciones del Serbal, Barcelona, 1997.

CENNINI, C., *Tratado de la pintura. El libro del Arte*, 4ª edición, Sucesor de E. Meseguer, Editor, Rosellón, 76, Barcelona, 1979.

ESPONDA CASCAJARES, M. *Evolución de los criterios de intervención con hormigón armado en la restauración de edificios históricos en España y México*, Tesis Doctoral, Universidad: Politécnica de Cataluña, Año: 2003.

GÓMEZ, M.L., *La restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*. Ediciones Cátedra S.A., Madrid 1998.

GÁRATE ROJAS, I., *Artes de la cal*, Ministerio de Cultura, Dirección General de Bellas Artes, I.C.R.B.C., Instituto Español de Arquitectura, Ediciones de la Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, 1993.

LAZZARINI, L. & SALVADORI, O., *A reassessment of the formation of the patina called scialbatura*. *Studies in Conservation*, 34: 20-26, 1989.

MALTESE, C., (Coord.), AA.VV., *Las técnicas artísticas*. Ed. Cátedra S.A., Madrid, 1985.

MARTÍNEZ CABEZAS, Celia, RICO MARTÍNEZ, Lourdes, (Drs.), *Diccionario técnico Akal de Conservación y Restauración de Bienes Culturales*, Ed. Akal, Madrid, 2003.

MAYER, Ralph, *Materiales y técnicas del arte*. Ed. Blume, 4ª edición, 1ª edición española, Madrid, 1985.

MONJO CARRIÓ, Juan; VEGA AMADO, Santiago, (Drs.), *Diccionario de Arquitectura y Construcción*. Ed. Munilla - Lería, Madrid, 2001.

MORA, Paolo; MORA, Laura; PHILIPPOT, Paul; *La conservation des peintures murales*, Ed. Compositori, 1ª edición, Bologne, 1977.

PALLADIO, Andrea, *Los cuatro libros de la Arquitectura*. Ed. Altafulla, Barcelona, 1987.

PLINIO SEGUNDO, Cayo, *Historia natural*, libro XXXV (de la pintura, colores y pintores), trasladado y anotado por el doctor Francisco Hernández (Libros primero a vigesimoquinto) y por Jerónimo de la Huerta (Libros vigesimo-sexto a trigésimoséptimo) y Apéndice (Libro Séptimo capítulo LV), 2ª edición, Ed. Visor, Madrid, 1999.

REALINI, M. y TONIOLO, L. (eds). (1996). *“II International Symposium The oxalate films in the conservation of works of art”*. EDITEAM S.A.S. Castello d’Argile (BO). 539 p.

RONCHETTI, Giuseppe, *Pittura murale*, Ed. Hoepli, 6ª edición, Milano, 1994.

VITRUVIO POLIÓN, Marco, *Los diez libros de Arquitectura*, Edición de José Ortiz y Sanz, Ed. Akal, Madrid, 1987, 1992, 2001.

251

Grupo Español del Intenational Institute for Conservation, www.ge-iic.es.

Diccionario de la Lengua Española, Real Academia Española, Vigésima Primera Edición, Madrid, 1992.

Legislación y cartas de recomendación

Ley 16/1985, de 25 de junio de 1985, del Patrimonio Histórico Español.

Ley 7/90, de 3 de julio de 1990, del Patrimonio Cultural Vasco.

Carta de Atenas, 1931.

Carta de Venecia, 1964.

Carta del Restauero, 1972.

Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico, 26 de septiembre de 1975.

Carta de Burra, 1999.

Recomendación 880 (1979) de la Asamblea del Consejo de Europa Relativa a la Conservación del Patrimonio Arquitectónico Europeo.

Convención para la salvaguarda del Patrimonio Arquitectónico de Europa, Convención de Granada, 3-X-1985.

Carta de Cracovia 2001, Principios para la conservación y restauración del patrimonio construido.

Principios para la preservación, conservación y restauración de las pinturas murales, ratificados por la 14ª Asamblea General del ICOMOS, en Victoria Falls, Zimbabwe, octubre de 2003.





Anexo

PLIEGO DE
PRESCRIPCIONES TÉCNICAS
PARA LA CONTRATACIÓN
DE LA EJECUCIÓN DE
LAS INYECCIONES DE
LECHADAS Y MORTEROS
DE CAL HIDRÁULICA EN LAS
FÁBRICAS DE LA CATEDRAL
DE SANTA MARÍA DE
VITORIA-GASTEIZ

Este pliego resume de manera sencilla las condiciones técnicas particulares que deben regir en la consolidación de fábricas mediante la inyección de fluidos, cuya base es la cal hidráulica natural. Fruto de la experiencia acumulada en todas las inyecciones llevadas a cabo en el pórtico occidental de la Catedral Santa María de Vitoria-Gasteiz, las cimentaciones de la nave central y la consolidación de los muros y contrafuerte de la capilla de los Reyes puede servir de guía y base para el desarrollo de trabajos análogos a realizar en otras intervenciones sobre el patrimonio construido. Por ello, las referencias a la Catedral Santa María son constantes sin perjuicio de que se puedan hacer especificaciones a otros lugares donde se lleven a cabo los trabajos. El carácter del pliego es fundamentalmente práctico y abierto a la incorporación de mejoras basadas en el empleo de esta técnica en similares condiciones o con otras particularidades.

1.- DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO

El objeto de este pliego es la realización de una campaña de inyecciones de lechadas y morteros de cal hidráulica natural en el relleno interior de los muros, pilares, estribos y zapatas de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz que se encuentran huecos o con el mortero interior degradado y sin cohesión suficiente para garantizar su correcto funcionamiento. Esta campaña se integra dentro del proyecto de consolidación general de las fábricas y se adecua a la metodología y a las prescripciones definidas en el trabajo de investigación realizado por la Comisión

de Cales promovida por la Fundación Catedral Santa María y el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava.

El objetivo inicial de los trabajos definidos era garantizar la estabilidad y función constructiva de los elementos estructurales del pórtico de la catedral situado a los pies de la nave y que sirve de vestíbulo cubierto al acceso principal del edificio. Ésta es una zona muy delicada y de especial valor artístico debido a que en ella se sitúa un conjunto de tres portadas consideradas por la historiografía española como “uno de los más bellos y mejor conservados conjuntos de la escultura gótica en el reino de Castilla”. Este hecho implicaba que era necesario compatibilizar la obra proyectada con los trabajos de restauración artística en ejecución y con el régimen de visitas de las obras que habitualmente se realiza en la catedral, adoptando las medidas de seguridad definidas en el proyecto de seguridad y salud.

El proceso de inyección del interior de los elementos de fábrica consta de dos partes principales: la ejecución de las perforaciones que permiten acceder al interior de los elementos constructivos atravesando su hoja exterior y la inyección de lechada o mortero de cal a través de las mismas, rellenando los huecos existentes. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea el deterioro interior de un elemento de fábrica serán necesarias menos perforaciones para su consolidación, ya que las oquedades existentes estarán generalmente comunicadas. Por el contrario, en un elemento que no se encuentre excesivamente deteriorado, las oqueda-

des no se encontrarán comunicadas, lo que implicará un número mayor de perforaciones.

