



2007



MINISTERIO DE FOMENTO



GOBIERNO DE CANTABRIA

## TECNOLOGÍA DE LA REHABILITACIÓN Y LA GESTIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO (REHABEND)

### ENTIDADES PATROCINADORAS



MINISTERIO DE FOMENTO



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



GOBIERNO de CANTABRIA



Plan Regional IDH de Cantabria



SODERCAN sociedad para el desarrollo regional de cantabria



EXMO. AYUNT. SANTANDER



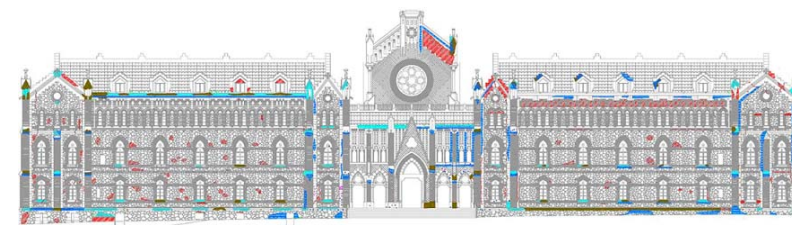
FUNDACIÓN COMILLAS



GRUPO TRIGUERO



CHEMPRO API XXI



Jornadas Técnicas subvencionadas por el Ministerio de Fomento y por el Gobierno de Cantabria (IDICAN) Santander, Octubre de 2007

TECNOLOGÍA DE LA REHABILITACIÓN Y LA GESTIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO (REHABEND)

Grupo de Tecnología de la Edificación.

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica.

Avda. Los Castros s/n 39005 SANTANDER

942 201 743(38) gted@unican.es

<http://grupos.unica.es/GTED/>



Universidad de Cantabria

GRUPO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN

GRUPO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN.

Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica.

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

JORNADAS TÉCNICAS INTERNACIONALES  
**TECNOLOGÍA DE LA REHABILITACIÓN Y LA GESTIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO**

ESTAS JORNADAS FUERON ORGANIZADAS POR:  
**GTED-GRUPO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y MECÁNICA**  
TELF: 942 201 743; FAX: 942 201 747; [gted@unican.es](mailto:gted@unican.es); <http://grupos.unican.es/GTED/>

DIRECCIÓN DE LAS JORNADAS:  
**PROF. D. LUIS VILLEGAS CABREDO**

COORDINACIÓN DE LAS JORNADAS:  
**ING. IGNACIO LOMBILLO VOZMEDIANO**

**PARTICIPAN:**

CONSEJERÍA DE CULTURA DEL GOBIERNO DE CANTABRIA  
POLITÉCNICO DI MILANO. DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE  
POLITÉCNICO DI BARI. FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
UNIVERSIDAD DO PORTO. FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO MINHO. DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (GTED, LADICIM, GIF, GEOTECNIA, GEURBAN, ARTE Y PATRIMONIO, GTAS)  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
UNIVERSIDAD DE OVIEDO  
UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO  
UNIVERSIDAD DE BURGOS  
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (DPTO. CONSTRUC. ARQUITECTÓNICAS DE LA E.T.S. DE ARQUITECTURA DE VALLADOLID, DAVAP)  
FUNDACIÓN MARCELINO BOTÍN  
FUNDACIÓN SANTA M<sup>A</sup> LA REAL – CENTRO DE ESTUDIOS DEL ROMÁNICO  
FUNDACIÓN CATEDRAL SANTA MARÍA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA COMUNIDAD VALENCIANA (AIDICO)  
LBEIN TECNALIA  
SCOTTISH LIME CENTRE  
ACCIONA INFRAESTRUCTURAS  
GEOTECNIA Y CIMENTOS (GEOCISA)  
SIKA  
FHECOR INGENIEROS CONSULTORES  
TRIAx  
ESTUDIO DE INGENIERÍA DÍNAMIS  
MONTAÑESA DE DESINFECCIÓN  
CHEMPRO  
INNOVA CONSULTING  
CTC LOZANO Y ASOCIADOS  
ÁLAVA INGENIEROS  
PANATEC  
BOVIAR  
ESTUDIO DE ARQUITECTURA AI  
ARQS. ALBERTO ALONSO & JOAQUÍN BARRIENTOS  
ARQS. EDUARDO FERNÁNDEZ ABASCAL & FLOREN MURUZABAL  
ARQS. EDUARDO PESQUERA & JESÚS ULARGUI

**JORNADAS INTERNACIONALES SUBVENCIONADAS POR:**



Subvenciones 2007 para la realización de actividades relacionadas con las infraestructuras, sistemas de transportes y demás competencias del Ministerio de Fomento



Ayudas 2007 para acciones especiales y complementarias en I+D+i

El editor no asume responsabilidad ninguna sobre la actualidad, correctitud, el estado completo o la calidad de las informaciones puestas a disposición. El uso no autorizado puede infringir los derechos de propiedad de patentes de la publicación.

Ninguna responsabilidad es asumida por el editor por cualquier daño a las personas o a la propiedad como consecuencia de productos o servicios prestados u ofertados por otras personas o entidades, y otros derivados de la operación de algún método instrucciones o ideas contenidas a continuación.

ISBN:  
978-84-691-3612-6

DEPÓSITO LEGAL:  
SA-380-2008

IMPRIME:  
GRÁFICAS IGUÑA, S. A

## Patrocinadores

Ministerio de Fomento  
Sociedad Regional Cantabria I+D+i (IDICAN)  
Universidad de Cantabria (UC)  
Sociedad para el Desarrollo Regional de Cantabria (SODERCAN)  
Ayuntamiento de Santander  
Fundación Comillas  
Apia XXI  
Chempro  
Grupo Triguero  
Agrupación Tecnológica para la Rehabilitación del Patrimonio Construido (ATREP-UC)



## Colaboradores

Consejería de Cultura del Gobierno de Cantabria  
Politécnico de Milano. Dipartimento di Ingegneria Strutturale  
Politécnico di Bari. Facoltà di Ingegneria  
Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia  
Universidade do Minho. Department of Civil Engineering  
Universidad de Cantabria (Gted, Ladicim, Gif, Geotecnia, Geurban, Arte y patrimonio, Gtas)  
Universidad Politécnica de Madrid  
Universidad de Oviedo  
Universidad del País Vasco  
Universidad de Burgos  
Universidad de Valladolid (Dpto. Construc. Arquitectónicas de la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid, Davap)  
Fundación Marcelino Botín  
Fundación Santa M<sup>a</sup> la Real – Centro de Estudios del Románico  
Fundación Catedral Santa María  
Instituto Tecnológico de la Construcción de la Comunidad Valenciana (Aidico)  
Labein Tecnalia  
Scottish Lime Centre  
Acciona Infraestructuras  
Geotecnia y cimientos (Geocisa)  
Sika  
Fhecor Ingenieros Consultores  
Triax  
Estudio de ingeniería Dýnamis  
Montañesa de desinfección  
Chempro  
Innova Consulting  
CTC Lozano y asociados  
Álava ingenieros  
Panatec  
Boviar



# ÍNDICE

## PRESENTACIÓN

### Técnicas no destructivas aplicadas a la Rehabilitación del Patrimonio

1. *THE MOST INTERESTING NDTs IN BUILDING REFURBISHMENT STUDIES: LESSONS LEARNT IN THE INTERVENTION ON SOME HISTORIC ITALIAN CONSTRUCTIONS.*
2. *ANÁLISIS DE CARGAS EN LA BASÍLICA DE SANTA MARÍA DEL MAR DE BARCELONA.*
3. *LA VIDEOCORRELACIÓN, UNA TÉCNICA DE MEDIDA DE DEFORMACIÓN Y DESPLAZAMIENTO SIN CONTACTO.*
4. *APLICACIONES DEL GEORADAR EN LA INGENIERÍA CIVIL.*
5. *MONITORIZACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE FISURAS PARA EL DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL EN PATRIMONIO HISTÓRICO CONSTRUIDO.*
6. *METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.*
7. *INTEGRACIÓN DE METODOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS PARA LA EVALUACIÓN DEL PATRIMONIO INDUSTRIAL: CHIMENEAS.*
8. *TECNICAS NO DESTRUCTIVAS Y PSEUDO –NO DESTRUCTIVAS APLICADAS A LA MADERA ESTRUCTURAL.*

### “Campus Comillas, una rehabilitación emblemática”

9. *DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS SOBRE LA PATOLOGÍA, LA IDONEIDAD ESTRUCTURAL Y DE MATERIALES DEL SEMINARIO MAYOR DE COMILLAS. CONCLUSIONES OBTENIDAS.*
10. *CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES PÉTREOS ORIGINALES DEL EDIFICIO DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS.*
11. *PROCESOS PATOLÓGICOS DEBIDOS AL AGUA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS.*
12. *VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA NUEVA SEDE DE LA FUNDACIÓN CAMPUS COMILLAS.*
13. *APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS FOTÓNICAS EN LA REHABILITACIÓN DEL SEMINARIO MAYOR DE COMILLAS.*
14. *SAYME, WIRELESS SENSOR NETWORKS. SENSÓRICA INALÁMBRICA REMOTA DE BAJO CONSUMO Y GESTIÓN DE VIDEO IP DEL SEMINARIO MAYOR DE COMILLAS.*
15. *LA REHABILITACIÓN DEL ANTIGUO SEMINARIO DE LA UNIVERSIDAD DE COMILLAS.*

## **“Gestión del Patrimonio Construido”**

16. *EL CONTROL DE LAS INTERVENCIONES ARQUITECTÓNICAS EN EL PATRIMONIO CULTURAL DE CANTABRIA.*
17. *EL PATRIMONIO COMO FACTOR DE DESARROLLO. LA FUNDACIÓN SANTA MARÍA LA REAL, UN MODELO DE GESTIÓN DEL PATRIMONIO.*
18. *LOS PLANES DIRECTORES PARA LA RECUPERACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO: APROXIMACIÓN METODOLÓGICA Y DESARROLLO EN LAS MURALLAS DE LABRAZA (ÁLAVA)*

## **“Estudios específicos del patrimonio”**

19. *TWO CASES OF SENSITIVE STRUCTURES SUBJECT TO GROUND VIBRATIONS.*
20. *PLANEAMIENTO URBANÍSTICO Y REHABILITACIÓN URBANA. EL CASO DEL ÁREA DE REHABILITACIÓN INTEGRAL DE SANTANDER.*
21. *METODOLOGÍA DE LOS ESTUDIOS HISTÓRICO-ARTÍSTICOS EN LA RESTAURACIÓN.*
22. *LA PLATAFORMA UVACAD EN TAREAS DE DOCUMENTACION Y VISUALIZACION DEL PATRIMONIO.*
23. *REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA.*
24. *PUENTES DE AYER PUENTES DE HOY.*
25. *STRENGTHENING SOLUTIONS APPLIED TO SOME MASONRY WALLS: TRMTECHNOLOGY.*

## **“Otras experiencias en intervenciones del patrimonio construido”**

26. *HISTORY, SCIENCE AND TECHNIQUE IN THE METHODOLOGICAL APPROACH TO THE RESTORATION PROJECT.*
27. *LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE DEL INFANTADO DE POTES*
28. *REPARACIÓN DE UNA FACHADA.*
29. *ENSAYOS A ROTURA Y AUTOPSIA DEL PUENTE DE FÁBRICA URNIETA (GUIPUZCOA)*
30. *CONSOLIDATION OF CATHEDRAL OF PORTO.*
31. *ULTIMAS ACTUACIONES EN LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA DE VITORIA.*
32. *REHABILITACIÓN DEL TEATRO CAMPOS ELISEOS DE BILBAO.*
33. *REHABILITACION DEL CUARTEL DE GUARDIA DE CORPS*
34. *DE SAN IDELFONSO – LA GRANJA EN SEGOVIA.*
35. *ANOMALIES DIAGNOSIS AS A SUPPORT TO REHABILITATION STRATEGY FOR LARGE SCALE HOUSING BUILDINGS.*

## Presentación

Las Jornadas Técnicas Internacionales sobre "TECNOLOGÍA DE LA REHABILITACIÓN Y GESTIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO (REHABEND)", subvencionadas por el Ministerio de Fomento y por el Gobierno de Cantabria, cuyo Libro de Ponencias presentamos, se celebraron en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, Santander, España, los días 25 y 26 de Octubre de 2007.

La deceleración actual del sector constructivo en lo referente a nuevos emplazamientos va a redundar en un mayor interés por el mantenimiento y rehabilitación de construcciones, que amplificará los flujos económicos destinados al sector de la rehabilitación, y la necesidad de puesta a punto de las metodologías tratadas en el desarrollo de las jornadas. Por otra parte el no haberse alcanzado el "techo productivo" del sector de la rehabilitación en España es una interpretación directa del último informe SEOPAN referente al año 2006; en éste se obtiene que la producción de la rehabilitación y mantenimiento tiene que crecer en torno a un 12 % en España, para alcanzar los niveles europeos (en la actualidad el 37%), lo cuál redundará en la necesidad de conformar una masa crítica de expertos en este ámbito, en tanto que se considera una línea de trabajo con mucho futuro.

En noviembre de 2006 se pusieron en marcha las primeras jornadas REHABEND, de carácter nacional, referentes a las metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido. Siguiendo esta línea y siendo conscientes que otros países europeos son pioneros desde hace ya tiempo en el desarrollo, investigación e intervención del patrimonio construido, en esta segunda convocatoria se ha pretendido otorgar al evento una proyección internacional. Para ello, los ponentes de las Jornadas fueron profesionales, profesores e investigadores con amplia experiencia en el campo de la Rehabilitación del Patrimonio Construido de España, Italia, Reino Unido y Portugal. De la misma forma con el objetivo de hacer menos específico su contenido se han abierto los horizontes de las temáticas tratadas, manteniendo las metodologías no destructivas como eje central. En este sentido las Ponencias presentadas a lo largo de las Jornadas versaron sobre trabajos, experiencias e investigaciones, sobre metodologías no destructivas aplicadas al patrimonio construido, sobre la gestión del patrimonio en nuestro país y sobre experiencias llevadas a cabo en intervenciones tanto a nivel nacional como internacional. Cabe destacar la presentación pública, por vez primera, del proyecto de rehabilitación del Seminario Mayor de la Universidad Pontificia de Comillas, a la postre futura sede de la Fundación Comillas.

Desde GTED-UC teníamos como uno de los objetivos el consolidar un foro nacional de debate y de exposición de los avances y resultados que vayan surgiendo en España en relación a la conservación del patrimonio, a las metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación de construcciones y a la difusión de conocimiento y experiencia. Consideramos que el objetivo ha sido conseguido tras dos años de esfuerzo y gracias a la asistencia de participantes de diferentes ámbitos regionales, como Madrid, Valencia, Barcelona, País Vasco, Navarra, Castilla y León, Castilla La Mancha, Asturias, La Rioja, Cantabria, etc. La asistencia a las Jornadas Técnicas puede ser calificada como excelente, dado lo específico del tema de la Jornada y las limitaciones geográficas de la Universidad de Cantabria, ya que se logró alcanzar la cifra de 189 asistentes inscritos, de los cuáles 174 eran profesionales. De la misma forma durante los dos días del evento se conectaron a las ponencias, retransmitidas en directo vía Web, un total de 272 personas. Dicha circunstancia nos ha animado, aún más si

cabe, a consolidar el evento en años sucesivos, de forma que en un futuro el ámbito trascienda internacionalmente como Congreso.

Otra finalidad ha sido el preparar la publicación sobre la temática citada que ahora presentamos, fruto de las distintas intervenciones que se llevaron a cabo en las dos Jornadas, en tanto que seguro servirá de beneficio, de manera directa e indirecta, a los diferentes grupos y entidades que vienen trabajando en la línea de conservación del patrimonio. En este sentido un aspecto a destacar fue, además de la cantidad, la calidad de los participantes.

Finalmente, cabe mostrar nuestro más sincero agradecimiento a los autores y ponentes participantes, en tanto que han invertido parte de su tiempo, su bien más preciado, y un gran esfuerzo en recopilar la información que disponían sobre sus experiencias aplicables a este apasionante campo del conocimiento, la rehabilitación del patrimonio construido.



*D. Ignacio Lombillo Vozmediano  
Ing. de Caminos, C. y P. Doctorando UC  
Investigador de GTED-UC  
Coordinador de las Jornadas Técnicas*



*D. Luis Villegas Cabredo  
Dr. Ing. de Caminos, C. y P.  
Catedrático de la Universidad de Cantabria  
Director de GTED-UC  
Director de las Jornadas Técnicas*

Santander, Cantabria  
26 de Octubre de 2007

## **THE MOST INTERESTING NDTs IN BUILDING REFURBISHMENT STUDIES: LESSONS LEARNT IN THE INTERVENTION ON SOME HISTORIC ITALIAN CONSTRUCTIONS**

Luigia Binda<sup>1</sup> ([binda@stru.polimi.it](mailto:binda@stru.polimi.it)); Antonella Saisi<sup>2</sup> ([saisi@stru.polimi.it](mailto:saisi@stru.polimi.it)).

<sup>1</sup> Full Professor, DIS - Dept. of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy.

<sup>2</sup> Assistant Professor, DIS - Dept. of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy.

### **Summary**

Conservation of historic buildings requires a deep knowledge of structures and materials, of their characteristics and eventual state of damage and its causes. Investigation procedures applied at different levels of complexity from monuments to “minor” historic buildings for several purposes are briefly outlined with particular interest in non-destructive techniques (NDT). The most successful and interesting applications made by the Authors to historic buildings are presented with special attention to the complementarity of different techniques.

### **1.- Introduction.**

Prevention and rehabilitation can be successfully accomplished only if a diagnosis of the state of damage of the building has been formulated (Binda 1983). Besides the damage investigation before the intervention, the effectiveness of the repair techniques should also be controlled during and after the repair work, as well. It is known that a correct intervention on a historic structure should start from an accurate diagnosis of the building in order to minimise the interferences of the intervention with the authenticity of the architecture. The investigation also may require long-term monitoring of the structure. The diagnosis should result from an experimental investigation on site and in the laboratory aimed to define the characteristics of the materials and of the structure itself and from the structural analysis based on appropriate mathematical models. It should also be clear that the investigation on site must be non-destructive as far as possible and give information with good precision.

The structural performance of a historic masonry building can be understood provided the following aspects are known: (a) its geometry; (b) the characteristics of its masonry texture (single or multiple leaf walls, connection between the leaves, joints empty or filled with mortar); (c) the physical, chemical and mechanical characteristics of the components such as bricks, stones, mortar; (d) the characteristics of the masonry as a composite material (Binda 2000a); (e) the material decay; (f) the state of damage of the structure.

In order to fulfil these needs an on-site experimental investigation is required and recommended also by Codes of Standards in several countries. Several investigation procedures have been applied in the last decades most of them coming from other research field (e.g. medicine, aerospace engineering) or from application to the study of new materials (steel, concrete, composites). Nevertheless, to apply non destructive, although advanced, techniques to masonry which is a composite, highly non homogeneous material can be frustrating due to the difficulty of interpretation of the collected data (Binda 1999a).



Furthermore, when a complex investigation is carried out using different techniques, the highest difficulty is represented not only by the interpretation of the results of the single technique but also by the harmonisation of all the collected data (Binda 2001a).

To this purpose the development of new more appropriate software for the elaboration, interpretation and fusion of data particularly from NDT is needed (sonic, radar, flat-jack tests, static and dynamic monitoring). The production of guidelines for the correct application of investigation techniques to the different classes of masonries and of masonry structures (Binda 1999b), (Binda 2007a) is also important.

The solution of very difficult problems as the detection of the morphology of multiple leaf masonry sections, the presence of voids and cracks in masonries, their mechanical characteristics, cannot be reached with a single investigation technique, but with the complementary use of different techniques (Binda 2005a).

Some typical problems solved by the Authors with the combination and the complementary use of different techniques such as boroscopy, radar and sonic tests, flat-jack and sonic tests, sonic and radar tomography and others will be presented. The research was carried out on several Italian case histories and the most significant ones are presented in the following.

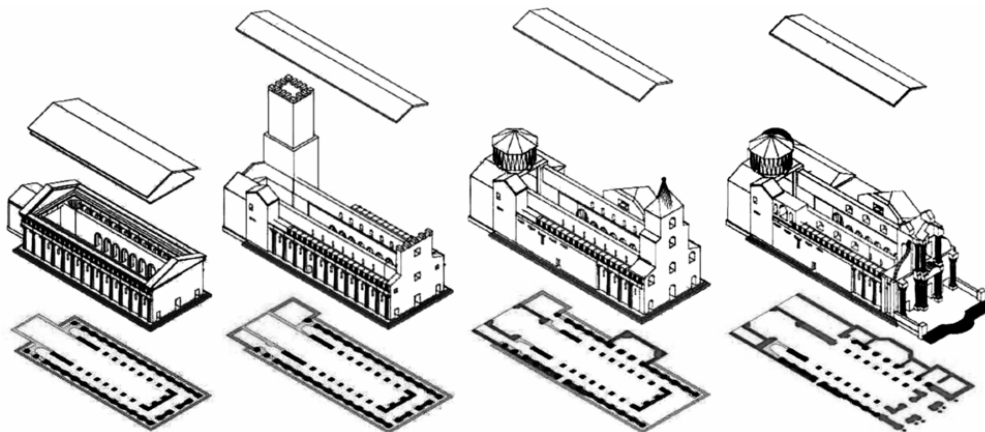
## **2.- Structural damages caused by multiple interventions: the Syracuse Cathedral.**

The Cathedral of Syracuse is the result of the transformation of an ancient Greek temple from the 5th cent b.C. with modifications that have also been consequence of the damages caused by earthquakes.

The first step of the investigation carried out (Binda 2007b) was in fact the study of the historic evolution of the structure due, not only to its architectural transformation but also to the earthquakes by which it was hit along the centuries (*Figure 1*).

In 6th century A.D., during the Byzantine period, the temple was transformed into a church with a nave, obtained from the internal cell, and two aisles. The external space between the columns was filled by stonework masonry. The walls of the temple cell were cut, obtaining arcades and pillars (*Figure 2*). The works were carried out with precision taking into account the Greek masonry techniques made by large stone blocks and the necessity of the arch rhythm (*Figure 3*).

*Figure 4a* shows a presentation of the damage occurred in 1542 in the north side with a



*Figure 1: Syracuse Cathedral evolution before the earthquake of 1169, 1542, 1693, 1800.*

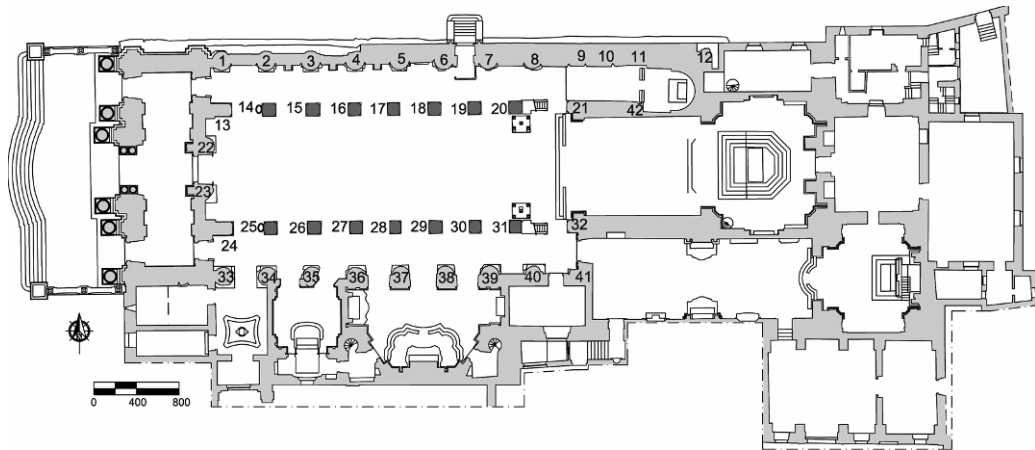


Figure 2: Plan of the Syracuse Cathedral with the pillars numbering

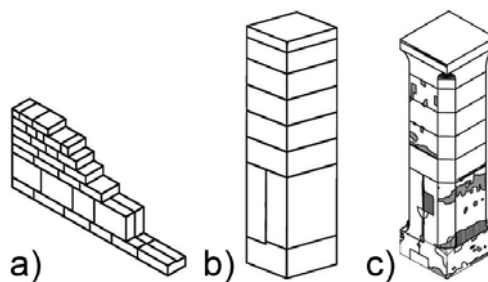


Figure 3: Scheme of the pillar assemblage of the Syracuse Cathedral: (a) original wall, (b) original shape of the pillars and (c) shape after 1924-26 intervention.

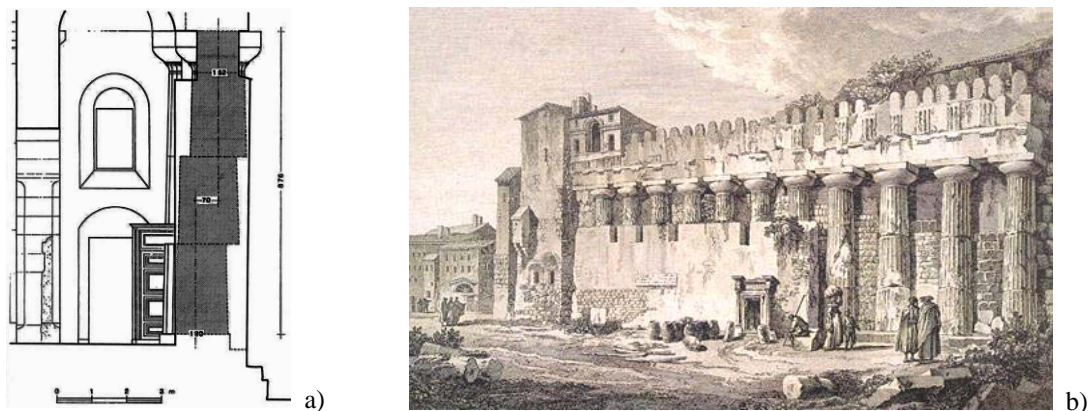


Figure 4: Detail of a damaged column in the Syracuse Cathedral (a) and view of the intervention following the earthquake in a picture of 18th century (b).

shift of the column drum still visible. The wall was strengthened as shown in *Figure 4b*.

At the beginning of 20th century (1924-26), several interventions were carried out as the removal of the baroque decoration inside the church.

More in detail, the pillars of the central nave, obtained by cutting the walls of the temple cell, show a complex situation of damage and repairs (*Figure 5*). The crack patterns, with mainly vertical cracks at the lowest part and on the corners (*Figure 6*), could represent a situation of progressive damage and needed a careful investigation in order to understand the causes.

Due to the complex situation, the survey of the pillars was carried out with an accurate mapping of the several superficial materials, of the defects, of the cracks and of the

*The most interesting NDTs in building refurbishment studies: lessons learnt in the intervention of some historic Italian constructions*

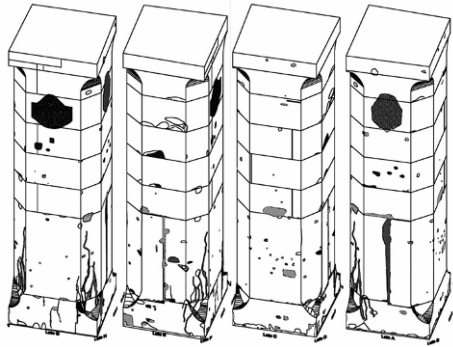


Figure 5: Cracks pattern survey of the pillar 26 of the Syracuse Cathedral

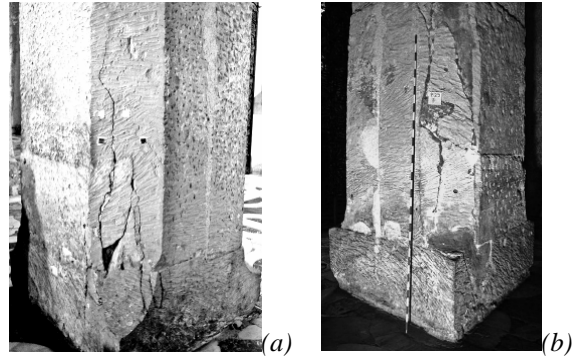


Figure 6: Damages on pillars 26 (a) and 29 (b) of the Syracuse Cathedral

morphology (Figures 5 and 7). The survey presented in Figure 5 for the pillar 26 was extended to all the 18 pillars.

The out of plumb of the pillars was measured both in the aisles and in the nave. The horizontal displacement measured on top of each pillar of the right side are substantially higher than the left side ones. The maximum values concern the pillars 25, 26, 27 (Figure 2) and reaches 14 cm (Figure 8). Taking into account the geometry of the church this could be partially explained by the fact that the left aisle of the building is less restrained than the right one (Figures 2 and 8). Nevertheless, the presence of the short span vaults in the left aisle could produce an increase of stiffness for the left side of the nave.

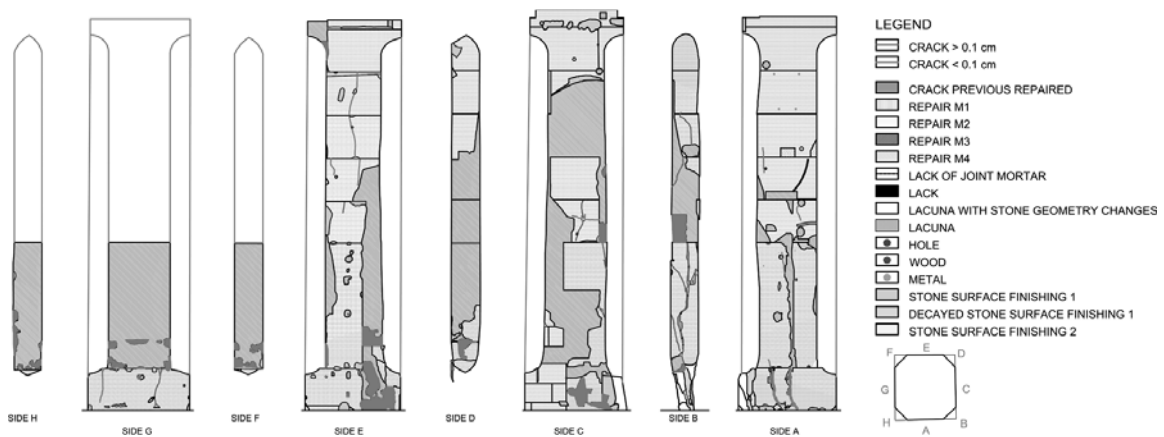


Figure 7: Survey of the pillar 19 of the Syracuse Cathedral.

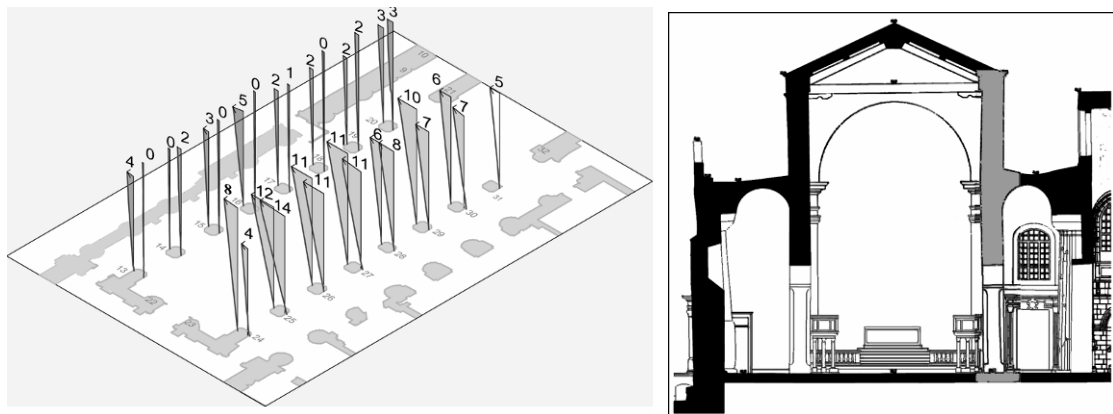


Figure 8: Out of plumb survey of the Syracuse Cathedral.

The crack pattern was accurately documented by pictures (*Figure 7*) and reported on the geometrical survey (*Figures 5 and 7*). A classification of the cracks was made according to their thickness. Particularly, the survey has localised the most frequent damage on the base and on the corners of the pillars.

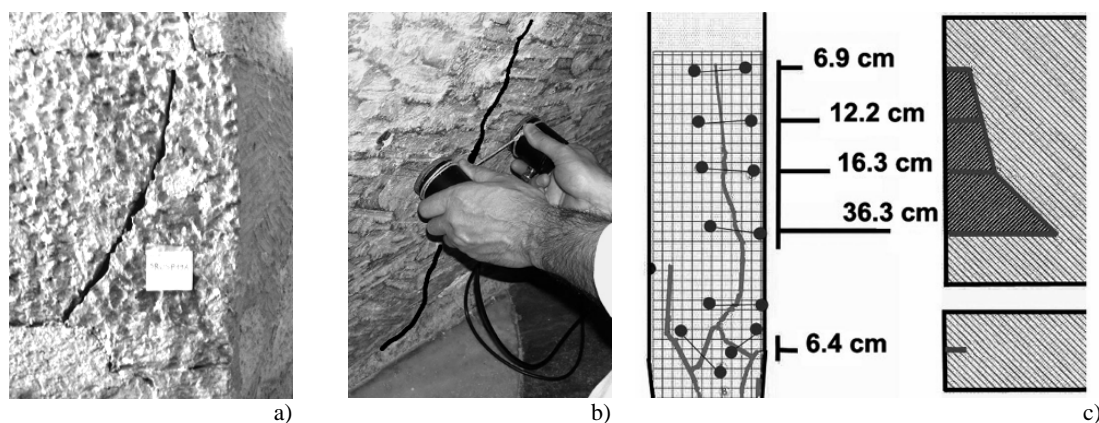
The cracks have frequently a vertical pattern, showing the presence of high compression stresses, caused not only by the dead loads but also by the fatigue effects of successive earthquakes. In some cases, the corners and part of the stone blocks were expelled. The mortar traces in these cases were trials made in the past to locally repair the damage. In the survey, the repaired cracks were enhanced in order to evaluate the evolution of the damage. The differences of the surface appearance were also reported to stress the sequence of the interventions.

The archive and on-site surveys allowed to understand a number of problems to be solved: (i) the depth of the cracks visible on the surface, (ii) the soundness of the stones, (iii) the depth of the layers of rendering and their bond to the support, (iv) the presence of inclusions, reinforcement, flaws in the stones. All this information could not be collected by a single NDT (Binda 2000a). Therefore, the following techniques were chosen: (i) sonic and ultrasonic tests to detect the inside density of the material and the depth of cracks, (ii) thermovision to evaluate the extent of detachment problems affecting the rendering simulating the stone, (iii) georadar as complementary to ultrasonic test and thermovision, to find deep defects and hidden inclusions.

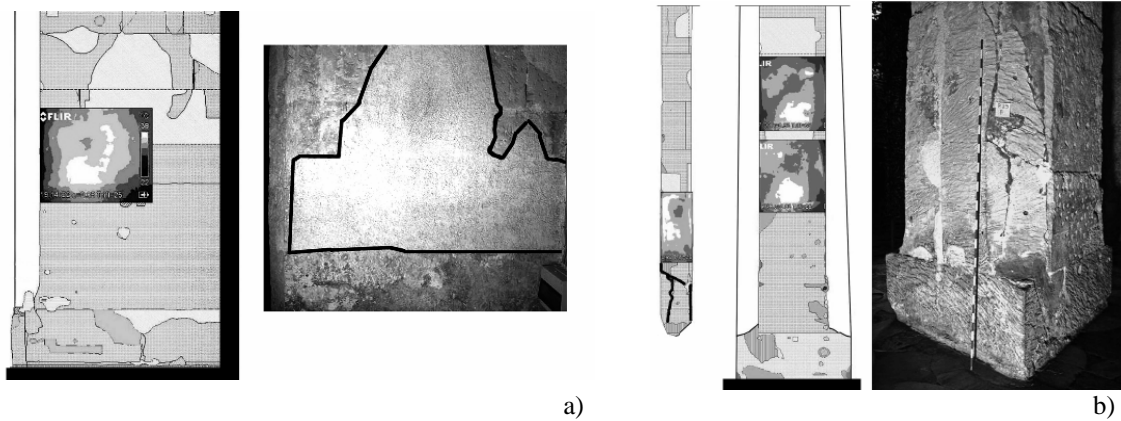
Ultrasonic tests, carried out across the main cracks of all the pillars (*Figure 9a*), allow estimating the depth of the cracks (*Figure 9b*) (Bungey 1982). The tests showed that the cracks could have a great depth up to 40 cm being the section of the pillars averaging about 125 x 125 cm.

Thermovision was mainly applied to estimate the detachment of the several types of rendering or remaking of the stone surface applied in the past interventions. In these cases, it was not clear the reason of such intervention and which type of material could be under the covering. In most cases, the covering seems to be detached from the support, revealing the poor compatibility between them (*Figure 10*). This situation was found in several positions.

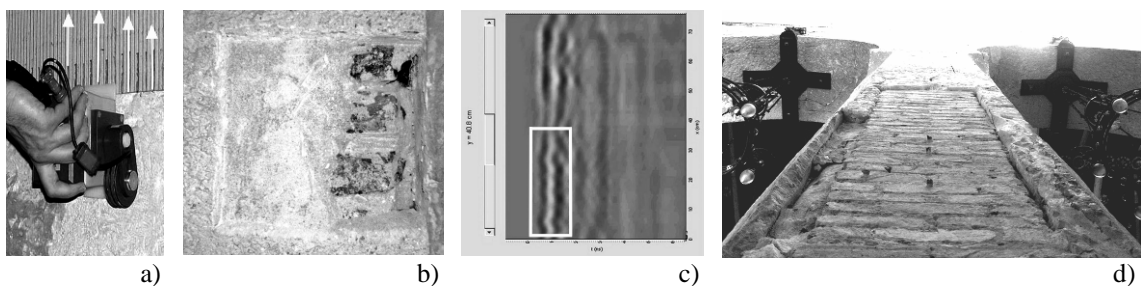
Georadar was applied to investigate the masonry morphology beyond the covering and to control the presence of internal defects and cracks of the pillars. A high frequency antenna (2.0 GHz) was also used to estimate the thickness of the rendering applied to reconstruct the external surface of highly damaged pillars. Finally, it was used to find



*Figure 9: Ultrasonic test procedure (a,b) and result of the tests on the pillar 31 of the Syracuse Cathedral (c) with the extension of the cracks inside the pillars.*



*Figure 10: Thermovision carried out on the pillar 13 (a) and 29 (b) of the Syracuse Cathedral. Higher temperatures (white and light grey) observed after artificial heating are associated with covering detachment problems.*



*Figure 11: In pillar 18 of the Syracuse Cathedral, the radargram shows the presence of regularly spaced diffractions (about every 5-6 cm) at a depth of about 3-4 cm. The inspection proved that these pillars were sometimes repaired with bricks*

expected and unexpected steel reinforcements applied during past restoration activities. In the most damaged pillars 18, 19, 29, 30, the radar investigations detected the presence of regularly spaced diffractions (about every 5-6 cm, *Figure 11a*) at a depth of about 3-4 cm, i.e., just behind the plaster. A direct inspection in one of these areas (*Figure 11b*) proved that unexpected brickwork used to substitute some stones during past repairs, probably in the 1920s, produced the diffractions.

Monitoring of the most important cracks was then set up in order to assess possible risks and to understand the mechanical behaviour of the structure, before planning an intervention. The first results of monitoring show a continuous movement in the Chapel walls and in pillars 19 and 18, not correspondent only by the temperature variation, showing a dangerous instability of the cracks. This situation indicates that the damage is probably caused by the insertion of a softer material (brickwork) into a large-block stone masonry. The change of the material probably made in the 20th century was worsening a situation of pre-existing damages causing the stiffer stones to assume higher stresses than the ones passing through the brickwork.

In the special case, the use of several NDTs helped in detecting the damage and also its cause.

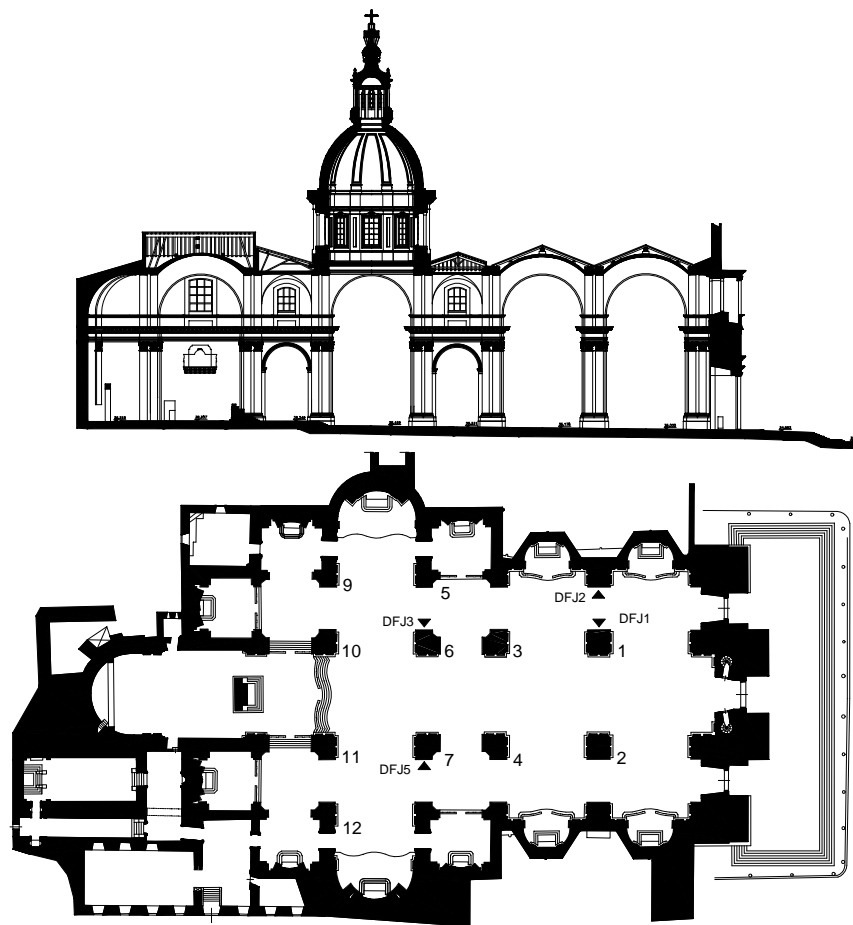
### **3.- Pillars damages caused by different construction techniques: Church of S. Nicolò l'Arena.**

After an earthquake, which struck the Eastern part of Sicily in 1990, the structural elements of the Church of S. Nicolò l'Arena in Catania (*Figure 12*), as the dome and the vaults, were damaged and the presence of vertical cracks on the oldest pillars of the

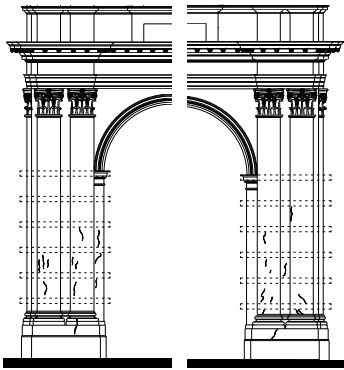
Church was detected (*Figure 13*). In fact it was known that the Church, which was previously much smaller, had been enlarged in the 17th and 18th century.

The type of crack, due to high compressive state of stress, can indicate an unsafe situation as it was shown by the Authors in other cases (Binda 2003a), (Noto Cathedral (Binda 2001a), (Binda 2001b), SS. Crocifisso Church in Noto (2001c), (Binda 2007c)). Then, an investigation programme (including sonic, flat jack, coring, boroscopy, etc.) was planned to evaluate the state of conservation of the structure and to design the preservation and restoration actions (Binda 2003b). Geometrical and crack-pattern surveys were carried out (*Figure 13*), after core drilling in order to study the stratigraphy of the masonry and see, through the use of boroscopy, the presence of internal cracks and voids. Unfortunately core drilling is very local and the boroscopy did not allow to survey the highly inhomogeneous interior.

Along the centuries, the original Church belonging to a Monastery damaged by earthquakes and by the Etna volcano eruptions was enlarged. The original pillars (1 and 2 in *Figure 12*), which now belong to the entrance and to the first arcade, were built with a different construction technique than the new pillars, as appeared from a direct inspection of the masonry texture and of the drilled cores. All are made with volcanic stones and lime mortar. Nevertheless, the original pillars have a highly inhomogeneous section with a mixture of large irregularly cut stones and rubble material surrounded by a cover more than 300 mm thick. This is made with tile fragments, stones and rather weak mortar, a technique locally called "incoccio" (*Figure 14*). The mortar sampled from the "incoccio" of pillar 1 is shown in *Figure 15*. This material appears very weak



*Figure 12: Localisation of the tested pillars in the S. Nicolò Church.*



*Figure 13: Crack pattern of pillar 1 of the S. Nicolò Church.*



*Figure 14: Texture of the "incoccio" cover in the S. Nicolò Church.*



*Figure 15: Consistence of the mortar sampled from "incoccio" in pillar 1 of the S. Nicolò Church.*

and incoherent.

The other pillars have a multiple leaf section with large more regularly cut stones (Figure 16) on the external leaf and rubble filling with a rather strong hydraulic mortar.

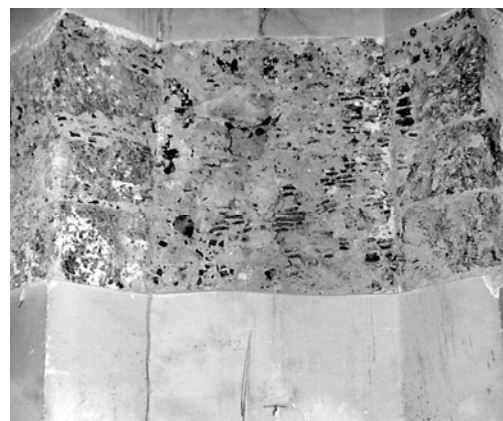
The characteristic of the two masonry typologies used for the pillars was investigated by double flat jack tests, which clearly revealed two completely different mechanical behaviours (Figures 17 and 18). These characteristics are of primary importance in the numerical structure modelling for safety control. The double flat jack results carried out on the pillars with "incoccio", show deformation about 10 times larger than the one of the other tested pillar even for the lowest stress values (Binda 2001a) (Figures 17 and 18). This comparison between the two series of data enhances the different mechanical behaviour of the two characteristic masonries of the Church.

Figures 17 and 18 show the local state of stress, measured by single flat jack; the stress values are high and out of the elastic range of the materials in some of the measured points. Although these data cannot give information on the behaviour of the internal leaves of the pillars, they can be considered important information on the pillar situation and behaviour, clearly showing a weak inhomogeneous material in the external leaf.

In order to define the morphology of the two different masonries, sonic tomography was extensively applied in the Church pillars, producing 28 tomographic sections (18 horizontal and 10 vertical). The two most damaged pillars at the entrance of the Church



a)



b)

*Figure 16: Regular stone-block masonry and regular stone-block masonry with "incoccio" in the S. Nicolò Church.*

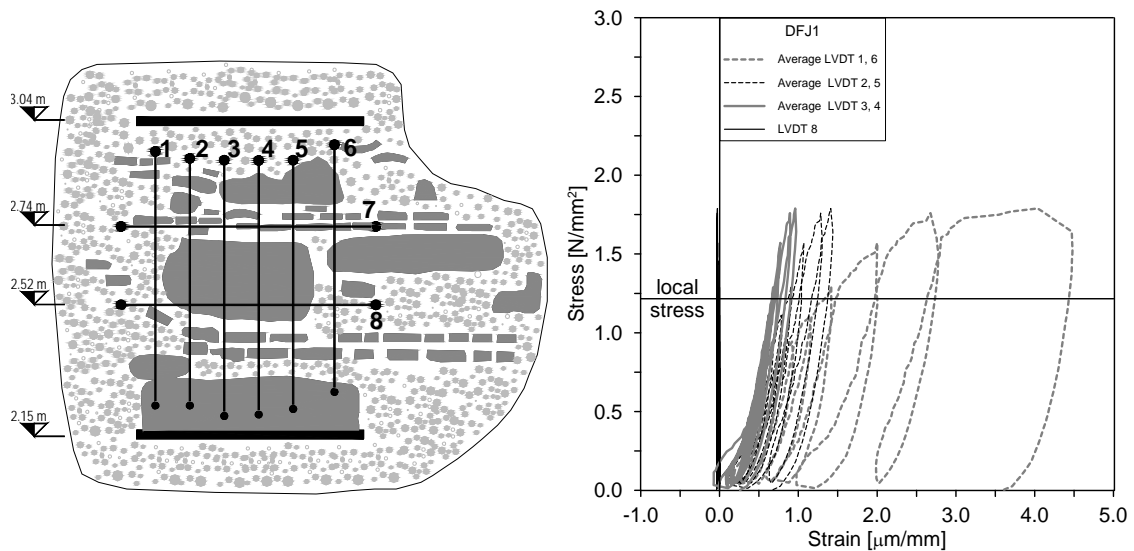


Figure 17: Masonry texture and result of the double flat jack test DFJ1 on pillar 1 of the S. Nicolò Church.

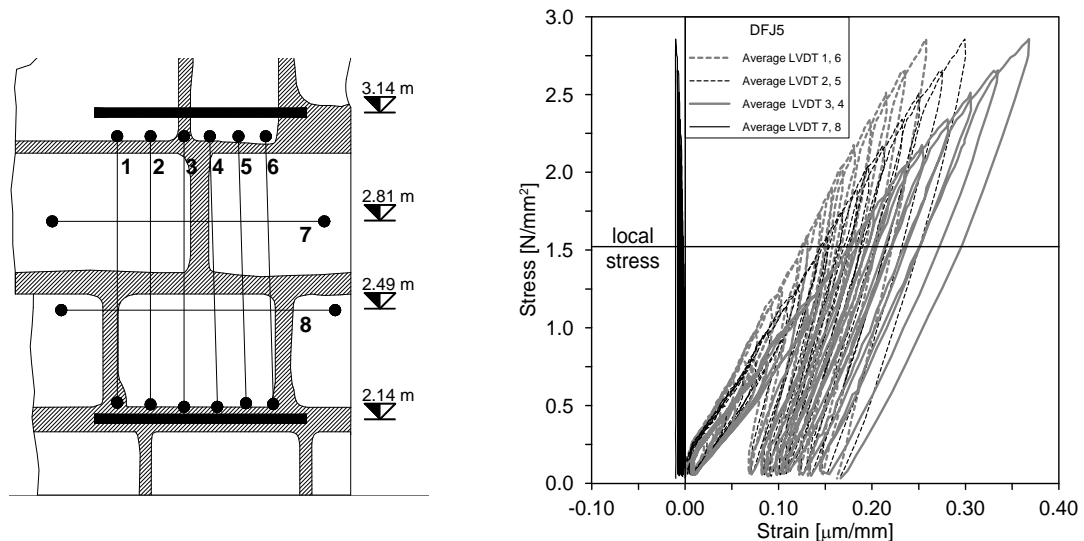


Figure 18: Masonry texture and result of the double flat jack test DFJ5 on pillar 7 of the S. Nicolò Church.

were investigated with much care.

In Figure 19 the sequence of the horizontal tomographies of pillar 1 is represented.

A typical distribution of the velocity on both the damaged pillars shows average velocities relatively high at the base and at the top of the pillars and very low velocities in the middle.

The very low velocities that were in the pillars 1 and 2 and the fact that these pillars show a dangerous crack pattern confirm the need of urgent preservation actions. From an external observation, the masonry texture seems, as said above, very poor, characterised by the presence of the so called "incoccio".

It is worth to remember that also from coring of the pillars it was observed that the internal mortar is locally very weak. So in this case the use of coring showed the inhomogeneity and the internal weakness confirmed by sonic tomography. Single flat jack test indicates the presence of a high state of stress, which has caused the crack



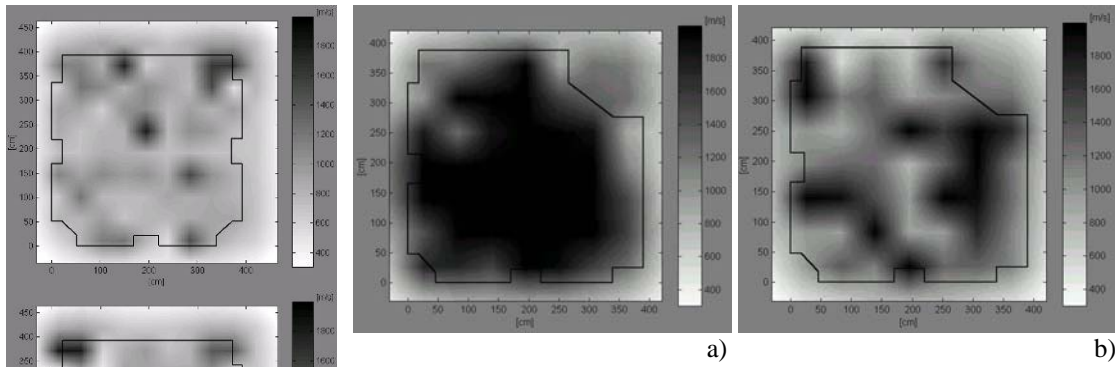


Figure 20: Horizontal sections of pillar 6 (a) and pillar 10 (b) of the S. Nicolò Church at 5.8 m.

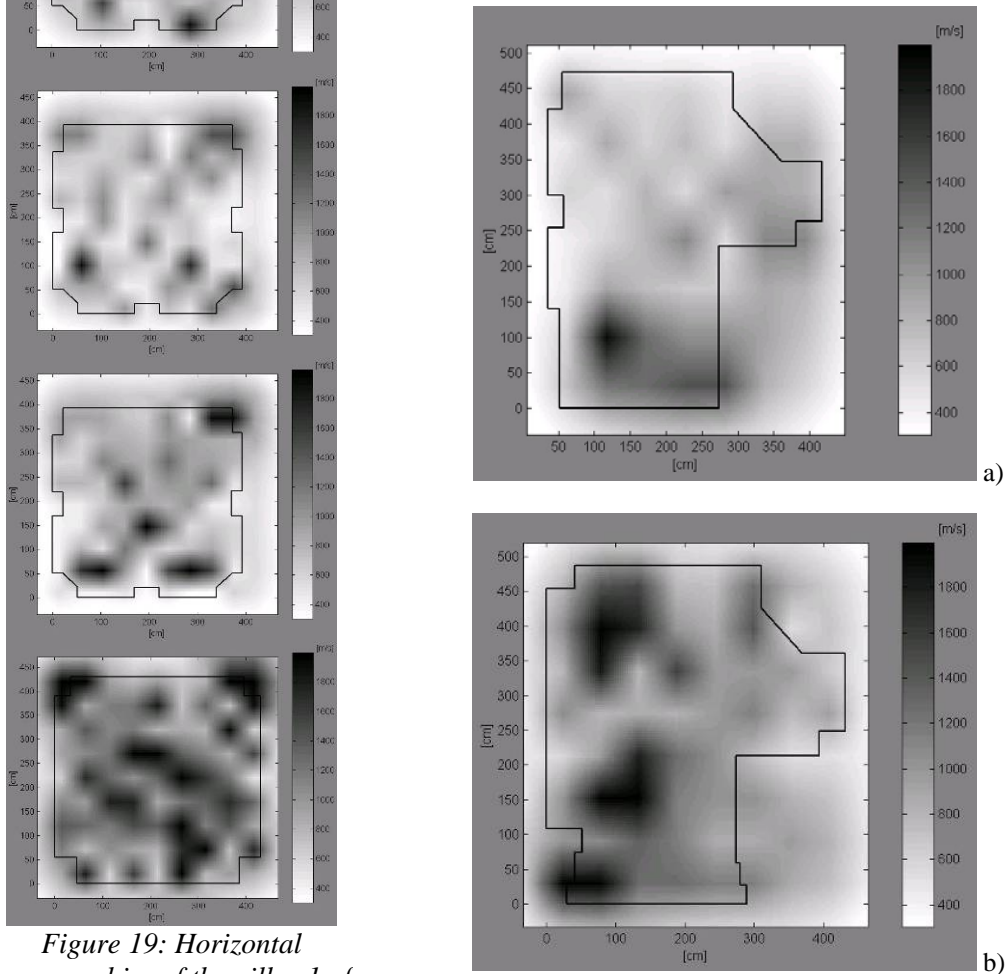


Figure 19: Horizontal tomographies of the pillar 1 of the S. Nicolò Church at 9.1, 7.8, 5.1, 3.8, 1.8 m (from top to bottom).

Figure 21: Horizontal sections of pillar 9 of the S. Nicolò Church at 1.40 (a) and 4.90 m (b).

formation.

The other pillars that have been investigated generally present much higher velocities indicating a less alarming state of conservation (Figure 20).

In particular the pillar 6 seems characterised by the best quality material, as it is possible to recognise in Figure 20. The observation of the masonry texture reveals large block

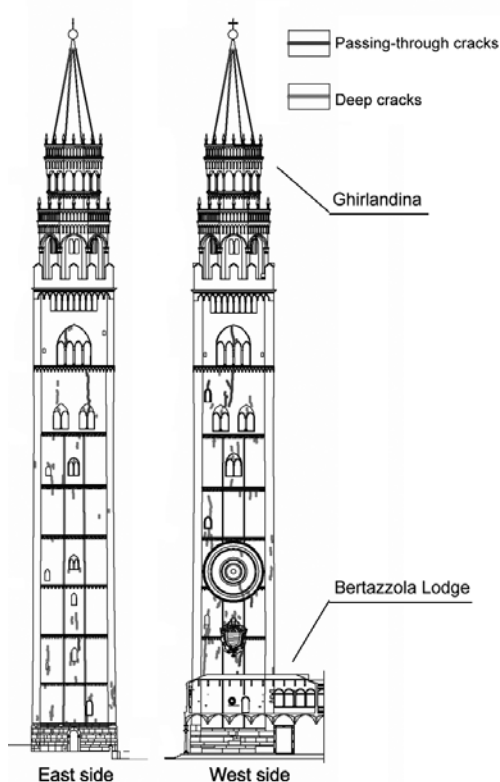
stonework, rather regular.

Some results on two very large pillars characterised by a complex geometry are worth of attention (pillars 9 and 12). They show higher velocities on the narrow side of the pillar and lower velocity on the large side (*Figure 21*). It is particularly readable in the vertical sections, as well.

This trend is symmetrically observed on both the pillars (9 and 12) and might be related to a specific construction design or to a non homogeneous state of degradation of these elements.

#### **4.- Presence of external leaf detachment.**

The Authors have applied non destructive and slightly destructive techniques (radar, sonic tests, boroscopy and flat jack) in order to investigate the situation of the Bell-Tower of the Cremona Cathedral, called *Torrazzo* (*Figure 22*) (Binda 2000b, Binda 2000c). Georadar, using different frequency antennas, were applied to recognise the wall morphology and the presence of local defects (Binda 2000c). This presence was confirmed by a number of local tests as boroscopy and flat jacks; nevertheless, the use of NDTs was necessary to investigate the extension of the eventual defect over large surfaces (Binda 2005b).



*Figure 22: Crack pattern survey of the Bell-Tower of the Cremona Cathedral*

*Figure 23: Detail of the cladding detachment in the Bell-Tower of the Cremona Cathedral.*

The most interesting results concerned the detection of the presence in some parts of the Tower, of an external thin leaf one brick thick which was partially detached from the rest of the wall section (*Figure 23*). The thickness of the whole brick masonry section varies from 3.0 m at the base to 2.0 m at the top.

This seemed to be a rather unusual way of construction in Italy, since according to the continuity with the Roman techniques the walls were usually multiple leaves until 15th

century. Other studied cases show that medieval towers made with solid brick walls and the same technique of construction. The presence of the detachment of a sort of external leaf was noticed in several parts of the Tower. Cores from boreholes and boroscopy were also showing this phenomenon. By this so punctual investigation it was impossible to understand whether this detached part was built after the walls as a sort of cladding or it was born as a solid part of the wall; this could be only partially connected to it and subsequently detached as a consequence of the damage occurred to the Tower due to long term behaviour of the masonry. This phenomenon is not dangerous for the Tower stability, but in any case, a safety problem is affecting the Tower, since a collapse of large parts of this leaf can be very dangerous.

Due to the large dimensions of the tower external walls, it was necessary to match the results of local tests as boroscopy and flat-jack to ND tests (radar) which could be more easily applied and extended to large parts of the tower sides (Figure 24).

An unpredictable anomaly was found in the results of the flat jack tests in various positions (Figure 25). A large difference between the stress values measured in the internal face of the wall and in the external face was found. The internal part average stress value of  $1.63 \text{ N/mm}^2$  is definitely higher than the outer average one of  $0.73 \text{ N/mm}^2$  (being  $0.40 \text{ N/mm}^2$  the minimum) suggesting the presence of detachments of the

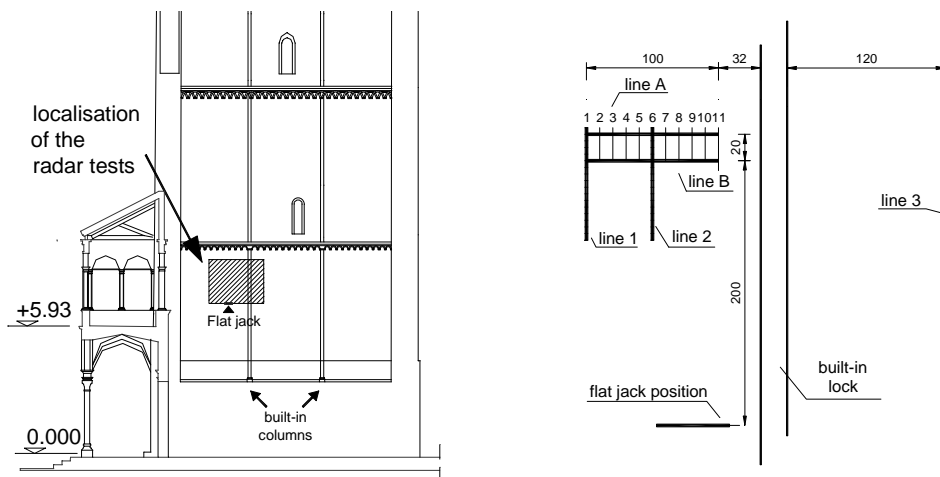


Figure 24: Localisation of the radar and flat jack tests in the South side of the of the Bell-Tower of the Cremona Cathedral.

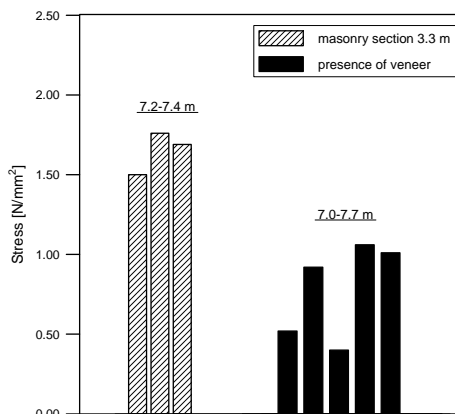


Figure 25: Stress distribution measured by single flat jack at the same level of the Bell-Tower of the Cremona Cathedral.

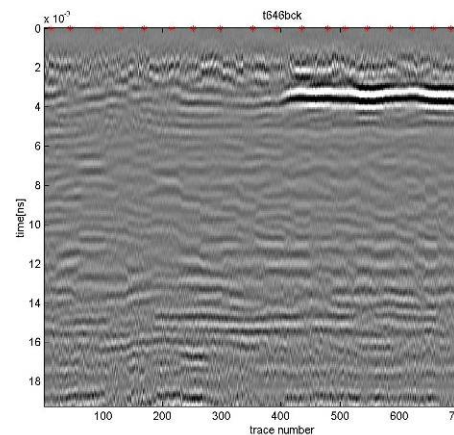


Figure 26: Bell-Tower of the Cremona Cathedral: scan line called 1 in Figure 24. From left to right the antenna is moving down.

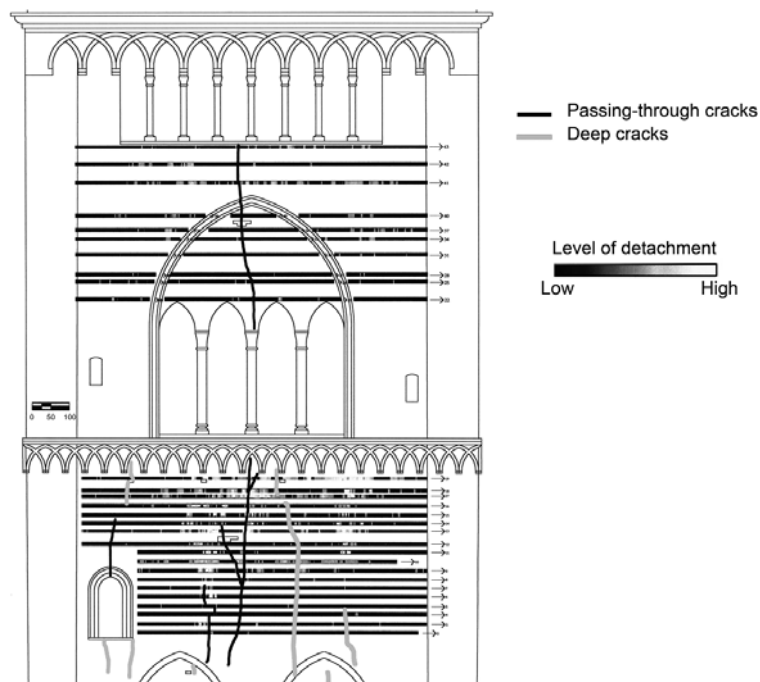
external leaf of the wall or eventually a non uniform distribution of stresses due to eccentric loads, but this was not the case. The fact appeared strange as in this area the wall of the tower was supposed to be solid.

The radar tests which interested the east side of the Torrazzo at the level of the Bertazzola lodge were carried out in proximity of the flat jack tests (*Figures 25 and 26*). The first tests performed on the Bertazzola lodge were used essentially to calibrate the radar and to control if it was really able to detect the presence of the external leaf. *Figure 24* shows the localisation of the radar tests.

The radar tests were carried out by moving horizontally the 1.5 GHz antenna, along line scans called A and B while line scans called 1, 2, 3 in *Figure 26* were acquired by moving the antenna vertically, from up to down.

The horizontal profiles, concerning scan lines A and B, did not show any evidence. The vertical scans along lines 1, 2, 3 of *Figure 24* contained enhanced reflections parallel to the wall surface in the lower part of the profile. As an example, *Figure 26* shows the radar section along vertical line 1. Line 2 and line 3 produced very similar results. The effect can be explained by the presence of a void or a detachment in the lower part of the scans. It is interesting to stress the high readability of the reflections that demonstrated the sudden change in the dielectric characteristic of the media, produced by the detachment of the external leaf. In conclusion, the supposed detachment is localised below line B in *Figure 24*, and extended in most of the wall area, from line 1 to line 3.

The detachment is revealed on the radar data by a strong reflection that appears at a constant depth of approximately 12 cm. Associating the intensity of the radar energy back scattered by the void space behind the external leaf a detachment map can be obtained. The technique was applied to various large areas. In *Figure 27* white indicates areas with serious detachment problems while black areas are expected to be safe. The



*Figure 27: Detection of the areas affected by the detachment problem in the Bell-Tower of the Cremona Cathedral. The grey-scale map is associated with the intensity of the detachment phenomenon.*

images were overlapped to the crack pattern survey to facilitate the correlation of the detachment with the stress state apparently affecting this side of the Tower. The lower part in *Figure 27*, in fact, was more affected than the upper one by cracks and deformations of the external surface induced by the stress state. This deformation trend is very likely the main reason of the detachment problem affecting this area.

The result showed the ability of the radar tests to detect clearly this phenomenon which is affecting other cases.

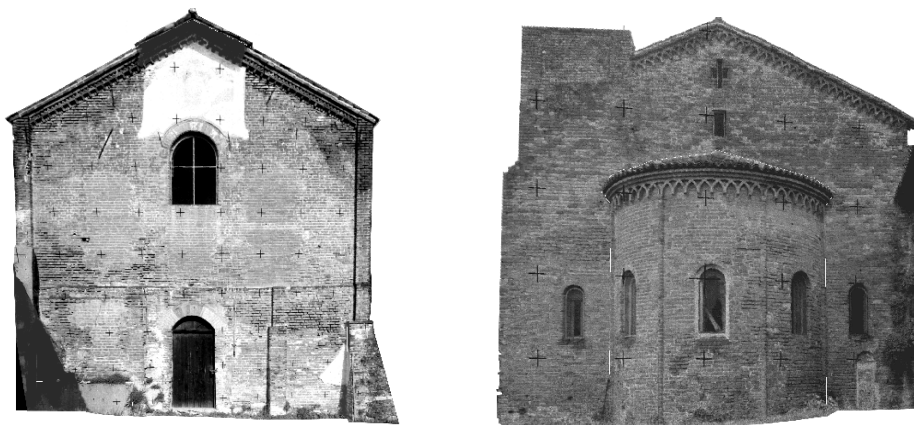
### **5.- Moisture detection: St. Maria Rossa Church**

The decay of masonry surfaces is often caused by the presence of the humidity in the wall. The investigation on this specific problem can be subdivided in (i) detection of the presence of moisture, (ii) evaluation of the moisture content. Some techniques are very sophisticated and expensive but completely non destructive like the thermovision or radar test (Binda 1994), others are cheaper, like the power drilling method, but not often repeatable in the time, being locally partially destructive.

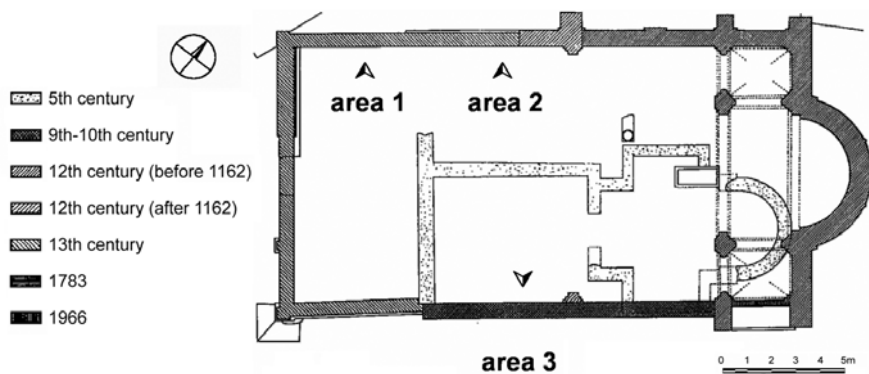
Furthermore, the radar and thermovision methods can scan large portions of the walls while the drilling test is very local.

The choice of the investigation methodologies, then, is a function of the adopted strategies and necessities, but also of the available budget.

For the decay prevention, it is often enough a general mapping of the moisture. In fact, the most decayed areas are usually the ones affected by dry-wet or frost-defrost cycles, with salt deposits.



*Figure 28: The Church of S. Maria Rossa.*



*Figure 29: Plan of the S. Maria Rossa Church. The three areas investigated are marked with arrows.*

In the following, different tests are compared and applied on a case history: the S. Maria Rossa Church (Binda 1998) (Figures 28, 29). Radar microwave borehole measurements, thermovision and the power drilling method were combined for the characterisation of the moisture content and distribution on the historic brickwall within the framework of a BRITE EC contract.

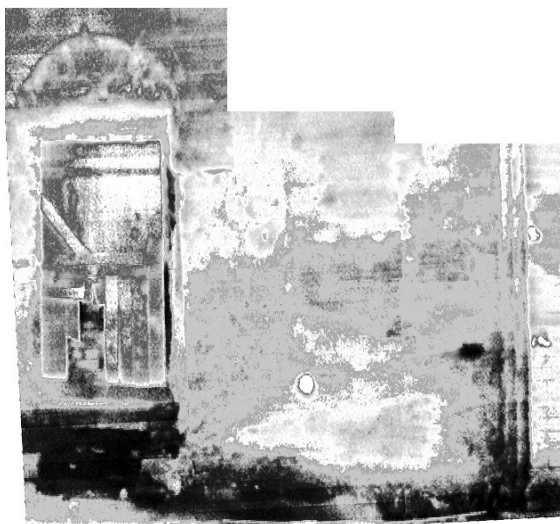
The thermovision returns a general mapping of the area, displaying the surface temperature and qualitatively the wet area (Figure 30) The advantage of the technique is the rapidity of the test on a large portion of the masonry but only on the surface and without any quantitative correlation with the water content.

Similar observation could be done for the radar application. The technique gives information on the moisture presence within the masonry, not only on the surface as thermovision; moisture is expected to be revealed by a decrease of the EM wave velocity and by an increase of the EM wave attenuation. This is clearly demonstrated by laboratory tests (Figure 31) where a 1GHz antenna is moved down along a vertical profile, approximately 2m long; moisture is rising from the wet soil and as a result the EM velocity is expected to decrease as the antenna is approaching the base of the masonry. The effect is a gradual increase of the reflection time from the opposite side of the masonry. Some years ago, some correlation was attempted between the EM parameters and the water content (Binda 1994).

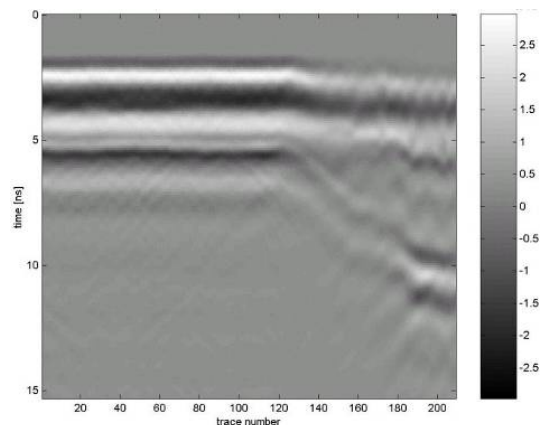
The microwave borehole measurement is a technique developed by BAM (Rudolph 1993), able to detect the distribution of the moisture in the masonry section, at present only qualitatively. In fact, the technique, evaluating the properties of the material by the EM wave transmission, needs correlation curves between the measured parameter, permittivity, and water content, for each tested material (Figure 32).

The method requires the drilling of two thin holes with a diameter of 12 mm, a distance of 50 mm and a depth corresponding to the thickness of the wall, thus this method is only quasi non-destructive. Leaving the holes accessible, the technique can be repeated as monitoring tool.

The last method, the powder drilling test is a low cost technique often used, which gives



*Figure 30: Thermovision applied to the area 2 of the S. Maria Rossa Church.*



*Figure 31: GPR data from a profile on a partially wet brick masonry. The effect of moisture content is observed on the right side of the section.*

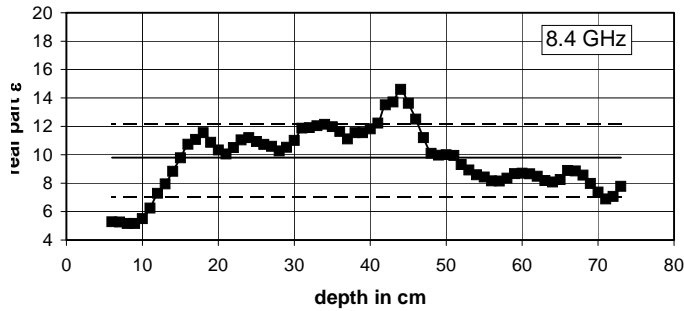


Figure 32: Depth resolved presentation of the real part of permittivity (area 2 of the S. Maria Rossa Church). The mean value is shown as a solid line while the mean value obtained by radar as a dashed line.

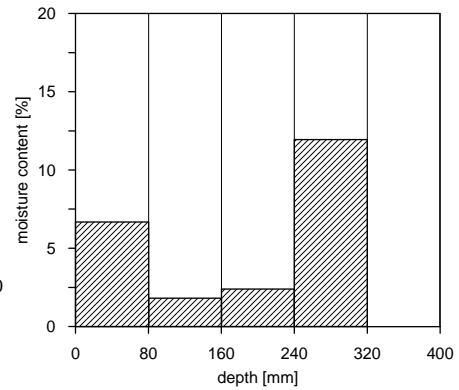


Figure 33: Moisture content in Mass% measured by powder drilling (area 2 of the S. Maria Rossa Church).

the water content of the sampled material (Figure 33), also at different depth, but it is local and not widely repeatable over time. The comparison of these methods could not give analytical correlation, but only some qualitative results showing the limits and advantages of each method.

## 6.- Detection of voids or chimney flues: Brera Palace in Milan

Again, the investigation can be carried out using different techniques. Radar can be used to enhance the presence of a void, as well as thermovision when the defect is very close to the surface. In the following, a simple combination of pulse sonic tests and borehole inspection was applied on a frescoed wall (Figure 34). The inspected area was displaying a serious crack pattern, with an unknown origin (Figure 34).

The pulse sonic test was carried out by impacting on the wall surface opposite the fresco and receiving on the fresco surface. The test allowed to detect the presence of a large void behind the fresco itself by the very low values of the pulse sonic velocity (Figure 35). The same situation appeared below the fresco showing a vertical continuity of the void. This deduction was supported by borehole inspections, through cores drilled on the opposite side of the wall (Figure 36).

The visual inspection gave the exact dimension of the void and detected the presence of a soot (Figure 36). An accurate historical research revealed that the fresco was moved in the 17th century to the present location, probably previously used as a chimney flue.



Figure 34: The tested wall at the Brera Palace.

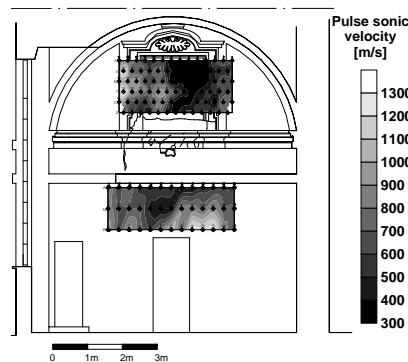


Figure 35: Distribution of the pulse sonic velocities at the Brera Palace



Figure 36: Borehole inspection of the cavity at the Brera Palace.

## 7.- Detection of inclusions of wood and steel: Malpaga Castle.

An application was carried out on the Malpaga Castle near Bergamo (Lenzi 1997). A wall showed surface irregularities due apparently to wooden trusses inclusions.

The tested wall is decorated with precious frescos (*Figure 37*), so it was absolutely necessary the use of non destructive tests. This application was considered important to examine the feasibility of the radar and thermovision procedure for the detection of inclusions.

The radar surveying was carried out along a grid of profile lines to have an overall image of the wall (*Figure 38*). Due to the limited thickness of the wall (about 160 mm) the measurements were conducted with a frequency of 1 GHz.

The data processing procedure was of great effectiveness. *Figure 38* illustrates the improvement of a radar section as the processing procedure is gradually applied to enhance the irregularities due to the vertical timber element.

The final picture showing the presence of the timber frame (*Figure 39*) was obtained by joining the parallel radar sections acquired at different levels. From the radar tests, a timber frame was found, with the presence of nails and other metal elements at the column-beam intersections.

On the same wall, a thermovision test was conducted which confirmed the radar test conclusion (*Figure 40*). In this case, thermovision was successful, also because the inclusions were very close to the surface, and compared to radar it was very quick and less expensive.

This application showed that it is frequently possible to make an appropriate choice between the techniques, according to their performance and cost.

## 8.- Conclusions.

The past experiences developed by the Authors since the early eighties (Binda 1983) allows to reach a good knowledge on the appropriate use of NDTs for the evaluation of

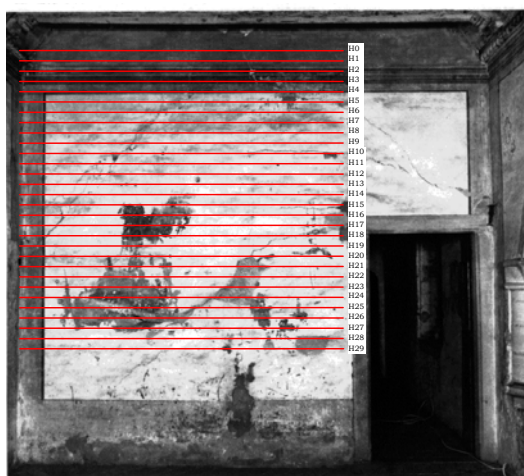


Figure 37: Detail of the wall and localisation of the test lines at the Malpaga Castle.

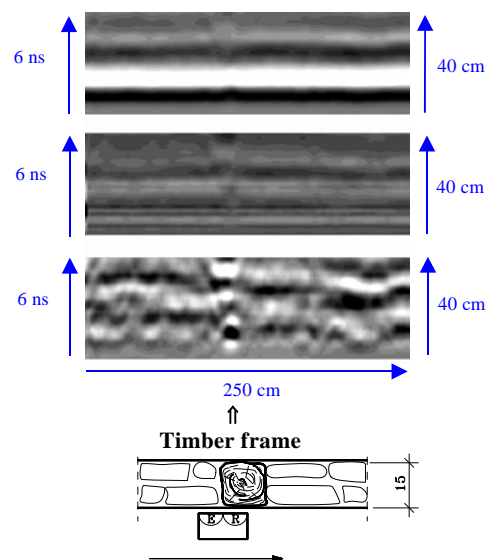
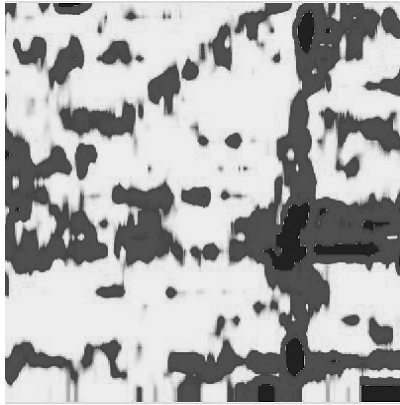
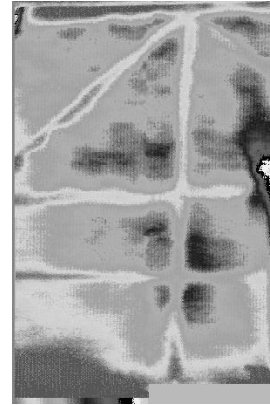


Figure 38: From top to bottom, a radar section at different processing levels and its interpretation.





*Figure 39: Picture obtained by joining the radar sections acquired at the Malpaga Castle.*



*Figure 40: Thermovision applied to the wall of the Malpaga Castle*

different problems in masonry structures.

The on site investigation procedures should be calibrated and controlled in order to verify their effectiveness and particularly the possible application to each peculiar masonry problem.

A great deal of research is still necessary for the interpretation of the NDT results and for their correlation with the masonry characteristics. Since no test is usually self-sufficient to give the requested information, the complementarity of the different tests (thermovision, georadar, flat-jack, etc.) has also to be studied for the solution of physical and mechanical problems of masonry structures.

### **Acknowledgement**

The Authors wish to thank M. Antico, L. Cantini, E. Cardarelli, P. Condoleo, M. Cucchi, G. Lenzi, M. Lualdi, N. Ludwig, C. Maierhofer E. Rosina, C. Tiraboschi and L. Zanzi for their precious contribution to the experimental part of the research.

### **9.- References.**

- (1) Binda, L., Rossi, P.P., Sacchi Landriani, G., 1983. Diagnostic Analysis of Masonry Buildings, Proc. IABSE Symp. on Strengthening of Building Structures, Ed. IABSE-AIPC-IVBH, Venezia, pp. 131-138.
- (2) Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2000a. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries, Construction and Building Materials, vol. 14, n. 4, pp. 199-233.
- (3) Binda, L., G. Lenzi, A. Saisi, 1999a, Radar Investigation for Diagnosis of Historic Buildings: Application to Stone Masonries, Proceedings of the Int. Conf. on Structural Faults and Repair, London.
- (4) Binda, L., Saisi, A., 2001a, Non Destructive Testing applied to historic buildings: the case of some Sicilian Churches, Proceedings of the 3rd Int. Seminar: Historical Constructions – Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, Guimaraes, Portugal, pp. 29-46.
- (5) Binda, L., C. Tiraboschi, 1999b, Flat-jack test as a slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures, Int. Journal

- for Restoration of Buildings and Monuments, *Int. Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*, Zurich, pp. 449-472.
- (6) Binda, L., Cantini, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2007a. Use of flat-jack and sonic tests for the qualification of historic masonry, Tenth North American Masonry Conference 10NAMC, St. Louis, Missouri, USA, 3rd-6th June 2007, pp. 791-803.
  - (7) Binda, L., Cantini, L., Lualdi, M., Tedeschi, C., Saisi, A., Zanzi, L., 2005a. Investigation procedures based on the complementarity of non destructive and slightly destructive on site tests: application to the two Castles of Avio (Italy) and Pisece (Slovenia), 10<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium, Banff, Alberta, 8<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> June 2005, pp. 441-453.
  - (8) Binda, L., Lualdi, M., Saisi, A., 2007b. Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy, *International Journal of Architectural Heritage, Conservation, Analysis, and Restoration*, vol. 1, n. 4, pp. 380-402.
  - (9) Bungey, J.H. 1982, *The testing of concrete in structures*, Surrey University Press.
  - (10) Binda, L., Anzani, A., Saisi, A., Mirabella Roberti, G., 2003a, *Structural Integrity in Historic Structures*, in, *Comprehensive Structural Integrity. Fracture of Materials from nano to macro, Volume I: Structural Integrity Assessment - Example and Case Studies*, Editors I. Milne, R.O. Ritchie, B. Karihaloo, Pergamon Elsevier Science, Oxford, Vol. 1, Cap. 1.02, pp. 25-47.
  - (11) Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2001b, *Application of Sonic Tests to the Diagnosis of Damage and Repaired Structures*, *Int. Journal Non-Destructive Testing and Evaluation (NDT&E Int.)*, vol. 34, n. 2, pp. 123-138.
  - (12) Binda, L., Saisi, A., 2003b. The collapse and reconstruction of the Noto Cathedral: Importance of the Investigation for the design choice, *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, vol. 9, n. 4, pp. 415-434.
  - (13) Binda, L., Saisi, A., Messina, S., Tringali, S., 2001c. Mechanical damage due to long term behaviour of multiple leaf pillars in Sicilian Churches, III International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, , Guimarães (Portugal), 7<sup>th</sup>-9<sup>th</sup> November 2001, pp. 707-718.
  - (14) Binda, L., Cantini, L., Condoleo, P., Saisi, A., 2007c. Non destructive testing techniques applied to the masonry and timber structures of the Crocifisso Church in Noto, 10th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, STREMAH 07, Prague, Czech Republic, 4th-6th July 2007, pp. 237-248.
  - (15) Binda, L., Saisi, A., Zanzi, L., 2003c. Sonic tomography and flat jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S.Nicolo' l'Arena (Italy), *Non Destructive Testing and Evaluation International*, vol. 36, n. 4, pp. 215-227.
  - (16) Binda, L., M. Forde, A. Saisi, S. Valle, L. Zanzi, 2000b, *Application of radar test in the survey of the load bearing walls of the Torrazzo of Cremona*,

Proceedings of the 5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage, Firenze.