Para decidir el número exacto de las perforaciones que se ejecutarán en cada elemento constructivo se realizará previamente un estudio del mismo mediante la ejecución a diferentes alturas y en las diferentes orientaciones de una serie de sondeos con recuperación de testigo. Los sondeos previos se realizarán siempre en horizontal para poder obtener una secuencia estratigráfica completa de la composición interior del muro. En este estudio se definirá la composición y estratigrafía de los testigos extraídos y se realizará la inspección visual remota con endoscopio de la perforación ejecutada siguiendo, en ambos casos, el protocolo que se define en este pliego. De acuerdo a este estudio se decidirá la densidad de la trama de las perforaciones por rotoperCUSión que, junto con los sondeos previamente ejecutados, servirán de canal de inyección de la lechada para la consolidación definitiva.

Los taladros definidos se ejecutarán siempre en sentido ascendente desde la base hasta la coronación del elemento, siguiendo una serie de niveles predefinidos en los planos y que corresponden a una serie de bandas de inyección por tongadas. Por seguridad es necesario que el fluido que se inyecta en el interior de un elemento constructivo, no alcance antes de su endurecimiento (se estima en siete días) una altura mayor a 1,50 metros. Se propone que a medida que se vayan completando las perforaciones de cada nivel

o tongada se proceda directamente a su inyección, sin esperar a tener acabados el resto de los agujeros correspondientes a otros niveles. De este modo, deberá planificarse el trabajo combinando las perforaciones y las inyecciones de los diferentes elementos, garantizando un proceso continuo del trabajo sin paradas innecesarias y sin que en ningún momento se inyecten columnas de fluido mayores de 1,50 metros.

El fluido de cal hidráulica definido se inyectará por presión a través de los taladros realizados previamente en los muros o aprovechando huecos y fisuras existentes en la fábrica. Tras acabar todas las inyecciones se realizarán una serie de taladros de control con recuperación de testigo para comprobar que todo el proceso de inyección ha sido eficaz. Estos últimos sondeos deberán –lógicamente– rellenarse también, completando con esta actuación la consolidación del elemento. Finalmente, se procederá a sellar todos los sondeos realizados con una tapa de piedra procedente del propio testigo, alterando de este modo lo mínimo posible la imagen exterior del edificio. Del mismo modo se sellarán los sondeos ejecutados por rotoperCUSión con una mezcla de agua, cal y polvo de piedra procedente de la perforación previamente ejecutada.

Todos los trabajos deberán ajustarse a los procedimientos y prescripciones aprobados por un comisión de seguimiento (constituida al efecto por la Fundación Catedral de Santa María) y bajo las órdenes definidas por la dirección de la obra.

2.- LECHADAS Y MORTEROS DE INYECCIÓN

Es obligatorio que los morteros y lechadas de inyección que se introduzcan en los muros durante el proceso se realicen siguiendo las prescripciones y especificaciones técnicas establecidas por el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava, que se encargará también de controlar mediante probetas extraídas en obra, la calidad, composición, dosificación, fluidez y aditivos del material de inyección. Se prevé la inyección de los siguientes fluidos:

Componentes de la lechada de cal hidráulica natural NHL-5.⁽¹⁾

- Cal hidráulica natural NHL-5
- Agua, proporción de agua/cal = 0,53-0,54
- Aditivo fluidificante⁽²⁾. % aditivo s.cal= 1

Componentes del mortero de cal hidráulica natural NHL-5

- Cal hidráulica natural NHL-5
- Arena tostada de Laminoria 0/2 con una proporción en la mezcla de cal/arena= 1 / 2
- Agua con una proporción de la mezcla agua/mortero de 0,26;
- Aditivado con un fluidificante⁽²⁾. % aditivo s.cal= 1
- Aditivado con un cohesionante⁽³⁾. % aditivo s.cal= 1

En cualquier caso, estas composiciones y dosificaciones del material de inyección están siendo sometidas a ensayo en el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava y su composición final quedará sometida en todo momento a los pará-

metros establecidos por la dirección de obra, de acuerdo a los ensayos realizados y al propio desarrollo de los trabajos que pueden obligar a la modificación de estas composiciones. En principio, se prevé la inyección masiva de lechadas y sólo cuando en una perforación se detecten huecos de un volumen superior a 0,5 m³ se realizará la inyección de morteros.

Para garantizar el control de la recepción de la cal, ésta deberá cumplir la norma UNE-EN 459-1/2/3. Como norma general la cal se suministrará en sacos, preferentemente de 25 ó 35 kg, que facilitan el manejo del material y su puesta en obra. Se evitará su almacenamiento en lugares de elevada humedad y siempre protegidos del agua. Se debe conservar el producto en un lugar seco y protegido, a temperaturas entre 5 °C y 35 °C. Es preferible conservar los sacos en un lugar con calefacción durante el invierno y en un lugar fresco durante el verano. No se deberán hacer grandes acopios de cal en obra, ya que ésta no podrá almacenarse in situ por un periodo de tiempo mayor a 8 meses. En cualquier caso se debe utilizar el producto antes de la fecha de caducidad indicada por el fabricante. El almacenamiento de la arena en obra se realizará en silo de acuerdo a la norma UNE -EN 933-8:00. Para garantizar la cohesión del fluido éste deberá amasarse en obra con ayuda de batidoras de alta turbulencia, que disgregan perfectamente las posibles acumulaciones de pasta o árido.

Con el fin de asegurar la idoneidad del fluido a inyectar se establecen unos criterios de control de fluidez. Éstos deberán

ejecutarse en obra por la empresa adjudicataria de los trabajos para **cada una de las mezclas realizadas *in situ***. El control se debe hacer mediante un cono Marsh normalizado que deberá permanecer en todo momento en obra por cuenta de la empresa, siendo las fluideces obligatorias para la inyección las siguientes:

- Lechada de cal: 7-11 segundos.
- Mortero de cal: 7 -11 segundos.
- Medidos en lo que tarda en pasar 0,5 l por el cono Marsh.