- (17) Binda, L., M. Falco, C. Poggi, A. Zasso, G. Mirabella Roberti, R. Corradi, R. Tongini Folli, 2000c, Static and Dynamic Studies on the Torrazzo in Cremona (Italy): the Highest Masonry Bell Tower in Europe, Proceedings of the Int. Symposium Bridging Large Spans: from Antiquity to the Present, Istanbul, Turkey, pp. 100-110.
- (18) Binda, L., Zanzi, L., Lualdi, M., Condoleo, P., 2005b. The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy, *NDT&E International*, 38(3), 171-179.
- (19) Binda, L., Colla, C., Forde, M.C., 1994. Identification of moisture capillarity in masonry using digital impulse radar, *Construction and Building Materials*, Vol. 8, n.2, pp. 101-107.
- (20) Binda, L., Saisi, A., Ludwig, N., Maierhofer, C., Leipold, S., Schaurich, D., 1998, Combination of non-destructive testing methods for the characterisation of the moisture content and distribution in a historic brickwall, Proceedings of the 2nd Int. RILEM Conf. on Rehabilitation of Structures, Highett, Australia, pp. 112-129.
- (21) Rudolph, M., Schaurich, D., Wiggenhauser, H., 1993. Feuchteprofilmessungen mit Mikrowellen in Mauerwerk, Eds. H. Wiggenhauser, H. S. Müller and N. Girlich (MFPA Weimar), Tagungsbericht Feuchtetag 21.09.1993, Berlin: DGZfP, pp. 44-56.
- (22) Lenzi, G, Ludwig, N., Rosina, E., Saisi, A., Binda, L., 1997, Analisi di tessiture murarie mediante termografia e georadar, Proceedings of the V Congresso Nazionale ASS.I.R.C.CO, Orvieto - Italy, pp. 142-146.

## ANÁLISIS DE CARGAS EN LA BASÍLICA DE SANTA MARÍA DEL MAR DE BARCELONA

Santiago Sánchez Beitia<sup>1</sup> ([santiago.sanchez@ehu.es](mailto:santiago.sanchez@ehu.es)),  
Pere Roca Frabegat<sup>2</sup> ([pere.roca.fabregat@upc.edu](mailto:pere.roca.fabregat@upc.edu))  
Javier Barrallo Calonge<sup>1</sup> ([javier.barrallo@ehu.es](mailto:javier.barrallo@ehu.es))

<sup>1</sup> E.T.S. de Arquitectura de San Sebastián, Universidad del País Vasco.

<sup>2</sup> E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña

### Introducción

La Basílica de Santa María del Mar constituye uno de los exponentes más significativos del gótico catalán. Como es conocido, el edificio presenta notables rasgos formales y estructurales. Desde el punto de vista formal, el edificio se caracteriza por su atención a las proporciones geométricas y por su sobriedad ornamental. Estructuralmente, presenta remarcables innovaciones (en gran parte deudoras de la catedral de Barcelona) orientadas a la consecución formal de un espacio diáfano de carácter basilical. Entre éstas cabe destacar el uso de bóvedas de crucería de planta cuadrada, la formación de pilares sensiblemente esbeltos y de sección maciza (es decir, enteramente contruidos a base de grandes sillares) y la elevación de las bóvedas laterales hasta casi alcanzar la altura de las centrales. De hecho, las bóvedas laterales se hallan adecuadamente dispuestas en altura para recoger el empuje de las bóvedas centrales y llevarlo eficazmente hasta los contrafuertes, trabajando a la manera de unos eficientes arbotantes. Ello da lugar a una estructura más compacta que no precisa de elementos estructurales exentos tales como arbotantes. Debido a las superficies de las bóvedas y a la limitada sección de los pilares, cabe esperar que éstos se vean sujetos a compresiones medias comparativamente elevadas (Figuras 1 a 5). Tanto por sus características estructurales como por los avatares sufridos (terremotos durante los siglos XIV y XV, incendios durante los siglos XIV y XX), resulta aconsejable realizar un estudio detallado de la estructura del edificio, así como un completo análisis de su estado de conservación.

Dentro del análisis del comportamiento estructural de sus elementos portantes, se han deducido experimentalmente los esfuerzos reales que soporta el pilar sureste del segundo tramo, desde el altar mayor, de la nave central del Templo. La técnica empleada es la denominada Hole Drilling, único método que permite obtener cargas en servicio en este tipo de elementos portantes. La otra técnica existente para similar objetivo, el ensayo de Gato Plano (Flat Jacks), no es aplicable en este caso, dadas las dimensiones y el compromiso estructural del pilar analizado, puesto que obligaría a descargar, para cada punto de análisis, un sillar completo de los cinco que conforman la sección. De modo complementario, se han deducido analíticamente mediante estática gráfica las tensiones que los diferentes elementos transmiten a los pilares de la nave central. Para ello, se ha preparado un esquema analítico que combina los programas Mathematica®, Excel® y Autocad® de tal modo que a partir de los datos geométricos de los arcos y bóvedas, de los espesores de los rellenos y del valor de los pesos específicos, se permite deducir y representar las Líneas de Presiones que descargan sobre el pilar analizado. Este esquema está a punto para ser aplicado en cualquier construcción histórica. La aplicación preparada contempla la posibilidad de introducir geometrías y espesores variables a partir de una discretización de cada elemento

portante en 18 tramos. Se trabaja actualmente también en la modelización y el análisis no lineal de la estructura por elementos finitos bajo carga gravitatoria y sismo.



*Figura 1: Vista general del interior del Templo*



*Figura 2: Vista general de las bóvedas*



*Figura 3: Vista de las bóvedas de crujiás de la nave central*



*Figura 4: Sobre las bóvedas de la nave central*



*Figura 5. Aspecto de las cubiertas de la nave lateral del lado del evangelio.*

## **Deducción experimental mediante la técnica Hole Drilling**

### **Descripción de la Técnica**

La Norma ASTM E837-95 y posterior actualización (Ref. 1 y 2), establece el procedimiento para la cuantificación de las Tensiones Residuales, fundamentalmente en materiales metálicos, mediante la técnica Hole-Drilling. Este tipo de tensiones están confinadas en zonas muy cercanas a la superficie del material (hasta una profundidad de

500 micras en la mayor parte de los casos). La técnica se basa en la medida de las deformaciones captadas en tres bandas extensométricas (galgas), convenientemente dispuestas, cuando se elimina por taladrado una parte del material. La eliminación de material origina una relajación de las tensiones existentes en la zona analizada. Esta relajación es captada por las bandas extensométricas. El estado tensional al que estaba sometida la zona analizada antes del taladrado puede deducirse, a partir de estas deformaciones, mediante el adecuado proceso matemático. La anterior Norma ASTM no es posible aplicarla directamente al análisis de los estados tensionales en fábricas de sillería y de ladrillo puesto que las dimensiones empleadas en este caso son, al menos, treinta veces mayores que las descritas en dicho documento. Consecuentemente, la técnica Hole Drilling que se describe continuación no dispone de dispositivo estándar alguno para su ejecución, a excepción de diversas herramientas convencionales de amplio uso. Además de este inconveniente experimental, la técnica requiere de la obtención de unas constantes que relacionan las deformaciones captadas en las galgas con los estados tensionales que las originan. La metodología para la deducción de estas constantes en un material homogéneo, continuo e isótropo, como por ejemplo el acero, es muy diferente a la que es aplicable en roca, ladrillo y/o mortero, que precisan de un mayor muestreo de resultados experimentales. Las tensiones que se van a deducir no son Tensiones Residuales sino Estados Tensionales en Servicio (Referencias 3 a 8). La Técnica Hole Drilling en Patrimonio Arquitectónico consiste, por tanto, en adaptar experimentalmente un procedimiento normalizado para otro uso diferente del previsto. El método permite deducir las tensiones principales ( $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$ ), y su dirección ( $\beta$ ), a partir de tres deformaciones ( $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$ ) registradas en tres direcciones. En la Figura 6 se observa la disposición convencional de tres bandas extensométricas y de la zona de taladrado de acuerdo con la Norma ASTM E837-95 y que se mantiene inalterable en mamposterías. La deducción de los estados tensionales a partir de las deformaciones registradas en las bandas, está fuertemente influenciada por las Constantes A y B que relacionan aquéllas con los estados tensionales que las originan. De acuerdo con dicha Norma, las tensiones principales y sus direcciones se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{A} - \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{B}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{A} + \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{B} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}\right)$$

siendo  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$  las deformaciones registradas a  $0^\circ$ ,  $225^\circ$  y  $90^\circ$  con una dirección de referencia,  $\sigma_{max}$  and  $\sigma_{min}$  son las tensiones principales máxima y mínima respectivamente y  $\beta$  es el ángulo entre  $\sigma_{max}$  y la dirección de  $\varepsilon_1$  medido con signo positivo en sentido antihorario (también es el ángulo entre  $\sigma_{min}$  y la dirección de  $\varepsilon_3$ ).

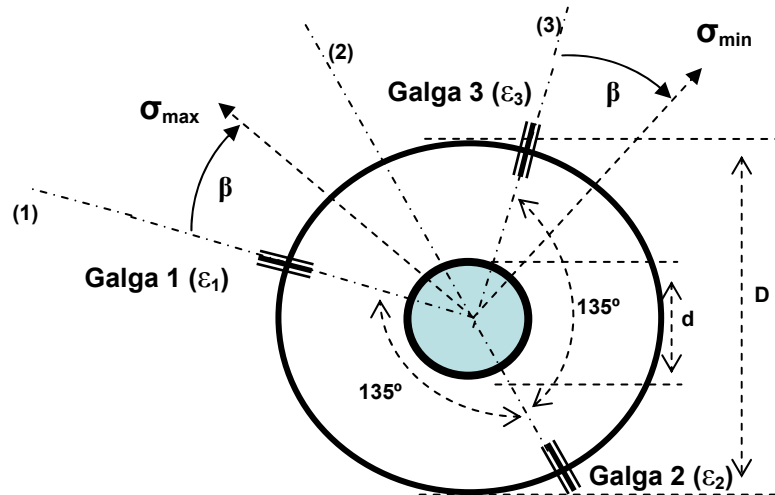


Figura 6: Disposición convencional de las bandas extensométricas y del taladro (círculo central) de acuerdo con la Norma ASTM E837-95. Las galgas 1 y 3 se disponen perpendicularmente entre sí, mientras que la galga 2 se dispone sobre la bisectriz, en el lado opuesto, de dichas direcciones. “D” es el diámetro de la circunferencia de galgas mientras que “d” es el diámetro del taladro.  $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$  son las tensiones principales máxima y mínima respectivamente y  $\beta$  su posición respecto a una dirección conocida.

El procedimiento es laborioso y se compone de varios pasos que tienen todos ellos una fuerte incidencia en los resultados. Por otra parte todo el trabajo experimental se realiza sobre elementos verticales lo que dificulta la experimentación. Recientemente se ha tomado la decisión de emplear ocho bandas extensométricas para el análisis de fábricas de sillería (Figura 7), con el objeto de eliminar o modular posibles errores experimentales.

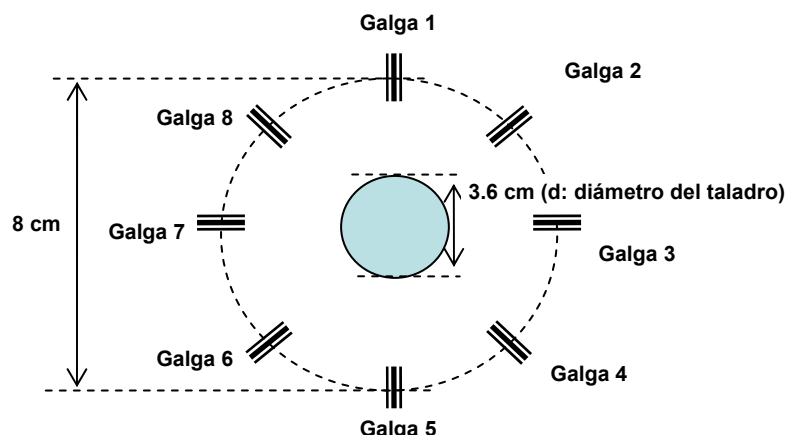


Figura 7. Esquema de la posición de las ocho galgas en fábricas de sillería

De acuerdo con el procedimiento experimental, en el caso de fábricas de sillería se disponen de ocho deformaciones en otras tantas direcciones cada  $45^\circ$ . Las ocho deformaciones generan ocho ternas diferentes de deformaciones, de las que se pueden obtener otros tantos valores de un mismo estado tensional. Los ocho valores de los



estados tensionales se deducen a partir de las siguientes combinaciones de deformaciones (Figura 4):

Combinación 1: Galga 1 ( $\epsilon_1$ ), Galga 3 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 6 ( $\epsilon_2$ )

Combinación 2: Galga 2 ( $\epsilon_1$ ), Galga 4 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 7 ( $\epsilon_2$ )

Combinación 3: Galga 3 ( $\epsilon_1$ ), Galga 5 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 8 ( $\epsilon_2$ )

Combinación 4: Galga 4 ( $\epsilon_1$ ), Galga 6 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 1 ( $\epsilon_2$ )

Combinación 5: Galga 5 ( $\epsilon_1$ ), Galga 7 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 2 ( $\epsilon_2$ )

Combinación 6: Galga 6 ( $\epsilon_1$ ), Galga 8 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 3 ( $\epsilon_2$ )

Combinación 7: Galga 7 ( $\epsilon_1$ ), Galga 1 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 4 ( $\epsilon_2$ )

Combinación 8: Galga 8 ( $\epsilon_1$ ), Galga 2 ( $\epsilon_3$ ) y Galga 5 ( $\epsilon_2$ )

De acuerdo con la Norma ASTM E837-95, las constantes A y B dependen de dos parámetros adimensionales “a” y “b”, del Módulo de Young (E) y del Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) mediante las siguientes expresiones:

$$A = -\frac{2(1 + \nu)}{Ea}$$

$$B = -\frac{2}{Eb}$$

Los parámetros a y b dependen de la geometría experimental y se encuentran tabulados en la Norma ASTM E 837. A continuación (Tabla 1) se reproduce una parte de los valores de dichos parámetros. En la actualidad se están realizando análisis mediante Elementos Finitos con objeto de comprobar estos valores tabulados y deducidos para unas dimensiones muy reducidas con respecto a las empleadas en fábricas de sillería y de ladrillo. La correlación obtenida, por el momento, es muy alta con respecto a los valores que figuran en la Tabla 1.

<b>d/D</b>	<b>A</b>	<b>b</b>
0,38	0,174	0,430
0,39	0,182	0,448
0,40	0,190	0,466
0,41	0,199	0,484
0,42	0,208	0,503
0,43	0,217	0,521

*Tabla 1: Valores de los parámetros a y b en función de la relación d/D, siendo d el diámetro del taladro y D el diámetro de la circunferencia de bandas.*

Existen otros métodos alternativos para la deducción de estas constantes cuya descripción se aleja de los objetivos de la ponencia.

Las expresiones (1) permiten deducir para fábricas de sillería, ocho valores de un mismo estado tensional a partir de las ocho combinaciones posibles de galgas descritas anteriormente. En ausencia de errores experimentales, estos ocho valores de estados tensionales serán similares, por lo que es posible obtener un promedio como resultado final válido. En una apreciable cantidad de ocasiones se observa que existe algún valor del estado tensional que puede considerarse anómalo. Ello es debido a la existencia de algún error experimental en alguna galga. Las fuentes de error son variadas. Una mala alineación de las bandas extensométricas, un mal pegado e incluso algún deterioro durante el taladrado, pueden ser el origen de errores experimentales. En estos casos se

observa que existe una (o más de una en ciertas ocasiones) deformación registrada por una galga que es común a las combinaciones de los valores anómalos. En este caso se desechan los valores de estados tensionales obtenidos a partir de las combinaciones en las que se encuentre esa o esas galgas. El estado tensional válido será el promedio del resto de los valores de estados tensionales.

### Resultados en la Catedral de Santa María del Mar

Se ha analizado el pilar sureste de la segunda crujía desde la cabecera del Templo (Figura 8). En este pilar se han analizado tres puntos situados en tres caras del pilar (Figura 9). Las deformaciones captadas en los tres puntos se observan en la Figura 10. En los tres casos se detecta una banda extensométrica cuyos valores son anómalos y que han sido eliminados del análisis. Las razones de estas anomalías no se han detectado aunque puede deberse a una causa postural en el proceso de pegamento de las bandas extensométricas. Consecuentemente, para cada punto experimental se puede obtener 5 valores diferentes de un mismo estado tensional de los que se puede extraer un valor promedio válido. En el Punto 1 se deducen unas tensiones de 3.8 MPa, en el Punto 2 se deduce un estado tensional de 2 MPa, mientras que en el Punto 3 se ha deducido un valor promedio de 3 MPa (Figura 9), aunque uno de los cinco valores de estados tensionales es ligeramente inferior a los otros cuatro. Salvo por este caso aislado, la dispersión es inferior al 10%. A partir de ensayos previos se ha deducido un Módulo de Young de 10 GPa.

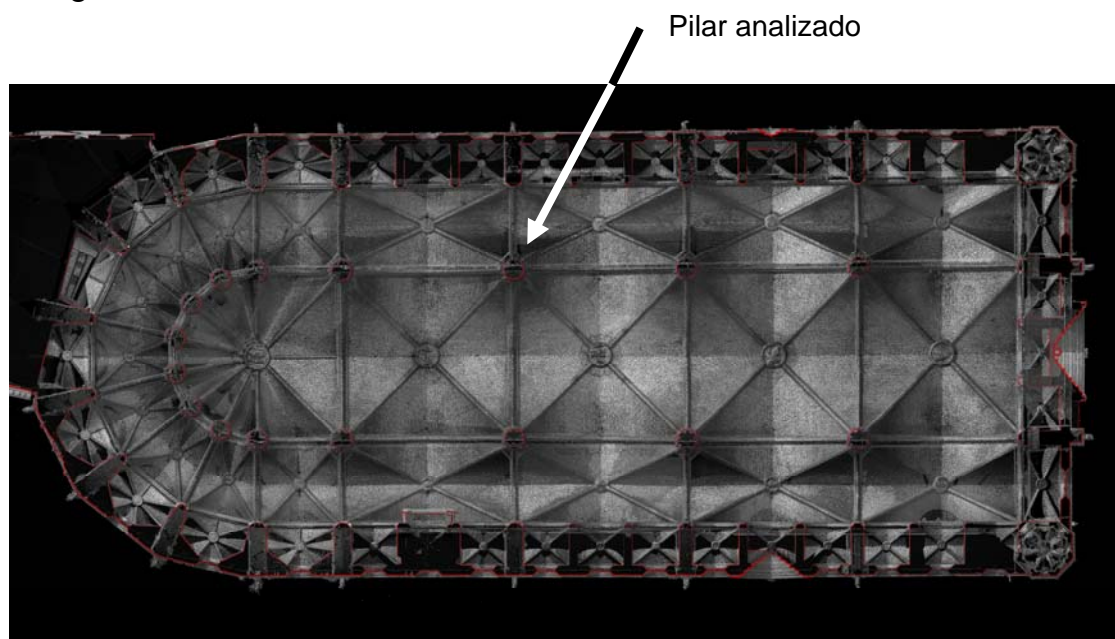


Figura 8: Planta a cota de cubiertas de la nave central

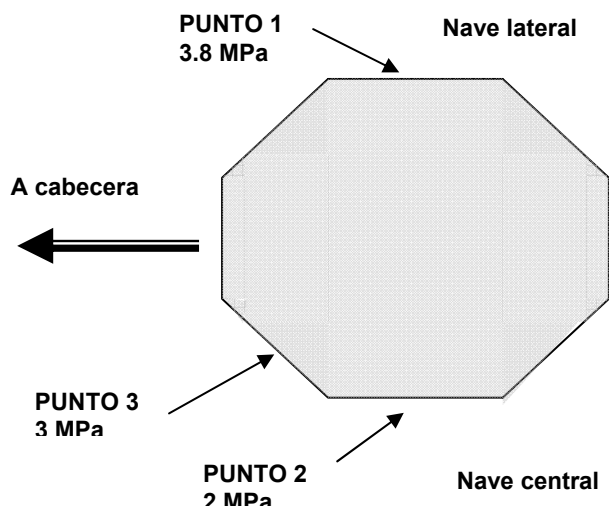


Figura 9: Sección esquemática del pilar analizado

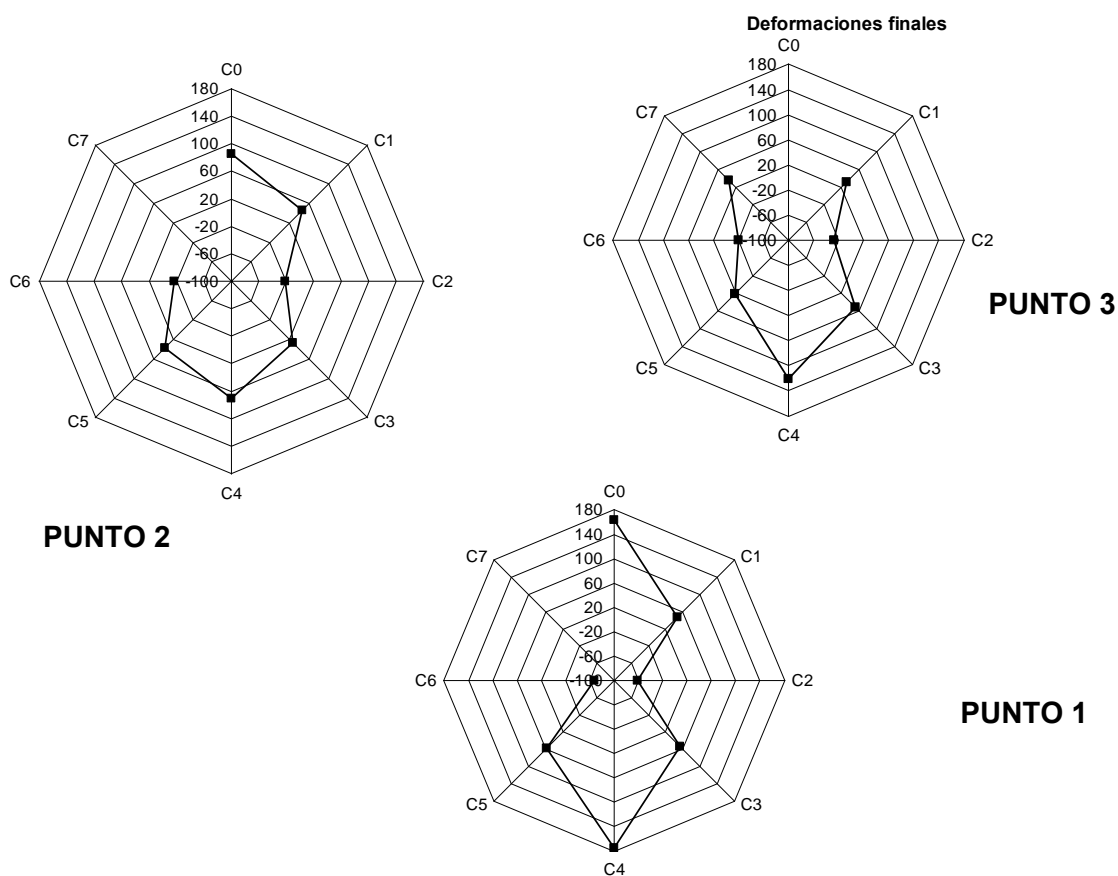


Figura 10: Deformaciones ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) captadas en los tres puntos analizados

Las siguientes fotografías muestran el lugar de medida sobre el Punto 1 y una secuencia de los pasos realizados en el trabajo experimental en el Punto 2.



Figura 10



Figura 11



Figura 12



Figura 13



Figura 14



Figura 15

### **Deducción analítica de las cargas transmitidas al pilar**

Se ha preparado un esquema analítico para deducir la transmisión de cargas a través de los elementos portantes hasta el pilar analizado experimentalmente. La metodología se basa en los conceptos de la Estática Gráfica conectando las aplicaciones estándar Mathematica®, Excel® y Autocad®. La aplicación Mathematica® permite obtener de modo suficientemente aproximado la forma completa de todos los elementos involucrados: arcos, bóvedas y rellenos. El esquema preparado permite una aproximación de segundo grado a la forma real de los arcos y bóvedas y una aproximación lineal a la variación de sus espesores. Cada elemento se ha dividido en 18 tramos de tal modo que dichas aproximaciones pueden aplicarse a cada tramo independientemente de los demás. La aplicación Excel elaborada contiene el equivalente a 20.000 líneas de programa permitiendo deducir la Línea de Presiones de los ocho arcos que descargan a diferente altura sobre el pilar analizado. Por último, se ha conectado la aplicación Excel® a la aplicación Autocad® con el objeto de visualizar en paralelo los resultados obtenidos y el proceso realizado. Es decir, los polígonos funiculares, los de fuerzas y, por último, las líneas de presiones. El esquema conceptual utilizado es el convencional de Estática Gráfica siguiendo las directrices de Jacques Heynman (Ref. 9) para la discretización de bóvedas. El estado tensional deducido para el pilar analizado es muy próximo a 3 MPa, considerando unos pesos específicos de fábrica y rellenos de valor 22 KN/m<sup>3</sup> y 15 KN/m<sup>3</sup> respectivamente.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a Dña. Pilar Giráldez, miembro del equipo que trabaja en el estudio de la estructura de la Catedral de Santa María del Mar, la ayuda prestada para el conocimiento integral del Templo. Así mismo, agradecen a la Parroquia de Santa María del Mar las facilidades prestadas para el desarrollo de todo el trabajo experimental. Éste forma parte del Proyecto del Plan Nacional de I+D con referencia BIA2004-05801 del Programa Nacional de Construcción cuyo Investigador Principal es el primer autor.

## Referencias

- (1) Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM 837-95 Standard. American Society for Testing Materials, (1995).
- (2) Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM 837-01 Standard. American Society for Testing Materials, (2001).
- (3) Barrallo J, Zulueta A, Blanco L, Caro J, Sánchez-Beitia S. Stress measurements on ancient structures by the hole drilling method. *Experimental Techniques (SEM)* 1994; 19 (3): 9-13.
- (4) Barrallo J, Zulueta A, Sánchez-Beitia S. The Donostia Method for stress measurements in architectural heritage. *STRAIN (British Society for Strain Measurement)* 1999; 35 (3): 107-112
- (5) Sánchez Beitia S. Stress analysis at the Altes Museum of Berlin by means of the Hole Drilling Technique (Donostia Method). *Construction and Buildings Materials*, 2006. Elsevier Ed.
- (6) Sánchez Beitia S. Stress Analysis of the Piers of Tarazona Cathedral (Zaragoza-Spain) by means of the Hole Drilling Technique. *Construction and Building Materials*, 2006. Elsevier Ed.
- (7) Final Report del Proyecto Europeo del 4º Programa Marco ONSITEFORMASONRY con referencia EVK4-CT-2001-00060.
- (8) S. Sánchez-Beitia, L. Schueremans and K. van Balen. In site stress analysis on the piers of the Saint Jakobs church in Leuven (Belgium). *International Journal of Architectural Heritage* (en revision), 2007. Ed. Taylor and Francis.
- (9) J. Heynman. *El esqueleto de piedra*. Ed. CEDEX, CEHOPU, Instituto Juan de Herrera, 1999.

## LA VIDEOCORRELACIÓN, UNA TÉCNICA DE MEDIDA DE DEFORMACIÓN Y DESPLAZAMIENTO SIN CONTACTO

Pablo Lorenzo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Álava Ingenieros

### INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años han sido muchos los esfuerzos realizados en el desarrollo de nuevas técnicas en ensayos no destructivos. Uno de los campos que ha experimentado grandes avances ha sido el estudio de componentes sin contacto, tanto para la detección de defectos internos, como para la medida de desplazamientos y deformaciones. Dentro del área correspondiente a la medida de desplazamientos y deformaciones está la técnica conocida como video-correlación digital, cuyo principio de funcionamiento se explica más adelante. Esta técnica permite la medida en elementos de cualquier tipo, con dimensiones desde pocos milímetros hasta varios metros.

A día de hoy no se conocen aplicaciones específicas en el campo de la rehabilitación del patrimonio construido, pero la gran versatilidad de la video-correlación digital nos hace pensar que su aplicación en este campo podría ser una realidad en un corto período de tiempo.

### FUNDAMENTOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

#### Correlación Digital de Imágenes

La técnica de correlación digital de imágenes comenzó a desarrollarse a principios de los años 80 por investigadores de la Universidad de Carolina del Sur. La idea en la que se basa el método es la de calcular el desplazamiento del componente objeto de medida mediante un tracking de la deformación de un patrón moteado en imágenes obtenidas durante el proceso de carga (ver figura 1). El proceso de análisis de imágenes puede ser entendido como una técnica de reconocimiento de patrones que busca localmente el patrón moteado aleatorio comparando imágenes del elemento deformado con el estado de referencia (imagen de referencia). Mediante el uso de una única cámara se pueden tomar medidas en dos dimensiones (en el plano de la superficie que se está midiendo), obteniendo las componentes  $u, v$  de desplazamiento y las componentes de deformación  $e_{xx}, e_{yy}, e_{xy}, e_1, e_2$  cuando el espécimen es plano.

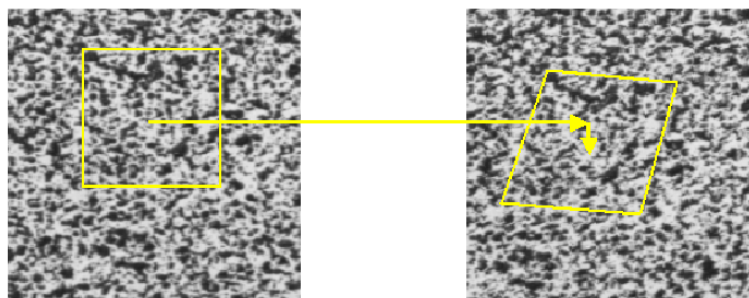


Figura 1: Patrón aleatorio antes y después de la deformación

Recientemente, el método de la correlación digital de imágenes (DIC) ha sido extendido al uso de múltiples cámaras, pudiendo obtenerse medidas en elementos tridimensionales, así como el cálculo de sus deformaciones en tres dimensiones. La técnica de medida en tres dimensiones requiere el uso de al menos dos cámaras sincronizadas adquiriendo imágenes del componente sometido a carga desde distintos ángulos. Mediante la determinación de los puntos correspondientes a las imágenes de

las distintas cámaras y realizando un tracking del movimiento a través del ciclo de carga, la forma y la deformación pueden ser reconstruidas en base a una simple calibración de cámaras. Usando dos o más cámaras es posible medir las coordenadas  $x,y,z$  del objeto, los desplazamientos  $u,v,w$ , y las deformaciones, teniendo en cuenta los movimientos de sólido rígido.

### Montaje del Sistema

El montaje experimental para el método DIC en 3 dimensiones es sencillo y se ilustra en la figura 2. Las dos cámaras se montan en una barra de alta rigidez con el fin de evitar movimientos relativos entre las cámaras.

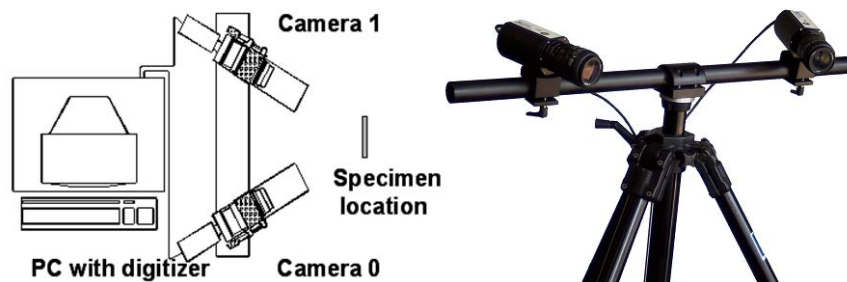


Figura 2: Montaje estereoscópico para medida de deformaciones en 3D

El método DIC no requiere el uso de iluminación LASER, de forma que el espécimen puede ser iluminado con una fuente de luz Blanca. Sin embargo, la superficie a medir debe tener un patrón random uniforme, que suele ser aplicado antes de la toma de medidas. Los patrones aleatorios pueden ser obtenidos mediante esprays de pintura, pegatinas, etc.

### Análisis de imágenes

Aunque se han desarrollado una gran variedad de algoritmos DIC a lo largo de los años [1,3,4,5,6], un método se ha establecido como el preferido en análisis de deformación debido a su capacidad para medir grandes rotaciones y deformaciones (500%) arbitrarias, así como por su mayor precisión y eficiencia. Como las coordenadas deformadas no coincidirán con la cuadrícula de muestreo de la imagen, se requieren técnicas de interpolación basadas en la escala de grises de la imagen. De esta forma se consigue una precisión óptima.

**En medidas de elementos con forma tridimensional se usa un algoritmo similar. Sin embargo, la función para el “mapping” de la superficie se basa en parámetros de calibración conocidos de las cámaras y los parámetros de visionado son la localización y orientación de un segmento de la superficie, asumiéndose éste como localmente plano.**

Para medidas de deformación se añaden a las funciones de mapping parámetros adicionales describiendo la orientación y la posición del segmento de la superficie tras la deformación, así como los parámetros describiendo componentes de deformación de orden superior. La figura 3 muestra un esquema del proceso.



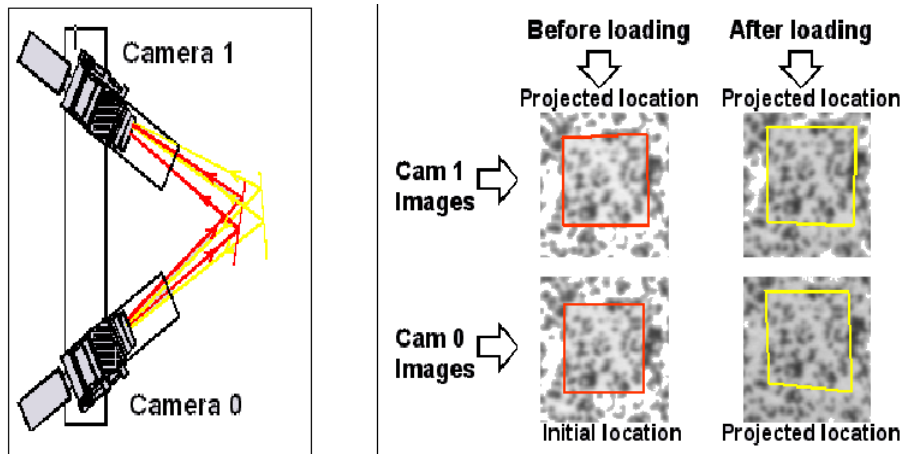


Figura 3: Principio de medida en 3D.

### Calibración

En contraposición a los sistemas de dos dimensiones (donde la calibración se realiza simplemente determinando un factor de escala), los sistemas en 3D deben ser calibrados. Esta calibración se realiza de forma automática y envuelve la adquisición de una serie de imágenes de una tarjeta de calibración patrón que debe posicionarse en distintas orientaciones (rotaciones alrededor de los tres ejes). La figura 4 muestra dos imágenes de muestreo para la calibración. Con estas imágenes de la tarjeta de calibración patrón, los parámetros de trabajo de las cámaras y su orientación relativa son ajustados automáticamente en pocos segundos. Una vez que el sistema ha sido calibrado, es posible comenzar a tomar las medidas de deformación del componente objeto de medida o ensayo.

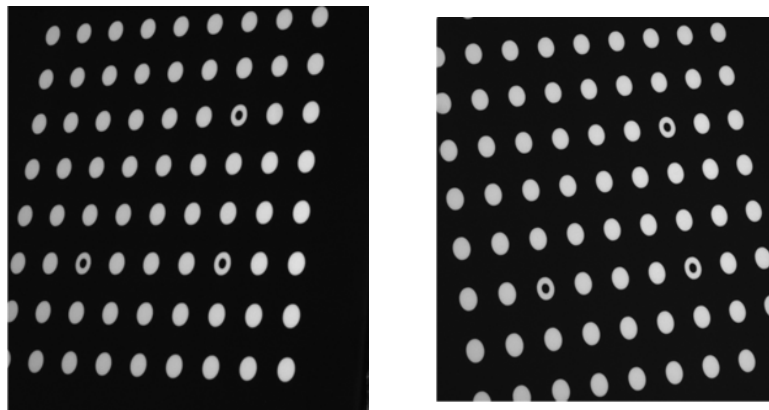


Figura 4: Imágenes de una tarjeta de calibración patrón obtenidas durante una calibración por dos cámaras distintas.

### Adquisición de medidas

En medidas de deformaciones en 3D se hace necesario realizar varias correlaciones entre imágenes:

1. Comparación de las imágenes obtenidas por las cámaras izquierda y derecha (Stereo matching) para calcular las componentes en 3D (forma) del espécimen.
2. Tracking temporal entre las imágenes del espécimen deformado y las imágenes de referencia (especimen antes de la deformación) para calcular los desplazamientos y deformaciones del espécimen.

La Figura 5 ilustra las múltiples correlaciones entre imágenes. Gracias a esta correlación es posible calcular la precisión de la medida, obteniéndose una referencia de la calidad en la misma.

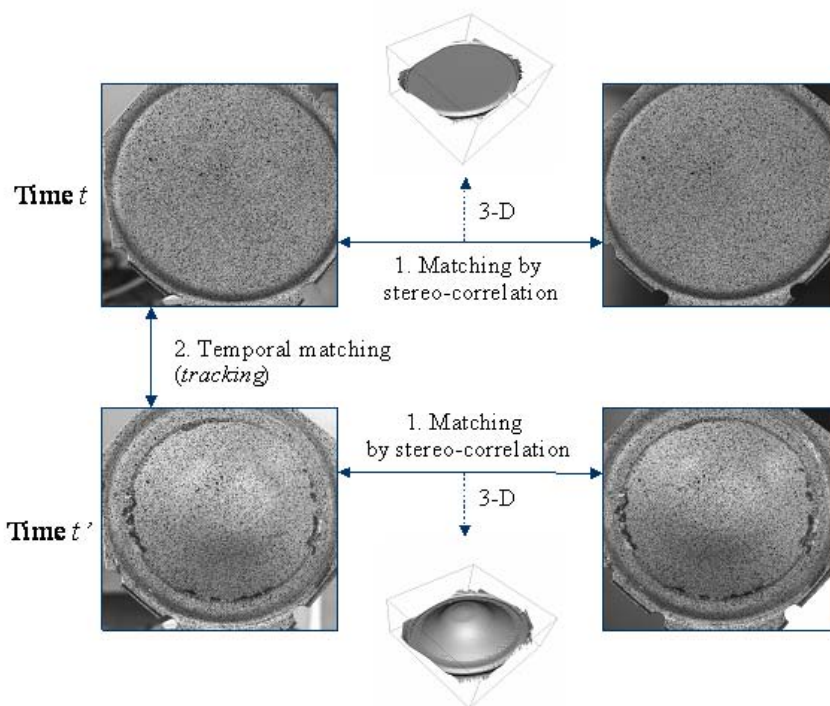


Figura 5: Principio de funcionamiento. Estéreo-correlación y tracking temporal

## APLICACIONES

Tal y como se ha comentado anteriormente, a día de hoy no se tiene constancia de aplicaciones específicas en “Rehabilitación del Patrimonio Construido”, pero el gran potencial de esta técnica nos hace pensar que podría aplicarse en este campo en un futuro cercano.

Las aplicaciones de este método van desde las medidas de pequeñas probetas en ensayos de tracción-compresión a grandes componentes tales como palas de turbinas de viento o fachadas de edificios.

A continuación se muestran varios ejemplos de aplicaciones llevadas a la práctica, de medidas de desplazamientos y deformaciones de componentes:

### Medida de deformaciones en una fachada

Las figuras mostradas a continuación representan los resultados obtenidos de las mediciones en una fachada de 30 metros cuadrados sometida a una determinada excitación. El equipo midió desplazamientos de hasta 12mm en el plano ortogonal a la fachada (fuera de plano). De igual manera, se pueden medir la planitud y forma de la superficie de la fachada.

LA VIDEOCORRELACIÓN, UNA TÉCNICA DE MEDIDA DE DEFORMACIÓN Y DESPLAZAMIENTO SIN CONTACTO

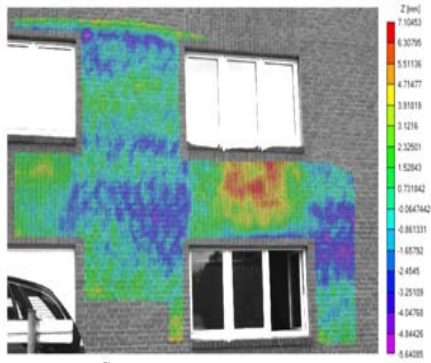


Figura 6

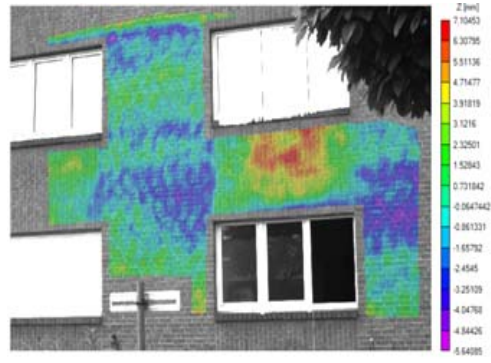


Figura 7

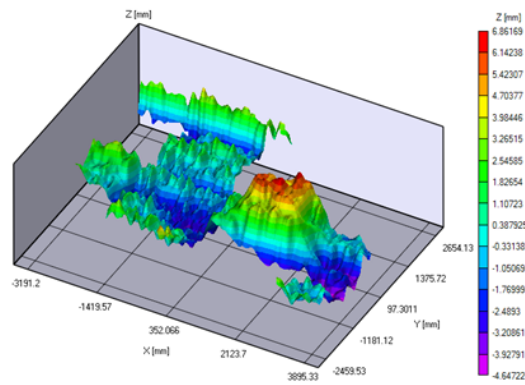


Figura 8: Resultados de la medida en la fachada de un edificio (desplazamientos fuera de plano)

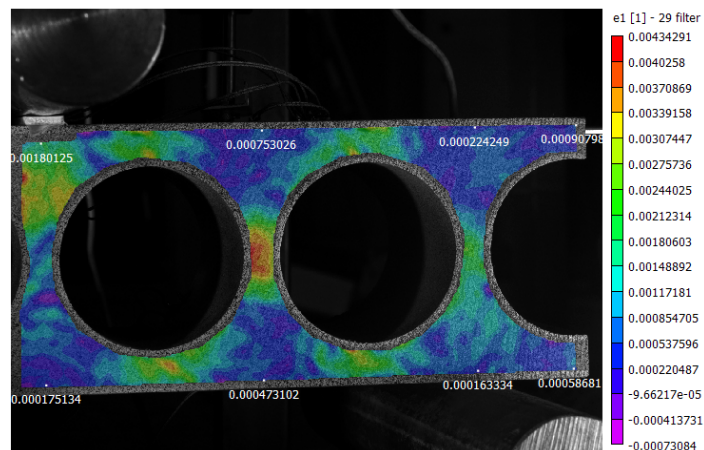


Figura 9: Medida de la deformación principal  $e_1$  en una viga de acero sometida a flexión

LA VIDEOCORRELACIÓN, UNA TÉCNICA DE MEDIDA DE DEFORMACIÓN Y DESPLAZAMIENTO SIN CONTACTO

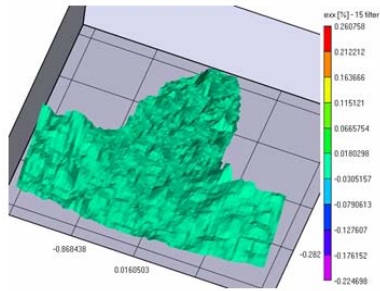


Figura 10: Deformación en 3D

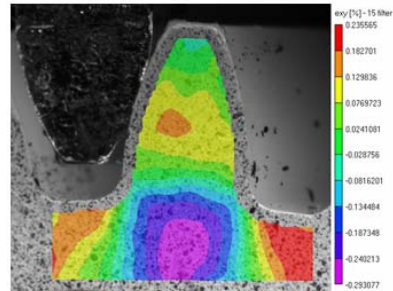


Figura 11:  $E_{xy}$ : Deformación a cortante

Componentes de la matriz de deformación en un diente de un engranaje

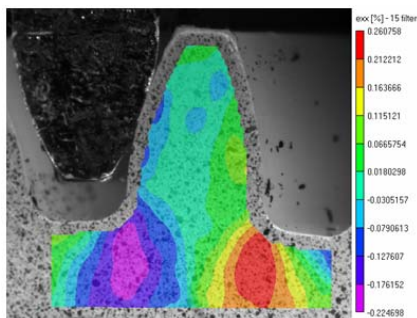


Figura 12:  $E_{xx}$ : Deformación horizontal

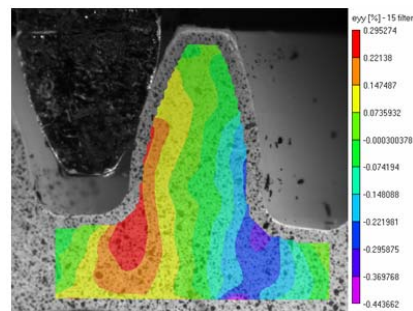


Figura 13:  $E_{yy}$ : deformación vertical

## Aplicaciones del Georadar de alta frecuencia en la ingeniería civil.

Miguel Mateo García<sup>1,2</sup>, ([miguelmateo@panatec.net](mailto:miguelmateo@panatec.net))

<sup>1</sup>Ingeniero Geólogo

<sup>2</sup>Panatec S.L. C.\ Tresp, 42 B, 28040 Madrid España.

### Resumen

El georadar (Ground Penetrating Radar) es una técnica geofísica no destructiva que proporciona una imagen del subsuelo midiendo diferencias en las propiedades electromagnéticas de los materiales. Dichas propiedades son definidas por una serie de parámetros que, junto con las características de la onda emitida, determinan la propagación de la energía del pulso electromagnético por el medio. El resultado es la generación de una imagen del subsuelo con una altísima resolución vertical y lateral permitiendo la identificación de objetos singulares además de caracterizar el entorno.

### Introducción.

Profesionales de la construcción que intervienen en procesos de corte, toma de muestras en estructuras de hormigón necesitan un método seguro y fiable de inspección de dichas estructuras para localizar e identificar objetos y/o cuerpos que puedan causar daños a la maquinaria o al propio operador durante dichas operaciones.

El georadar (Ground Penetrating Radar) o radar de subsuelo, ofrece la mejor solución de investigación con la mejor resolución posible. Las antenas de alta frecuencia ofrecen un método fiable y no destructivo de recopilación de información del subsuelo en tiempo real de forma eficiente y precisa para las características de elementos metálicos y no metálicos como tuberías, cables tubos metálicos y cables eléctricos, etc.

### Descripción de la técnica.

El GPR utiliza pulsos electromagnéticos de alta frecuencia desde un transmisor situado en el interior de la antena. El pulso transmitido es reflejado en las diferentes interfases del subsuelo y sus reflexiones son detectadas por el receptor.

Las interfases de las reflexiones pueden ser interfases suelo.-roca, objetos enterrados o cualquier otra interfase que posea un contraste de las propiedades dieléctricas.

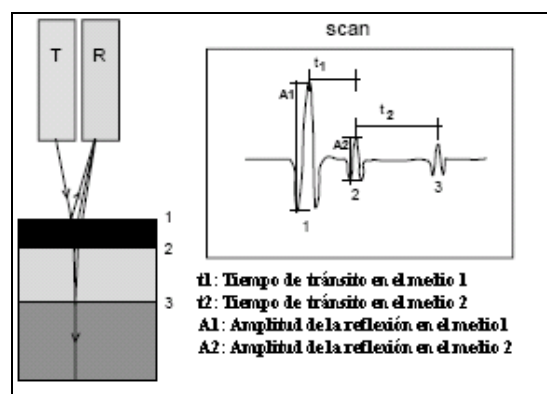
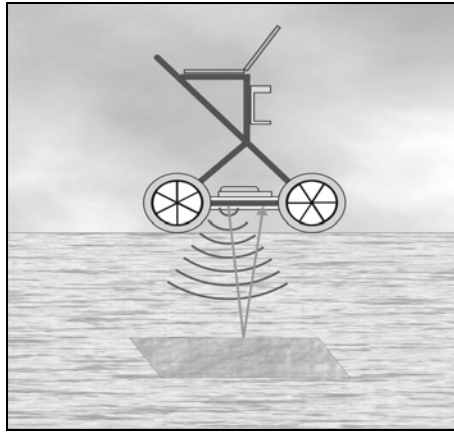


Figura 1: Principio básico de funcionamiento de un georadar (extraído de T. Saarenketo)

La señal de radar se dirige hacia el subsuelo a través de una antena colocada sobre la superficie de estudio. Las señales reflejadas son detectadas por un transmisor situado en el mismo cuerpo de la antena.

La señal recibida es procesada y mostrada gráficamente en un monitor. Debido a que la antena se mueve a lo largo de la superficie de estudio, el gráfico muestra los resultados en un radargrama de la superficie.



*Figura 2: Esquema de manejo de un georadar (cortesía de J. Díaz Curiel E.T.S.I.MINAS U.P.M.)*

El GPR posee una longitud de onda muy corta en la mayoría de los materiales, por lo que la resolución que se obtiene de las diferentes interfases de los materiales de subsuelo y de los diferentes objetos es muy grande. Sin embargo, la atenuación de la señal en los mismos materiales es también elevada, las profundidades de penetración no suelen ser elevadas. El agua y los materiales con alto contenido en arcillas aumentan la atenuación, reduciendo la profundidad de penetración.

La teoría de propagación de las ondas electromagnéticas esta fuera del alcance de este artículo, sin embargo, existen dos parámetros físicos de los materiales que influyen enormemente en la propagación de las ondas electromagnéticas a través de los diferentes materiales presentes en la naturaleza.

La primera de ellas es la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), este parámetro proporciona una medida de la respuesta de las cargas libres de un medio en presencia de un campo eléctrico externo. Las unidades de media en el sistema internacional, (SI), es Siemens/metro (S/m)

La segunda de ellas es la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ), medida en este caso adimensional. La constante dieléctrica está relacionada con cómo un material reacciona a un campo eléctrico estático.

Material	Cte. Dieléctrica ( $\epsilon$ )	Conductividad (mS/m)	Velocidad (m/ $\mu$ s)
Aire	1	0	300
Agua	81	0.5	33
Arenas	4-30	00.1-1	55-150
Calizas	7-16	0.5-2	75-113
Arcillas	4-16	2-1000	74-150
Granito	5-7	0.01-1	113-134
Hormigón	4-10	0.5-1	95-150
Asfalto	2.7-3	0.01	120-150

Tabla 1: Propiedades electromagnéticas de los materiales presentes en la corteza terrestre

El objetivo de los estudios de GPR es la caracterización de la parte más superficial del subsuelo, por ello los usos principales dentro de la construcción pueden resumirse en los siguientes:

- Inspección de hormigón: localización de objetos metálicos y no metálicos en techos, soleras y tabiques.
- Inspección de estructuras de hormigón: profundidad de zapatas, determinación de espesores de recubrimientos de hormigón proyectado en túneles, inspección de balcones, garajes, columnas, etc.

### Equipo de adquisición de datos.

El equipo utilizado para realizar los estudios ha sido un sistema RAMAC/GPR de la firma sueca MALA GEOSCIENCE consistente en una unidad de control denominada ProEx, una antena apantallada de 1.6GHz y un monitor de visualización de datos X3M.

### Procesado de los datos.

Una de las grandes ventajas del georadar es el hecho de que los datos son adquiridos de tal manera que permiten ser visualizados en tiempo real usando un ordenador portátil. En la mayoría de las ocasiones únicamente es necesario un pequeño procesamiento de los datos para obtener un perfil con los resultados deseados.

La forma básica de los datos es un perfil o sección del subsuelo a través de una dirección longitudinal con la dimensión vertical el tiempo de ida y vuelta de los pulsos electromagnéticos. Sin embargo, en la mayoría de estudios interesa convertir esta sección de tiempos en una sección de profundidad. Para llevar a cabo este cambio es necesario conocer la velocidad de propagación a través del medio en el que se está trabajando a fin de poder reescalar el perfil. La forma de conocer la velocidad de propagación de este medio puede aproximarse utilizando los valores de velocidad presentes en libros técnicos o bien si desea una mayor precisión en este ajuste de velocidad, se puede calibrar utilizando el equipo en un lugar donde se conozca la profundidad de algún servicio oculto en el subsuelo y modificar la velocidad hasta obtener el resultado de la profundidad que coincida con la real.

## **Casos prácticos.**

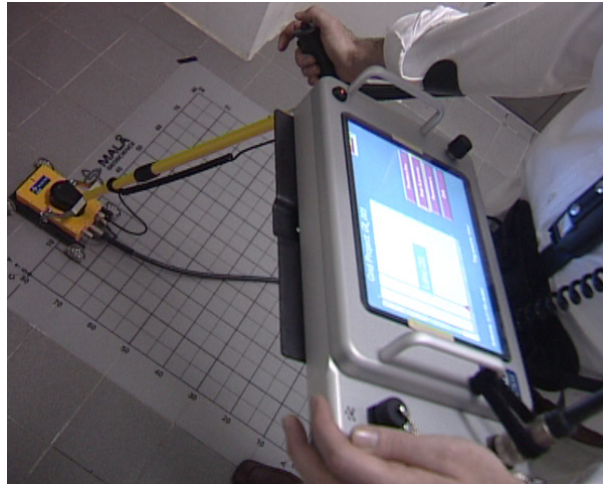
### **Detección de tuberías de PVC en una solera de hormigón.**

En este estudio, se trataba de localizar las tuberías existentes en la solera de un edificio como estudio previo para las obras de remodelación del edificio.

El área de estudio (40x25m) se dividió en celdas de 5x5m. Cada una de las celdas se investigó individualmente y las anomalías detectadas se marcaron directamente sobre el hormigón de la solera.



*Figura 3: Fotografía del operador trabajando con la antena de 1.6GHz y el monitor XV11*



*Figura 4: Fotografía del operador trabajando con la antena de 1.6GHz y el monitor XV11*

El equipo utilizado para llevar a cabo este trabajo fue un sistema georadar de Mala Geoscience con una unidad de control ProEx y una antena apantallada de alta frecuencia con una frecuencia nominal de 1.6GHz. Como accesorios, fueron utilizados un mango extensible con controles de la antena en el mango y un monitor con pantalla transreflectiva modelo XV11.

El rango de profundidad a estudiar en este caso es de 20 cm. usando los siguientes ajustes:

- Velocidad del medio: 60m/μs
- Apilamiento de las trazas (Stacking): Automático
- Ventana de tiempos: 8ns
- Intervalo de muestreo: 0.5cm
- Frecuencia de muestreo: 37GHz



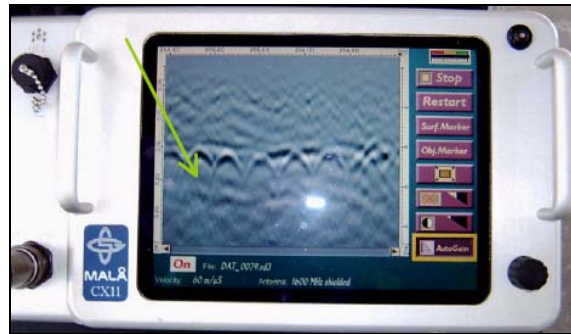


Figura 5: Monitor XVII mostrando las reflexiones de una serie de tuberías.

Los resultados muestran con gran resolución la posición de las tuberías, representadas en el radargrama en forma de hipérbolas como la señal en la figura 4. La conclusión que se obtuvo fue que la mayoría de las tuberías de PVC localizadas se encontraban enteradas a una profundidad de 11cm.

### Investigación de la estructura interna de una chimenea.

En este estudio se pretendía localizar las tuberías internas destinadas a la ventilación del humo de combustión de la chimenea. Dicha chimenea fue construida utilizando ladrillos conteniendo 6 tramos de tubería.

La chimenea se investigó en dos zonas de la primera planta del edificio y en una zona de la segunda planta

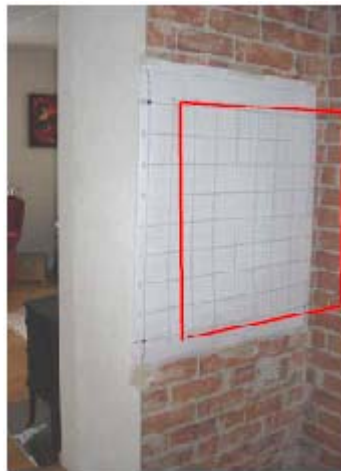


Figura 5: Fotografía de la chimenea objeto de estudio, lado norte y lado sur respectivamente.



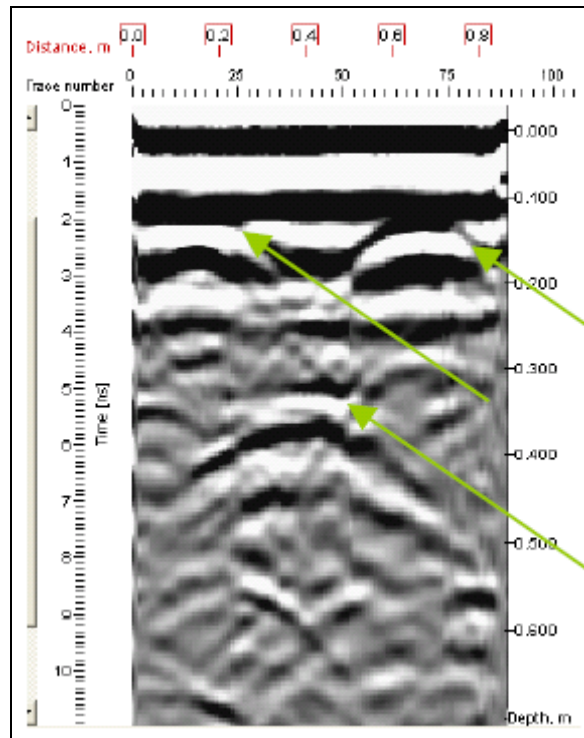
Figura 6: Fotografía de la chimenea objeto de estudio, lado norte y lado sur respectivamente.

El rango de profundidad a estudiar en este caso es de 35 cm. usando los siguientes ajustes:

- Velocidad del medio: 100m/ $\mu$ s
- Apilamiento de las trazas (Stacking): Automático
- Ventana de tiempos: 8ns
- Intervalo de muestreo: 0.5cm

- Frecuencia de muestreo: 20GHz

En el lado Sur del tramo de chimenea de la primera planta se realizó un perfil de 80cm de longitud obteniéndose el siguiente radargrama:



*Figura 7: Radargrama de 80cm de longitud obtenido en el lado Sur de la chimenea. Las flechas verdes señalan las reflexiones producidas por las tuberías.*

En la segunda planta únicamente se realizó un perfil en el lado norte ya que el lado sur no se encontraba libre para realizar las medidas. El radargrama obtenido fue el siguiente:

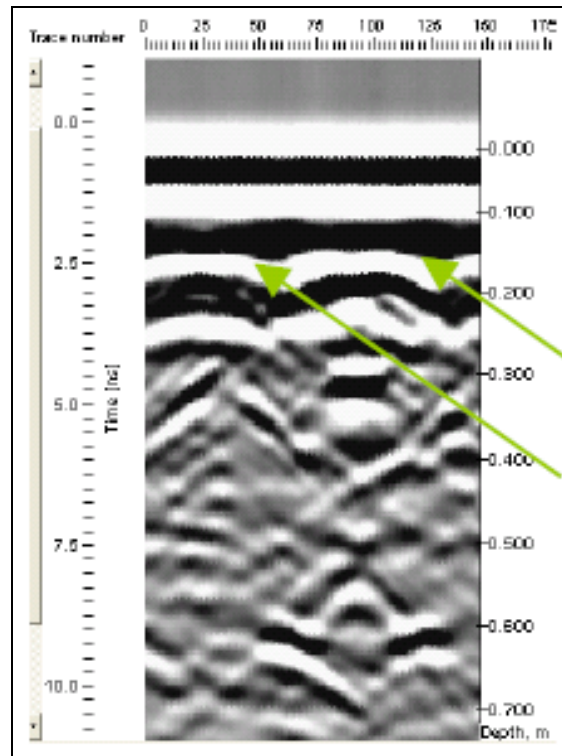


Figura 8: Radargrama de 150cm de longitud realizado en el tramo norte de la chimenea. Las flechas verdes, señalan las reflexiones producidas por las tuberías.

La figura 9 sintetiza la localización de las tuberías dentro de la chimenea del edificio entre la primera y la segunda planta.

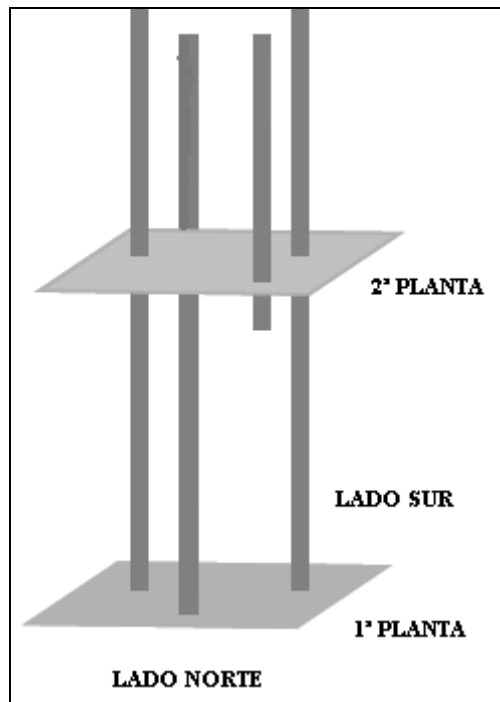


Figura 9: Esquema de situación de las tuberías dentro de la chimenea de estudio.

## **Conclusiones.**

El georadar representa una excelente herramienta para investigaciones no invasivas y no destructivas que requieran de una alta resolución. Las antenas apantalladas de alta frecuencia se presentan como una clara alternativa para los profesionales de la construcción que necesitan de un método fiable para poder localizar objetos enterrados como tuberías, conducciones eléctricas etc.

## **Referencias.**

- (1) T. Saarenketo, “Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys” 2006.[Tesis Doctoral]
- (2) J.Díaz Curiel, “Teoría y práctica de la prospección geofísica”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. U.P.M. 2000.[Libro]
- (3) H.Lorenzo, “Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a Obras civiles” Monografías serie azul. CEDEX. Ministerio de Fomento, 1996.[Libro]
- (4) J.Martín, “Análisis del subusuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema georadar RAMAC/GPR”, VIII congreso Nacional de topografía y Cartografía. Madrid, 2004[Artículo]
- (5) S. Griffin, “Ground penetrating radar” Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration, CRCLEME Open. Report 144, 2002, pp.80-89.[Artículo]

## Monitorización e instrumentación de fisuras para el diagnóstico estructural en patrimonio histórico construido

J. Yuste<sup>1,3</sup>; V. Albert<sup>2,3</sup>  
AIDICO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ing. Caminos, C.y P. MSc

<sup>2</sup> Ing. Telecomunicación, Electrónico

<sup>3</sup> U.T. Seguridad, Laboratorio de Patología y Diagnóstico Estructural Instituto Tecnológico de la Construcción

Valencia Parc Tecnològic, Valencia - España

### I.- Resumen

En el presente artículo se describen los trabajos realizados en la unidad de diagnóstico estructural de AIDICO (Instituto Tecnológico de la Construcción) en el campo del diagnóstico estructural mediante la aplicación de *Técnicas de Auscultación Avanzadas, Instrumentación y Monitorización de Estructuras del Patrimonio Histórico Construido*. El artículo pretende dar una visión detallada de las ventajas que presenta la instrumentación en el diagnóstico estructural dado que esta, acompañada y apoyada por otros ensayos no destructivos, se hace imprescindible en una eficiente conservación del Patrimonio.

En la siguiente figura se muestra un diagrama con los elementos que forman un sistema completo de Instrumentación, y las interconexiones realizadas entre todos ellos,

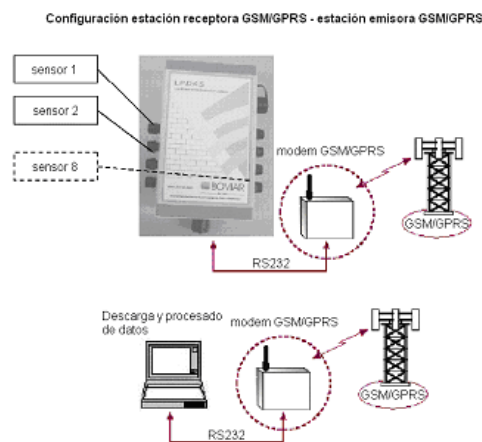


Figura 1: Esquema de conexión GSM

Figura 2: Esquema de conexión GSM

### II.- Introducción

En el campo de la conservación del patrimonio histórico construido, nos encontramos a menudo con la dificultad de estudiar y analizar las patologías aparecidas en edificios catalogados como de interés cultural.

Esta dificultad radica en la necesidad de hacer uso de técnicas no agresivas aplicadas al campo concreto de la construcción y la ingeniería civil. Dichas técnicas incluyen inspección sónica y ultrasónica, georádar, exploración mediante endoscopia,

visualización termográfica, empleo de técnicas quasi-no destructivas como gatos planos y micro-drilling, etc.

Todas las técnicas no destructivas enumeradas anteriormente presentan un gran inconveniente. Se trata de ensayos muy localizados y que, por tanto, no permiten realizar una evaluación global acerca del estado en que se encuentra la estructura bajo análisis.

El diagnóstico estructural requiere de herramientas que permitan dotar a los técnicos de información fiable y completa acerca de la estabilidad de la construcción en su conjunto y con este objeto se realiza la instrumentación estática de edificios patrimoniales, principalmente en Iglesias.

El equipamiento colocado en las Iglesias consiste en un conjunto de fisurómetros y sensores de temperatura. Las lecturas tomadas por los diferentes sensores son procesadas y permiten, por tanto, mantener monitorizado el cuadro fisurativo presente en su totalidad.

Mediante el análisis de la evolución de las diferentes lecturas tomadas periódicamente, se pretende conocer el comportamiento de la estructura y valorar la estabilidad de la misma. Para ello, se debe discernir el efecto introducido por la temperatura en los movimientos de abertura de las diferentes grietas monitorizadas. Estos movimientos son debidos fundamentalmente a los principios de dilatación y compresión de los materiales constructivos sometidos a grandes variaciones de temperatura.

El objeto del presente artículo se centra en los estudios realizados en algo mas de un año en la Iglesia de la Concepción Vall d'Almonacid (Castellón), Iglesia de la Inmaculada Concepción de Sot de Ferrer (Castellón), Iglesia del Cementerio General de Valencia (España) e Iglesia de San Pedro en Becerril del Carpio (Palencia).

Asimismo, en el presente artículo se presentan los resultados obtenidos en el control de unas excavaciones llevadas a cabo en un solar de Valencia con motivo de la construcción de un edificio. Estos resultados, si bien no pertenecen a obras del Patrimonio Histórico Construido, si que tienen una clara aplicación en la Instrumentación y el diagnóstico estructural aplicado a dichas obras del Patrimonio.

### **III.- Descripción teórica**

El sistema de monitorización y control es adecuado para la evaluación de la estabilidad de un fenómeno concreto a través del control de las lesiones aparecidas en una determinada estructura.

Como toda grieta o fisura se convierte en una nueva junta, las variaciones de temperatura y humedad implican variaciones de volumen en los materiales y por tanto se traducen en movimientos de la abertura de fisuración.

El problema a resolver es desligar el movimiento debido a la temperatura de una posible evolución de la abertura de fisuras debida a otra posible causa.

La metodología a seguir se basa en el análisis, cuando se dispone de suficiente número de datos, de los residuos de una función paramétrica de dos componentes, respecto de las lecturas reales.

La función paramétrica consta de una función armónica y una función lineal. La función armónica esta relacionada con las variaciones de temperatura estacionales y la función lineal, representa la deriva a determinar. La obtención de los parámetros desconocidos

se realiza mediante la minimización del error cuadrático de los residuos, obtenidos con la medida de los distintos instrumentos. Una vez obtenida la función lineal de deriva ésta es la que puede indicar, si el proceso evoluciona con una pendiente más ó menos constante en el tiempo.

Este sistema puede ser de gran utilidad, permitiendo un conocimiento real de la estabilización de un fenómeno, lo que contribuye a evitar intervenciones de recalces muy costosas y en muchos casos innecesarias.

La limitación del método hasta la fecha es que necesita de un tiempo de registros elevado. Por otra parte, siempre es utilizable la instrumentación de control para el seguimiento tras determinadas intervenciones y así evaluar la eficacia. No obstante se ha desarrollado en AIDICO un software capaz de procesar los datos obtenidos en un intervalo más corto de tiempo, pudiéndose realizar una prognosis en el tiempo del comportamiento de la estructura a partir de su cuadro fisurativo.

Así pues, los objetivos son los siguientes:

- a) evaluar la estabilidad de la fisuración para diagnóstico.
- b) evaluar los riesgos en función del grado de avance de la evolución de las señales.
- c) controlar la eficacia de posibles intervenciones como, atirantamientos, recalces etc.
- d) Disponer de más datos para evitar costes de intervenciones innecesarias.

Para llevar a cabo el control y la monitorización de las fisuras detectadas en las iglesias estudiadas se ha empleado un sistema de instrumentación completo. Este sistema esta formado por:

- Fisurómetros.
- Sensores de temperatura.
- Inclínómetro.
- Un adquisidor de datos.
- Una estación de comunicaciones GSM.
- Software para conexión.

Los fisurómetros son los instrumentos empleados para la medida de desplazamiento de las fisuras. Están formados por un transductor lineal potenciométrico que convierte estas variaciones de desplazamiento en mm a valores de tensión entre 0 y 2 Voltios, como se puede observar en la figura 1. Este transductor, a su vez, consta de un sensor cilíndrico de desplazamiento bidireccional y un acondicionador de señal, de forma que a la salida del mismo se obtenga una tensión de salida adecuada a los desplazamientos de la fisura bajo análisis. Los fisurómetros empleados son el modelo PZ34A25 (25 mm de recorrido) y el PCF50E (50 mm de recorrido) que se detallan a continuación:

	<b>PZ34A25</b>	<b>PCF50E</b>
Rango de medida	+/-12.5 mm	+/-25 mm
Señal de salida	0 – 2 Volt	0 – 2 Volt
Alimentación	2 Volt	2 Volt
Canal	2	1
Voltaje FOCET	1.04 Volt	1.07 Volt
Calibración	0.076 Volt/mm	0.038 Volt/mm
Linealidad	+/-0.2%	+/-0.05%
Sensibilidad	0.01 mm	0.01 mm

Figura 3: Especificaciones técnicas fisurómetros



(a)



(b)

Figura 5: Fisurómetros a) PZ34A25 y b) PCF50E

Por otra parte, el transductor de temperatura funciona de manera similar al de desplazamiento con la diferencia de que este último está formado por un transductor de temperatura con coeficiente negativo y su correspondiente circuito acondicionador de señal. El modelo empleado para la medida de temperaturas es el NTC/A. Con este sensor se obtienen valores de temperatura de gran precisión. Cabe destacar, que la situación de los sensores debe ser próxima a los potenciométricos, para monitorizar con mayor precisión la temperatura de la grieta que es lo que realmente nos importa conocer. Este modelo presenta las siguientes características:

<b>NTC/A</b>	
Rango de medida	-30° +70°
Alimentación	2 Volt
Sensibilidad	0.1°
Precisión	+/- 2°

Figura 5: Especificaciones técnicas sensor de temperatura



Figura 6: Sensor NTC/A



En la cúpula de la Capilla del Cementerio de Valencia se ha colocado además un inclinómetro para mantener monitorizado el ángulo respecto al plano vertical de una de las columnas que sustenta la cúpula.

Dichos sensores van conectados a un adquisidor de 8 canales que se encarga de registrar los valores de temperatura y desplazamiento correspondientes a 3 – 4 grietas y los transmite vía GSM a un puesto central de control donde se llevan a cabo las tareas de almacenamiento y procesado de las diferentes señales.



Figura 7: Adquisidor LPdas

A partir de los datos obtenidos por los sensores colocados en los diferentes puntos de interés, se lleva a cabo el almacenamiento de los datos para su posterior visualización. Esto se realiza mediante un complejo software que permite la conexión con el adquisidor, la descarga de señales y su correcta visualización.

## IV.- TRABAJOS REALIZADOS

### 5.1 Montaje del equipamiento

La instalación de un equipamiento completo en una Iglesia, requiere de un estudio previo de la estructura y de su comportamiento, con el fin de instrumentar aquellas fisuras más significativas.

En las siguientes figuras se observan las plantas de las iglesias de Vall d'Almonacid y Sot de Ferrer con las correspondientes fisuras señaladas.

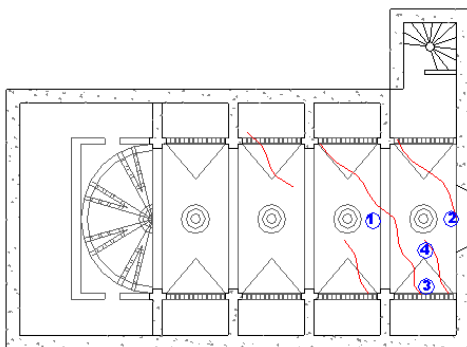


Figura 8: Planta Iglesia Vall d'Almonacid

Ubicación	Fisurómetro	Temperatura
Punto 1	Canal 1 (PCF50E) Canal 5 (PZ34A25)	Canal 7 (NTC/A)
Punto 2	Canal 3 (PZ34A25)	Canal 7 (NTC/A)
Punto 3	Canal 2 (PZ34A25)	Canal 6 (NTC/A)
Punto 4	Canal 4 (PZ34A25)	Canal 8 (NTC/A)

Figura 9: Localización de puntos de control Vall d'Almonacid

Cada fisura se mantiene monitorizada mediante un fisurómetro y un sensor de temperatura en cada uno de los puntos de interés localizados. En las siguientes imágenes se observa la colocación de los sensores en el interior de la iglesia de Vall d'Almonacid.

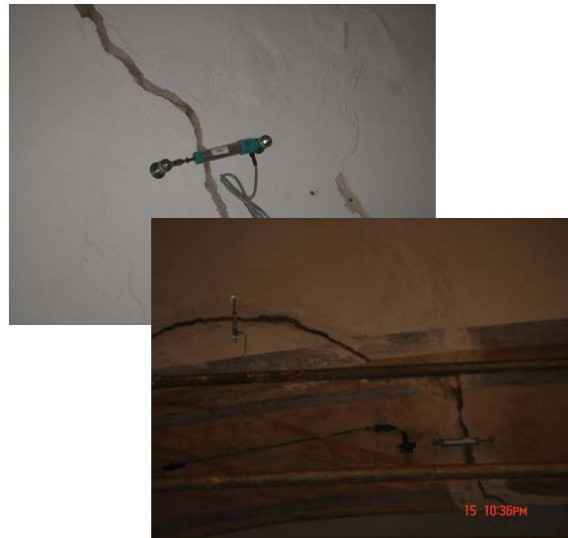


Figura 10: Colocación sensores Vall d'Almonacid

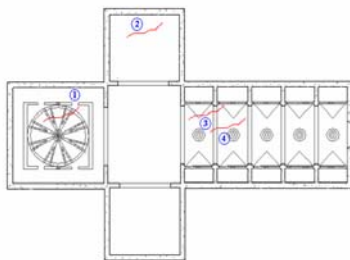


Figura 11: Planta Iglesia Sot de Ferrer

Ubicación	Fisurómetro	Temperatura
Punto 1	Canal 1 (PCF50E) Canal 2 (PZ34A25)	Canal 3 (NTC/A)
Punto 2	Canal 8 (PZ34A25)	Canal 7 (NTC/A)
Punto 3	Canal 4 (PZ34A25)	
Punto 4	Canal 6 (PZ34A25)	Canal 5 (NTC/A)

Figura 12: Localización puntos de control Sot de Ferrer

## 5.2 Evolución de las medidas efectuadas

Una vez se tienen correctamente colocados y calibrados los equipos, el puesto central de control instalado en AIDICO se conecta periódicamente a las estaciones LPdas vía GSM procediendo a la descarga de las lecturas realizadas.

De esta forma, tras un periodo de adquisición de lecturas de más de un año y medio en la Iglesia de la Inmaculada Concepción de Vall d'Almonacid, se obtiene el siguiente gráfico de evolución de temperatura y abertura de la fisura en uno de los puntos de control localizados.

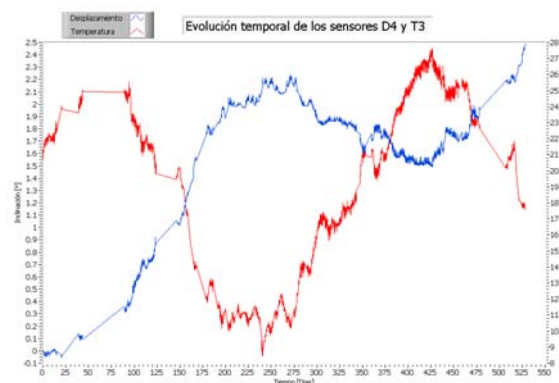


Figura 13: Evolución lecturas Vall d'Almonacid

La instrumentación llevada a cabo en la Iglesia de Sot de Ferrer se realizó posteriormente, durante el mes de Octubre y únicamente se cuenta con medidas correspondientes a 6 meses.

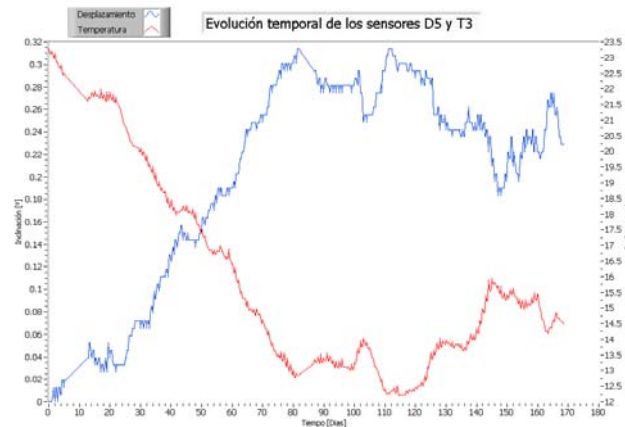


Figura 14: Evolución lecturas Sot de Ferrer

En las medidas realizadas se puede observar la componente armónica de las señales obtenidas. Esta componente viene dada por la variación cíclica de temperatura con periodo de un año.

En el caso de la señal obtenida en la Iglesia de Vall d'Almonacid, por ejemplo, presenta una deriva lineal superpuesta a la función periódica esperada. Esta contribución se debe a que la estructura no se encuentra estabilizada y no ha alcanzado un estado de equilibrio. De esta tendencia puede deducirse la existencia de daños estructurales que provocan estas variaciones en la abertura del cuadro fisurativo.

### 5.3 Verificación y tratamiento de señales

Previamente a la realización del procesado y evaluación de las lecturas adquiridas, se debe proceder a la comprobación de las mismas, tanto desde el punto de vista de la electrónica de los diferentes instrumentos de medida, como de la coherencia de las señales obtenidas en los distintos puntos de control.

El estudio de las funciones de correlación entre las diferentes señales obtenidas, permite concluir el grado de similitud que presentan las mismas. Esta práctica le confiere a la técnica de la Instrumentación Estática una ventaja frente a otros ensayos, puesto que permite evaluar la degradación de la estructura en su conjunto, independientemente de la localización de los puntos que se mantengan instrumentados.

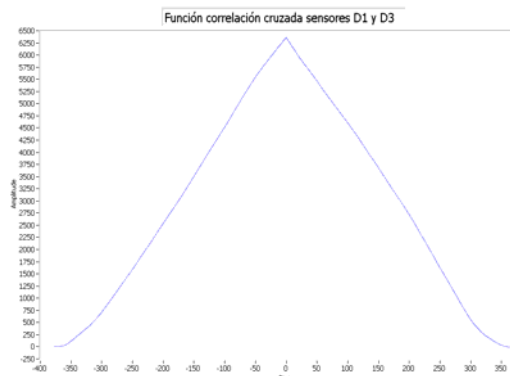


Figura 15: Función de autocorrelación

Los resultados obtenidos tras el cálculo de la correlación permiten concluir que los movimientos que presentan las fisuras en puntos diferentes son totalmente dependientes. Ello permite, por una parte, verificar el correcto funcionamiento de los diferentes

instrumentos de medida y, por otra parte concluir el grado de inestabilidad de la estructura en su conjunto.

Cabe recordar que el objetivo de este avanzado sistema de medición de grietas no es otro que el de llegar a discernir las variaciones en la abertura de la grieta que se deben a la temperatura, de efectos de otra índole de los que se podría deducir algún tipo de daño estructural.

Con este fin, en AIDICO se lleva cerca de dos años desarrollando un software específico que nos permita realizar tareas adicionales a la simple adquisición de datos. Para ello se hace uso de técnicas de tipo estadístico que pueden llevarnos, en un futuro no muy lejano, a predecir en pocos meses cual va a ser la evolución de la grieta en los próximos años. Este estudio podría suponer un elevado ahorro económico en costosos refuerzos estructurales.

Tras observar la periodicidad y la apariencia de las señales se aproximan las mismas mediante una función débil, pudiendo de esta forma evaluar cual va a ser la deriva de las señales con el fin de discernir claramente el factor térmico del factor introducido por la patología presente en la estructura.

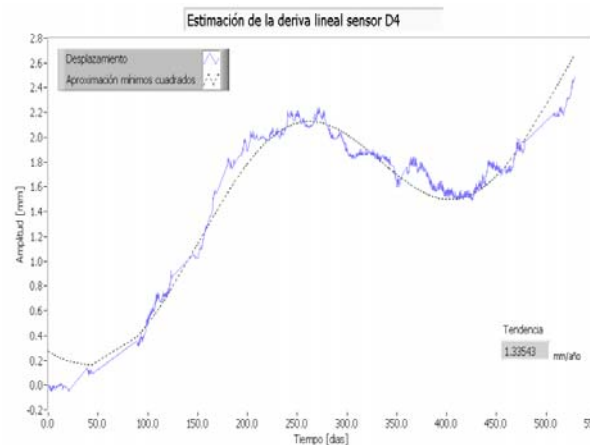
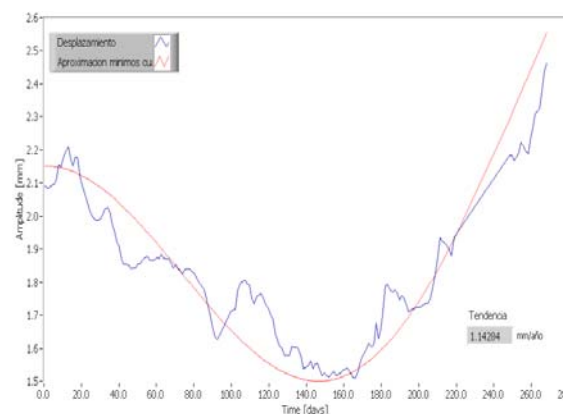


Figura 16: Deriva lineal Vall d'Almonacid

Con esta finalidad se están desarrollando en la actualidad unos modelos que en pocos meses o semanas sean capaces de sustraer la dependencia existente entre el movimiento de abertura de la grieta y la temperatura.

Para ello se debe realizar una aproximación cuadrática de la señal obtenida a una función matemática formada por una componente armónica producida por la variación de temperatura y una componente de deriva lineal no explicada mediante dichas variaciones.



*Figura 17: Modelo de prognosis Vall d'Almonacid*

En la figura anterior se muestra claramente la tendencia obtenida para el sensor D4 en la Iglesia de Vall d'Almonacid tras la ejecución de un algoritmo predictivo sobre la señal de desplazamiento obtenida de 9 meses. En el gráfico se puede observar la precisión del método de medida, con un error producido inferior al 10%.

## **V.- Conclusiones y resultados**

Las medidas de temperatura y desplazamiento obtenidas mediante la Instrumentación y Monitorización Estática de Estructuras permiten realizar un diagnóstico y análisis cuantitativo del estado en el que se encuentra la construcción bajo estudio.

A través de la monitorización estática estructural del cuadro fisurativo se puede evaluar el grado de estabilidad en que se encuentra la construcción a través de los movimientos presentes en las grietas encontradas. De esta forma, se puede conocer el margen de seguridad que presenta la estructura, a fin de estimar el grado y la urgencia de intervención necesarios en la misma.

Estas medidas deben ser complementadas con modelizaciones de Elementos Finitos y otros ensayos de tipo no destructivo que permitan realizar un análisis más profundo y cualitativo de los daños producidos.