3.- CONDICIONES TÉCNICAS DE EJECUCIÓN DE LA CONSOLIDACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA, MEDIANTE INYECCIÓN DE LECHADAS O MORTEROS DE CAL

3.1.- REGISTRO Y NUMERACIÓN DE PUNTOS

Cada sondeo debe tener una designación unívoca que permita su identificación y localización en el edificio sin que pueda confundirse con la designación de otro sondeo similar. El resultado del sondeo es una perforación y un testigo -cuando éste se extraiga de la perforación- que se designarán del mismo modo. Para diseñar ésta se ha aprovechado la que se realizó en el plan director para identificar las unidades constructivas que componen la catedral. Esta designación se realiza a partir de la combinación que resulta de una división topológica de la planta por cuadrantes cuyos ejes coinciden con la línea de los pilares que se entrecruza con otra tipológica que discrimina en altura los diferentes elementos constructivos que componen la sección de la estructura. A esta desig-

nación, que identifica la unidad constructiva de la catedral, en la que se realiza la perforación, se ha añadido un dígito de orientación de la cara de este elemento y un número de orden. De este modo la nomenclatura del sondeo consta de:

- Localización en la planta de la unidad constructiva, de acuerdo a una trama ortogonal con sus vértices en el centro de los pilares y que se designa con una letra para los ejes transversales y un nº para los longitudinales.
- Abreviatura de dos letras del nombre del elemento constructivo definido de acuerdo a los glosarios más comunes de la arquitectura gótica.
- Orientación de la cara desde la que se perfora.
- Numeración correlativa de los sondeos realizados en cada unidad constructiva, empezando a contar desde el número 1.

Un ejemplo: Q1CF-N-16

- Q1: Hace referencia a la localización en planta de la unidad constructiva a perforar.
- CF: Hace referencia al elemento constructivo contrafuerte designado con la abreviatura CF (contrafuerte).
- N: La perforación se inicia desde la cara Norte.
- 16: El numero de perforación en esa unidad constructiva es el 16.

En caso de subdividirse el elemento constructivo en varias partes con la misma orientación geográfica se designarán en los planos de obra unas letras de referencia vertical de los sondeos que ayuden a la identificación unívoca del mismo.

3.2.- DISEÑO Y SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE SONDEO

La localización de las perforaciones se realizará siguiendo una trama cuadrada al tresbolillo que no superará nunca el de cinco perforaciones por m² de superficie. Como criterio general para la situación de los puntos de perforación se establece que la separación entre dos perforaciones adyacentes debe ser mayor o igual a 50 cm en todas las direcciones, es decir, que no podrá realizarse ninguna perforación dentro de una circunferencia de 50 cm de radio con centro en cada uno de los sondeos. La distancia de separación mínima a esquinas o encuentros entre paramentos será también igual o superior a 50 cm.

Cuando la perforación se realice para obtener un testigo del sondeo deberá situarse siempre en el centro de un sillar o de un mampuesto y realizarse mediante rotación simple con corona de diamante, utilizándose el extremo exterior del testigo para sellar posteriormente el agujero de la perforación. Cuando la perforación se realice por rotoperCUSión los taladros se realizarán siempre desde la cara exterior del muro en las juntas entre dos sillares o mampuestos. En el caso de que en una posición concreta la junta sea muy estrecha y el taladro suponga también la perforación del sillar o del mampuesto se optará por perforar en el centro de las piezas, evitando que se produzcan perforaciones entre dos materiales diferentes.

Los trabajos empezarán replanteando en la obra todas las perforaciones proyectadas. El replanteo se realizará mar-

cando con tiza el lugar de perforación, de acuerdo con la malla general definida en los planos y se escribirá también el número identificativo que le corresponda. Por problemas de posicionamiento y anclaje de la máquina, problemas de espacio, inclinaciones de perforación inadecuadas, necesidades de andamiaje, etc., puede suceder que algunas de las posiciones de perforación previstas presenten dificultades para su ejecución en la realidad. Por este motivo, antes de iniciar los trabajos de perforación deberá revisarse el replanteo realizado por la dirección facultativa de la obra y el técnico encargado de la empresa adjudicataria de los trabajos. Será en este momento cuando todas las partes podrán evaluar in situ todos los problemas que pudieran derivarse para cada uno de los sondeos previstos y replantear las posiciones que presenten dificultades insalvables para su ejecución, e incluso la amortización de los mismos.

La señalización de los puntos se realizará para que sea lo más reversible posible de acuerdo siempre con el responsable de restauración pétreo, por lo que no se deben utilizar grafito, spray o productos similares. Como norma general no se podrá perforar en las zonas que contienen escultura monumental y/o pinceladuras, salvo en aquellos puntos claramente especificados por la dirección y en las condiciones que la misma disponga.

Una vez realizado el replanteo definitivo de las perforaciones, los testigos extraídos de los sondeos previstos se identificarán con una tarjeta de plástico en el que aparezca sobrescrito el número correspon-

diente marcado con rotulador indeleble. Esta tarjeta se fijará al soporte mediante masilla de pegado rápido no grasa o plastilina, fácilmente reversible. Al interior y en zonas protegidas de humedad se podrá sustituir la tarjeta de plástico por una pegatina. Cada testigo llevará el mismo código identificativo que se ha utilizado para la designación de la perforación de la que se ha extraído, que lo vinculará con el elemento constructivo en el que se sitúa y que es unívoco.

3.3. EJECUCIÓN DE LAS PERFORACIONES

Se utilizarán dos sistemas de perforación distintos:

- Corona de diamante con recuperación de testigo.
- Rotopercusión.

Para obtener de cada elemento constructivo que vaya a consolidarse la composición y estado de sus fábricas se realizarán -a diferentes alturas y orientaciones- una serie representativa de sondeos en los que está prevista la extracción del testigo de la perforación para su estudio. Se perforará, en los puntos marcados previamente, por rotación simple con corona de diamante siguiendo las prescripciones de la dirección facultativa de la obra. La cantidad, densidad de la trama y localización definitiva de las perforaciones se establecerá en función de los resultados obtenidos del estudio de los testigos extraídos en los sondeos previos, de tal modo que exista un número suficiente de perforaciones para garantizar el acceso del fluido a la totalidad de los huecos de la fábrica.

Una vez que se hayan replanteado las modificaciones necesarias en la trama prevista inicialmente el resto de las perforaciones previstas se realizarán por rotopercusión, sin extracción de testigo. En cualquier caso, la trama de las perforaciones definida podrá variar también a medida que se desarrollan los trabajos por los motivos que la dirección considere oportuno. Esta situación debe ser controlada en todo momento ya que la heterogeneidad manifiesta de las fábricas históricas exige un control constante sobre la necesidad o no de inyección.

En el caso de que una perforación, por motivos justificados, se deba ejecutar a una distancia mayor de 10 cm de la proyectada se debe poner en conocimiento de la dirección facultativa. En caso de no hacerlo, no se considerará ejecutada la perforación. Se considera necesario que todos los trabajos de perforación los ejecuten un mínimo de dos personas.

3.3.1.- Perforación con corona de diamante y recuperación de testigo

La perforación de las bocas de inyección se efectuará siempre sin golpeo, mediante equipos de perforación a rotación simple con coronas diamantadas y agua como fluido de evacuación y refrigeración de las coronas de corte. El anclaje de la máquina de perforación se realizará adecuándose a las circunstancias de la obra, evitando que los taladros de fijación de la máquina alteren el monumento. La empresa adjudicataria aportará en estos trabajos todos los elementos necesarios

para su correcto desarrollo como los sistemas de eliminación, recogida y canalización del agua de refrigeración, escarriadores, fijaciones, etc.

Se ejecutarán cuantas canalizaciones temporales sean necesarias para evacuar el agua de perforación hasta la red de saneamiento municipal o depósito habilitado al efecto, evitando que el agua se acumule en la calle o en las zonas de paso de las visitas a la catedral. Es imprescindible la canalización y evacuación correcta del agua de perforación en el interior de la catedral, ya que el subsuelo se encuentra excavado arqueológicamente y existen cimentaciones descubiertas que deben mantenerse secas y sin humedades importantes para evitar un deterioro rápido de estos elementos y de los estratos arqueológicos. En el caso de que fuese necesario trabajar en el interior del pórtico o del templo se realizarán unos embudos temporales a la salida del sondeo que permitan canalizar el agua, evitando que discurra por el paramento y llegue al suelo.

Se debe tener un control de la cantidad de agua de perforación utilizada en cada sondeo, por lo que el operario perforador debe ser capaz de cuantificar el porcentaje de agua recuperada (25, 50, 75, 100 %) en toda la longitud de perforación. Estos datos se registrarán en unas fichas proporcionadas por la dirección facultativa que se rellenarán obligatoriamente por los encargados de la perforación, tal y como se describe posteriormente.

Las perforaciones por rotación con corona de diamante deben tener un diá-

metro entre 40 mm-50 mm, no pudiendo superar esta medida sin autorización expresa de la dirección facultativa, ya que se considera que estas medidas constituyen un diámetro suficiente para la recuperación del testigo. Se recomienda utilizar maquinaria no muy pesada y de dimensiones tales que permita manejarse con facilidad en un andamio, perforadoras tipo Weka, Longyear, Hilti, Diamec, etc.

Los perforadores deberán colocar todos y cada uno de los testigos en cajas de plástico normalizadas, debidamente preparadas para ello, de manera que sea identificable el principio, el fin y cada maniobra realizada a diferentes profundidades del sondeo. Los testigos se dispondrán ordenados en profundidad sucesiva de perforación, tomando las medidas necesarias para que no se muevan ni se altere su orden correcto. Al exterior de la caja se identificarán todos los sondeos recogidos en su interior con los datos suficientes para su correcta localización.

El ángulo de inclinación hacia el interior del muro oscilará entre 15 y 30 grados por encima de la horizontal, lo que facilitará la penetración de la lechada en el proceso de inyección posterior, no debiendo sobrepasarse ninguno de estos límites, salvo indicación expresa de la dirección facultativa. Durante la ejecución de la perforación, los operadores que la estén ejecutando deberán de tener especial cuidado para no traspasar -de un lado a otro- el elemento constructivo que se está perforando, dejando siempre un mínimo 30 cm de margen con respecto a la cara opuesta de la perforación. Para

garantizar una correcta consolidación del elemento que se está perforando ésta deberá continuarse aunque se atraviesen huecos por los que se pierde la totalidad del agua de perforación. Esta medida queda sujeta a la idoneidad de disminuir o aumentar su alcance.

Hay que tener presente que en la catedral existen elementos que tienen un gran espesor, como ocurre en estribos, contrafuertes y pilares, y que habrá por tanto que realizar taladros con una profundidad que supere los 200 cm reales. Todo sondeo que no alcance la profundidad prevista no se computará como ejecutado salvo autorización expresa de la dirección facultativa para disminuir su alcance. Se debe tener en cuenta que la vida de una corona de diamante es de aproximadamente 100 m. de perforación, por lo que es obligado prever su desgaste con suficiente antelación, siendo recomendable tener dos coronas en obra para evitar retrasos.

3.3.2.- Perforación por rotopercusión

La perforación a rotopercusión a pesar de su carácter más destructivo, su alcance limitado y de los problemas que puede provocar en determinados elementos constructivos, debido a los golpes y vibraciones implícitos en este sistema de perforación, es una forma mucho más rápida de trabajo. Permite además realizar unas perforaciones de un diámetro menor y no necesita agua. Por el contrario hay que tener un cuidado especial en su manejo. La longitud máxima de perforación vie-

ne limitada por la longitud de la broca a emplear. No se encuentran en el mercado brocas superiores a 1,2 m para diámetros inferiores a 30 mm, lo que implica que la longitud efectiva de perforación ronde los 80-100 cm. Por ello se establece que toda perforación por rotopercusión alcanzará una profundidad mínima de 70 cm para ser computada como tal. Para garantizar la idoneidad de la inyección posterior el diámetro de estas perforaciones será de entre 25 y 30 mm, ya que diámetros menores no permitirán la penetración adecuada del fluido. Los ángulos de inclinación de estos taladros estarán comprendidos entre 10° y 30°, medidos en sentido al paramento con respecto a la horizontal. Sólo excepcionalmente se permitirá un diámetro máximo de 40 mm, con el fin de lograr un alcance que supere los 150 cm de profundidad sin necesidad de agua de perforación.

El proceso de perforación por rotopercusión debe comenzar por realizar un pretaladro del diámetro e inclinaciones indicadas con una broca de pequeño alcance (+/-10 cm). Este pretaladro servirá de embocadura para la broca de largo alcance, de manera que esta segunda no resbale por la pared, y evitar así dañar a los operarios y la superficie exterior de las fábricas. No obstante es conveniente la previsión en obra de un tubo de diámetro interior ligeramente superior a la broca de perforación y de unos 25 cm de longitud. Este tubo servirá puntualmente para dirigir la broca de perforación en caso de ser necesario. Durante todas las perforaciones, se preverá un sistema básico de recogida del polvillo originado por la perforación justo a la salida del agujero.

El canal obtenido debiera limpiarse por aspiración o con aire a presión antes de efectuar las inyecciones, aunque no es estrictamente necesario. Dado que el sistema de perforación es en seco, se deberá mojar la cavidad obtenida inmediatamente antes de la inyección.

3.3.3.- Entubamiento de las perforaciones

Siempre que sea necesario, y con el fin de evitar la obturación del canal de inyección por desmoronamiento del relleno interior de los muros o pilares, se deberán entubar o encamisar las perforaciones. Esta operación permitirá posteriormente la penetración del fluido hasta el centro mismo del elemento que va a consolidarse.

El entubamiento se realizará mediante la introducción de una tubería plástica de un diámetro exterior algo inferior al de la perforación realizada (diámetro mínimo de 22 mm), que se introducirá hasta el fondo de los taladros realizados o, en su caso, hasta donde se encuentren coqueras que garanticen la inyección. La introducción del fluido se efectuará por el interior de la tubería que se irá subiendo y retirándose a medida que avance la inyección.