En la difícil tarea de la Conservación del Patrimonio Histórico y Cultural Construido, se deben llevar a cabo acciones no agresivas como la descrita en el presente artículo, y que, a su vez, contribuyan a realizar un diagnóstico preciso y acertado con el fin de evitar intervenciones costosas en la estructura que pueden resultar en muchos casos innecesarias.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

*Ignacio Lombillo<sup>1</sup>; Luis Villegas<sup>2</sup>; GTED-UC<sup>3</sup>.*

<sup>1</sup> Ingeniero de Caminos, C. y P. Doctorando UC ([ignacio.lombillo@unican.es](mailto:ignacio.lombillo@unican.es)).

<sup>2</sup> Catedrático de Universidad. Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. ([luis.villegas@unican.es](mailto:luis.villegas@unican.es)).

<sup>3</sup> Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander ([gted@unican.es](mailto:gted@unican.es)).

### 1.- Introducción.

Las estructuras del patrimonio arquitectónico están sometidas a una serie de dificultades de diagnóstico y restauración, que limitan la aplicación de las disposiciones normativas y las pautas vigentes en el ámbito de la construcción. Ello hace tan deseable como necesario formular unas recomendaciones que garanticen la aplicación de unos métodos racionales de análisis y restauración.

En primer lugar cabe referir que la conservación, consolidación y restauración del patrimonio arquitectónico requieren un tratamiento multidisciplinar, enfocando la intervención desde el punto de vista de la integridad con el contexto cultural al que pertenece. Habitualmente, un equipo pluridisciplinar, cuya composición vendrá determinada por el tipo y la envergadura del problema, debe trabajar conjuntamente desde las primeras fases del proyecto, así como en el examen inicial del lugar y en la preparación del programa de investigación.

Merece la pena insistir en la idea de la multidisciplinaridad, se ha de plantear un enfoque que trascienda las simples consideraciones de una disciplina individual. Por ejemplo, un equipo bien coordinado puede favorecer que la investigación histórica descubra fenómenos sobre el comportamiento estructural, y en otras ocasiones las cuestiones históricas puedan responderse a partir del conocimiento del comportamiento estructural. Así pues, es importante contar con un equipo formado por investigadores que dispongan de una variedad de conocimientos adecuados en relación con las características del edificio y asimismo dirigido por alguien con la experiencia apropiada que sea capaz de articular todas las conclusiones obtenidas.

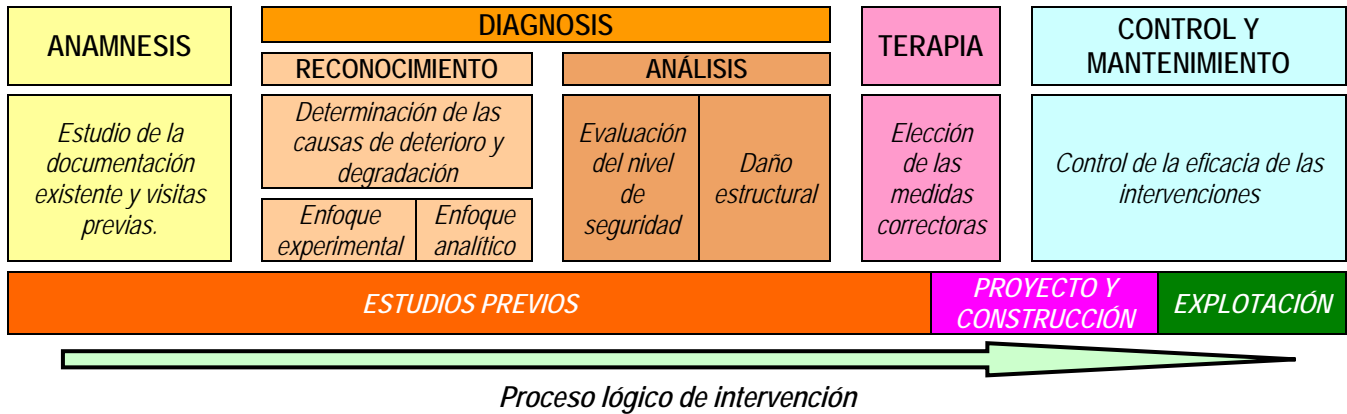
Existe una necesidad de poner en práctica metodologías que contribuyan a facilitar la comunicación entre los profesionales de diferentes campos del conocimiento implicados, para de esa forma disminuir la subjetividad inherente a cada profesional y evitando que, en función de los técnicos implicados, se planteen diferentes enfoques en los estudios (enfoque histórico, enfoque arquitectónico, enfoque arqueológico, enfoque ingenieril, etc.). De lo que se trata es de aprovechar las sinergias existentes entre los diferentes equipos participantes, quien más quien menos con conocimientos transversales con el campo del análisis, conservación y restauración del Patrimonio Construido, con la finalidad de obtener mayor número de datos de entrada y, por ende, enriquecer los contenidos y las conclusiones previas a la fase de intervención propiamente dicha.

Las peculiaridades que ofrecen las estructuras arquitectónicas, con su compleja historia, requieren que los estudios y propuestas se organicen en fases sucesivas y bien definidas, similares a las que se emplean en medicina (anámnesis, reconocimiento, diagnosis,

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

terapia y control), aplicados a la correspondiente búsqueda de datos reveladores e información.

Para conseguir un equilibrio óptimo entre el coste y los resultados, y producir el mínimo impacto posible en el patrimonio arquitectónico, utilizando los fondos disponibles de una manera racional, se hace normalmente necesario repetir estas fases de estudio dentro de un proceso continuado.



### 2.- Anámnesis.

En la fase de anámnesis<sup>1</sup> o de información es fundamental recabar información sobre la estructura en su estado original y en sus primeras etapas, las técnicas que se emplearon en la construcción, las alteraciones sufridas y sus efectos, los fenómenos que se han producido y, por último, sobre su estado actual.

El tipo de análisis desarrollado es eminentemente un **análisis cualitativo**, basado en la comparación entre la condición actual de la estructura y sus condiciones pasadas (análisis histórico), en la comparación entre la condición actual y la condición de otras estructuras similares cuyo comportamiento haya sido ya caracterizado, y en las vistas de aproximación desarrolladas.

#### 2.1.- Investigación histórica (antecedentes).

El objetivo del estudio histórico es entender la concepción y la importancia del edificio, las habilidades y técnicas utilizadas en su construcción, los cambios que se hayan producido tanto en la estructura como en su entorno y finalmente los sucesos que puedan haber causado algún daño.

La historia es el laboratorio experimental más completo y opera, además, a escala real. La tarea del analista reside en desechar la información superflua e interpretar correctamente los datos pertinentes para describir el comportamiento estático y dinámico de la estructura. Puede constituir una indicación útil para estimar el nivel de seguridad en su estado actual. A pesar de tratarse de un factor importante que debe considerarse en el estudio del comportamiento futuro, el conocimiento de un comportamiento satisfactorio en el pasado no siempre constituye una guía fiable para predecir la seguridad y la supervivencia de una estructura.

Dentro de este apartado podríamos incluir el estudio de la documentación previa existente (antiguos proyectos, libros de fábrica, etc.).

<sup>1</sup> Conjunto de los datos clínicos relevantes y otros del historial de un paciente.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

### 2.2.- Inspección visual de la estructura (visitas de aproximación) y experiencia previa.

Su finalidad reside en proporcionar una comprensión inicial de la estructura que, a su vez, permita enfocar apropiadamente las investigaciones posteriores.

El estudio de las alteraciones estructurales comienza con el levantamiento de los daños visibles (Figuras 1 y 2), de forma que pueda hacerse una idea sobre el comportamiento estructural. Es decir una evaluación de los síntomas de los procesos patológicos existentes.



Figura 1: Ficha para el levantamiento de daños visibles.

En esta fase se ha elaborado una toma de datos exhaustiva de los aspectos más característicos de la estructura, elaborando un reportaje fotográfico adecuado. La observación de las zonas donde se concentran los daños puede indicar posibles causas de los mismos.

La experiencia que se gana analizando y comparando el comportamiento de estructuras diferentes puede hacer viables las extrapolaciones y proporcionar las bases necesarias para evaluar el nivel de seguridad. Este análisis depende más del juicio personal que de procedimientos estrictamente científicos. Sin embargo, puede ser el análisis más racional en los casos en los que las incertidumbres inherentes a los problemas son tan



## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

pronunciadas que otros tipos de análisis resultan más rigurosos y fiables sólo en apariencia. La fiabilidad de la evaluación dependerá del número de estructuras observadas y, por consiguiente, de la experiencia y conocimiento de las personas involucradas. Un programa de investigación apropiado y una monitorización de los fenómenos progresivos pueden aumentar el grado de fiabilidad del análisis.

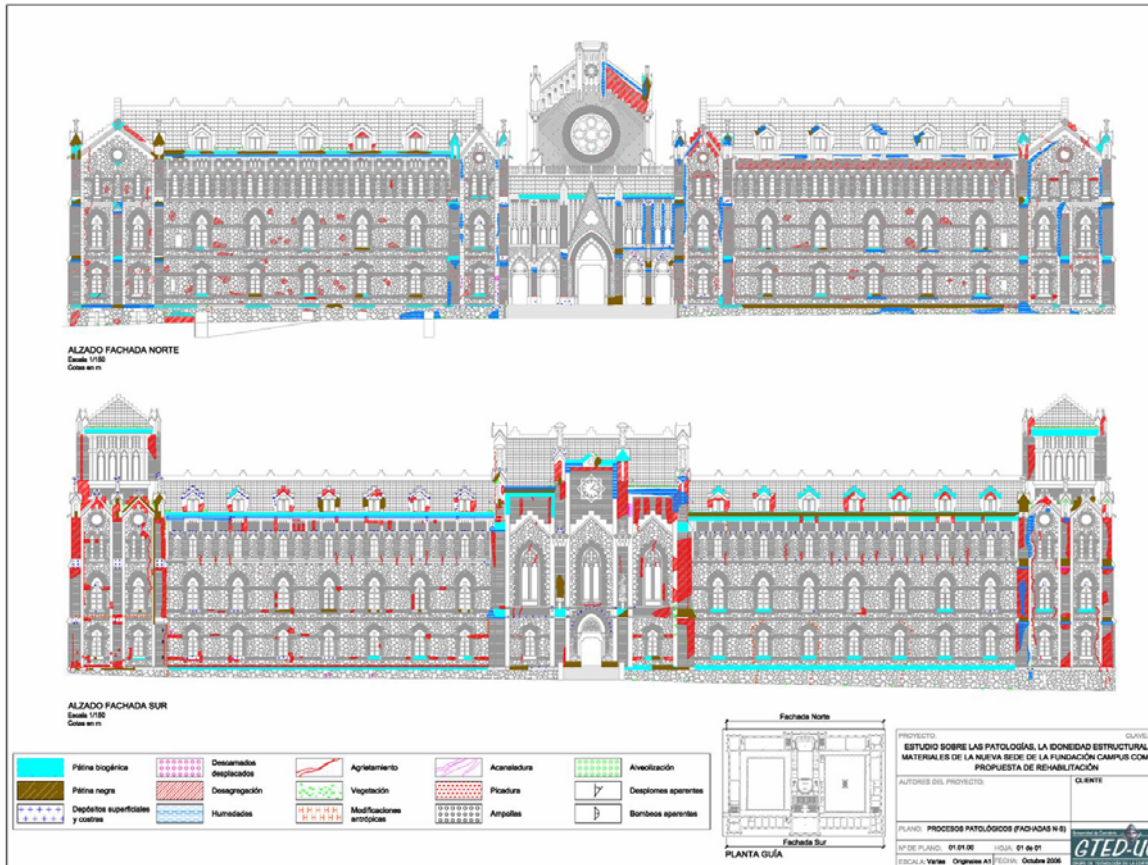


Figura 2: Levantamiento de procesos patológicos de las fachadas Norte y Sur del Seminario Mayor de Comillas

### 3.- Diagnóstico.

#### 3.1.- Reconocimiento: identificación de causas.

La primera fase del diagnóstico consiste en identificar las causas del daño y del deterioro basándose en los datos obtenidos tanto a partir del **análisis cualitativo** de la fase de anámnesis, como del análisis cuantitativo propiamente de esta fase. Los primeros, análisis cualitativo, como ya se ha referido han de basarse principalmente en la observación de los daños estructurales y la degradación material, así como en la investigación histórica y arqueológica propiamente dicha; y los segundos, **análisis cuantitativo**, fundamentalmente en pruebas sobre los materiales y los elementos estructurales (campaña experimental), en la supervisión continua de los datos (monitorización) y en el análisis estructural (en muchos casos mediante modelización matemática).

El diagnóstico es a menudo una fase difícil, puesto que los datos disponibles normalmente se refieren a los efectos, mientras que es la causa o, más frecuentemente, son las distintas causas concomitantes lo que hay que determinar.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

### 3.1.1.- Enfoque experimental

Desde el punto de vista de la tecnología de estructuras es **imprescindible conocer las geometrías, así como propiedades físicas y mecánicas de los diferentes elementos estructurales involucrados en una construcción**, para poder verificar la tolerabilidad de los niveles tensionales motivados por las acciones, y por ende discernir los coeficientes de seguridad y estimar la vida útil de las estructuras.

Como consecuencia, todos los esfuerzos encaminados a optimizar las metodologías experimentales existentes (ensayos in situ, preferentemente no destructivos y monitorización, preferentemente remota) se traducen de forma inmediata en una optimización de los resultados obtenidos con el empleo de las herramientas numéricas, ya que hay un desconocimiento generalizado de la tecnología de los materiales involucrados, sobretodo de las propiedades mecánicas, lo cuál hace que los modelos numéricos no deban contemplarse desde una visión eminentemente cuantitativa. De la misma forma además de contribuir a la obtención de dichos parámetros de entrada del modelo, de la forma menos destructiva posible, se pretende que las metodologías experimentales ayuden a calibrar dichos modelos matemáticos mediante la comprobación experimental de los resultados obtenidos por éstos en determinados puntos de control.

En la obra de fábrica el enfoque experimental debe identificar las características de los componentes de este material compuesto: las piedras (piedra caliza, arenisca, etc.) o ladrillos (cocidos o secados al sol, etc.) y el tipo de mortero (de cemento, de cal, etc.). También es necesario saber cómo están unidos los elementos (juntas secas, juntas de mortero, etc.) y la manera en la que se relacionan entre sí geométricamente. Pueden utilizarse distintos tipos de ensayos para determinar la composición de la pared (ensayos endoscópicos, acústicos, rádar, etc.).

#### 3.1.1.1.- Investigación de campo y ensayos de laboratorio

Los ensayos normalmente tienen como objetivo identificar las características mecánicas (resistencia, deformabilidad, etc.), físicas (porosidad, etc.) y químicas (composición, etc.) de los materiales, las tensiones y deformaciones de la estructura y la presencia de cualquier discontinuidad dentro de la estructura.



*Figura 3: Videoscopia a través de un agujero existente en una fábrica de arenisca.*



*Figura 4: Videoscopia a través de una perforación realizada en un mampuesto para obtener un testigo para ensayo en laboratorio.*

Los ensayos no destructivos (figuras 3 y 4) son preferibles a los ensayos que impliquen alteraciones de la estructura; si no son suficientes, es preciso valorar el beneficio que se

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

obtendrá haciendo catas o pequeñas intervenciones en la estructura teniendo en cuenta la pérdida de material con valor cultural que ello pueda suponer. Si es posible deben utilizarse varios métodos y comparar los resultados.

Desde un punto de vista de caracterizar los materiales involucrados y el comportamiento de los diferentes elementos estructurales, cabe discriminar entre ensayos propiamente de laboratorio sobre muestras extraídas de material homogéneo, ensayos de laboratorio sobre material heterogéneo (bien para la caracterización de lo existente o para la caracterización del comportamiento futuro frente por ejemplo ante un refuerzo) y ensayos in situ no destructivos, o mejor dicho, ligeramente destructivos.

### 3.1.1.1.1.- Ensayos de laboratorio sobre muestras extraídas de material homogéneo.

Desde este punto de vista podemos discriminar en ensayos para caracterizar **químicamente** la muestra homogénea de material:

- Composición química elemental por energía dispersiva de rayos X (EDAX) (Figura 5).
- Análisis microestructural por microscopía electrónica de barrido (Figura 6).
- Composición mineralógica por difracción de rayos X.
- Etc.

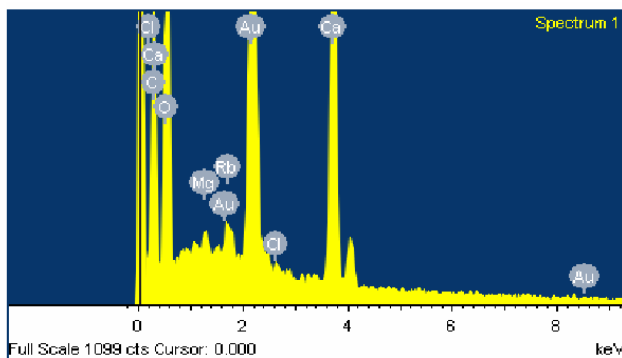


Figura 5: Composición química elemental por energía dispersiva de rayos X (EDAX) de una caliza del Palacio de Riva Herrera (Santander).

Cortesía: LADICIM.

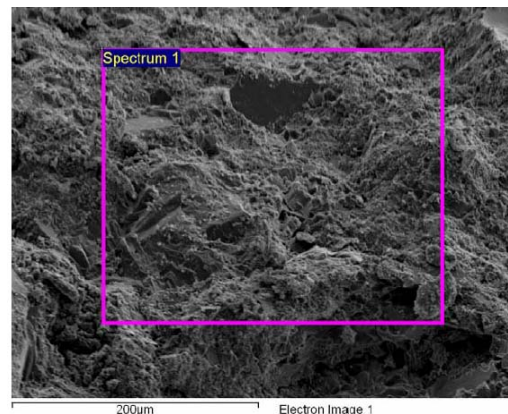


Figura 6: Análisis microestructural por microscopía electrónica de barrido de una caliza del Palacio de Riva Herrera (Santander).

Cortesía: LADICIM.

Para caracterizar sus **propiedades físicas** (figuras 7, 8 y 9):

- Densidades.
- Porosidades.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.



*Figura 8: Cámaras de vacío para la saturación de muestras. Cortesía: LADICIM.*



*Figura 8: Pesado de muestras en balanza de precisión. Cortesía: LADICIM.*



*Figura 9: Secado en estufa de muestras hasta peso constante. Cortesía: LADICIM.*

- Absorción.
- Caracterización de parámetros térmicos (coeficiente de dilatación térmica, conductividad térmica, etc.)
- Etc.

Para caracterizar sus **propiedades mecánicas**:

- Resistencia a compresión.
- Resistencia a tracción (Figura 10).
- Resistencia a flexotracción.
- Obtención del módulo de elasticidad (E) (Figura 11).
- Obtención del coeficiente de poisson ( $\nu$ ).
- Etc.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.



Figura 10: Ensayo brasileño (tracción indirecta) de un testigo de piedra caliza.



Figura 11: Ensayo para la obtención del módulo de elasticidad y coeficiente de poisson de un mortero polimérico epoxi.

Evaluar el comportamiento del material frente a determinados mecanismos de alteración, es decir **propiedades relacionadas con la durabilidad**:

- Pérdida de masa y resistencia por hielo-deshielo (Figura 12).
- Ensayos de humedad-sequedad.
- Ensayos de abrasión.
- Ensayos de corrosión acelerada en cámara de niebla salina (Figura 13).
- Etc.



Figura 12: Testigos en el interior de la cámara frigorífica durante los ensayos de heladicidad. Cortesía: LADICIM.



Figura 13: Probetas en cámara para ensayo acelerado de corrosión por niebla salina. Cortesía: LADICIM.

### 3.1.1.1.2.- Ensayos de laboratorio sobre material heterogéneo.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

Para obras de fábrica, por ejemplo:

- Ensayos de compresión simple: obtención de carga de rotura, módulo de elasticidad y coeficiente de poisson (Figuras 14 a 17).



*Figura 14: Configuración general de un ensayo a compresión sobre una probeta de fábrica antigua de ladrillo macizo.*

- Ensayos de compresión excéntrica.
- Ensayos de corte.
- Ensayos de flexión paralela a tendeles (Figura 17).
- Ensayos de flexión perpendicular a tendeles (Figura 18).

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.**



*Figura 14: Ensayo a compresión de una fábrica cerámica*



*Figura 15: Ensayo en laboratorio a compresión de una probeta de fábrica antigua extraída de la construcción original*



*Figura 16: Ensayo a compresión de una fábrica de bloques*



*Figura 17: Ensayo de flexión paralela a tendeles de una fábrica cerámica*



*Figura 18: Ensayo de flexión perpendicular a tendeles de una fábrica cerámica*

- Ensayos para **evaluar el comportamiento de posibles refuerzos** (Figuras 19 y 20) **o de comportamiento de sistemas estructurales basados en subsistemas independientes** (por ejemplo piedra – materiales poliméricos, Figuras 21 y 22).



*Figura 19: Ensayo para determinar la carga máxima a flexión en una probeta pétrea natural.*



*Figura 20: Ensayo para determinar la carga máxima a flexión en una probeta pétrea natural armada, frente a mecanismos de rotura a flexión y cortante, con acero inoxidable y mortero*

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.**

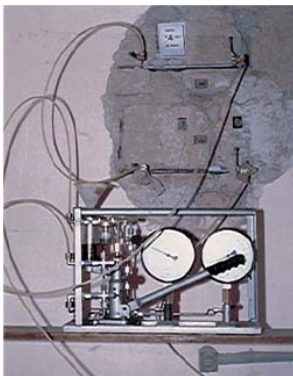
*polimérico.*



*Figuras 21 y 22: Ensayo para evaluar la tensión de adherencia a cortante entre una piedra caliza natural y un mortero polimérico epoxi*

**3.1.1.1.3.- Ensayos in situ.**

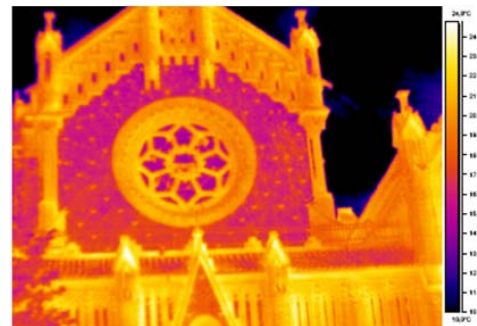
Se trata de unos ensayos muy útiles para el subsector constructivo de la rehabilitación, en tanto que pueden orientar sobre las características de los elementos estructurales que interesen a escala real y en su localización real. Es preferible que se trate de ensayos no destructivos o ligeramente destructivos.



*Figura 23: Ensayo de gato plano doble.*



*Figura 24: Martillo sónico.*



*Figura 25: Termografía infrarroja en el Seminario Mayor de Comillas.*

El objetivo de estos ensayos es variable. Desde el punto de vista de las estructuras de fábrica, los hay que tratan de obtener **valores cuantitativos de ciertos parámetros**:

ENSAYO	FUNDAMENTO	OBJETIVO
<i>Gato plano simple (“Simple flat jack”)</i>	Liberación de tensiones	Nivel tensional local asociado a un determinado plano.
<i>Gato plano doble (Double flat jack”) (Figura 23)</i>	Ensayo a “compresión simple” de una probeta real de fábrica	Relación $\sigma$ - $\epsilon$ . Módulo de deformación, coeficiente de poisson.
<i>Resistencia al corte de la junta de mortero (“In situ shear test” o “push test”)</i>	Ensayo a “corte”, bajo diferentes niveles de carga vertical, de una probeta real de fábrica	Índice de la resistencia in situ a corte en las juntas horizontales de fábricas sin reforzar. Relación $\zeta$ - $\sigma$ .
<i>“Hole drilling”</i>	Tensiones residuales.	Nivel tensional. Posibilidad de obtención de tensiones principales. Posibilidad de obtención de estados a tracción.
<i>Dilatometría</i>	Registro de la presión suministrada y	Relación $\sigma$ - $\epsilon$ en elementos de gran



**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.**

		del incremento de volumen generado. La sonda ejerce una tensión radial conocida contra el material que la rodea. Relacionando esta tensión con la deformación medida en la misma dirección (a partir de consideraciones de variación volumétrica) se obtiene un índice del módulo de deformación de la fábrica en la zona de aplicación.	espesor. Módulo de deformación (módulo presiométrico).
<i>Técnicas esclerométricas</i>		Relacionan la resistencia del material con la penetración de un útil en su seno.	Orden de magnitud de la resistencia y calidad del material (mortero, piedra, ladrillo, etc.).
<i>“In situ bond test”</i>		Aplicación de carga excéntrica	Proporciona una estimación de la resistencia a flexión de la junta de mortero.
<i>“Pull out resistance”</i>		Fuerza necesaria para el arrancamiento de un útil introducido en un tendel de la fábrica	Proporciona la resistencia al arrancamiento del mortero. Indirectamente proporciona la resistencia mecánica del mortero
<i>“Drilling resistance”</i>	<i>Penetrómetro PNT-G</i>	Correlacionar la resistencia del mortero de cal con la energía necesaria para reducirlo a arena	Orden de magnitud de la resistencia y calidad del mortero.
	<i>Taladro DRMS</i>	Correlaciona la resistencia al avance con la resistencia mecánica. El uso del Par permite la corrección a la abrasión debida a la naturaleza distinta dureza de los áridos	Orden de magnitud de la resistencia y calidad del mortero.

Por el contrario los hay que proporcionan **órdenes de magnitud cualitativos** sobre la composición de los muros (en hojas de diferentes materiales), distribución de defectos, etc.:

<b>ENSAYO</b>	<b>FUNDAMENTO</b>	<b>OBJETIVO</b>
<i>Endoscopia y videoendoscopia (Figuras 3 y 4)</i>	Observar cavidades de difícil acceso de forma sencilla y precisa, con un grado de nitidez, fidelidad en la reproducción de los colores y luminosidad que resultan decisivos	Tamaño de defectos. Composición de las hojas de un muro. Etc.
<i>Velocidad de pulso ultrasónico (ensayo directo o transparencia)</i>	Medida del tiempo de propagación de la onda ultrasónica. Evaluación de elementos pétreos aislados (mampuestos o sillares de compacidad adecuada) o probetas extraídas de los mismos. No son adecuados para evaluar materiales muy heterogéneos (p. ej.: fábricas).	Estimación, mediante correlaciones, de propiedades físicas (densidad) y mecánicas. Rangos de velocidades relacionados con la calidad del material.
<i>Velocidad de pulso sónico (ensayo directo o transparencia) (Figura 24)</i>	Se mide el tiempo que toma el impulso para cubrir la distancia entre el transmisor y el receptor (tiempo de viaje) → Se deduce la $V_{\text{onda}}$ . Más adecuado para evaluar materiales muy heterogéneos (p. ej.: fábricas).	Calificar la fábrica. Detectar la presencia de vacíos y defectos. Encontrar patrones de agrietamiento y modelos de daño. Controlar la eficacia de una inyección. Detectar cambios en las características físicas de los materiales
<i>Impacto eco (sónico o</i>	En un material heterogéneo, como la fábrica, se producirá una reflexión de	Calificar la fábrica.

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.**

<i>ultrasónico)</i>	<p>la onda acústica de llegada siempre que haya una discontinuidad del material, produciéndose una pérdida de velocidad respecto a la que se obtendría en un material homogéneo.</p> <p>Si se mide el tiempo de viaje (ida y vuelta), y si se conoce la velocidad de propagación de la onda puede determinarse la distancia a que se produce la reflexión (profundidad e intensidad de la interfase reflectora: defecto o cara opuesta)</p>	<p>Detectar la presencia de vacíos y defectos.</p> <p>Controlar la eficacia de una inyección.</p> <p>Detectar cambios en las características físicas de los materiales</p>
<i>Tomografía sónica o ultrasónica</i>	<p>Técnica computacional que utiliza un método iterativo para el procesado de una gran cantidad de datos</p> <p>La tomografía reproduce la estructura interna de un objeto a partir de medidas (sónicas o ultrasónicas) recogidas desde su superficie externa.</p>	<p>Mapa de distribución de velocidades acústicas en el interior de la fábrica.</p> <p>Permite zonificar la fábrica desde un punto de vista de su calidad, detectar la presencia de vacíos y defectos, controlar la eficacia de una inyección y detectar cambios en las características físicas de los materiales</p>
<i>Termografía infrarroja (Figura 25)</i>	<p>Las radiaciones infrarrojas del espectro electromagnético, invisibles al ojo humano, que todo cuerpo a temperatura superior al cero absoluto (-273.15 °C) se emiten en forma de calor, con una distribución espectral en función de la temperatura, de la composición del cuerpo y de su emisividad.</p>	<p>Localización de humedades.</p> <p>Identificación de estructuras ocultas.</p> <p>Localización de huecos cegados.</p> <p>Identificación de grietas.</p> <p>Localización de diferentes materiales.</p> <p>Etc.</p>
<i>Técnicas radar</i>	<p>Basada en el estudio de las reflexiones de las ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Los impulsos emitidos se reflejan entre los interfaces de materiales con propiedades dieléctricas diferentes como las superficies de un muro, huecos, inclusiones, etc.</p>	<p>Ámbito de la arqueología y paleontología: definición de zonas de excavaciones en yacimientos arqueológicos y paleontológicos, localización de vías, murallas, restos fósiles, etc.</p> <p>Localización de cavidades bajo superficies rígidas.</p> <p>Localización de tuberías de servicios y cables enterrados en medios urbanos</p> <p>Etc.</p> <p>En fábricas: localizar la posición de grandes vacíos e inclusiones de materiales diferentes como acero, madera, etc., identificar el estado de conservación o daño de estructuras, definir la presencia y nivel de humedad, controlar la eficacia de reparación por técnicas de inyección, descubrir la morfología de la sección de muros de múltiples hojas de piedra y/o ladrillo.</p>

**3.1.1.2.- Monitorización**

Entre las técnicas disponibles por parte de los técnicos para un mejor conocimiento de las estructuras se encuentra la instrumentación y monitorización de las mismas. Es una metodología no destructiva que permite mediante la colocación de una serie de referencias y equipos conocer como se deforman las estructuras en un periodo de tiempo.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

La observación de la estructura durante un cierto período de tiempo puede ser necesaria no sólo para obtener información útil acerca de la existencia de fenómenos progresivos, sino también para el seguimiento de un proceso de renovación estructural de carácter secuencial. En este último caso, se monitoriza el comportamiento en cada fase (enfoque observacional) y los datos que se obtienen proporcionan la base para cualquier acción posterior.

Un conocimiento del comportamiento de la estructura, lo más real posible, permite a los técnicos emitir un adecuado diagnóstico de los problemas de las estructuras y permite definir soluciones que no aumenten el costo de las mismas y que no dañen de forma irreversible al monumento.

Puede discriminarse entre el control de estructuras mediante técnicas convencionales denominado manual (colocación de referencias y medida de las mismas con equipos portátiles), y el control remoto de estructuras. Con ambas técnicas se pueden obtener resultados similares, si bien la calidad de los datos, frecuencia de lecturas y flexibilidad en las mismas es superior en el caso de la remota. La medición manual se impone en casos de entidad menor, de menor puntos de lectura o bien cuando los recursos disponibles se encuentran más limitados.

### 3.1.1.2.1.- Monitorización manual.

La monitorización manual consiste en la colocación de una serie de referencias que se fijan a las zonas de la estructura a estudiar para su lectura manual mediante equipamiento portátil. En función del riesgo existente, la evolución de los daños, el objeto de la auscultación y de los recursos disponibles, el periodo de medida puede variar entre un máximo de tres meses y el mínimo que se desee, incluso con periodicidad diaria en situaciones de posible riesgo estructural.



Figura 26: Cinta de convergencia en proceso de lectura. Cortesía: LABEIN.



Figura 27: Torpedo inclinométrico con electrónica de medida

### 3.1.1.2.2.- Monitorización remota.

Como alternativa a la monitorización manual es posible la realización de una monitorización remota, bien mediante sensores convencionales, sensores inalámbricos, sensores basados en la tecnología del hilo vibrante o sensores de fibra óptica mediante medidas cuasi-distribuidas o distribuidas.

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.**



*Figura 28: Extensómetro. Cortesía: LABEIN. Figura 29: Clinómetro. Cortesía: LABEIN.*

Los datos que se obtienen con este sistema son mucho más numerosos y con mayor precisión. El estándar de medida habitual incluye en registro de datos dos veces al día durante el periodo de medición, de tal manera que resulta factible efectuar un seguimiento de mayor calidad, discriminando además los posibles efectos por variación de temperatura en una misma jornada. Así, al final del periodo de seguimiento, existen datos continuos de los movimientos, y que incluso, en aquellos casos en que sea de aplicación, pueden relacionarse fácilmente con las fases de ejecución de obras. De esta forma, podría valorarse en el comportamiento estructural la incidencia inmediata de la colocación de nuevas cubiertas, refuerzos, excavaciones, aperturas de huecos, etc.

<b>DISPOSITIVO</b>	<b>OBJETIVO</b>
<i>Testigos de fisuración</i>	Comprobar el progreso o no de fisuras.
<i>Referencia para fisuración en obra de fábrica</i>	Obtener la lectura de la separación entre las referencias mediante calibre.
<i>Extensómetros (Crackmeter) (Figura 28)</i>	Se emplean para la medición de la variación de espesor de fisuras
<i>Galgas extensométricas</i>	Registro de deformaciones
<i>Referencias de control de desplazamientos angulares</i>	Detectar variaciones en la inclinación.
<i>Referencias de nivelación</i>	Control de los posibles movimientos verticales que pueda sufrir la estructura.
<i>Cintas de convergencia (Figura 26)</i>	Se emplean para el registro de medida del movimiento relativo entre dos paramentos (fundamentalmente muros y pilares)
<i>Clinómetros (Figura 29)</i>	Se emplean para el registro de la inclinación de elementos estructurales (fundamentalmente muros y pilares)
<i>Inclinómetros (Figura 27)</i>	Controlar los posibles movimientos en el subsuelo. Con esta técnica se puede conocer las deformaciones en profundidad en el terreno, hecho especialmente interesante cuando pudieran existir patologías asociadas a movimientos del terreno o bien se prevén excavaciones en zonas cercanas.

**3.1.2.- Enfoque analítico**

Se trata de un procedimiento deductivo. Sin embargo, las incertidumbres que pueden afectar a la representación de las características de los materiales y del comportamiento estructural, junto con las simplificaciones adoptadas, pueden llevar a resultados que no siempre son fiables o que incluso están muy alejados de la situación real.

Los modelos matemáticos (Figuras 30 y 31) son las herramientas más frecuentemente utilizadas en el análisis estructural.

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

**Los modelos que describen la estructura original**, si han sido adecuadamente calibrados mediante procedimientos experimentales, permiten comparar el daño teórico producido por diferentes tipos de acciones con el daño observado en la realidad, y proporcionan así una herramienta útil para identificar sus causas.

**Los modelos matemáticos de la estructura dañada** y de la estructura reforzada ayudan a evaluar los niveles de seguridad actuales y valorar los beneficios de las intervenciones propuestas.

El análisis de la estructura es una herramienta indispensable. Incluso en los casos en los que sus resultados no puedan ser precisos, los cálculos y análisis pueden indicar el flujo de las tensiones y de las posibles zonas críticas.

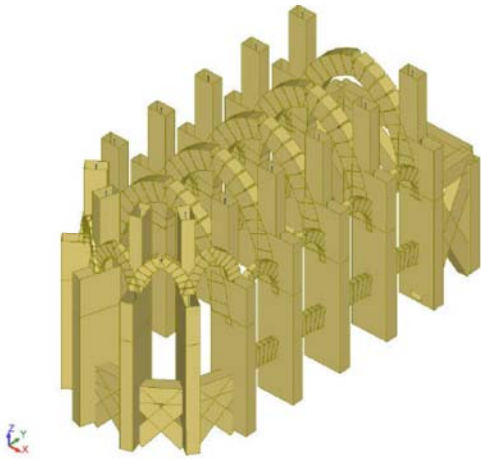


Figura 30: Modelo de barras de la iglesia del Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: DYNAMIS.

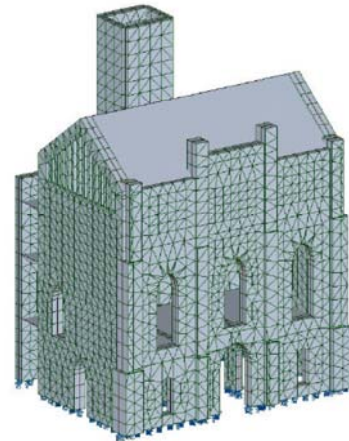


Figura 31: Modelo del volumen central sur del Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: DYNAMIS.

Todo modelo matemático debe tener en cuenta los tres aspectos siguientes:

### 3.1.2.1.- Geometría y Condiciones de Contorno.

De forma implícita al hablar de la geometría y de las condiciones de contorno nos estamos refiriendo al **esquema estructural**.

El comportamiento real de un edificio es normalmente tan complejo que obliga a representarlo como un “esquema estructural” simplificado. El esquema estructural muestra cómo el edificio transforma las acciones en esfuerzos y asegura la estabilidad. Por ello es necesario:

- Disponer de una **caracterización geométrica** lo más fiel posible a la realidad para optimizar en lo posible el modelo. Para realizar el levantamiento geométrico existen técnicas como las de la topografía clásica, la fotogrametría y el láser escáner 3D (Figura 32).

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

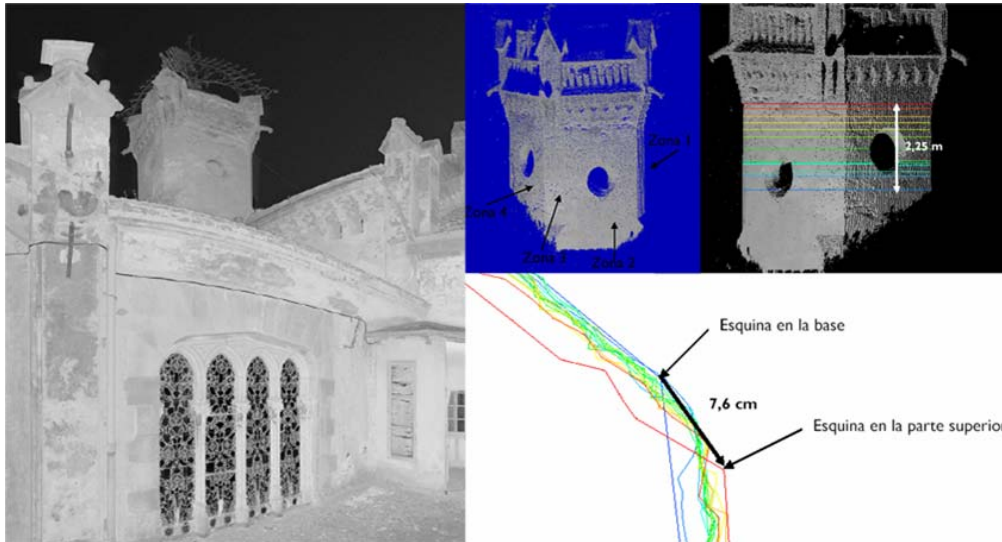


Figura 32: Técnica de láser escáner 3D aplicada en el Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: GIM GEOMATICS.

- Conocer la **tipología (composición) de los diferentes elementos estructurales** involucrados: hojas en las que se descompone un muro, etc. Dicho conocimiento hay que tratar de obtenerlo de la forma menos intrusiva posible, es decir empleando metodologías como la endoscopia o videoendoscopia, técnicas acústicas y técnicas rádar.
- De la misma forma es condición necesaria el proceder a realizar un estudio geotécnico (Figuras 33 y 34) previo con la finalidad de conocer la condición de contorno que constituye el terreno de cimentación para la estructura (establecer la tipología de la cimentación, las condiciones generales de cimentación y su relación con las patologías estructurales existentes), y la respuesta del mismo ante las cargas transmitidas por la estructura.



Figura 33: Calicata para conocer las condiciones de cimentación de un muro. Cortesía: TRIAX.

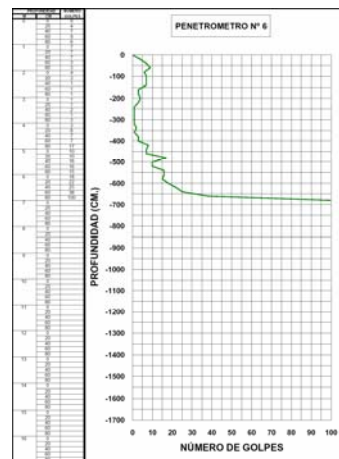


Figura 34: Registro de un penetrómetro. Cortesía: TRIAX.

- De la misma forma es necesario tener un conocimiento certero de las **interfases existentes entre los diferentes elementos estructurales** (por ejemplo el encuentro de forjados en muros para evaluar el grado de empotramiento de éstos en la estructura portante de fábrica) que componen el esquema estructural global.

### 3.1.2.2.- Resistencia de los elementos estructurales involucrados.

La resistencia de los elementos estructurales está íntimamente relacionada con las características de los materiales intervinientes. Como ya se ha mencionado al referirnos al enfoque experimental cuantitativo, es necesario conocer las características de los materiales (particularmente las de carácter mecánico), en tanto que son parámetros básicos para realizar cualquier cálculo. Por ello que cuanto más fidedigno sea su conocimiento, mejores resultados obtendremos del modelo matemático.

### 3.1.2.3.- Acciones a las que está sometida la estructura.

Finalmente es de crucial importancia disponer de un conocimiento lo más exhaustivo posible de las acciones involucradas en una determinada construcción.

De forma general las acciones pueden dividirse en acciones mecánicas que afectan a la estructura y acciones biológicas, físicas y químicas que afectan a los materiales.

Las **acciones mecánicas** que actúan sobre la estructura producen esfuerzos y tensiones en los materiales, y pueden tener como resultado grietas, fisuras, aplastamientos y movimientos visibles. Pueden ser:

- **Acciones estáticas**, que a su vez pueden ser de dos tipos:
  - **Acciones directas**, esto es, las cargas aplicadas. Pueden producir un incremento de las tensiones y, por lo tanto, causar daños en la estructura. Las acciones directas incluyen las cargas muertas (peso propio del edificio, etc.) y las sobrecargas de uso (mobiliario, personas, nieve, etc.).
  - **Acciones indirectas**. Se trata de acciones como los asentos del terreno, movimientos térmicos, fluencia, retracción del mortero, etc. Producen fuerzas sólo si las deformaciones no tienen libertad para desarrollarse.
- **Acciones dinámicas**. Las acciones dinámicas se producen cuando se transmiten aceleraciones a una estructura, debido a vibraciones (asociadas al tráfico rodado, a obras próximas, etc.), terremotos, viento, etc.

Las **acciones químicas, físicas y biológicas** son de naturaleza completamente diferente. Actúan sobre los materiales cambiando sus propiedades y, por ende, pudiendo afectar a la resistencia de los materiales si el cambio referido induce un deterioro de los mismos.

## 3.2.- Análisis de su situación.

El análisis de la situación en que se encuentra la estructura, tanto en su actualidad como en las condiciones futuras, en otras palabras, la **evaluación del nivel de seguridad**, debe determinar, a partir de un análisis de la condición actual de la estructura y los materiales, si los niveles de seguridad son aceptables o no.

En base al nivel de seguridad evaluado se toman las decisiones respecto a la necesidad y el alcance de cualquier medida terapéutica.