3.4.- INSPECCIÓN VISUAL REMOTA DE LAS PERFORACIONES, ENDOSCOPIAS

El equipo de perforadores deberá coordinarse con el equipo que designe la dirección técnica, facilitando el tiempo y los medios auxiliares que les permitan la ejecución de la inspección visual remota

(endoscopias) de todas las perforaciones realizadas que se consideren oportunas. Un hecho a tener muy en cuenta es que el agua de perforación es incompatible con la realización de endoscopias por lo delicado del instrumental electrónico. Por ello estas inspecciones se realizarán de manera que los perforadores no intervengan en las cercanías del sondeo a inspeccionar. Las endoscopias se realizarán previamente a la inyección de los fluidos, por lo que un sondeo que necesariamente tenga que ser inspeccionado no puede ser inyectado.

3.5.- FICHAS DE REGISTRO DE SONDEOS

Tan importante es la perforación en sí como los datos y análisis que se pueden derivar de ella para la correcta consolidación de los muros. Por ello cada sondeo debe quedar registrado en una ficha proporcionada por el equipo de geólogos de la catedral que consta de tres partes principales:

- Datos de perforación, a rellenar por el equipo de perforación.
- Datos del testigo, a rellenar por el equipo de geólogos/técnicos de la catedral.
- Datos de la inspección visual remota, a rellenar por los autores de endoscopias.

3.5.1.- Datos de perforación

El equipo de perforadores debe rellenar obligatoriamente estos datos siguiendo la situación especificada en los planos y la

señalización previa de los puntos establecidos por la dirección:

- Elemento constructivo donde se ubica la perforación.
- Número del sondeo.
- Fecha de perforación.
- Orientación de la cara desde la que se perfora.
- Profundidad real en cm del sondeo ejecutado, medido una vez finalizada la perforación.
- Diámetro del sondeo en mm.
- Equipo y sistema utilizado para la perforación.
- Número de la caja en la que se localiza el testigo extraído.
- Inclinaciones en grados, en planta y perfil del sondeo.
- Observaciones de operario. En este apartado de gran importancia el operario perforador debe cuantificar en porcentaje de agua que se pierde en las distintas profundidades del sondeo. Asimismo, deberá constatar la posible presencia de huecos o zonas de distinta dureza en la perforación tratando de localizarlas en profundidad. Del mismo modo debe registrar aquí cualquier anomalía o suceso acaecido durante la perforación que considere oportuno.

3.5.2.- Datos de testigo

En este apartado de la ficha la persona designada al efecto por la Fundación, preferiblemente geóloga, debe describir estratigráficamente la litología del testigo extraído en la perforación, en sucesión continua de profundidad. Además deberá constatar los siguientes datos:

- Fecha de la descripción del testigo.
- Diámetro del testigo recuperado.
- Constatación de si se ha fotografiado el testigo en la caja.
- Nombre de la persona que realiza la descripción del testigo.
- Recuperación o índice porcentual de porosidad del sondeo, relacionando la profundidad total del sondeo, con la longitud de testigo recuperado.
- Litotipos o litologías reconocidas
- Porosidad = $((\text{medida de testigo recuperado en cm} / \text{profundidad de perforación en cm}) - 1) * 100$. Nótese que el signo negativo obtenido hace referencia a la ausencia de material, ya que la porosidad es en realidad la falta de materia solida en el volumen extraído.

Por otra parte se debe de registrar fotográficamente cada testigo en su caja correspondiente. En la propia fotografía debe aparecer la identificación del sondeo con los siguientes datos mínimos:

- Fecha de ejecución de la perforación.
- Localización del sondeo: Unidad constructiva, su número de perforación, y la orientación de la cara desde la que se perfora.
- Profundidad de perforación.

3.5.3.- Datos de endoscopia

Se describirá la endoscopia relacionando materiales y profundidad. Se prestará especial atención a la presencia de grietas, desmoronamientos, obturaciones, etc. Se constatará igualmente:

- La fecha de realización de la endoscopia.

- Nombre del archivo digital en el que se guarda la inspección. Deberá coincidir con el número de registro del sondeo.
- Equipo y lente utilizados.
- Profundidad de la endoscopia.
- Profundidades a las que se observan oquedades o anomalías.

3.6.- LA INYECCIÓN

Las sucesivas inyecciones se realizarán por tongadas de aproximadamente 150 cm en altura, no debiendo sobrepasarse en vertical ese límite. Entre tongada y tongada se dejarán de 3 a 4 días, como norma general, para obtener un fraguado mínimo que evite presiones hidrostáticas.

3.6.1.- Datos previos

La dirección de las obras o la contrata facilitarán puntualmente unas fichas de inyección en los que se establecen unos datos previos que facilitan y ordenan la ejecución de la inyección:

- Unidad constructiva y agujeros a inyectar.
- Orden de inyección de los agujeros.
- Nivel de inyección relativa a la unidad constructiva.
- Especificación del fluido inyectable y su composición.
- Capacidad en litros del sondeo en base a la perforación.
- Diámetro de la perforación para prever el obturador a emplear.

El resto de los campos previstos en la ficha de inyecciones se rellenarán por

parte del equipo inyector a medida que se ejecuta la inyección y que se detallan posteriormente.

3.6.2.- Ejecución de la inyección

Herramientas, útiles de trabajo y personal necesario.

Para la ejecución de la inyección son necesarios los siguientes elementos:

- Compresor o bomba de presión de escasa potencia, con capacidad de presión recomendable inferior a 20 bares. Sirve para presurizar el vaso de presión y va conectado a éste mediante manguera con válvulas en ambos extremos.
- Vaso de presión o calderín, con entre 30 y 40 litros de capacidad. Este elemento es el principal en el proceso de inyección. Debe ser capaz de soportar una presión máxima de 6 bares. Debe estar dotado de manómetro, calibrado en litros en su interior y tener un sistema mecánico de batido del fluido a baja revolución. Este batido en el interior del vaso es fundamental para evitar posibles decantaciones y obturaciones durante el proceso de inyección. La salida del vaso de presión prevista para el fluido debe estar dotada de una llave de corte. Debe además tener una llave de vaciado que puede coincidir con la anterior.
- Elementos de fontanería. Manguera de entre 4 y 7 m de longitud y de 3-5 cm de diámetro. Además de todos los elementos para realizar las conexiones, garantizar su estanqueidad y permitir

su control, tales como válvulas de corte, racores, reducciones de diámetros. En todo caso se dispondrá una llave de corte a la entrada del obturador.

- Obturadores. Se dispondrá de tantos obturadores como distintos diámetros se hayan utilizado en la perforación, siendo recomendable tener uno de repuesto por cada diámetro. Los obturadores deben garantizar la estanqueidad de la cavidad, durante la inyección, de manera que esta no se despresurice.
- Hormigonera. La mezcla se realizará en una de pequeña capacidad (50-60 litros), y a baja revolución. Es preferible hacer varias amasadas pequeñas que una grande, por lo que se recomienda tener en obra dos hormigoneras de escasas dimensiones.
- Batidora de alta turbulencia externa. Para facilitar la correcta mezcla y obtener las fluideces necesarias. Se situará siempre junto a las hormigoneras, pero su uso se limitará a aquellos casos en que las fluideces iniciales superen ligeramente los 11 segundos.
- Cono Marsh normalizado y probetas calibradas. No se puede inyectar una mezcla sin tener control de su fluidez, por ello mediante el cono Marsh se verificará que cada una de las amasadas cumpla los límites de fluidez establecidos. Las probetas son necesarias para tomar medidas de volumen exactas y su capacidad ha de ser de 1 l.
- Cubos calibrados en litros. Han de ser de fácil manejo, con unos 15-17 l de capacidad y calibrados en su interior. Son necesarios un mínimo de tres cubos.
- Trapos, clavos y cuñas de madera. Para solucionar pequeñas grietas provocadas

por la inyección a presión se emplearán este tipo de elementos temporales. Una vez finalizada la inyección deben retirarse de las fábricas.

- Yeso de fraguado rápido. Con la misma función de los elementos anteriores se utilizará de forma puntual para rejuntar pequeñas grietas aparecidas durante la inyección. Se podrá utilizar además para la elaboración de embudos para recogida y posterior canalización del agua de perforación, o para garantizar la estanqueidad del proceso. Tras la inyección deben ser retirados.
- Cepillos de cerdas no metálicas. Junto con los trapos para limpiar los distintos paramentos de cualquier resto de lechada o mortero de cal durante e inmediatamente después de la inyección.
- Embudos. Es conveniente disponer de uno o más embudos de plástico para un posible relleno por gravedad.
- Agua y electricidad. Deben estar siempre disponibles en las distintas zonas de trabajo.
- Para garantizar un correcto desarrollo de los trabajos, la cuadrilla de inyección estará formada por un mínimo de tres personas.

Proceso de inyección

El proceso de inyección comienza con la preparación del fluido a inyectar en el tipo y composición previamente fijada. Es importante que en la hormigonera se viertan los distintos componentes en este orden:

1. Agua.
2. Aditivo.
3. Cal.
4. Arena (sólo en caso de morteros).

Hay que tener presente que con un mayor tiempo de amasado de la mezcla se obtiene una fluidez mayor que facilita su puesta en obra. No obstante, conviene recordar que cada amasada tiene una vida aproximada de 6 horas (en movimiento continuo), por lo que si transcurrido ese tiempo no se ha inyectado se procederá a desecharla y preparar una nueva. Para facilitar la correcta mezcla de los componentes de la amasada éstos se deben batir dentro de la hormigonera con una batidora exenta al poco tiempo de realizar la mezcla, con lo que se evitan la posible formación de grumos y se acelera la obtención de la fluidez necesaria. Es importante situar las hormigoneras en planta baja, no muy alejadas de las zonas de trabajo, llevando los útiles de trabajo restantes a la zona inmediata al agujero a inyectar.

Antes de obturar el agujero se debe medir siempre su profundidad con el fin de comprobar si ha habido desmoronamientos, un llenado a través de otro orificio, etc. De esta manera, se tiene además un control real de la capacidad de inyección del agujero. Además, será conveniente soplar el orificio para eliminar posibles suciedades o polvo acumulado desde la perforación, sin olvidar la importancia que tiene el humedecer previamente el orificio para una mejor adherencia y carbonatación del fluido hidráulico a inyectar. El obturador debe introducirse en el orificio entre 10 y 25 cm, para permitir - en una fase posterior- reponer los testigos en el exterior.

Una vez obturado el agujero y asegurado su estanqueidad para evitar despresurizaciones, se procede a realizar el resto de

conexiones de fontanería entre obturador-manguera-vaso de presión, sin olvidar la llave de corte entre la conexión de manguera y obturador. Es conveniente prever una derivación en T en este punto con sus correspondientes llaves de corte, una de las derivaciones unirá manguera y obturador, mientras que la otra tendrá un sobrante de manguera con llave de corte que servirá para comprobar de forma manual la correcta presurización del agujero.

Finalizadas todas las conexiones necesarias y tras la comprobación de la fluidez correcta de la mezcla se rellena el calderín de presión, siempre controlando el volumen introducido. Se conecta la batidora del calderín y se procede a la inyección con permanente control manométrico de las presiones, en especial de la máxima. Como norma general se considera adecuada una presión de entre 2-2,5 kg/cm², no debiendo superarse en ningún caso el límite de 3 kg/cm², salvo autorización expresa de la dirección facultativa. De la misma manera, en determinados casos más delicados como en los pilares del interior del templo se comenzará con presiones menores 1-1,5 kg/cm² y se aumentará progresivamente si es necesario hasta alcanzar las consideradas como norma general. Es preciso tener presente que un exceso de presión en la boca de inyección puede causar roturas interiores, con la separación de las fábricas y la creación de falsas vías de penetración de la lechada, el salto de revocos o el recalado de juntas.

Durante el proceso de inyección se controlará que no se produzca ningún tipo de freno ni taponamiento del fluido

que se inyecta por obstrucción de cánula de la perforación donde se introduce la inyección, o de cualquiera de los conductos y válvulas de fontanería. En caso de producirse, se deberá detener la inyección y realizar una limpieza hasta que pueda continuarse el proceso de llenado de los huecos. En caso de desmoronamiento del canal de la perforación y su consiguiente obstrucción, se deberá limpiar y desatasacar hasta permitir su entubado y la continuación de la inyección.

Es importante que durante el proceso de inyección no se produzcan fugas ni pérdidas a través de las juntas de los muros que se inyectan, del terreno arqueológico o de las redes e instalaciones existentes, por lo que se deberán preparar las superficies y los elementos adyacentes previamente. En caso de que el fluido se desparrame al exterior a través de las juntas de los muros u otros elementos no se deberá paralizar la inyección, y paralelamente con personal auxiliar se tratará de sellar las fugas mediante cuñas de madera, trapos o yeso. En caso de no poder detener la fuga, se parará momentáneamente para realizar el taponado correcto y se continuará inyectando con una presión menor a la anteriormente empleada.

Se debe controlar en todo momento la inyección, tanto desde el punto de vista cuantitativo como volumétrico o espacial, de tal modo que pueda ésta detenerse en el momento que se observe una anomalía del proceso, especialmente cuando se observe que se inyecta una cantidad excesiva de material en un punto específico. En este caso, deberá consultarse a la di-

rección la continuación de la inyección en ese punto ya que podría estar rellenándose huecos de otros elementos adyacentes que no guardan relación con el elemento que se esté consolidando.

Es importante que tanto el operario que maneja el obturador como el que controla las presiones estén familiarizados con las características bajadas de presión cuando el agujero traga el fluido, la presión tiende a bajar y el compresor entra en funcionamiento. Asimismo, si se ha vaciado el calderín se empieza a introducir aire y la manguera empezará a moverse en sucesivos golpes de presión característicos. En caso de duda si una perforación esta completamente inyectada conviene utilizar el sobrante para ver que el circuito esta presurizado. En caso de estarlo se para la inyección, se despresuriza el circuito y se abre el calderín.