Por una parte los códigos legales y de práctica profesional actuales adoptan un enfoque conservador que supone una aplicación de factores de seguridad que tienen en cuenta las diversas incertidumbres. Este enfoque es apropiado para las estructuras nuevas, en las que la seguridad puede mejorarse con incrementos modestos del tamaño de las secciones y el coste de los elementos. Sin embargo, tal enfoque resulta inapropiado en estructuras históricas, en las que los requisitos para mejorar la resistencia pueden conducir a una pérdida de fábricas históricas o a alteraciones en la concepción original

## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

de la estructura. En las estructuras históricas es preciso adoptar un enfoque más amplio y flexible para relacionar más claramente las medidas terapéuticas con el comportamiento estructural real y para mantener el principio de mínima intervención.

Por otra, los métodos de análisis estructural utilizados para construcciones modernas pueden no ser ni exactos ni fiables cuando se aplican a estructuras históricas, lo cual puede llevar a tomar decisiones incorrectas. Así pues, un enfoque cuantitativo basado en modelos matemáticos no puede ser el único procedimiento utilizado. Como en la fase de diagnóstico relativa a la identificación de causas, también debe partirse de enfoques cualitativos basados en la investigación histórica y en la observación de la estructura.

Otra situación podría ser la relacionada con la existencia de daño estructural. El daño estructural se produce cuando las tensiones producidas por una o más acciones exceden la resistencia de los materiales en zonas significativas, ya sea porque las propias acciones han aumentado (por ejemplo cambio de uso de una construcción) o porque la resistencia de los materiales se ha visto reducida (procesos de deterioro en general asociado a acciones químicas, físicas y biológicas). Los cambios sustanciales en la estructura, incluso las demoliciones parciales, también pueden ser una fuente del daño.

Para identificar las causas del daño, en obras de fábrica, resulta útil un análisis de la distribución de las tensiones. Para entender la causa del daño (primera fase del diagnóstico) en primer lugar es necesario determinar los niveles y la distribución de las tensiones, aunque sea de manera aproximada (Figuras 35 y 36). Dado que las tensiones son normalmente muy bajas, errores pequeños en su evaluación no afectan de manera significativa al margen de seguridad. Una inspección visual detallada del cuadro fisurativo puede proporcionar una indicación de las trayectorias de las cargas en la estructura.

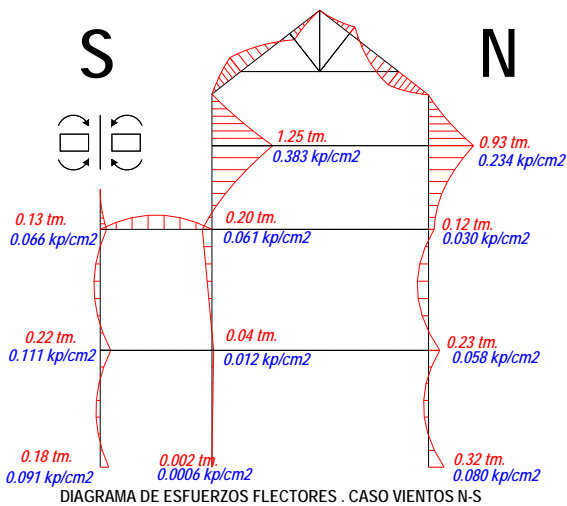


Figura 35: Modelo de barras de una de las secciones transversales del Seminario Mayor de Comillas.

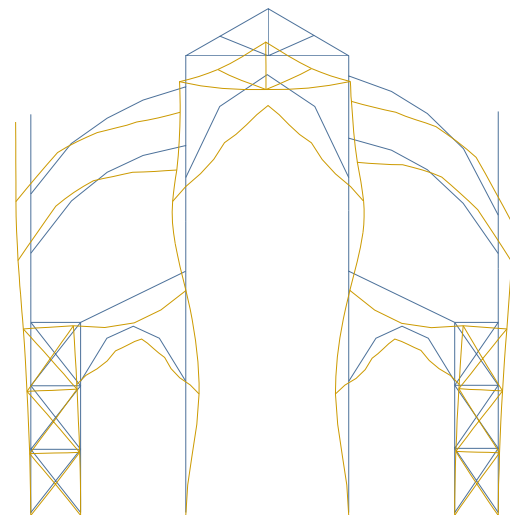


Figura 36: Modelo de barras de la sección transversal de la Iglesia de Santa María de Castro Urdiales

Cuando las tensiones en áreas significativas se aproximen a la resistencia máxima, es preciso realizar un análisis más exhaustivo de la estructura (Figuras 37 y 38) o ensayos específicos para conocer las tensiones existentes en la obra de fábrica (ensayo de gato plano, hole drilling, etc.) con el fin de obtener una valoración más precisa del margen de seguridad.



## METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

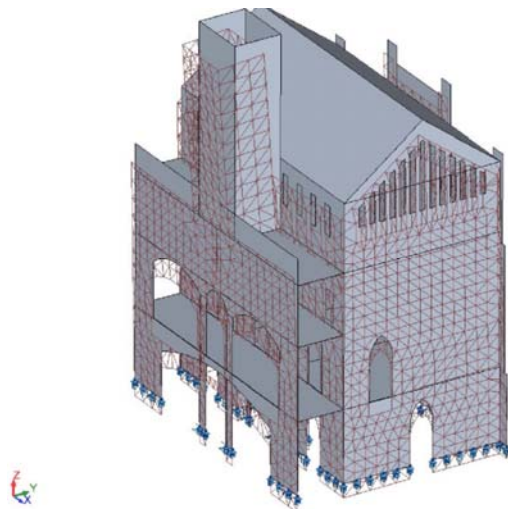


Figura 37: Comportamiento del cuerpo central sur del Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: DYNAMIS.

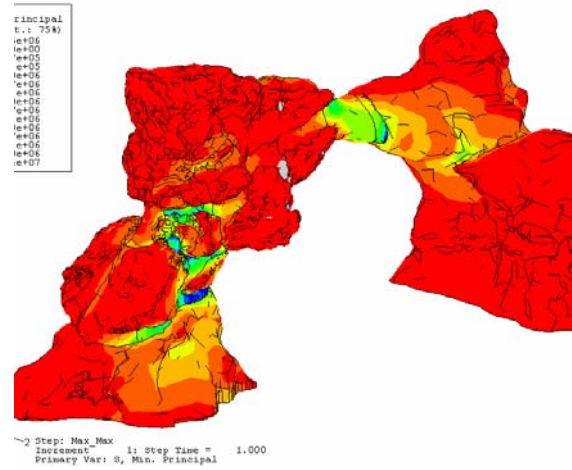


Figura 38: Modelo numérico del arco de la isla Horadada de Santander. Cortesía: GCAE.

Concretando, en la evaluación de la seguridad estructural, que constituye la última fase de la diagnosis, y en la que se determina la necesidad de aplicar una medida terapéutica, se deben estudiar conjuntamente las conclusiones de los análisis cualitativos y cuantitativos: la observación directa, la investigación histórica, el análisis estructural y, en su caso, los resultados experimentales y las pruebas que se hayan realizado.

#### **4.- Terapia**

La terapia ha de contemplarse bien cuando el nivel de seguridad que ofrece la estructura no sea suficiente o cuando exista un daño estructural, debiendo de estar dirigida a las raíces del problema (causa diagnosticada de un determinado proceso patológico) más que a los síntomas existentes. Es decir frente a un muro de carga agrietado la solución terapéutica adoptada no debe ser únicamente el relleno sistemático de grietas, sino que además de lo referido, previamente, habrá que actuar sobre la causa generadora del proceso patológico, por que sólo actuando sobre la causa se resolverá el problema.

El proyecto de intervención deberá basarse en una comprensión clara de la clase de factores que causaron el daño y la degradación, así como de los que hayan de tenerse en cuenta para analizar la estructura tras la intervención, puesto que el proyecto debe realizarse en función de todos ellos.

De la misma forma en el proyecto de intervención hay que tener en cuenta que el valor del patrimonio arquitectónico no reside únicamente en su aspecto externo, sino también en la integridad de todos sus componentes como producto genuino de la tecnología constructiva propia de su época. Bajo este punto de vista, el vaciado de las estructuras internas de una construcción para mantener solamente las fachadas, su piel, no responde al criterio de conservación aludido.

Siempre que sea posible, las medidas que se adopten deben ser “reversibles”, es decir, que se puedan eliminar y sustituir por otras más adecuadas y acordes a los conocimientos que se vayan adquiriendo. En el caso de que las intervenciones practicadas no sean completamente reversibles, al menos no deberán limitar la posible ejecución de otras posteriores.

Deben determinarse todas las características de los materiales (especialmente cuando son nuevos) que vayan a utilizarse en una obra de restauración, así como su compatibilidad con los existentes. En ese estudio deben incluirse los impactos a largo plazo, a fin de evitar efectos secundarios no deseables.

Cada intervención debe respetar, en la medida de lo posible, el concepto, las técnicas y los valores históricos de la configuración primigenia de la estructura, así como de sus etapas más tempranas, y debe dejar evidencias que puedan ser reconocidas en el futuro.

La intervención debe responder a un plan integral de conjunto que tenga debidamente en cuenta los diferentes aspectos de la arquitectura, la estructura, las instalaciones y la funcionalidad.

Las estructuras arquitectónicas deterioradas deben ser reparadas, y no sustituidas, siempre que resulte factible.

Deberán mantenerse las imperfecciones y alteraciones que se hayan convertido en parte de la historia de la edificación, siempre que no atenten contra las exigencias de la seguridad.

#### **5.- Control y mantenimiento.**

Cualquier propuesta de intervención debe ir acompañada de un programa de control que, en la medida de lo posible, deberá llevarse a cabo mientras se ejecuta la obra.

## **METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.**

De la misma forma, una vez finalizada la intervención debe programarse un mantenimiento efectivo de la construcción que vele por la integridad de la misma en la fase de explotación futura, y es que la aplicación de medidas de mantenimiento de índole preventiva es la mejor estrategia terapéutica.

### **RECONOCIMIENTO**

Los autores de este artículo técnico desean agradecer a las entidades que se citan seguidamente el habernos confiado los “Estudio previos” a la rehabilitación de edificios de su propiedad y de los cuales se han recogido la mayoría de las fotografías y dibujos que ilustran el presente artículo:

- Empresa de Residuos de Cantabria, S.A. (Empresa pública del Gobierno de Cantabria).
- Excmo. Ayuntamiento de Santander.
- Medio ambiente, Agua, Residuos y Energía, S.A.: MARE. Empresa pública del Gobierno de Cantabria, adscrita a la Consejería de Medio Ambiente.
- Sociedad de Activos Inmobiliarios Campus Comillas, S.L.

# **INTEGRACIÓN DE METODOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS PARA LA EVALUACIÓN DEL PATRIMONIO INDUSTRIAL: CHIMENEAS**

*Dolores Rodríguez*<sup>1</sup> ([dolores.rodriguez@aidico.es](mailto:dolores.rodriguez@aidico.es)); *J. V. Fuente*<sup>2</sup> ([jvfuelle@aidico.es](mailto:jvfuelle@aidico.es)); *J. V. Sabater*<sup>3</sup> ([juanvicente.sabater@aidico.es](mailto:juanvicente.sabater@aidico.es)); *Vicente Albert*<sup>4</sup> ([vicente.albert@aidico.es](mailto:vicente.albert@aidico.es));

*Javier Yuste*<sup>5</sup> ([javier.yuste@aidico.es](mailto:javier.yuste@aidico.es))

*AIDICO*<sup>6</sup>

<sup>1</sup> *Licenciada BBAA. Hª Arte. Evaluación Histórico-Artística,*

<sup>2</sup> *Doctor en Física. Responsable Área No Destructivo,*

<sup>3</sup> *Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones. Técnico de I+D+i,*

<sup>4</sup> *Ingeniero de Telecomunicaciones. Departamento de Patología,*

<sup>5</sup> *Ingeniero de Caminos. Director de la Unidad Técnica de Seguridad,*

<sup>6</sup> *AIDICO – Instituto Tecnológico de la Construcción, Parque Tecnológico de Paterna, Valencia-España*

## **Resumen**

Los procesos de restauración y rehabilitación en el patrimonio construido deben conllevar estudios previos al diagnóstico estructural que ofrezcan una información histórica y percepción social de la construcción como obra perteneciente al patrimonio que permita comprender el cómo y porqué de dicha construcción. En el presente trabajo, se hace una revisión de la historia de las chimeneas industriales.

Asimismo, se describe una aplicación concreta de diferentes técnicas no destructivas para la determinación del espesor de muro de fábrica de la chimenea. Las técnicas empleadas son la inspección por ultrasonidos y la técnica sónica utilizadas en la configuración de medida cross-hole para la reconstrucción topográfica del interior del basamento de la chimenea. Además, se hace un análisis de las imágenes térmicas tomadas mediante termografía infrarroja para la determinación del espesor según orientaciones.

## **Introducción**

La revolución industrial, que llega en diferentes periodos en cada país, cambió el paisaje natural y el urbano de las poblaciones. De tal manera que el agrupamiento de las fábricas dio lugar a un nuevo paisaje: el industrial. En el resto de la Península los modelos se repiten. Las industrias que requieren grandes espacios se limitan a organizar sencillos conjuntos a base de naves adosadas o bien edificios de pisos circunscritos a un recinto tapiado. Estos edificios proporcionaran a la ciudad una silueta diferente: chimeneas.

Las chimeneas son un rasgo característico de una zona industrial, de los asentamientos humanos que han tenido un pasado industrial. Signo, testimonio y muestra de la industria en alza del momento.

Las chimeneas industriales, símbolo de la primera época industrial, se encuentran enclavadas y forman parte del paisaje urbano de nuestros pueblos. Estas construcciones humeantes fueron señal de la productividad, del poder económico y de la industrialización de finales de siglo XIX y principios del XX.



*Figura 1: Fábrica de ladrillos  
Dangast.1907-Heckel*

Ningún componente del Patrimonio Histórico parece ser tan frágil y estar tan amenazado como el Patrimonio Industrial. El Patrimonio Industrial ha sido alta mente sensible a multitud de factores que empujan a su desaparición desde la década de los 60. Las reconversiones industriales de los 90 y estrategias del territorio en las ciudades incorporan los antiguos cinturones industriales de las ciudades a las nuevas áreas residenciales. Los restos de las actividades industriales que movieron a las poblaciones valencianas, están generalmente situados en áreas urbanas sometidas a fuertes procesos de reorganización y modernización del espacio urbano.

### **Las chimeneas industriales**

La fragilidad derivada de su ubicación y escasa sensibilidad desarrollada a favor de su conservación exigen unas actuaciones urgentes y decididas por parte de los poderes públicos y otros sectores. Muchas localidades están desarrollando proyectos, con el objetivo central de conservar, recuperar elementos de carácter simbólico-estético que se identifiquen con los ciudadanos en algunos de sus aspectos.

En esta línea, algunas localidades valencianas están desarrollando proyectos, apoyados por las autoridades locales. Así mismo, AIDICO ha firmado un convenio con el ayuntamiento de Aldaia para la recuperación y restauración de su Patrimonio Industrial, concretamente, las chimeneas de fábrica de ladrillo.



*Figura 2: Chimeneas de Aldaia*

Afortunadamente la propia Ley del Patrimonio Cultural Valenciano es consciente de su significación social y las protege con la ley de junio de 1998. Ya en su artículo 50 nos habla, del alcance del Régimen de Protección. Y una ley reciente de febrero de este

mismo año, que modifica esta anterior ya especifica en su disposición adicional quinta, que uno de los bienes protegidos son "...las chimeneas de tipo industrial construidas de ladrillo anteriores a 1940..." (LEY 5/2007, de 9 de febrero, de modificación de la Ley 4/1998, de 11 de junio, del Patrimonio Cultural Valenciano).

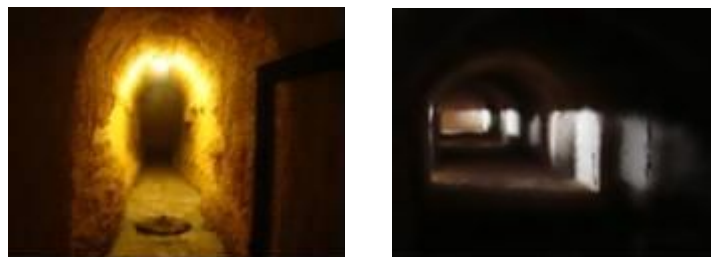
El paulatino despegue industrial modificaría la trama urbana con la implantación de sus grandes chimeneas, y a su vez, conllevaría un proceso de cambio industrial económico y social por la importancia que desarrollaría la actividad industrial en la economía y las transformaciones socio-culturales de las formas de vida y costumbres de los pobladores. En una primera fase hemos identificado las arquitecturas fabriles de la zona, su ubicación. Haciendo una labor de inventariado, una correcta catalogación y documentación histórica. Esta labor no ha sido fácil ya que no existía ningún registro ni documento que nos hable de su actividad industrial de antes de 1939, todos los archivos del Ayuntamiento se habían quemado.

Por ello, hemos establecido un plan de actuación, a través de entrevistas y encuestas con la población local. Todas ellas encaminadas a conseguir cualquier tipo de información, oral o gráfica que nos aporte datos sobre cuando, cómo y por quienes fueron construidas, es decir, un acceso directo al testimonio de sus protagonistas.

## **Tipologías**

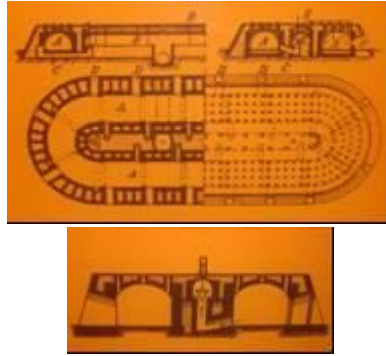
Hablar de chimeneas, milagrosamente salvadas no es solo hablar de una época bastante cercana y sin embargo diferente, sino también de una maestría constructiva difícil de igualar. Estas se salvaron, otras no tuvieron tanta suerte, se derribaron por torpeza o por ignorancia, otras por ser incompatibles con determinado esquema urbanístico, y otras simplemente por que su ruina aconsejaban su demolición.

Aparecen con una función específica: evacuar los humos o gases generados por los hornos de las fábricas o máquinas de vapor a la atmósfera. Cuanto más alta, la tirada de gases era mayor. La altura debía ser tal que los gases expulsados no pudieran llegar afectar a la salubridad de los trabajadores y a la población. Su aparición coincide con la adopción de la caldera de vapor como una nueva técnica en los procesos de producción y con el uso del carbón como recurso energético natural.



*Figura 3: Cavidad del horno y conducto chimenea*

La mayoría de ellas tenían un horno Hoffman, horno que por sus características, revolucionó la producción de estas fábricas. La particularidad del horno Hoffman, es que funciona sin interrupción y aprovecha el calor de los ladrillos cocidos, empleándolo en los que están sin cocer. Se trata de hornos, que a diferencia de otras variedades que se encienden y se apagan después de cada cocción, estos están siempre en funcionamiento y es el fuego quien se mueve mientras que el material queda quieto.



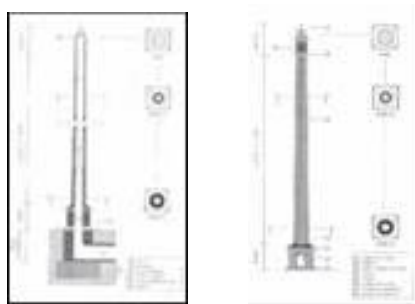
*Figura 4: Partes del horno Hoffman*

La mayor parte de las chimeneas de Aldaia fueron construidas en la primera mitad del siglo XX. Aunque podemos encontrar variaciones en las formas, todas ellas obedecen a un mismo tipo de basamento, de sección cuadrada, un mismo fuste, de sección octogonal y una corona sencillamente ornamentada.

El material utilizado es el ladrillo cerámico que resiste mejor la acción del calor, siendo también el mejor aislante para su enfriado ya que soportaban unas temperaturas entre los 200° y 300° centígrados. La argamasa utilizada para unir los ladrillos se obtenía de la combinación de la arena con la cal y el cemento.

Aunque empresas de todo tipo requerían la construcción de estas chimeneas, generalmente, las más abundantes eran las industrias conserveras, de cerámica y ladrillo.

La construcción de la chimenea industrial planteaba unos cálculos que se determinan con la altura y la sección, en función de los tipos de caldera u horno. La altura total de las chimeneas varía entre 25 y 30 metros (las más comunes). Las que tenían más de 30 metros correspondían a industrias con una cierta envergadura. Recordaremos que, por ejemplo, la altura de la chimenea la definían una serie de circunstancias formales como la ubicación de la fábrica, los obstáculos que la circundan, los vientos a la que se podía ver sometida y el tipo de caldera que se instalaría en la fábrica. Pero también se definían elementos tan poco formales como el prestigio que el empresario deseaba obtener ante la visión de estas magnas construcciones.



*Figura 5: Chimenea industrial*

A medida que se hacían más altas se vieron obligados a separarlas de los edificios, estableciéndolas en sus propios cimientos. Cada vez que se levantaba un metro de altura, la chimenea iba perdiendo 5 cm. de diámetro, hasta llegar a la cúspide que resultaba de un total de 80 cm. de diámetro, la cual se coronaba con un pararrayos.

*“... se levantan por secciones de cinco a seis metros de sección constante disminuyendo el espesor de medio ladrillo de una u otra sección, lo que permitía dejar sitio en el interior a distancias regulares, que servían de apoyo al encofrado durante su construcción y para su mantenimiento, empotrándose también para este cometido escalones de hierro (anillos) para deshollarla y para poder reparar su mampostería... La construcción avanzaba por hiladas horizontales, ubicándose el albañil en el espacio interior del tubo”<sup>1</sup>*



*Figura 6: Ejemplo de cómo subía la construcción*

Aunque en el proyecto técnico se proyectaba la construcción de la chimenea junto con el resto de la nave, la empresa constructora de esta última no era la misma que la que hacía la chimenea. En este tipo de chimeneas prima la idea de solidez, de ahí sus formas rectas<sup>2</sup>, siendo un tamaño prominente lo que solían buscar primeramente los empresarios a la hora de encargar su construcción. Las decoraciones neomudéjares de ladrillo son también otra de las características formales.

Las características de los equipos de trabajo muestran que los maestros de obras que levantaron las chimeneas utilizaron las técnicas constructivas propias de los artistas valencianos, murcianos y catalanes influenciados por las técnicas francesas.



*Figura 7: Equipo de*

---

<sup>1</sup> José Riquelme Almagro constructor de chimeneas industriales de fuste circular.

<sup>2</sup> De fuste octogonal y circular mayoritariamente, aunque se conocen ejemplos de fuste cuadrado (Real Fábrica de San Juan de Alcázar, Albacete)



*trabajo*

## **Integración**

Esta labor está encuadrada no solo en la recuperación y rehabilitación del patrimonio industrial, sino en integrarlo de una forma coherente dentro de las áreas urbanas e incluirlos en sus planes urbanísticos. En este sentido, tenemos un tema cercano de adaptación de los espacios, naves y talleres de los Altos Hornos de Sagunto. Aún no habiéndose conservado por completo todo el complejo industrial, sí se han rescatado gran parte de sus edificios y se ha proyectado darle un nuevo uso, un nuevo sentido. Queremos evitar que se conviertan en elementos residuales.



*Figura 8: Dos ejemplos de integración en el área urbana*

Pero no se trata de almacenar monumentos sin vida, sino de formular propuestas coherentes de puesta en valor y uso de este Patrimonio acordes con sus cualidades.



*Figura 9: Almacenes Altos Hornos de Sagunto*

De esta forma nuestro proyecto contempla varios propósitos, hacer un estudio histórico-artístico, análisis y diagnóstico de las chimeneas y algo tan importante para la población, como recuperar su memoria industrial.

La finalidad de este trabajo es organizarlo en un catálogo, exponerlo, de manera que la información esté a disposición de las personas que deseen consultarla, abriendo a los ciudadanos, con esta recopilación, una puerta al conocimiento del lugar en que viven.



Figura 10: Museo del Ladrillo. Paiporta

## **Aplicación de técnicas no destructivas**

Las técnicas no invasivas utilizadas son las técnicas basadas en propagación de ondas mecánicas a través de la fábrica de ladrillo de la chimenea y el empleo de técnicas de procesamiento digital para extraer la información necesaria para la reconstrucción tomográfica.

## **Tomografías sónicas**

Las técnicas sónicas basadas en el método impacto-eco descrito por Sansalone y Carino [1,2,3] representan una evaluación de las características elásticas del material o el elemento constructivo. Su empleo en este tipo de estructuras permite evaluar, no sin cierta complejidad, la disposición interna del material, si este no cambia apreciablemente su constitución o composición.

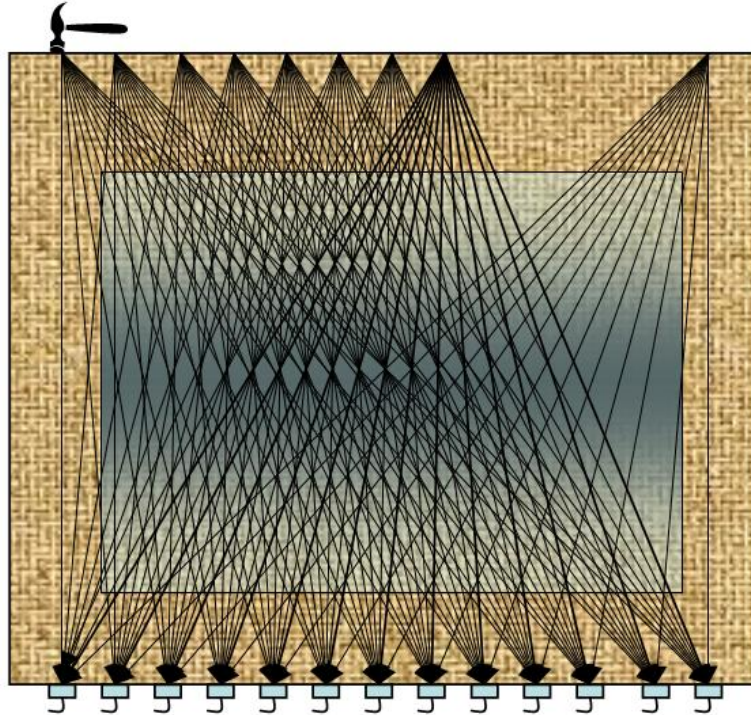
Una de las ventajas de esta técnica radica en su poder de penetración. En efecto, las ondas sónicas son un tipo de onda o perturbación mecánica transitoria de una longitud de onda mucho mayor que el tamaño del dispersor representativo del material por que se propaga. Esto hace que los fenómenos de atenuación sean menos intensos que en el caso de las inspecciones ultrasónicas con lo que la capacidad de propagar este tipo de ondas por los elementos constructivos como mampostería, muros de sillería o fábrica de ladrillo, es mayor.

Además, con la propagación de ondas sónicas se pueden realizar dos tipos de análisis. Los análisis en el dominio tiempo se refieren a la velocidad y amplitudes de propagación de las ondas longitudinales, transversales y superficiales. Los análisis en el dominio espectral se refieren a la caracterización de los fenómenos resonantes. A partir de las frecuencias resonantes principales se puede determinar modos espesores e interfases.

Las tomografías sónicas consideran los parámetros temporales, principalmente, para la integración de los mismos en una representación 2D/3D de éstos que permiten interpretar visualmente las características constructivas de los elementos constructivos analizados<sup>9</sup>.

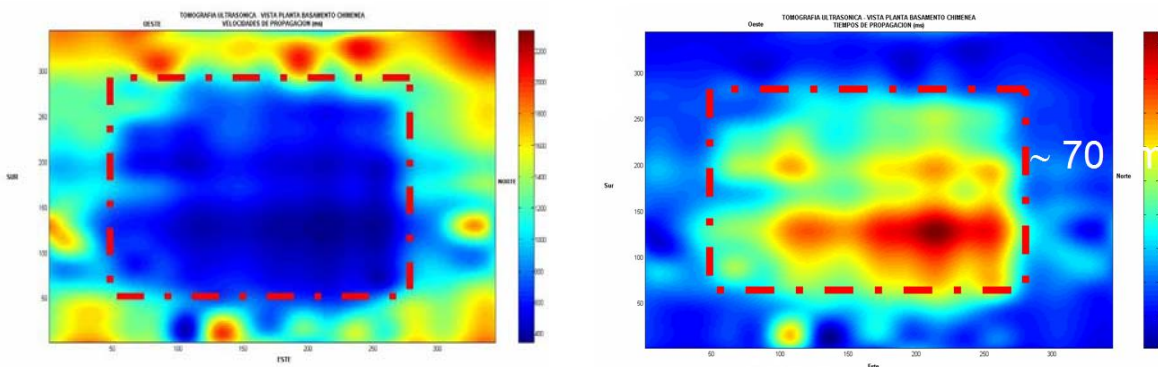
El método Cross-hole permite la representación 2D a partir de las medidas moviendo emisor y receptor hasta cubrir por trazado de rayos toda el área bajo estudio. Este método se ha aplicado en el basamento de la chimenea sita en Aldaia (Valencia) de casi 40 metros de alto, con fuste octogonal y base de 3.5 x 3.5 metros. El sistema constructivo externamente muestra una llaga de 1 cm y una ladrillo de 1.5 cm de alto y 22 cm de largo. El desconocimiento del espesor no llevó a la realización de estos análisis.

Mediante un equipo sónico multicanal y utilizando una excitación instantánea y puntual mediante martillo instrumentado se colocaron los 13 acelerómetros utilizados. Asimismo, el martillo se utilizó para realizar 13 impactos en la cara paralela, con una separación entre posiciones de 25 cm. Esta operación se realizó en ambas direcciones norte-sur y este-oeste.



*Figura 11: Cross-hole basamento de chimenea.*

A partir de estas medidas se realiza la integración de las medidas de tiempo de propagación y velocidad de propagación.



*Figura 12: Tomografías sísmicas de tiempo y velocidades.*

Se aprecia una zona donde se intuye la presencia de un hueco. Lo que no deja muy delimitada es la forma rectangular o circular de la cavidad del basamento. Lo que si que parece más claro se un espesor de muro de entre 60 y 70 cm. sensiblemente mayor en la orientación norte donde se está la bocana tapada hoy en día.

Para la medida del espesor mediante el tipo de medida basado en la caracterización espectral de las medidas sísmicas se han tomado medidas por semi-impacto. Este tipo de medida emplea la técnica multicanal de recepción con los 13 sensores en una misma orientación mientras se mueve sucesivamente el golpeo. Analizando la presencia de

frecuencias del espectro se puede hacer una estimación del muro espesor correspondiente para cada posición de medida.

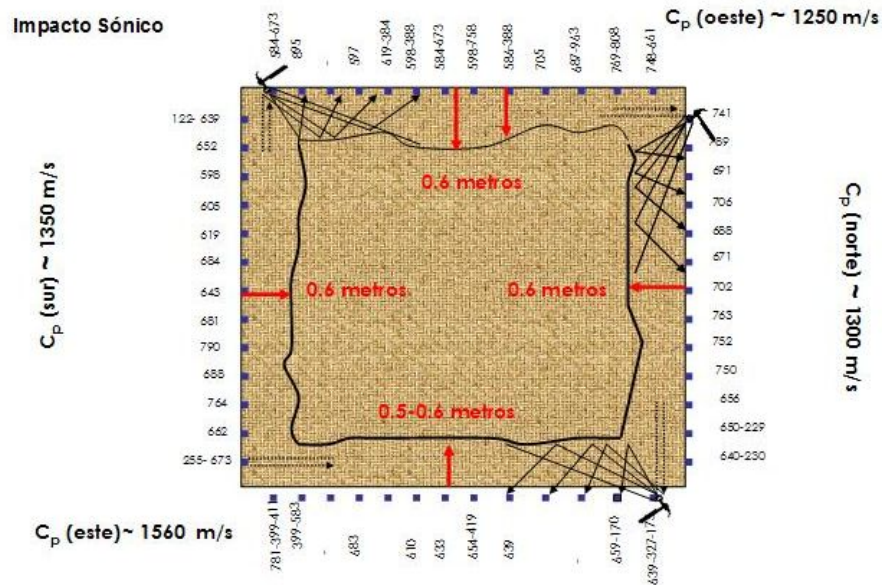


Figura 13: Estimaciones de espesor de fábrica a partir de las frecuencias encontradas.

### Tomografías ultrasónicas

Las inspecciones ultrasónicas en elementos constructivos de medio y gran tamaño son muy complicadas por la limitación que supone la fuerte atenuación que en estos materiales como la fábrica de ladrillo tiene el pulso ultrasónico<sup>10</sup>.

El método seguido para la realización de tomografías es el mismo que para las sónicas, pero sin que el equipo presente recepción multicanal.

Por tanto, en esta ocasión se han tomado 17 posiciones de medidas con una separación de 20 cm entre cada punto. La frecuencia de inspección es de 55 kHz aunque el efecto filtro paso bajo de la fábrica hace que no se tengan más de 30 kHz de frecuencia central del pulso de llegada.

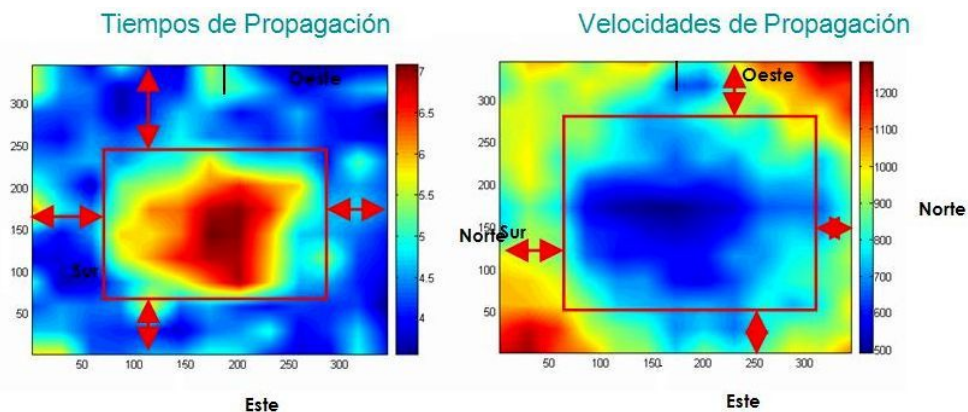
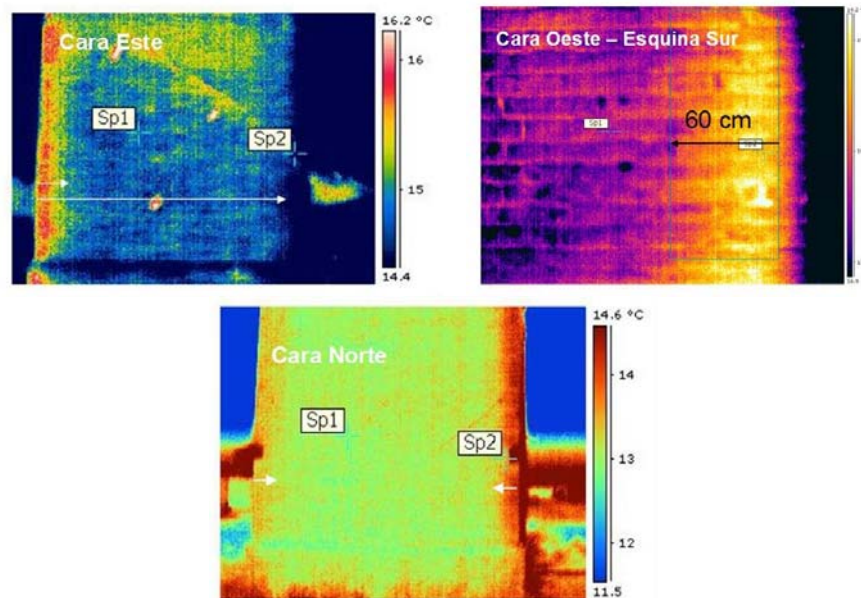


Figura 14: Tomografías ultrasónicas de tiempo y velocidades.

### Termografía infrarroja

Una cámara de infrarrojos mide y toma imágenes de la radiación infrarroja emitida por un objeto. El hecho de que la radiación sea una función de la temperatura de la superficie del objeto permite a la cámara calcular y visualizar dicha temperatura. Sin

embargo, la radiación medida por la cámara no sólo depende de la temperatura del objeto, sino que además es una función de la emisividad. También se origina radiación en el entorno, la cual se refleja en el objeto. La radiación procedente del objeto y la radiación reflejada se verán influidas también por la absorción de la atmósfera.



*Figura 15: Imágenes Termográficas de 3 orientaciones.*

Las imágenes termográficas fueron tomadas al anochecer para buscar el máximo gradiente entre la superficie de la chimenea que irradia calor en el espectro infrarrojo y el aire en contacto con la chimenea. Asimismo se aprovecha la inercia térmica del elemento que se quiere visualizar ya que el muro tiene que transmitir más calor, y por tanto tendrá más temperatura, en su sección que en la parte donde se supone relativa al hueco.

Las imágenes muestran que efectivamente en algunas orientaciones se marcan zonas de mayor temperatura que coinciden con el muro. Para los casos de los muros norte y sur, el espesor del muro no llega más allá de 30 cm. Las imágenes que muestran una mayor transmisión son las correspondientes las orientaciones este y oeste.

Para el caso de la orientación este, el espesor que se visualiza es de unos 55 cm como máximo, siendo 40 cm el espesor promedio. Para el caso de la orientación oeste se obtienen zonas de hasta 60 cm pero con promedio de 45 cm.

## **Conclusiones**

El análisis desde el punto de vista histórico y artístico detallado de un monumento, edificio u objeto de arte permite valorar en una aproximación previa, circunstancias del mismo que posteriormente, son de mucha utilidad en el proceso de conservación e intervención. Toda la documentación generada permite comprender mejor los elementos constructivos y son cauce vertebrador de las etapas de diagnóstico e intervención sobre el edificio. En este caso, se ha descrito un estudio histórico del cómo y porqué de las chimeneas industriales como exponentes que perduran de una etapa cercana en el tiempo y que son testigos de nuestro cambio de vida en los últimos siglos con la industrialización.

La aplicación de diferentes métodos no destructivos con el objetivo de determinar el espesor del muro de la fábrica de ladrillo permite comparar la bondad, precisión y calidad de las medidas y análisis realizados.

La tomografía sónica mostró una zona hueca o cavidad en el centro de la chimenea con un espesor de unos 70 cm sensiblemente mayor en la orientación norte. No permite aclarar la forma geométrica precisa de la cavidad.

La tomografía ultrasónica muestra una mayor precisión, con espesores de 60-70 cm. y con una forma rectangular, aunque los vértices interiores no son bien reproducidos debido a la precisión de la medida y a las distancias de propagación tan grandes.

Las imágenes térmicas no muestran una resolución suficiente, pero en cualquier caso los espesores son de menor espesor que en el caso de las medidas anteriores. Parece pues, que la calidad de estas imágenes no es suficiente, quizá por la hora en la que fueron tomadas debiendo de aumentar la espera de al anochecer, pues la inercia térmica es elevada.

## **Referencias**

1. Clemente López, Pascual y Sánchez Tomás, Cecilio, *Las chimeneas Industriales en la Provincia de Albacete*. Excma. Diputación Provincial de Albacete, 2006.
2. Cascales López, Pero L., *Las Chimeneas Industriales de Alcantarilla*. Alcantarilla, 2001.
3. Tarruella González, L., *Arquitecturas Perdidas*. Casa de la Cultura de Villena. Ayto. De Villena, 1996.
4. Bonet Correa, Y., *La Arquitectura del Humo*. Ed. do Castro, A Coruña, 1994.
5. Carmona, J.A., *Xemeneies de Sabadell*. Castayer Germans, Sabadell, 1996.
6. Capel, Horacio, *La Rehabilitación y el uso del Patrimonio Histórico Industrial*. Conferencia: "Second European Workshop on Urban rehabilitation: Europe/Latin America", 1995.
7. M. Sansalone and N.J. Carino 'Laboratory and field studies of the impact-echo method for flaw detection in concrete' included in 'Nondestructive Testing' Ed. H.S. Lew, Am. Concrete Institute, 1988.
8. M. Sansalone 'The complete story', ACI Structural Journal, 1997.
9. Beaty et al., 2002. K. S. Beaty , G. Perron , I. Kay , E. Adam, DSISoft: a MATLAB VSP data processing package, Computers & Geosciences, v.28 n.4, p.501-511, May 2002
10. Witten, 2002. Geophysica: MATLAB-based software for the simulation, display and processing of near-surface geophysical data, Computers & Geosciences, v.28 n.6, p.751-762, July 2002.

## **TECNICAS NO DESTRUCTIVAS Y PSEUDO –NO DESTRUCTIVAS APLICADAS A LA MADERA ESTRUCTURAL**

*Luis-Alfonso Basterra<sup>1</sup> ([basterra@arq.uva.es](mailto:basterra@arq.uva.es)); Luis Acuña<sup>2</sup>; Milagros Casado<sup>2</sup>; Gemma Ramón-Cueto<sup>3</sup>; Gamaliel López<sup>4</sup>.*

*1 Profesor Titular de Universidad. Dr. Arquitecto.*

*2 Profesor Titular de Universidad. Dr. Ingeniero de Montes.*

*3 Dr. Arquitecto.*

*4 Arquitecto. Universidad de Valladolid.*

### **Resumen**

El objetivo de esta comunicación es mostrar los trabajos de inspección, diagnóstico y propuesta de intervención sobre una singular estructura de madera vista: la plaza Mayor de Chinchón (Madrid). Se emplearon técnicas de reconocimiento visual y otras de tipo no destructivo o pseudo-no destructivo como la microfotografía, xilohigrometría, medición de la velocidad de ultrasonidos, arranque de tornillos y resistografía.

Ha sido realizado por el Grupo de Investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid (<http://www.uva.es/maderas>), que está integrado por profesionales e investigadores con experiencia en los campos de la construcción y restauración arquitectónica y la tecnología de la madera: arquitectos e ingenieros de montes, respectivamente.

### **1.- Objetivos**

- A. Inspección, diagnóstico, análisis estructural y propuesta de intervención en la estructura de madera vista de la plaza.
- B. Validar y poner a punto una metodología propia de inspección, representación y análisis de estructuras de madera.
- C. Analizar la eficacia de los ensayos no destructivos como técnicas predictoras de daños en la madera puesta en obra.
- D. Comprobar la fiabilidad en la aplicación a la peritación y diagnóstico de la madera estructural, con una orientación conservacionista.

### **2.- Planteamiento metodológico**

Este trabajo emplea una sistemática original (Ramón-Cueto 2007) de inspección, representación y análisis para la evaluación del estado de los elementos estructurales de madera en el patrimonio construido que pretende facilitar a los agentes intervinientes un procedimiento de diagnóstico contrastado y de calidad orientado al establecimiento de criterios y a facilitar la toma de decisiones de proyecto arquitectónico y de intervención constructiva. Utiliza aspectos del conocimiento de la teoría y el proyecto de restauración y de la construcción arquitectónica, así como del de la tecnología de la madera y la ingeniería forestal o de montes. Por ello tiene una condición eminentemente interdisciplinar.

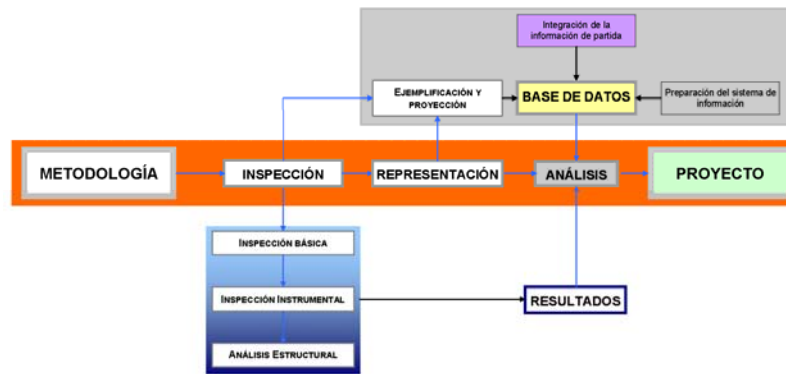


Figura 1: Síntesis esquemática de la metodología empleada.

La inspección en obra se basa en una colección limitada de técnicas visuales e instrumentales de carácter no destructivo o pseudo no destructivo, portátiles y con posibilidad de uso en obra, apoyándose en el perfeccionamiento y adaptación contextual de métodos de ensayo ya experimentados internacionalmente (Bucur 2003, Arriaga 2002) a las peculiaridades de las piezas estructurales de madera más frecuentes en el patrimonio histórico-cultural de España.

La representación utiliza un sistema original de codificación e integración de formatos documentales y gráficos heterogéneos relacionados con el diagnóstico y los resultados de los ensayos no destructivos a realizar en obra (Ramón-Cueto 2007). Se plasma en documentos hipertextuales que facilitan su análisis y valoración previos a la toma de decisiones de proyecto. El sistema es compatible para su impresión en formato papel.

### 3.- Material y métodos

#### 3.1.- La plaza Mayor

El conjunto de edificaciones alrededor de la plaza Mayor de Chinchón configuran un espacio urbano de gran valor arquitectónico e histórico. Su indiscutible pintoresquismo y el mantenimiento de los tradicionales festejos taurinos y otros eventos folklóricos y festivos son causas suficientes para su aprecio popular y una importante atracción turística. No obstante, desde un punto de vista estrictamente arquitectónico su interés obedece, entre otras, a dos razones fundamentales: su particular configuración espacial y constructiva, asociada a un uso que fue en su día común en muchas localidades castellanas, y el hecho de estar edificada con un material como la madera, que ha tenido no pocas dificultades para sobrellevar el paso del tiempo en estas tipologías. No tanto por falta de prestaciones constructivas o deterioros irreversibles sino por haber sido asociada, durante mucho tiempo, a una imagen de obsolescencia y falta de modernidad que llevó al derribo y la sustitución de tantas estructuras históricas. Afortunadamente esta situación ha sido corregida por un sentimiento general de aprecio y valoración del patrimonio histórico como bien cultural, desde hace bien pocos años.

La plaza ya fue, en el siglo XVII, incluida por el conde de las Navas entre las "reales plazas" de España. Hoy está declarada Bien de Interés Cultural y cuenta con el grado de protección más elevado -Grado 1 ° Protección integral- en su planeamiento urbanístico. Se levanta en el centro geométrico del casco histórico (0), entre el primitivo núcleo urbano del barrio de San Antón y el Castillejo, en la cabecera de un valle excavado por los arroyos que bajaban por las calles de las Mulillas y Grande o de José Antonio, a los que se unía la torrentera de la calle del Barranco.



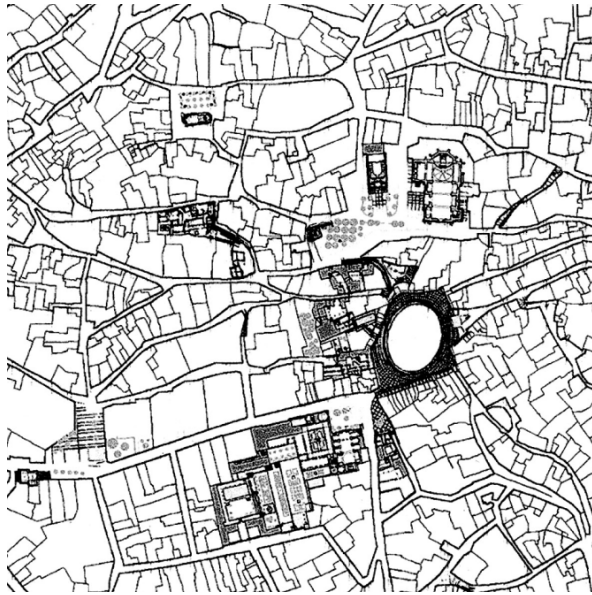


Figura 2: La plaza Mayor en el casco urbano<sup>1</sup>.

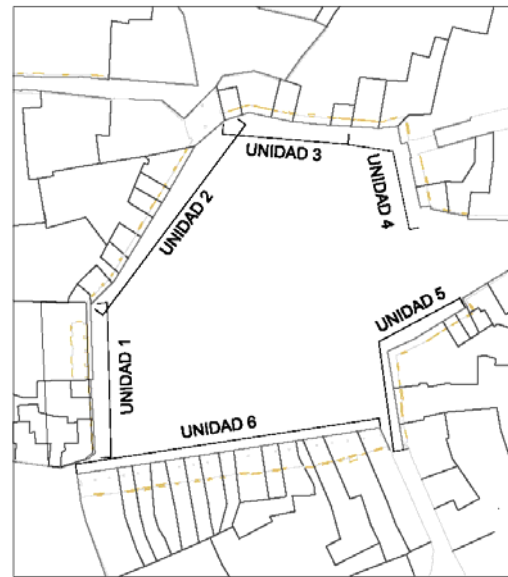


Figura 3: Esquema de la división en unidades

Su riqueza espacial la proporcionan la escala y la complejidad y variedad de perspectivas disponibles, derivadas de una planta y una topografía escasamente regular que se ha ido solventando en el tiempo de forma tan descoordinada como a la postre coherente. El desnivel del terreno en dirección oeste-este es resuelto mediante diferentes alturas del caserío y los tramos edificados son interrumpidos, a intervalos desiguales, por las cinco calles que se abren a la plaza mayor: de los Huertos, cuya embocadura es conocida también como Puerta de Villa por la antigua presencia de un portillo de la cerca medieval, hoy desaparecido; del Barranco; Grande, que era la arteria comercial del lugar, como su nombre indica; de las Mulillas, por ser donde se guardan las utilizadas en las corridas; y de Morata, que en tiempos señalaba la salida hacia tal vecina villa. Además de pocas, estas salidas han sido sucesivamente estrechadas llegándose a construir incluso pasos sobre las calles.

La plaza cuenta con 234 de dichos balcones o "claros" sobre los que aún se mantiene la tradición de la "requisa" o derecho a disfrutar de las balconadas durante las fiestas taurinas, que está disociado de la propiedad de la vivienda por las que tienen acceso, cargando sobre estas últimas una servidumbre de paso para los propietarios de aquéllas.

---

<sup>1</sup> Fragmento de un dibujo de la ETSAM para la Dirección General de Urbanismo y Planificación Territorial de la Comunidad de Madrid. Publicado en AA.VV.: Colección Arquitectura y Desarrollo Urbano, Comunidad de Madrid, Tomo XI, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Dirección General de Arquitectura y Vivienda; Fundación Caja Madrid y Fundación COAM, 2004.



*Figura 4: Fotografía del lado del Ayuntamiento, hacia 1959<sup>2</sup>.*

A efectos de su estudio en este trabajo se ha dividido la plaza en seis tramos o unidades, para lo que se aprovecha la presencia de las calles que llegan a ella (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Se parte de la calle de los Huertos, siguiendo el sentido de las agujas del reloj para recorrer toda la plaza.

Mediante el estudio histórico realizado para este trabajo, también se han documentado intervenciones relevantes, posteriores a la construcción original en el edificio del Ayuntamiento, así como otra serie de ellas, de menor influencia en la configuración original. De cierto calado, no obstante, fue la decisión de suprimir el color azulete o añil de las carpinterías originales, un tono tradicional de la Mancha -resultado de aplicar una imprimación repelente de los insectos xilófagos obtenido al mezclar carbonato de plomo y aceite de linaza con blanco albayalde y azul índigo- y pintar de verde todos los balcones de la plaza para unificar su color, en 1958. Las más recientes se deben a un proyecto de intervención redactado por el arquitecto Salvador Pérez Arroyo, por encargo de la Dirección General de Patrimonio Cultural de la Comunidad de Madrid, en 1992.



*Figura 5: Aspecto actual de la plaza Mayor (perspectiva de ojo de pez desde el lado sur).*

### **3.2.- Las técnicas**

---

<sup>2</sup> Obsérvese la configuración de la fachada del Ayuntamiento y la ya evidente deformación de las casas núms. 1 y 2. A.G.A. Patronato de Turismo. Fotografía publicada en AA.VV.: Colección Arquitectura y Desarrollo Urbano; Ib.

### **3.2.1.- Inspección visual, documentación fotográfica y examen superficial**

Incluso antes de la publicación del CTE, en España estaba ya normalizado, a través de la norma UNE EN 338:2003, el sistema de clases resistentes. Se basa en clasificar la madera por clases que tienen valores definidos de sus propiedades resistentes y de elasticidad. Para conocer a que clase resistente pertenece un espécimen o una población de madera se debe tener en cuenta la especie de que se trate y su calidad, entendiéndose esta como la mayor o menor presencia de las singularidades que experimentalmente se ha comprobado que perjudican el comportamiento estructural. Las diversas normas nacionales han normalizado en cada país la forma de medir aquellas, y los límites de cada calidad, realizándose este proceso de forma visual. La norma española de referencia es la UNE 56.544:2003 “Clasificación visual de la madera aserrada de uso estructural. Madera de coníferas”.

Bastantes trabajos publicados en los últimos años (Basterra 2005, Arriaga 2007) han llamado la atención sobre la escasa aptitud de la norma citada para clasificar madera puesta en obra de escuadrías medianas y grandes, pues está diseñada y experimentada para tamaños menores, más frecuentes en el ámbito comercial. Se producen porcentajes de rechazo injustificados, a la vista de los resultados obtenidos en máquina de ensayos hasta la rotura.

Recientemente, algunos autores como Arriaga (2007) han podido demostrar que en madera de gran escuadría las singularidades más influyentes en el comportamiento estructural son los nudos y la desviación de la fibra. Y proponen la asignación a estos elementos de valores mecánicos que no tienen por qué pertenecer a una misma clase resistente.

Además, la inspección visual permite la obtención de datos iniciales sobre las lesiones de tipo biótico y abiótico que puede presentar la estructura y proponer las zonas en las que se realizarán ensayos de los que se recogen en los párrafos que siguen. El resultado de esta inspección se refleja en planos mediante una serie de iconos y códigos de colores que nuestro grupo de investigación ha desarrollado (Ramón-Cueto 2007) con vocación pre-normativa y se encuentran pendientes de publicación. Mediante ellos se llega a tres series complementarias de planos, a saber:

1. Singularidades de la madera. Se recogen todas aquellas singularidades de la madera que por ser inherentes a su propia naturaleza material no pueden calificarse como defectos o patologías, pero redundan en una merma de sus prestaciones resistentes.
2. Patologías. Recogen los problemas y patologías que pueden considerarse específicos de la madera como material estructural.
3. Lesiones constructivas. En esta última serie se han recogido el resto de defectos y lesiones que aun existiendo no pueden considerarse específicos de una estructura de madera.

### **3.2.2.- Microfotografía**

La identificación de la especie de madera es esencial pues sirve, entre otras cosas, para tener una aproximación general a las características físico-mecánicas, de resistencia natural a los ataques xilófagos de dicha madera y de impregnabilidad para la posible aplicación de tratamientos curativos o protectores. Para tener una primera aproximación de la especie de madera primeramente se realiza una identificación macroscópica en

distintas zonas del edificio. Pero para tener una certeza positiva en la identificación de la especie se debe proceder a su análisis microscópico.

Para realizarlo se preparan cubos de madera de 15 x 15 mm de lado a los que se realizan cortes en cada uno de los tres planos (longitudinal, radial y tangencial) con un microtomo, obteniendo láminas de un grosor entre 25 y 50µm. El microtomo empleado en el presente estudio es un SM 200 R de la marca LEICA (0).



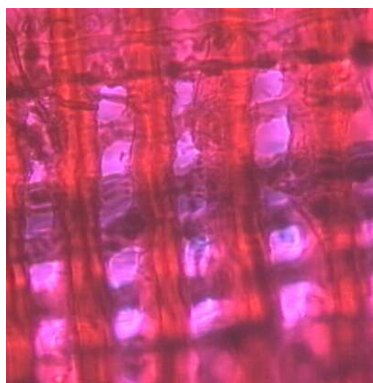
*Figura 6: Microtomo.*



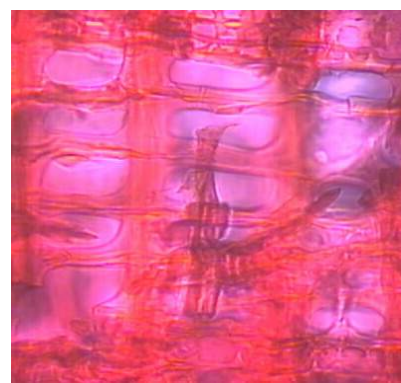
*Figura 7: Microscopio de transmisión.*

Tras un proceso de tinción con safranina y lavado, las láminas se montaron sobre un portaobjetos para ser observadas al microscopio de transmisión, procediendo a su identificación con la ayuda de las correspondientes claves. El microscopio utilizado en este estudio es de transmisión, modelo DMLB de la marca LEICA (0).

Se identificaron 19 muestras de madera como pertenecientes al grupo Pinoide 1, con punteaduras tipo ventana que corresponden a las especies: *Pinus silvestre*, *Pinus uncinata* y *Pinus nigra* (0 y 0). Dadas las características anatómicas y morfológicas de este grupo de especies, no es posible una mayor precisión en la identificación microscópica pero, si se tienen en cuenta los valores medios obtenidos en los ensayos complementarios correspondientes se podría concluir, con las reservas apuntadas, que la madera de la plaza de Chinchón sería de **pino negro o laricio**.



*Figura 8: U.6.3. Planta 3ª - pilar 6.*



*Figura 9: U. 2.3. Planta 1ª - vigueta 35.*

### **3.2.3.- Xilohigrómetro**

La humedad y la densidad son las primeras propiedades que se relacionaron con las características mecánicas, y hoy es sobradamente conocido que cuando aumenta el contenido de humedad disminuyen la resistencia y el módulo de elasticidad.

El **xilohigrómetro** mide la conductividad eléctrica entre electrodos configurados como dos púas de acero clavadas en la madera. Ofrece una lectura directa media de la humedad superficial de la pieza en el punto concreto en el que se ha hecho la lectura a una profundidad de 1 cm, basándose en la relación lineal entre el contenido de humedad y el logaritmo de la resistencia óhmica.



Figura 10: Xilohigrómetro.



Figura 11: Lectura en obra.

Se tomaron datos de la humedad de los elementos estructurales con un xilohigrómetro de resistencia tipo Surveymaster en 3 zonas distintas de cada pieza ensayada con el resto de equipos, resultando un total de 171 determinaciones.

VARIABLE	PILAR		VIGUETA		VIGA	
	Nº Eleme.	Media (Des. st)	Nº Eleme.	Media (Des. st)	Nº Eleme.	Media (Des. st)
HUMEDAD %	14	<b>12,2%</b> (2,4)	26	<b>13,3%</b> (1,9)	17	<b>12,1%</b> (2,1)

Tabla 1: Valores medios de la humedad por tipo de pieza.

### 3.2.4.- Velocidad de propagación de ultrasonidos

La medición de la velocidad de propagación de ultrasonidos a través de la madera es una técnica no destructiva bastante desarrollada en el campo de la ingeniería de montes y sobre la que existen abundantes estudios (Acuña 2007, Rodríguez 2000). Se basa en que la presencia de oquedades, nudos, bolsas de resina o degradaciones internas, hacen que la velocidad de transmisión de las ondas generadas sea diferente de la que se presenta en el material sin defectos. La aplicación de esta técnica tiene la ventaja de que puede ser empleada “in situ” para la evaluación de madera puesta en obra.

El equipo empleado en este trabajo es un modelo Sylvatest® que emplea una frecuencia de 30 kHz y mide el tiempo ( $\mu$ s) que tarda la onda ultrasónica en llegar de un palapador emisor a otro receptor. A partir de la longitud de la pieza y su geometría (sección cuadrada o redonda) y conociendo la densidad del material, se puede determinar el Módulo de Elasticidad Dinámico a partir de la ecuación:

$$\text{Módulo de Elasticidad Dinámico} = \text{Densidad} \times \text{Velocidad}^2$$

La constatación de la relación entre la velocidad de la onda y el módulo de elasticidad aporta información sobre la calidad general de la piezas, sin embargo la relación con el

módulo de rotura no es fácil ya que éste suele depender de un defecto local que produce la rotura y en la propagación de la onda no influye un defecto por sí sólo.

La medición puede hacerse básicamente de dos formas: medición directa (0), tomada con los palpadores colocados de testa a testa, en paralelo con el eje de la pieza; o medición indirecta (0), con los palpadores colocados de cara a cara o de canto a canto, formando un ángulo con la superficie de la pieza y en las que los ultrasonidos no recorren la pieza de forma longitudinal.

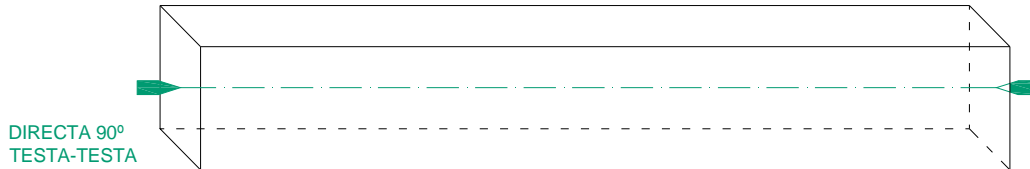


Figura 12: Posición de los palpadores en la medición directa.

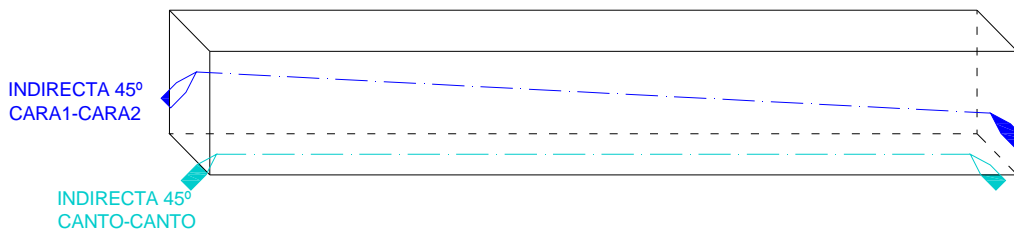


Figura 13: Posiciones de los palpadores en la medición indirecta.

En madera puesta en obra es difícil tener accesibles las testas de las piezas, por lo que se realiza normalmente la medición indirecta. Sin embargo la medición directa es más fiable y apropiada como variable predictora. Para poner en relación ambos valores nuestro grupo de investigación ha publicado (Acuña et al. 2007) unas funciones correctoras dependientes de la distancia y el ángulo que forman la dirección longitudinal y la línea de unión de los palpadores, que permiten relacionar las mediciones indirectas con las directas.

Los resultados medios obtenidos de la velocidad de propagación de la onda y el Módulo de Elasticidad Dinámico deducidos de ellos aparecen en la siguiente tabla:

VARIABLE	PILAR		VIGUETA		VIGA	
	Nº	Media (Des. st)	Nº	Media (Des. st)	Nº	Media (Des. st)
VELOCIDAD DE LA ONDA m/s	14	5.080 m/s (381)	26	5.055 m/s (567)	17	5.050 m/s (704)
MOE DINAMICO N/mm <sup>2</sup>	14	<b>14.048 N/mm<sup>2</sup></b>	26	<b>13.226 N/mm<sup>2</sup></b>	17	<b>10.886 N/mm<sup>2</sup></b>

Tabla 2: Resumen de resultados del ensayo de ultrasonidos.

### 3.2.5.- Extracción de tornillos

Esta técnica de ensayo es un método pseudo-no destructivo que utiliza un dispositivo que registra la máxima fuerza que se precisa para arrancar un tornillo de características específicas<sup>3</sup> previamente introducido en la pieza de madera (0). Dado que existe una relación directa entre tal resistencia al arranque y la densidad de la pieza de madera (Casado 2005) el ensayo permite predecir esta y relacionarla con otras propiedades de la madera. La técnica es válida también para detectar daños y lesiones ocultos en las piezas de madera estudiada.



Figura 14: Extractor de tornillos.



Figura 15: Aplicación en obra.

En la 0 se adjuntan los valores medios de la fuerza máxima de extracción y la densidad estimada por tipo de pieza.

VARIABLE	PILARES		VIGUETAS		VIGAS	
	Nº Eleme.	Media (Des. st)	Nº Eleme.	Media (Des. st)	Nº Eleme.	Media (Des. st)
FUERZA MÁXIMA KN	17	3,07 KN (0,48)	44	2,94 KN (0,53)	22	2,99 KN (0,48)
DENSIDAD ESTIMADA kg/m <sup>3</sup>	17	<b>557 kg/m<sup>3</sup></b>	44	<b>548 kg/m<sup>3</sup></b>	22	<b>542 kg/m<sup>3</sup></b>

Tabla 3: Resumen de resultados del ensayo de extracción de tornillos.

### 3.2.6.- Resistógrafo

La resistografía se basa en la evaluación de la variación de la fuerza, es decir la resistencia que la madera opone a la penetración de una broca a velocidad constante, mediante el consumo de potencia del taladro, relacionándolo con la densidad (Rinn 2004). En concreto se mide la resistencia a la penetración de una broca de diámetro entre 1,5 y 3 mm hasta una profundidad de 100 cm a una velocidad constante. La cantidad de fuerza es variable según la zona que atravesase y son esas variaciones a lo largo del tiempo las que ofrece el aparato gráficamente en forma de resistograma. La

<sup>3</sup> En este trabajo se emplearon tornillos de 4 mm de diámetro y 18 mm de longitud, por ser los más apropiados al tipo de madera en estudio.

integral de la curva fuerza-tiempo es la variable indicadora del ensayo. La resolución del método es tan alta, que se pueden detectar variaciones de densidad incluso entre los anillos de crecimiento.

Externamente el equipo consta de dos partes: el sistema de accionamiento mecánico con la aguja perforadora y el dispositivo de recogida y almacenamiento de datos que incluye una batería recargable (0). La geometría de la punta de la aguja tiene dos veces el espesor del vástago debido a que la fuerza ejercida se concentra en dicho punto (0). Una de las posibilidades más interesantes que ofrece este dispositivo es la inspección de la zona oculta de las cabezas de las piezas que entran dentro de los muros, posibilitando la detección de pudriciones interiores que podrían acarrear en un futuro problemas más graves (0).

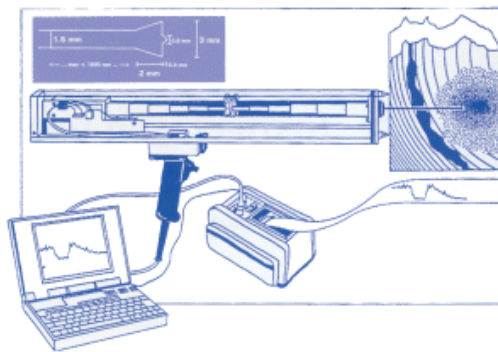


Figura 16: Esquema del equipo del resistógrafo.

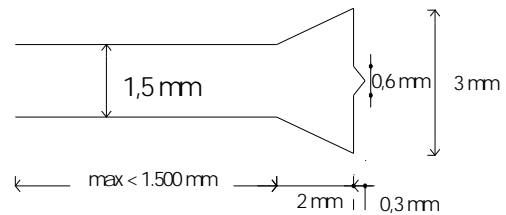


Figura 17: Geometría de la aguja del resistógrafo

El registro de datos se realiza de forma instantánea a la realización del ensayo de dos formas:

- Gráficamente a escala 1:1 impreso en un papel térmico que, con una resolución de 0,1 mm (0).
- Numéricamente, se almacenan directamente en el ordenador 1000 datos por cada centímetro de penetración de la aguja.

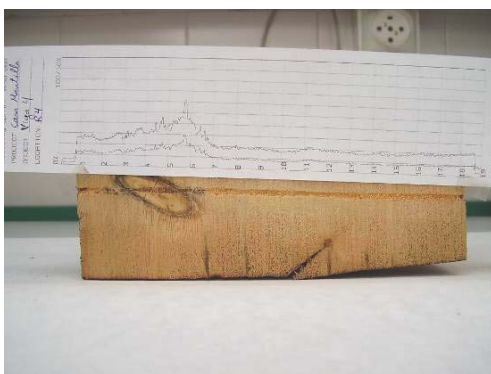


Figura 18: Resistograma sobre la sección penetrada.



Figura 19: Penetración en zonas empotradas.

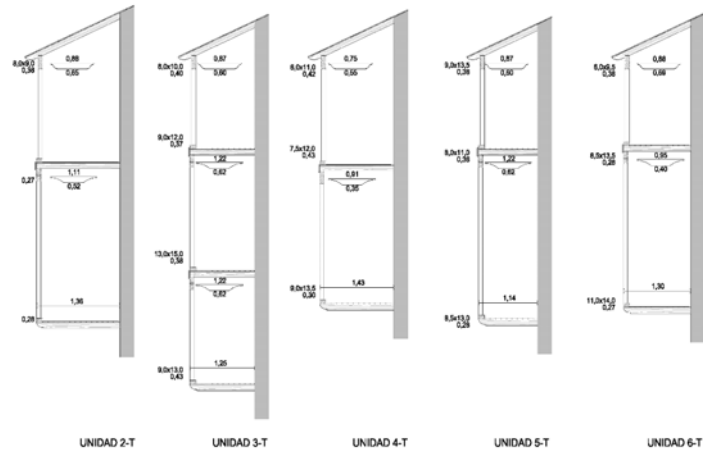
## 4.- Discusión de resultados

### 4.1.- Modelo estructural y constructivo

Los elementos estructurales de la plaza Mayor de Chinchón presentan un patrón común que puede describirse a partir de su sección tipo (0). En el nivel superior o de cubierta,



las viguetas inclinadas con el plano del tejado emergen desde el interior, apoyándose en los muros, hasta alcanzar una jácena frontal en el plano exterior de las balconadas. De este modo las viguetas responden a un modelo empotrado-apoyado, y las jácenas actúan como tal, entregando la carga, a través de unas generosas zapatas, a los correspondientes pies derechos.



*Figura 20: Serie de secciones tipo.*

Estos a su vez descansan en su base sobre un durmiente que reparte la carga vertical sobre los extremos de una nueva familia de viguetas, en el nivel inferior. A partir de aquí, en los niveles intermedios, se produce una contradicción entre la apariencia porticada de los frentes de las balconadas y su verdadero trabajo estructural.



*Figura 21: Apariencia porticada de la estructura de las balconadas.*



Figura 22: Falta de apoyo de los extremos de las ménsulas sobre la falsa jácena.



Figura 23: Cuñas y otros objetos calzando las viguetas.

En efecto, puede observarse que las viguetas no se apoyan en una jácena frontal como en el caso anterior, sino que trabajan como ménsulas empotradas en los muros de cerramiento dorsales, y son independientes del pórtico frontal, que sólo sirve para la sujeción de barandillas y antepechos. Estos se van sujetando entre los pies derechos, cuya escasa escuadría ya denota su incapacidad estructural, y la posibilidad de empuje hacia delante de todo el conjunto se limita a las subdivisiones de propiedades y precarios medios de tipo clavija.

En vertical, esta configuración constructiva ha propiciado que en momentos puntuales de gran deformación asociados a cargas importantes -por ejemplo, en los festejos taurinos- las ménsulas descendan arrastrando a los pórticos frontales, que pueden actuar de transición entre dos o más niveles superpuestos, repartiendo la sollicitación hasta encontrar el equilibrio. Este efecto produce dislocaciones y problemas locales que no pueden recuperarse al cesar la carga, permaneciendo las piezas fuera de su posición original. Por ello pueden observarse no pocos casos en los que los extremos de las viguetas no llegan a apoyar en la viga que en principio debería servirles de sustento (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esta falsa apariencia<sup>4</sup> ha propiciado que en algunos casos se hayan introducido cuñas u otros elementos para calzar esta distancia entre viguetas y viga (0). Tan prudente como desorientada actuación puede resultar perjudicial en el siguiente ciclo de carga, agravando la situación.

Por consiguiente, uno de los objetivos del análisis estructural al que se aludirá en las páginas siguientes será verificar si, en su configuración actual, la estructura de cada nivel es autosuficiente. Con ello se podrá actuar más orientadamente, en el sentido de independizar la conexión estructural entre niveles sucesivos, que perjudica actualmente a las piezas que se adosan a ellos.

## 4.2.- Singularidades

Las singularidades a las que se ha atendido en este trabajo son aquellas que por un lado pueden afectar de forma importante a la resistencia general del elemento y por otro, que

---

<sup>4</sup> Las casas núms. 1 y 2, entre la calle de los Huertos y el Ayuntamiento, constituyen dos excepciones a este esquema general pues la mayor profundidad de sus galerías, algo superior a los tres metros, impide la configuración de ménsula volada, respondiendo a un modelo empotrado-apoyado.

exista la posibilidad de evaluarlas, ya que estando la estructura en servicio, no es posible medir y/o apreciar la existencia de algunas de ellas (médula, anillos de crecimiento, madera juvenil, etc.)

El resultado de este proceso se reflejó detalladamente en la serie A) de planos (18x).

Como conclusión general se obtuvo que, salvo de lesiones o constructivas u otras patologías locales, las piezas podían clasificarse como C22 para Estados Límite de Servicio y C16 para Estados Límite Últimos<sup>5</sup>.

### **4.3.- Patologías**

El grupo de patologías detectadas tuvo su reflejo en la serie B) de planos.

Existe una muy extendida presencia de meteorización lígnea, sobre todo en las cabezas de las viguetas que soportan las balconadas.

Por lo que se refiere a las patologías bióticas, el estado general de la madera es razonablemente bueno gracias a sus buenas condiciones de ventilación y a actuaciones anteriores<sup>6</sup>. Se han detectado daños causados por hongos cromógenos de azulado y presencia de hongos de pudrición parda o cúbica, como patología muy extendida pero de alcance limitado en sección. Se han diagnosticado daños de diversa gravedad causados por insectos xilófagos en concreto de dos familias de insectos de ciclo larvario: Anobiidae (comúnmente llamados carcoma) y Ceramycidae (conocidos como carcoma gruesa). En general son ataques de escasa profundidad y referidos a la albura.

### **4.4.- Lesiones constructivas**

La enorme cantidad y variedad de defectos constructivos detectados puso a prueba la codificación y metodología desarrollada, que tuvo que ser completada y perfeccionada en determinados aspectos. Destacaba en este apartado la detección de diversas intervenciones no afortunadas que deberán corregirse (0 y 0).



*Figura 24: Empalme defectuoso en zapata.*



*Figura 25: Empalme defectuoso en viga.*

## **5.- Conclusiones y propuesta de intervención**

---

<sup>5</sup> Como se ha mencionado anteriormente, esta clasificación mixta, a caballo entre dos clases resistentes, resulta la más adecuada para clasificar piezas de madera históricas de escuadrías medianas y grandes. Ramón-Cueto 2007 y Arriaga 2007.

<sup>6</sup> Algunas de ellas no fueron del todo acertadas, por ejemplo la introducción, en las grietas y fendas de las testas de muchas viguetas, de masillas con el fin de reponer los daños causados por la meteorización y pudrición cúbica. Al tener este relleno un comportamiento higroscópico distinto al de la madera el daño ocasionado ha sido mayor que si no se hubiera puesto nada.

De acuerdo a los principios generales que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera ratificados por la 12ª Asamblea General del ICOMOS (1999), el objetivo prioritario debería ser el mantenimiento de la autenticidad histórica y la integridad del conjunto arquitectónico, conservando al máximo la estructura histórica y la función que le es inherente, así como revelar su valor cultural mejorando la percepción de su integridad histórica, de sus estadios anteriores y de su concepción original. En principio, se deben conservar al máximo los materiales existentes; intervenir lo menos posible en el entramado estructural histórico sería lo ideal. En algunos casos, la intervención mínima dirigida a asegurar la preservación y conservación de estas estructuras de madera podrá incluir su desmontaje, total o parcial, y su montaje subsiguiente, a fin de permitir que se efectúen las reparaciones necesarias. Por consiguiente, la intervención deberá tender a:

- Utilizar métodos y técnicas tradicionales.
- En la medida de lo posible, ser técnicamente reversible.
- Al menos, no estorbar o impedir los trabajos de conservación, que pudieran ser ulteriormente necesarios.
- No impedir el acceso, en el futuro, a las informaciones incorporadas en la estructura.

Las piezas y otros elementos retirados deben ser catalogados y sus muestras características deben ser guardadas de manera permanente como parte de la documentación. Los casos de sustitución se deberán limitar al máximo, reflejar documentalmente y marcar discretamente a cuchillo o mediante pirograbado.

Es de crucial importancia mantener una estrategia coherente de vigilancia continua y de mantenimiento regular.

### **5.1.- Intervenciones constructivas y de rehabilitación**

En la documentación histórica analizada se ha encontrado una referencia a una posible reducción de los aleros en una intervención realizada a finales de los años '60. Además estos no cuentan con sistema de recogida y drenaje del agua pluvial que cae libremente desde los tejados, con lo que, ayudada por el viento, moja regularmente la estructura de madera con efectos gravemente perjudiciales. Por un lado perjudica sus prestaciones al aumentar su grado de humedad, lo cual conlleva agotamientos locales en las piezas más cargadas -por ejemplo aplastamientos en algunas zonas de durmientes bajo los pies derechos- o deformaciones inadmisibles en viguetas a flexión. Por otro lado, el mayor grado de humedad incrementa muy significativamente el riesgo de ataques por organismos xilófagos, especialmente hongos de pudrición.

Además se ha observado que la mayoría de los aparatos de iluminación nocturna, tanto farolitos como proyectores, están anclados a piezas de madera. Esto supone, dado que el agua del tejado golpea sobre ellos al caer, una salpicadura de agua que también produce los daños descritos en el párrafo anterior. En este caso el daño potencial se incrementa por su peso individual y el hecho de estar en voladizo.

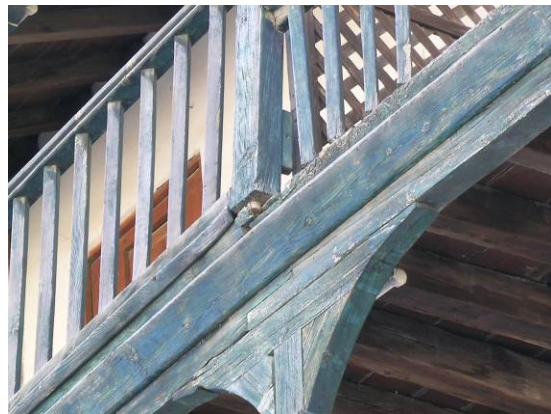
Por las dos razones apuntadas anteriormente se recomienda considerar la posibilidad de implementar canalones de recogida de agua de los tejados en el frente de los aleros. Podrían ser de cobre oxidado, cuyo color se integraría en el general de las balconadas de la plaza. Además, y más necesariamente en caso de no colocarse los canalones apuntados, será necesaria la retirada de los aparatos de iluminación y proyectores

recolocándolos en posiciones distintas, por ejemplo anclados en los muros, sin que su sujeción dependa de las piezas de madera. Esto último sería extensible a los toldos y marquesinas, especialmente la del nivel de planta baja en las subunidades 1.1 y 1.2.

En la misma línea, proponemos contemplar la posibilidad de incorporar protecciones sobre la parte superior de los durmientes, de manera que no se encuentren tan expuestos al agua de la lluvia y las salpicaduras como en la configuración actual. Una chapa del mismo material, cobre oxidado, con una pequeña vuelta y goterón en su borde exterior podría cumplir satisfactoriamente esta misión. Igualmente, las bases de los pilares podrían incorporar un babero que permitiera que el agua que cae y resbala sobre la parte superior del durmiente degrade las bases de los pies derechos de la forma generalizada que se aprecia actualmente (0 a 0).



*Figura 26: Desencaje por pudrición.*



*Figura 27: Desencaje por pudrición.*



*Figura 28: Aplastamiento por pudrición.*



*Figura 29: Aplastamiento por pudrición.*

Otro problema general serían los desencajes de nudos y encuentros, debidos, en la mayor parte de los casos, a movimientos asociados a sobrecargas importantes que hacen deformarse a la estructura sin que esta pueda retomar la posición original de todas las piezas. Por ello es importante considerar el verdadero trabajo estructural de las diferentes barras, de manera que en las intervenciones que se acometan en el futuro puedan compatibilizar su necesaria deformación al entrar en carga con el resto de elementos no estructurales. En este sentido sería necesario garantizar la estabilidad y resistencia del entramado superpuesto frente a acciones horizontales (empuje de los espectadores) incluyendo juntas de deformación en el sentido vertical, que permitan un cierto movimiento de las barras principales, sin perjudicar a los encuentros. Este

problema se detecta especialmente en las vigas frontales del nivel de cubierta, que se encuentran en muchos casos giradas hacia fuera.

Por último, a nuestro juicio se debería retomar la reflexión acerca de la propuesta, fallida en la última intervención de 1992, sobre el color añil original. A pesar de las reticencias entonces observadas, la documentación histórica apunta a que el color verde actual tiene una antigüedad de apenas medio siglo, cuando la historia de la plaza alcanza mucho más. El color azulado indicado es tradicional en toda la zona geográfica y se debe a un producto natural de origen vernáculo que protagonizó el aspecto original e histórico de la plaza hasta hace bien pocos años.

## **5.2.- Peritación estructural y propuestas de intervención**

Una vez realizada la identificación de especie, clasificación visual y asignación de clase resistente, sobre los elementos seleccionados se ha efectuado un análisis estructural de acuerdo a los criterios y bases de cálculo establecidos en el Eurocódigo 5: “Proyecto de estructuras de madera. Parte 1.1. Reglas generales y reglas para la edificación” (Norma experimental UNE ENV 1995-1-1:1999)<sup>7</sup>.

Partimos de la base de que las propiedades de la madera, obtenidas mediante la campaña de ensayos no destructivos que se ha explicado, serían las que corresponden a las clases C22 para Estados Límite de Servicio y C16 para Estados Límite Últimos. La densidad estimada a través de las mismas técnicas sería de unos 550 Kg/m<sup>3</sup>.

La peritación realizada se ha efectuado sobre un muestreo, eligiendo una pieza representativa del tramo en su situación más desfavorable. Por lo tanto, a tal esquema pueden no responder individualmente todas las integrantes del mismo que, en general, estarán en situación más segura. Se han calculado un total de ocho piezas de la Unidad 1 y 25 del resto de unidades, una por cada tipo distinto. Los cálculos presumen que las piezas están en buen estado y exentas de patologías. Se producen cuatro situaciones:

- Elementos que resultaban válidos en su configuración actual: piezas que han reflejado un índice de agotamiento menor que la unidad en Estados Límites Últimos y deformaciones aceptables, de acuerdo a los tres criterios establecidos por el Eurocódigo 5. En este grupo estarían las viguetas de cubierta y la totalidad de los soportes muestreados. También estarían validados por los cálculos efectuados las viguetas en ménsula de la planta primera en las Unidades 2, 5 y 6.
- Elementos cuya configuración constructiva debía revisarse para responder al modelo teórico: barras que no pueden entrar en el grupo anterior en su estado actual, pero sí lo harían con algunos cambios en la configuración constructiva. Por ejemplo: protecciones adecuadas de la lluvia que las permiten pasar de clase de servicio 3 a 2, o limitaciones en la sobrecarga<sup>8</sup>. En este grupo hay un número amplio de casos que incluyen algunas viguetas de cubierta de la Unidad 1, la mayoría de las vigas frontales de forjado de cubierta y algunas viguetas en ménsula de la planta primera.

---

<sup>7</sup> En la fecha de realización de este trabajo no se había publicado el Código Técnico de la Edificación DB SE-M.

<sup>8</sup> Se entiende que mediante disposiciones que lo hagan incompatible durante su vida de servicio, por ejemplo ocupaciones permanentes con elementos compatibles con la estética del edificio.

- Elementos a reforzar y/o consolidar: piezas que no cumplen las condiciones de agotamiento y deformación en su estado actual, ni pueden llegar a hacerlo con operaciones de reparación y declasado como las del apartado anterior. En estos casos se hace imprescindible la intervención en términos de consolidación y refuerzo que tienen como finalidad mejorar las propiedades mecánicas o de servicio de los elementos en madera con modificaciones mínimas.
- Elementos a sustituir y/o reforzar prótesis: piezas rotas o con daños importantes que hacen inviable su conservación y/o consolidación. Específicamente se desaconsejan, con carácter general, las prótesis realizadas con resinas epoxi y varillaje de fibra de vidrio. A los efectos de prescribir, vía Pliego de Condiciones Particulares del proyecto, madera nueva de aportación se incluyeron las características esenciales del material lúneo original.

### **5.3.- Tratamiento curativo y preventivo**

El estado general de la madera es relativamente bueno gracias a actuaciones realizadas anteriormente, de 1966 a 1969, saneado de todas las galerías, reposición de piezas, etc. y las últimas realizadas en el proyecto de restauración y consolidación de fachadas inaugurado en 1992.

Sobre la madera que no presenta sntomas de ataques ni abióticos ni bióticos se aconsejó un tratamiento preventivo superficial de forma que la penetración media alcanzada por el protector sea de 3 mm, siendo como mínimo de 1 mm en cualquier parte de la superficie tratada. Se corresponde con la clase de penetración P2 de la norma UNE-EN 351-1:1995.

En las zonas con meteorización se aconsejan saneados superficiales, eventualmente con tratamientos superficiales contra la fotodegradación y pasar al caso anterior. Para el caso de las maderas atacadas por insectos xilófagos y hongos de pudrición se prescribieron tratamientos convencionales de curación mediante inyecciones y válvulas unidireccionales para impregnación de profundidad media, con saneados mecánicos en las zonas más afectadas.

Para la madera de aportación se recomienda un tratamiento de profundidad media, de forma que la penetración media alcanzada por el protector sea al menos de 6 mm en las caras laterales de la albura. Se corresponde con las clases de penetración P4-P6 de la norma UNE-EN 351-1:1995. Al tratarse de elementos de nueva aportación este tratamiento puede ser aplicado en autoclave o por inmersión.

## **6.- Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Patrimonio de la Comunidad de Madrid y por el Ministerio de Fomento, en el marco de las Acciones Estratégicas sobre "Mantenimiento y evaluación de estado de obras y edificios" del Área Sectorial "Construcción Civil y Conservación del Patrimonio Histórico Cultural" del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003". Ha contado con la colaboración de la empresa privada Técnicas para la Restauración y Construcciones S.A., TRYCSA.