Una vez concluida la inyección se ha de contabilizar el volumen inyectado. Por ello se debe vaciar el calderín con baja presión (1 kg/cm^2) y realizar la resta entre el volumen introducido y el obtenido en el cubo tras finalizar la inyección. De esta manera se consigue además tener permanentemente limpia la manguera y el obturador evitando posibles tapones por endurecimiento del material que ralentizarían el proceso de manera mucho más acusada. En caso de que el trabajo sea ágil y rápido, bien por la cantidad de personas que trabajan en la inyección, bien por la cualificación de las mismas, se puede utilizar para la medición del volumen inyectado unas reglas previamente calibradas. Estas reglas deberán tenerse correctamente

calibradas para el volumen y geometría concreta de cada calderín. En este caso es recomendable realizar un vaciado periódico del calderín para evitar obturaciones y tener la regla calibrada perfectamente limpia. En cualquier caso el sistema de medición deberá ser validado por la dirección facultativa de la obra.

Posterior e inmediatamente después de la inyección se procederá a realizar, por cuenta de la empresa, la limpieza de los paramentos manchados y a ejecutar el rejuntado y sellado adecuado de los puntos donde se produce la evacuación. Es fundamental realizar la limpieza de todos los restos de lechada de cal que hayan manchado los paramentos, a la mayor brevedad posible. La lechada de cal hidráulica endurece y tiene cierta capacidad de penetración en materiales porosos por lo que una vez endurecida es prácticamente imposible de quitar sin alterar las pátinas de protección naturales de la piedra. Por ello, una limpieza con agua y cepillo de cerdas de plástico es suficiente siempre que se realice a tiempo. La ejecución de las referidas operaciones se realizará de acuerdo con el procedimiento, las prescripciones y los equipos de trabajo determinados por la comisión de seguimiento citada previamente en el presente documento.

3.6.3.- Carbonatación y endurecimiento de los fluidos de inyección y procesos de consolidación de los muros

Dados los tiempos de carbonatación y endurecimiento de las lechadas y morteros

que se pretenden inyectar es necesario realizar un proceso de inyección lento y coordinado en el tiempo para evitar la introducción en el interior del muro de columnas elevadas de fluido que pudiesen reventar por presión las caras exteriores de los muros.

Sabemos por los ensayos realizados en el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava que la cal hidráulica que se pretende inyectar alcanza su resistencia óptima a los 90 días de su puesta en obra y que a partir de esa fecha su resistencia sigue aumentando aunque mucho más lentamente. El endurecimiento mínimo del material sólo se consigue a los 3-4 días de la puesta en obra, alcanzando una resistencia que garantiza la posibilidad de continuar con el proceso. Este problema implica que se debe considerar que el material inyectado permanece como un fluido hasta los 3-4 días de su puesta en obra. Por tanto para evitar una presión excesiva del fluido inyectado se debe realizar la inyección del elemento constructivo por tongadas de aproximadamente un metro y medio de altura. Esto implica que el avance de la inyección en cada franja de un metro y medio de altura construida del muro tiene que realizarse pasado este periodo mínimo de días, no pudiéndose superar en vertical este límite.

3.6.4.- Ficha de inyección

Todos los datos del proceso de inyección deben registrarse en la ficha preparada al efecto. Los datos anteriormente indicados y previos a la inyección deben completarse

se con el relleno de los siguientes campos durante y posteriormente a la inyección por parte del equipo de inyectoras.

- Fecha de inyección.
- Fluideces medidas en segundos, empleadas por cada agujero inyectado.
- Presión máxima empleada por agujero, medida en kg/cm².
- Volumen inyectado por agujero, medido en litros.
- Constatación de la recogida de probetas para laboratorio.
- Observaciones. Donde se reflejarán todas las incidencias considerables acaecidas por cada agujero inyectado, tales como salida de lechada por otros agujeros o juntas, medidas correctoras, problemas de obturación encontrados, variación de la composición del inyectable y su justificación, etc.

3.7.- TRABAJOS POSTERIORES A LA INYECCIÓN

Una vez finalizados los trabajos anteriormente descritos, puede resultar necesario la ejecución de taladros de comprobación mediante el sistema de recuperación de testigo para verificar la eficacia de los trabajos de consolidación realizados. En estos taladros se seguirá el proceso de ejecución tal y como se ha descrito anteriormente.

La elección de dichos taladros de reperforación se realizará de acuerdo a las directrices que establezca la dirección facultativa de la obra. En cualquier caso se reperforarán algunos taladros inyectados, pero además es necesario realizar otros taladros nuevos en zonas adyacentes a las

inyectadas para ver la eficacia y alcance de la inyección. Señalar que en los casos de reperforación de taladros previos se deberá presentar y orientar la máquina de la misma manera que a la realización del primer taladro. Una diferencia mínima de orientación dará como resultado que una parte del testigo corresponda a la lechada inyectada ya endurecida, y la otra a un testigo de la parte existente. No obstante siempre es interesante constatar que no hay coqueas en la inyección y que la lechada inyectada y endurecida se ha unido correctamente al muro o relleno interior existente.

Como última fase del trabajo se prevé la reposición del tramo exterior de testigo a su lugar original, o en su caso un acabado con mortero de cal remetido ligeramente del plano de fachada. El testigo se fijará al sondeo en todos los casos mediante el empleo de mortero de cal. Se tendrá especial cuidado en no reponer un testigo de material distinto al que aparece en el exterior de la fábrica. En el caso de los taladros por rotoperforación se rellenarán de forma manual mediante embudos con lechada de cal mezclada con el polvo recuperado de la perforación. Este último trabajo será ejecutado de manera coordinada por el equipo de restauración. Otra posibilidad a considerar por parte de la dirección facultativa consiste en el empleo de tapas de piedra hechas específicamente con materiales adecuados a cada diámetro de perforación. Por ello se realizarán unas pruebas de acabado para los distintos tipos de orificios inyectados previamente a ejecutar su acabado de manera sistemática.

4.- PRESTACIONES POR CUENTA DE LA EMPRESA ADJUDICATARIA

El personal especializado en cantidad y cualificación, con todos sus emolumentos, seguros sociales y de accidentes.

Las máquinas y útiles necesarios para esta clase de trabajos como varillajes, herramientas de perforación, escariadores, elementos auxiliares para la ejecución de los trabajos, etc, descritos anteriormente en el pliego. Incluyendo en todo caso:

- Perforadora o taladro a rotopercusión de pequeño peso tipo Hilti, Wurz,....
- Perforadora a rotación tipo Diamec, Weka, Longyear,... con broca de diamante o similar.
- Planta de mezclado de lechadas y batidoras de alta turbulencia.
- Vaso de presurización, con batidora mecánica.
- Bombas de inyección a presión, compresores.
- Equipos de obturadores, mangueras y toda la fontanería necesaria para la ejecución.
- Útiles de limpieza de las fábricas: trapos, cepillos.
- Elementos de taponado puntual de grietas: trapos y clavos, cuñas de madera, yeso,...
- La cal hidráulica elegida por la dirección de obra será adquirida por la empresa adjudicataria al proveedor seleccionado

y posteriormente facturada junto con los trabajos realizados.

- Los andamios o elevadores necesarios aparte de los ya previstos en la obra, serán alquilados por la empresa adjudicataria.

La empresa adjudicataria realizaría las perforaciones en función de los planos y directrices marcados por el cliente.

5.- PRESTACIONES POR CUENTA DE LA FUNDACIÓN CATEDRAL SANTA MARÍA

- Los permisos tanto oficiales como privados que fueran necesarios para la ejecución de la obra. Permisos para la circulación de maquinaria, realización de obra, etc.
- El agua para la perforación en obra.
- El suministro de energía eléctrica.
- El suministro de los planos de instalaciones de servicios existentes en la zona de afección de la perforación.

271

6.- CONDICIONES ECONÓMICAS

Las condiciones económicas para el desarrollo de los trabajos descritos en este pliego quedan recogidas, en el presupuesto y pliego de condiciones establecido al efecto para el *Proyecto de Consolidación de las Fábricas de la Catedral*.

⁽¹⁾ Si se se desean resistencias finales en torno a los 150 kp/cm² se utilizará NHL-5. Si se requieren resistencias menores, en torno a los 100 kp/cm², se optará por la cal NHL-3,5

⁽²⁾ Fluidificante aceptado por la dirección facultativa de la obra, avalados por ensayos de compatibilidad de la cal.

⁽³⁾ Cohesionante aceptado por la dirección facultativa de la obra, avalados por ensayos de compatibilidad de la cal.

La publicación de este libro no se debe a un esfuerzo individual sino que es el resultado del trabajo de un grupo de profesionales de diferentes disciplinas que a iniciativa de la Fundación Catedral Santa María deciden colaborar para profundizar en el estudio y aplicación de las inyecciones de cales en la consolidación de muros y pilares.

El método de trabajo del grupo se ha basado en reuniones periódicas en las que se han ido tratando los diferentes temas que se analizan en esta publicación. El equipo ha estado formado por especialistas de diferentes áreas como la arqueología (Grupo de Investigación en Arqueología de la Arquitectura –a partir de 2009 Grupo de Investigación en Patrimonio Construido, GPAC– dirigido por Agustín Azkarate), arquitectura (Oskar Bell, Leandro Cámara, Juan Ignacio Lasagabaster, Pablo Latorre, Susana Mora), arquitectura técnica (María del Carmen Fernández), geología (Blanca Guaras, Luis Miguel Martínez-Torres), restauración (Diana Pardo, Dolores Sanz), química (Blanca Narbona, Santiago Tamayo) y topografía (Iñaki Koroso).

Además de los miembros permanentes de la comisión de cales que es como se denominó a este grupo de trabajo, diversas empresas y particulares han aportado su experiencia en este campo. Agradecemos la participación desinteresada de Antonio Aretxabala del Laboratorio Cadia, Félix Castaño de la Diputación Foral de Bizkaia, Agustín Ezcurra de la Universidad del País Vasco UPV-EHU, Francisco García de la Universidad de Valencia UPV, José Antonio Gil, Ingeniero Industrial, Carlos Hevia y Heraclio Varona de la empresa Calcinor, José Ángel Lanas de la Universidad de Navarra, Enrique Ruiz de la empresa Naturcal, Gregorio Obieta y María Pía de la empresa Ikerlan, Rafael Ramón-Lluch de la Universidad del País Vasco UPV-EHU, Jesús Rioyo de la Diputación Foral de Álava, así como a las empresas Anclajes Cintec, Geocisa, Site inyecciones y SVH **Sondeos** van Herckenrode por su colaboración para aspectos puntuales que han sido consultados.

Es nuestra intención reconocer a todas las personas que en diferentes foros y ámbitos nos han aportado sus ideas y planteamientos y nos han animado a concluir este trabajo de investigación aunque es posible que nos dejemos a alguien sin mencionar, con estas líneas nos gustaría agradecer a todas ellas su colaboración en esta publicación.

AUTORES

Oskar Bell: Arquitecto y Licenciado en Historia de Arte. Profesor de la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea y colaborador de la Fundación Catedral Santa María.

Leandro Cámara: Arquitecto y co-redactor del Plan Director de Restauración y del Anteproyecto de Restauración de la Catedral de Santa María. Responsable del Área Técnica de la Fundación Catedral Santa María.

María del Carmen Fernández: Arquitecta Técnica especialista en obras de restauración. Desarrolló su trabajo en la obra de la Catedral de Santa María entre los años 2000-2007.

Francisco García: Catedrático de Geofísica. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad Politécnica de Valencia.

Blanca Guaras: Doctora en Geología. Ha colaborado con la Fundación Catedral Santa María en el análisis petrográfico de los morteros.

Iñaki Koroso: Ingeniero Técnico en Topografía, responsable del Sistema de Información Monumental de la Catedral de Santa María.

Juan Ignacio Lasagabaster: Arquitecto, co-redactor del Plan Director de Restauración, Director Técnico (2000-2008) y Director-Gerente de la Fundación Catedral Santa María.

Pablo Latorre: Arquitecto y co-redactor del Plan Director de Restauración y del Anteproyecto de Restauración de la Catedral de Santa María.

Rafael Ramón-Lluch: Geólogo. Profesor Titular en el Departamento de Geodinámica de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.

Luis Miguel Martínez-Torres: Geólogo. Profesor Titular en el Departamento de Geodinámica de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea. Ha elaborado el mapa litológico de la Catedral de Santa María.

Susana Mora: Doctora en Arquitectura. Profesora Titular del Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (Universidad Politécnica).

Diana Pardo: Licenciada en Bellas Artes y diplomada en Restauración y Conservación de Bienes Culturales. Ha participado en la restauración de diferentes elementos artísticos en la Catedral de Santa María durante los años 2000-2008.

Alberto Plata: Doctor en Historia. Ha formado parte del Grupo de Investigación en Arqueología de la Arquitectura –a partir de 2009 Grupo de Investigación en Patrimonio Construido (GPAC)- de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea que ha excavado entre los años 1997-2009 la Catedral de Santa María.

Leandro Sánchez Zufiaurre: Doctor en Arqueología. Ha formado parte del Grupo de Investigación en Arqueología de la Arquitectura –a partir de 2009 Grupo de Investigación en Patrimonio Construido (GPAC)- de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea que ha excavado entre los años 1997-2009 la Catedral de Santa María.

Santiago Tamayo: Licenciado en Ciencias Químicas. Diplomado en Ingeniería Ambiental. Jefe de Servicio del Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava.