## **7.- Bibliografía**

- (1) Acuña, L.; Díez Barra, R.; Basterra, LA.; et al. La técnica de transmisión ultrasónica aplicada a la madera estructural. 11º Congreso Español de END. Sociedad Española de Ensayos no Destructivos AEND. Gijón (España), 2007.

- (2) Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.A.; Bobadilla, I.; García, F. Intervención en estructuras de madera. AITIM. Madrid, 2002.
- (3) Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M.; Bobadilla, I. Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. Revista Informes de la Construcción. Vol. 59, N°. 506. IETCC. Madrid, 2007.
- (4) Basterra, LA.; Casado, M.; Acuña L.; Pinazo, O. Técnicas de ensayo pseudo no destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos. Revista electrónica ReCoPaR, ISSN 1886-2497, N°. 2, 2006, págs. 37-59.
- (5) Basterra, LA.; Casado, M.; Acuña L.; Ramón-Cueto, G.; López, G.; Barranco, I.; Relea, E. Avance de propuestas metodológicas para el diagnóstico y análisis de estructuras de maderas históricas. Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Cádiz, 27-29 de enero de 2005 / coord. por Santiago Huerta Fernández, Vol. 1, 2005, ISBN 84-9728-147-0 , págs. 121-132.
- (6) Bucur, V. Nondestructive characterization and imaging of wood. Springer. Berlín, 2003.
- (7) Casado, M.; Basterra, LA.; Acuña, L.; et al. Determinación de la capacidad resistente mediante métodos no destructivos. Aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. IVº Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales SECF. Zaragoza, 2005.
- (8) ICOMOS: Principios que deben regir la conservación de estructuras de madera. Ratificados en la 12ª Asamblea General en México. 1999.
- (9) ISCARSAH (International Scientific Committee for the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage): Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. París, 13 de septiembre de 2001.
- (10) Ramón-Cueto, G. Propuesta de metodología orientada al proyecto para la evaluación de los elementos estructurales de madera en el patrimonio histórico español. Tesis doctoral. UVa, 2007.
- (11) Rodríguez Liñán, C.; Rubio de Hita, P. Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla. 2000.
- (12) Rinn, F. “Metodología de Inspección en Construcciones de Madera”, Revista CIS-Madera, nº 12 19-31. 1er semestre, 2004.
- (13) Tampone, G. “Reppresentazione delle strutture di legno antiche” en G. Tampone, M. Mannucci y N Macchioni, Strutture di legno. Cultura, conservazione, restauro, editore letrera. Milán, 2002.



# DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS SOBRE LA PATOLOGÍA, LA IDONEIDAD ESTRUCTURAL Y DE MATERIALES DEL SEMINARIO MAYOR DE COMILLAS. CONCLUSIONES OBTENIDAS

Luis Villegas<sup>1</sup> e Ignacio Lombillo<sup>2</sup>: GTED<sup>3</sup>.

Universidad de Cantabria (UC).

<sup>1</sup>Dr. Ingeniero de Caminos y Catedrático UC ( [luis.villegas@unican.es](mailto:luis.villegas@unican.es) )

<sup>2</sup>Ingeniero de Caminos y Doctorando UC ( [ignacio.lombillo@unican.es](mailto:ignacio.lombillo@unican.es) )

<sup>3</sup>Grupo I+D de Tecnología de la Edificación - UC ( <http://grupos.unican.es/GTED> )

## 1.- INTRODUCCIÓN

El Seminario Mayor se trata de un edificio Modernista (finales s. XIX) en el que parcialmente participó el Arquitecto Lluís Domènech i Montaner (autor de entre otros edificios del Hospital Sant Pau de Barcelona, Patrimonio de la Humanidad).



*Perspectiva general del Seminario Mayor de Comillas*



*Escalera de la zona central Sur*

El edificio se articula en torno a dos claustros y a un volumen central en el que se ubican los elementos arquitectónicos y artísticos de mayor calidad, la iglesia, el hall de entrada, la sacristía y el paraninfo



*Paraninfo*



*Perspectiva general de la iglesia*

El edificio ocupa una superficie rectangular aproximada de 100 m x 65 m, con dos patios interiores de unas dimensiones aproximadas de 35 m x 25 m, flanqueando una iglesia que

ocupa el centro de la edificación. El edificio consta de planta baja y tres alturas con dos castilletes laterales recrecidos en las esquinas de la fachada de entrada principal y uno situado encima de dicha entrada. En la fachada puede observarse como el muro es de mampostería recibida con mortero con pilares/contrafuertes de ladrillo macizo. En ocasiones se observa como la fachada de mampostería se encuentra enmarcada con un “pórtico” de sillares de distinto material, que en algunos casos se sustituyen a partir de cierta altura por ladrillo macizo revestido.



*Abovedado de la iglesia*



*Trasdós del abovedado, detalle de la escalera de caracol y del nudo tridimensional de la cubierta en la zona del ábside*

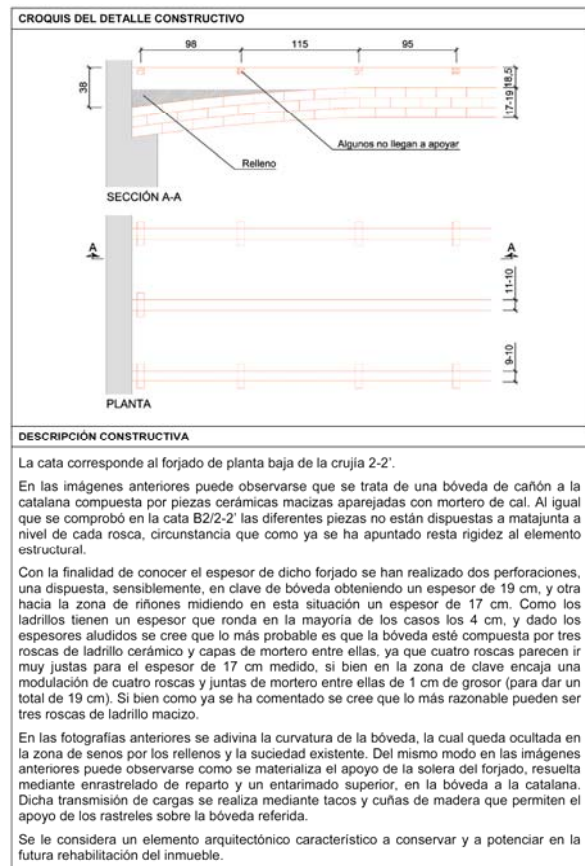
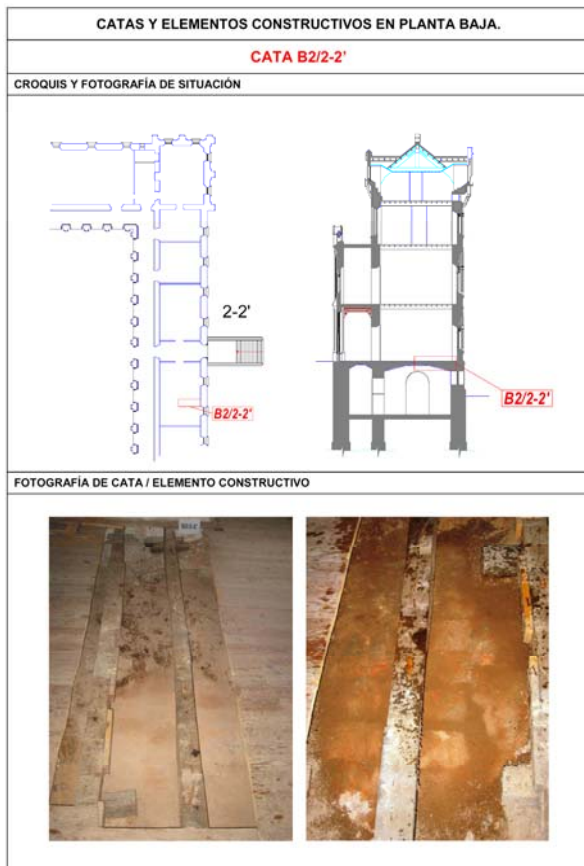
Los estudios previos que se resumen han sido llevados a cabo por un equipo multidisciplinar compuesto por Grupos de Investigación de la Universidad de Cantabria (GTED y LADICIM) y varias PYMES de la región (Estudio de Ingeniería DYNAMIS S.L., CHEMPRO S.L., MONTAÑESA DE DESINFECCIÓN S.L. y TRIAX S.A.), siendo el coordinador de los mismos el Grupo de Tecnología de la Edificación (GTED) adscrito al Dpto. de Ingeniería Estructural y Mecánica de la Universidad referida. Como puede comprobarse aglutinan diferentes áreas de conocimiento otorgando al estudio la multidisciplinaridad necesaria para acometerlos desde diversos puntos de vista y de esa forma enriquecer los contenidos con puntualizaciones propias de las diversas facetas involucradas.

De todos los trabajos desarrollados, en lo que sigue, se va a realizar una exposición general de los mismos deteniéndose en los realizados íntegramente por el Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria.

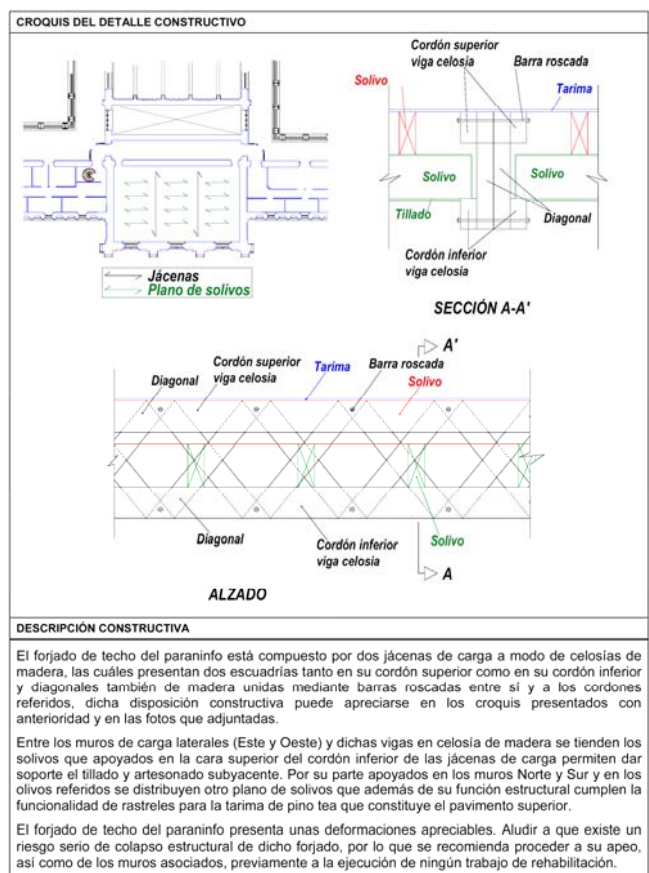
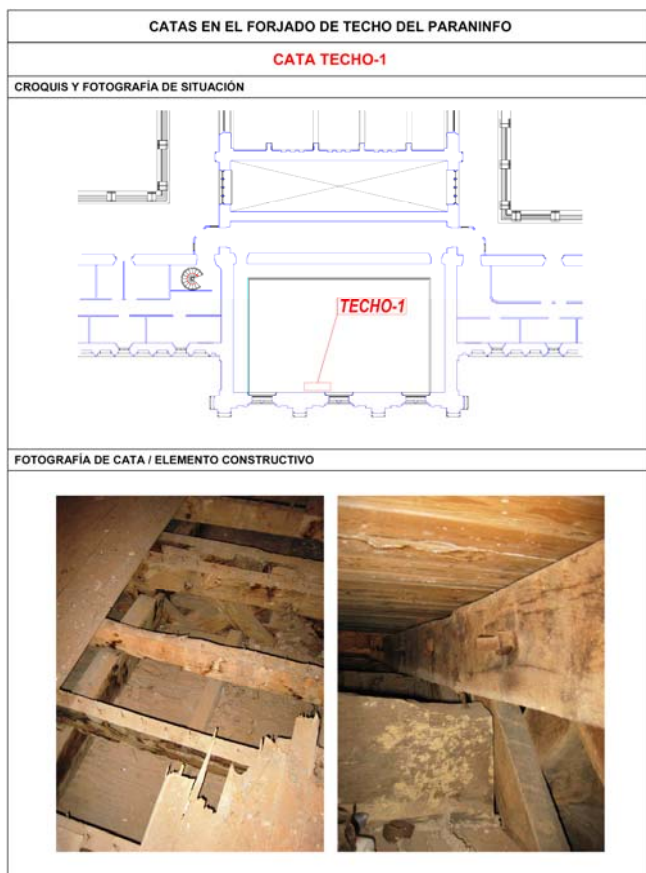
## **2.- REALIZACIÓN DE CATAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA Y ORGANIZACIÓN CONSTRUCTIVA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

Con la finalidad expuesta se ha procedido a realizar una serie de catas en lugares estratégicos. Para cada una de éstas se realizó una ficha en la que se incluye su localización dentro del edificio, tanto en planta como en alzado, fotografías de situación y de detalle, croquis con su geometría y dimensiones, y una descripción escrita de la misma.

Las catas han permitido un conocimiento profundo de las principales características constructivas del edificio y de algunos procesos patológicos existentes; por ejemplo, apoyo insuficiente de las viguetas de madera en las vigas de carga y otros que se recogerán en el siguiente apartado.



*Ejemplo de ficha descriptiva, concretamente del forjado de planta baja de la crujía más al Este*



*Ejemplo de ficha descriptiva, concretamente del forjado de techo del paraninfo*

De la misma forma también se realizó una inspección del aljibe existente en el claustro E. Para ello, y debido a sus características especiales de espacio confinado, se creyó conveniente conocer la calidad y características de la atmósfera existente para garantizar la seguridad y salud de los técnicos que debían de inspeccionarlo. Se procedió a la medición de la concentración de oxígeno, de monóxido de carbono, dióxido de carbono y de determinados gases inflamables con la finalidad de valorar el potencial explosivo de la atmósfera existente.

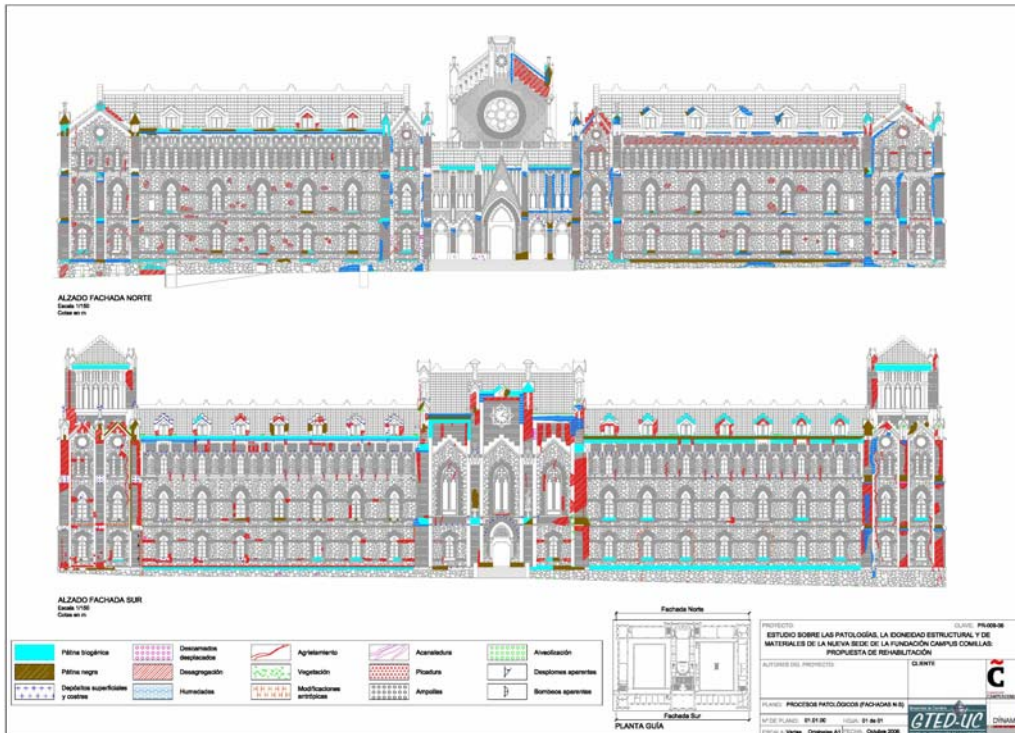


*Detalles de la inspección realizada en el aljibe existente en el claustro Este*

El aljibe esta compuesto por dos recintos separados por un tabique intermedio y tiene una superficie interior total de 204,5 m<sup>2</sup>. La estructura del mismo se compone a base de pilares cuadrados de 49 cm de lado que reciben las cargas de las bóvedas de cubierta.

### **3.- ESTUDIO DE LOS PROCESOS PATOLÓGICOS PRESENTES: RECOMENDACIONES DE ACTUACIÓN**

Se llevó a cabo un registro sistemático de los diferentes defectos y anomalías hallados en los muros del Seminario Mayor, tanto en las cuatro fachadas exteriores como en los muros N, S y W relativos al claustro Oeste, y en el muro W relativo al claustro Este.



*Levantamiento de procesos patológicos de la fachada Norte (arriba) y de la fachada Sur (abajo) del Seminario Mayor de Comillas.*

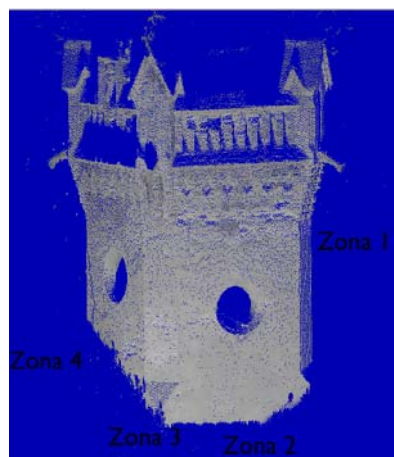
El proceso seguido para la realización de dichos trabajos fue la realización de una inspección visual pormenorizada. Con la información obtenida se realizó un levantamiento de los procesos patológicos asociados. Del mismo modo se adjuntaron las fotografías de detalle de cada proceso patológico así como su localización dentro del muro correspondiente. Finalmente, se adjuntó en forma de ficha una descripción de cada uno de las lesiones, así como las causas achacables más probables relacionadas.

Además, de los procesos patológicos sobre los muros aludidos, también se realizó un estudio orientado a las lesiones más comunes detectadas en las crujías perimetrales a los claustros, en la torre SW y otros procesos patológicos de carácter puntual y de bastante importancia localizados durante las visitas de inspección.

Un resumen de los defectos se compendia a continuación:

- Pátinas (capas o películas delgadas) biogénicas y negras (de suciedad o enmugrecimiento) en numerosas partes de los muros.
- Existen depósitos superficiales (acumulaciones de materiales) y costras (láminas o cortezas de material coherente) en diferentes zonas.
- Descamación o exfoliación de láminas o películas superficiales que se desprenden del sustrato.
- Ampollas por abombamiento de las costras o escamas.
- Alveolización (erosión alveolar o meteorización en panal)
- Desagregación que conlleva la descohesión de las partículas de la piedra y del ladrillo.
- Desplacados, acanaladuras y picaduras.
- Agrietamientos.
- Presencia de plantas superiores.
- Modificaciones antrópicas (intervenciones humanas desacertadas).

De la misma forma se propusieron recomendaciones de actuación (terapéutica) que permiten corregir los defectos señalados previamente. A su vez, como apoyo del proceso deductivo desarrollado fue necesario realizar un levantamiento mediante láser escáner 3D de determinados elementos constructivos (fundamentalmente en la torre del reloj y fachada sur).

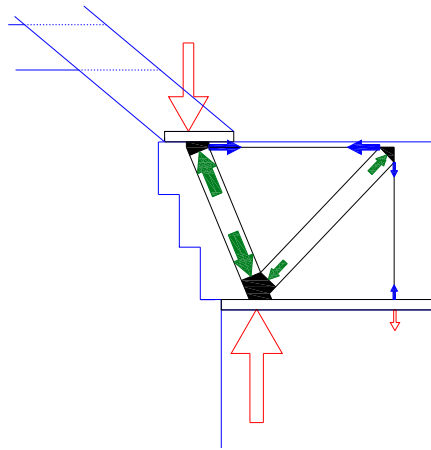


*Imágenes referentes a los trabajos desarrollados con láser escáner 3D. Cortesía Gim Geomatics.*

En lo que sigue se relacionan los procesos patológicos más graves en lo que respecta a la estabilidad del inmueble.

### 3.1.- Apoyo excéntrico de las cerchas en los muros de las crujiás perimetrales a los claustros

En relación a este proceso cabe aludir a que se han detectado agrietamientos generalizados en todas las crujiás motivados por dicho apoyo excéntrico (cuyo diseño estructural se considera poco afortunado) y agravados por el corte del atirantado transversal, acaecido en un momento de su historia, que ha roto la enlazabilidad y arriostramiento necesarios en la estructura. Debido a las deformaciones asociadas al esquema estructural del apoyo excéntrico de la cubierta en la obra de fábrica se han producido agrietamientos sensiblemente verticales y con amplitud máxima en la parte superior. Dicho patrón de agrietamiento se repite sistemáticamente en todas los paños bajo cubierta de los muros de fábrica marcándose perfectamente en la tabiquería existente. Además dichos agrietamientos también se manifiestan en el paño de muro inferior (entre plantas 2ª y 3ª). Dicho proceso patológico está asociado a la falta de contrarresto de la acción horizontal originada por el apoyo excéntrico de la cubierta y de las tracciones asociadas al tirante horizontal superior del modelo de bielas, tirantes y nudos que se adjunta.



*Esquema general del apoyo excéntrico de una cercha de cubierta en el muro de fábrica subyacente*

Caso de no centrar las cargas en el muro de carga subyacente es necesario materializar dicho arriostramiento horizontal mediante un elemento de acero a la altura de cada una de las cerchas, de forma análoga a como existían en su día. Se recomienda, no obstante, diseñar un apoyo centrado de la nueva cubierta en los muros de carga existentes.

### 3.2.- Procesos patológicos relacionados con los forjados de madera

La excesiva deformación de los forjados conduce a agrietamientos inclinados que forman arcos de descarga. Asimismo, aludir a la mala solución constructiva materializada en general en los forjados, en tanto que con la finalidad constructiva de realizarlos con el menor canto posible, toda la carga transmitida por las viguetas a las jácenas de carga se realiza a través de un apoyo indirecto en un listón de madera clavado a la viga de carga mediante puntas de encabriar dispuestas aproximadamente cada 40 cm. Dichos elementos, trabajando a corte, son insuficientes para resistir las cargas futuras y más teniendo en cuenta el efecto de mellado que podría ocasionarse en la madera. Por otro lado, debido a las deformaciones existentes en las jácenas de carga (como ya se ha indicado causa de diferentes lesiones) y en base a los cálculos realizados, puede concluirse que las secciones de madera estructural existentes son insuficientes para cumplir tanto los estados límites de servicio como los estados límites últimos. Además, varios elementos de madera están afectados por ataque biótico asociado a xilófagos e insectos sociales (térmitas).

### 3.3.- Procesos patológicos relacionados con el entronque excéntrico del “prisma de coronación retranqueado” respecto al cuerpo de las torres SE y SW

En el plano de entronque del “prisma” con el cuerpo de las torres referidas existen fenómenos locales asociados a la acción del apoyo excéntrico del prisma que generan esfuerzos importantes de tracción en el muro de fábrica que por otro lado son la causa de parte de los procesos patológicos existentes en dicha torre. Esto genera mecanismos de transmisión excéntrica de las cargas poco favorables y que tienden a “abrir y desplomar” los muros de carga principales y es fuente de los daños que aparecen en estas torres W y E (que han llevado a apuntalar la citada en primer lugar). Así, existen zonas localizadas en la coronación de la torre y en el plano de maclado del “prisma de coronación” en el cuerpo inferior, en que debido a las acciones excéntricas que se transmiten a los muros de carga, se generen esfuerzos de tracción, especialmente importantes en el entronque del prisma en el cuerpo de la torre.

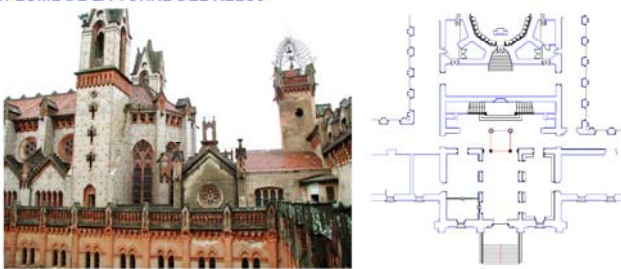
En la actualidad se presentan agrietamientos, tanto exteriores como interiores (sobretudo en la torre SW): En los cargaderos de huecos próximos a esquinas, y otros que marcan un movimiento hacia fuera de uno de los muros de la torre y que se manifiestan en los perpendiculares. Dichos fenómenos tienen mayores amplitudes a medida que se aproximan al entronque del prisma de coronación con el cuerpo de la torre.

### 3.4.- Desplome de la torre del reloj

La torre del reloj se encuentra en el cuerpo central del edificio, a uno de los lados de la escalinata principal.

**OTROS PROCESOS PATOLÓGICOS.**

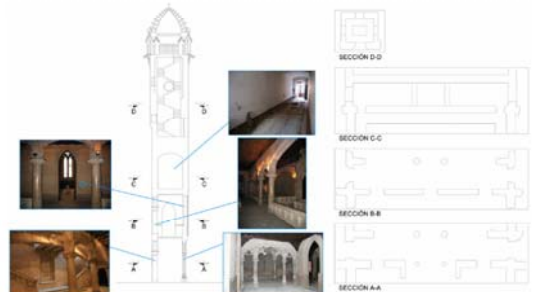
**DESPLOME DE LA TORRE DEL RELOJ**



Vista general de la torre del reloj      Proyección en planta baja de la torre del reloj

**COMENTARIOS**

La torre del reloj se encuentra en el cuerpo central del edificio, a uno de los lados de la escalinata principal. Sus muros Norte y Sur, en el nivel de maclado con el volumen inferior, descansan directamente en los muros de carga de dicho volumen, mientras que los muros Este y Oeste descargan sobre el volumen inferior mediante sendos arcos dispuestos debajo de cada uno, circunstancia que motiva concentraciones de carga puntuales y esfuerzos horizontales que hay que compensar mediante la resistencia a cortante de la unión, función de la traba existente y el peso que gravita sobre dicho plano.



Alzado de la torre del reloj, junto con un detalle de diferentes secciones de la misma

Entre los forjados de 2ª y 3ª planta, una vez llevadas las cargas a los muros del volumen inferior, estas se transmiten a niveles inferiores, mientras se abren, afectando a mayor longitud de muro a medida que descienden.

Entre los forjados de 2ª y 1ª planta mientras en el lado Sur de la torre las cargas se transfieren a niveles inferiores a través del muro de carga existente (muro Norte del paraninfo), que aunque con huecos permite

una mayor dilución de la carga en niveles inferiores, en el lado Norte de la torre las cargas tienden a concentrarse en dos pilares pétreos a través de arcos rebajados que motivan esfuerzos horizontales en los muros Este y Oeste de la caja de escaleras. Finalmente entre el forjado de planta 1ª y el de planta baja, en el lado sur de la torre las cargas, bastante abiertas, se comunican al terreno mediante cuatro pilares de poca sección y parte de los muros de carga, y en el lado norte las cargas se concentran bastante en dos zonas puntuales del terreno pues las cargas del nivel superior se pasan al nivel inferior mediante dos pilares continuación de los de la planta superior.

Se ha llevado a cabo un análisis del desplome de la torre mediante láser escáner, tomándose medidas desde la terraza del claustro oeste. Para determinar si hay desplome se han realizado 15 secciones en un intervalo de 2,25 m. de altura. De este estudio se obtiene que la torre del reloj tiene un desplome medio en la altura referida de entorno a 5 cm. (aproximadamente 2,20 cm/m de desplome), valor por otro lado nada desdeñable.

Los desplomes detectados sugirieron la necesidad de analizar en profundidad las causas que motivaron dicho proceso patológico. En este sentido la causa más factible es que el desplome se deba a una integral de giros en el alzado de la torre asociados a descensos diferenciales entre su zona Sur y su zona Norte. Dichos descensos se achacan a dos causas, principalmente a un asiento diferencial en cimentación del lado Norte respecto del lado Sur dada la mayor concentración de cargas en cimentación en el lado Norte, y de forma secundaria a un descenso de la clave de los arcos existentes en planta 1ª asociado a una falta de contrarresto lateral de los empujes que motivan a los muros Este y Oeste del cajón de la escalera.

El efecto que produce la falta de contrarresto horizontal en la arcada de la subida principal, son descensos en clave y desplazamientos horizontales en los arranques de los arcos que producirían un asentamiento relativo del lado Norte de la torre del reloj respecto del lado Sur. Parece ser que dicha problemática fue detectada en épocas pasadas porque en la campaña de catas se han detectado la colocación de tres tirantes que atan los muros Este y Oeste de la caja de escaleras y que a pesar de no estar colocados en los puntos de máxima eficacia, para no dañar la integridad estética de las dependencias que atravesarían, tratan de ofrecer el contrarresto horizontal necesario que se viene aludiendo.



Situación de los tres tirantes detectados en el lado Este

Modelo de EF desarrollado

El efecto de desplome de la torre del reloj en planta baja queda asociado al posible asiento diferencial producido en la cimentación de la arcada sobre la que descansa la cara Norte de la torre debido a una mayor concentración tensional que en la cara Sur. Dicha consideración se demuestra en el anejo A4, por lo que se remite al lector a dicho apartado para mayor información.

Además se cree conveniente aludir a que pudiera ser que en esta zona central de influencia de las cargas de la torre del reloj pudieran localizarse apoyos de la cimentación, tanto de los pilares como de los muros interiores, no directamente sobre el sustrato calcáreo, sino que quede apoyada sobre el eluvial de alteración, de consistencia media-dura (tal y como se comprobó que ocurría en la calicata C-9 de la campaña de calicatas realizada, y que se recoge en el anejo geotécnico A5). En esta situación y dada la mayor deformabilidad del eluvial de alteración que el sustrato calcáreo subyacente se favorecería el desarrollo de asientos diferenciales entre la cimentación de la parte más al Norte de la torre del reloj, de la situada más al Sur.

*Ejemplo de ficha descriptiva del proceso patológico relacionado con el desplome detectado en la torre del reloj*

En el nivel de maclado con el volumen inferior, sus muros Norte y Sur descansan directamente en los muros de carga de dicho volumen, mientras que los muros Este y Oeste descargan en él mediante sendos arcos dispuestos debajo de cada uno (en el nivel entre 2ª y 3ª planta), circunstancia que motiva concentraciones de carga puntuales y esfuerzos

horizontales que se compensan mediante la resistencia a cortante de la unión y el contrarresto de los empujes asociados a los apoyos. Una vez llevadas las cargas a los muros del volumen inferior, estas se transmiten a niveles subyacentes mientras se abren, afectando a mayor longitud de muro, a medida que descienden. En el lado Sur de la torre las cargas se transfieren a niveles inferiores a través del muro de carga existente (muro Norte del paraninfo), que aunque con huecos permite una mayor dilución de la carga en los citados niveles. En el lado Norte de la torre las cargas tienden a concentrarse en dos pilares pétreos a través de arcos rebajados que motivan esfuerzos horizontales en los muros Este y Oeste de la caja de escaleras. Finalmente, en el nivel de planta baja, en el lado sur de la torre las cargas, bastante abiertas, se comunican al terreno mediante cuatro pilares de poca sección y parte de los muros de carga, y en el lado norte las cargas se concentran bastante en dos zonas puntuales del terreno pues las cargas del nivel superior se pasan al nivel inferior mediante dos pilares continuación de los de la planta superior.

Dado que a simple vista parecía detectarse cierto desplome de la torre, se llevó a cabo un análisis del hipotético movimiento mediante láser escáner tridimensional. De dicho estudio se concretó que existe un desplome medio de 2,20 cm/m en la zona analizada (en total 5 cm en una longitud de 2,25 m).

La causa más factible es que el desplome se deba a una integral de giros en el alzado de la torre asociados a descensos diferenciales entre su zona Sur y su zona Norte. Dichos descensos se achacan a dos causas, principalmente a un asiento diferencial en cimentación del lado Norte respecto del lado Sur dada la mayor concentración de cargas en cimentación en el lado septentrional, y de forma secundaria a un descenso de la clave de los arcos existentes en planta 1ª, asociado a una falta de contrarresto lateral de los empujes que inciden en los muros Este y Oeste del cajón de la escalera.

En relación con la falta de contrarresto horizontal en la arcada de la subida principal, parece ser que dicha problemática fue detectada en épocas pasadas porque en la campaña de catas se han descubierto la colocación de tres tirantes que atan los muros Este y Oeste de la caja de escaleras que tratan de ofrecer el contrarresto horizontal necesario que se viene aludiendo.

En relación al posible asiento diferencial producido en la cimentación de la arcada sobre la que descansa la cara Norte de la torre (debido a una mayor concentración tensional que en la cara Sur) se cree conveniente aludir a que pudiera ser que en esta zona central de influencia de las cargas de la torre del reloj se localizasen apoyos de la cimentación (tanto de los pilares como de los muros interiores) no directamente sobre el sustrato calcáreo, sino que queden sustentadas sobre el eluvial de alteración, de consistencia media-dura (tal y como se comprobó que ocurría en la calicata C-9 de la campaña de geotécnica realizada). En esta situación y dada la mayor deformabilidad del citado eluvial que el sustrato subyacente se favorecería el desarrollo de los referidos asientos diferenciales. También, contribuiría a favorecer el fenómeno el posible reblandecimiento de las capas de apoyo dada la problemática de humedades de capilaridad detectada en la zona de influencia de las cimentaciones referidas. Por tanto, se cree conveniente que a la hora de la reestructuración de esta zona se inspeccionen las cimentaciones de las columnas centrales que soportan el muro Norte de la citada torre.

### **3.5.- Procesos patológicos en la zona del paraninfo**

En la zona central sur, en torno al espacio arquitectónico denominado como paraninfo, se han detectado varios procesos patológicos de gravedad, a continuación se hace una referencia los mismos:

Se observan **flechas excesivas** en el forjado del techo del paraninfo debidas a la gran luz existente y a que solamente hay dispuestos dos elementos portantes a modo de vigas en



celosía de madera. Además, sobre estas jácenas existen cargas (debidas a los elementos de acceso a la zona residual de cubierta sobre el paraninfo) que favorecen la existencia de dichas flechas. Por otro lado aludir a que debido a las luces existentes y los reducidos elementos portantes principales los esfuerzos que se motivan en las jácenas de carga son importantes. Asociado con lo anterior se ha observado un fallo del cordón superior de las vigas en celosía de madera que trabajando a compresión ha sufrido una inestabilidad quedando sometido a pandeo lateral (daño especialmente grave por su carácter de posible rotura o colapso frágil, sin previo aviso).

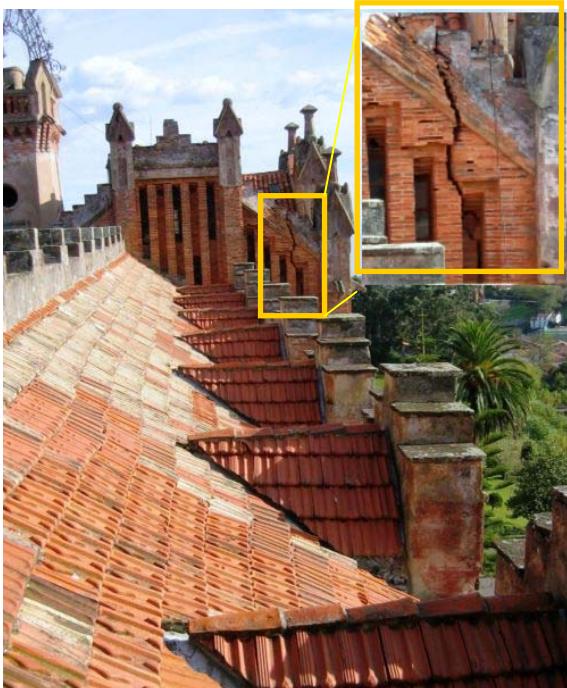


*Detalle de la viga en celosía que conforma las jácenas de carga*

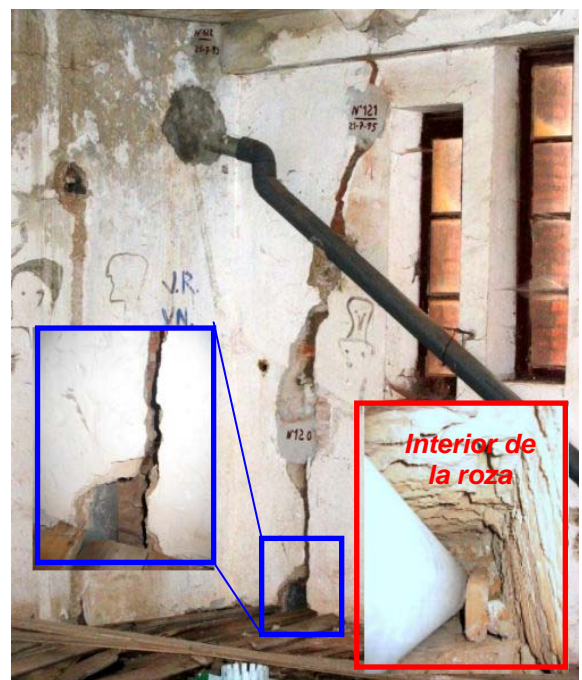


*Pandeo lateral del cordón superior a compresión de una de las dos jácenas de carga*

Existen, asimismo, **agrietamientos en los laterales de la fachada principal** del edificio (fachada sur-oeste y fachada sur-este). En la sur-oeste se observa a simple vista un agrietamiento de amplitud muy importante y grave (del orden de 6 cm y que atraviesa el muro lateral seccionando el mismo): La fachada principal central está suelta en su zona superior sin arriostrar y desplomada hacia el exterior.



*Vista general a la grieta de fachada Sur-Oeste desde la torre Oeste.*



*Detalle interior de la grieta de fachada Sur-Oeste. Puede apreciarse la tubería alojada en la sección del muro*

El proceso deductivo seguido ha llevado a concluir que la causa principal está asociada a la rotura por el plano de mayor debilidad de los muros perpendiculares a la fachada Sur ante las succiones de viento a que se ve sometida la misma en su zona central, ya que dada la configuración actual del edificio la mayor parte de los esfuerzos de tracción generados han de transmitirse a dichos muros de arriostramiento. Además, la sección de unión de ambos muros está bastante debilitada, en tanto que además de las ventanas existentes en los laterales se ha comprobado que en las proximidades de las esquinas hay empotradas sendas bajantes. La presencia de estas bajantes en una zona de encuentro entre dos muros de fachada (esquinas sur-oeste y sur-este de la zona central Sur) implica un debilitamiento importante de la unión asociado a una reducción importante del espesor efectivo de la misma.

En base a los procesos patológicos referidos, la zona central sur presenta un riesgo latente de “posible colapso”, por lo que se recomienda proceder a su refuerzo, previo apuntalamiento y andamiaje total tanto del forjado de referencia como de los muros de carga involucrados, para evitar males mayores.

### **3.6.- Procesos patológicos en la fachada Norte.**

En relación a la zona central Norte (acceso a la iglesia) aludir a que se han observado agrietamientos que aumentan en amplitud a medida que se va ganando altura. En la planta baja dichas fisuras afectan a las bóvedas existentes y a los muros sobre los que se apoyan, asociando a las flechas excesivas que presenta el forjado de planta primera como la causa más presumible. Dichas deformaciones están motivadas por las sobrecargas que suponen los tabiques situados por encima del de planta 1ª y por el peso del órgano. A nivel del forjado de terraza, dada la naturaleza de la cubierta, existen esfuerzos horizontales sin contrarrestar que pueden motivar los agrietamientos referidos. Se recomienda arriostrar los muros de forma adecuada y modificar el esquema estructural de la cubierta.

Existen, asimismo, procesos patológicos asociados a succiones del viento y empujes horizontales sin contrarrestar en los cuerpos de escalera anejos a la iglesia en fachada norte. Por un lado, se observan agrietamientos importantes en los muros laterales. Tras hacer tres catas y remover el revoco se comprueba también que dichas grietas tienen una gran amplitud y profundidad, incluso en algún caso son pasantes en todo el espesor del muro.

La causa de este agrietamiento está asociada a la acción de esfuerzos de carácter horizontal, fundamentalmente succiones del viento y esfuerzos horizontales de las bóvedas de las escaleras (la mayor parte de las cargas asociadas con éstas se transmiten a los muros laterales de las cajas de escaleras por las bóvedas a la catalana de los descansillos). Del mismo modo, también se asocia a la mala traba existente entre el muro de fachada norte y los muros perpendiculares, lo que motiva que frente a la acción de las cargas horizontales referidas se generen agrietamientos, de amplitud creciente con la altura, donde las tracciones producidas por la succión del viento son mayores (en tanto que los contrafuertes exteriores que existen en tal fachada no alcanzan la parte superior más solicitada).

Todas las causas referidas motivan que la unión rompa en el plano de mayor debilidad (aquel en que se presenta una mayor continuidad en llagas sucesivas), contorneando los mampuestos.

Por otro lado, se observan agrietamientos longitudinales entre el muro de fachada Norte y los descansillos abovedados de la escalera. Es otra causa aparente de dicho movimiento hacia el exterior del muro de fachada Norte de los cajones de escaleras.

Recapitulando, debido a los esfuerzos horizontales existentes y a la mala traba se han producido movimientos hacia el exterior de los muros de fachada norte que se encuentran

“suelos” en su parte superior, siendo su situación muy delicada y presentando un posible riesgo de colapso estructural.



*Agrietamientos y cata en el muro Oeste del cajón Este. Descansillo entre 2ª y 3ª planta.*



*Agrietamientos asociados con las rótulas plásticas formadas en las escaleras por imposibilidad de contener en su espesor la línea de presiones. Rótula plástica en la zanca que sube al forjado de 2ª planta*

A su vez los forjados de escalera de esta zona Norte se han visto sometidos a un desplazamiento y un reacomodo. La esbeltez de dichas bóvedas supone que la línea de presiones asociada a los esfuerzos que ha de soportar (peso propio y sobrecargas de uso) vaya muy forzada en su espesor, de forma que un movimiento horizontal hacia fuera del muro de fachada norte, suponga un cierto reacomodo de la bóveda que motiva que la línea de presiones no pueda ser contenida en el espesor existente, plastificando determinadas secciones de la escalera que se manifiestan mediante agrietamientos (rótulas plásticas) que al igual que ocurre con el agrietamiento de los muros transversales ganan en amplitud a medida que se asciende.

#### **4.- ESTUDIO ESTRUCTURAL DE LOS MUROS Y CIMENTACIÓN**

En este sentido se llevó a cabo el estudio estructural de los elementos portantes de la crujía 3-3' (al Norte) por ser la que presenta mayores luces, y de la torre SW. Los pasos seguidos son los que se indican:

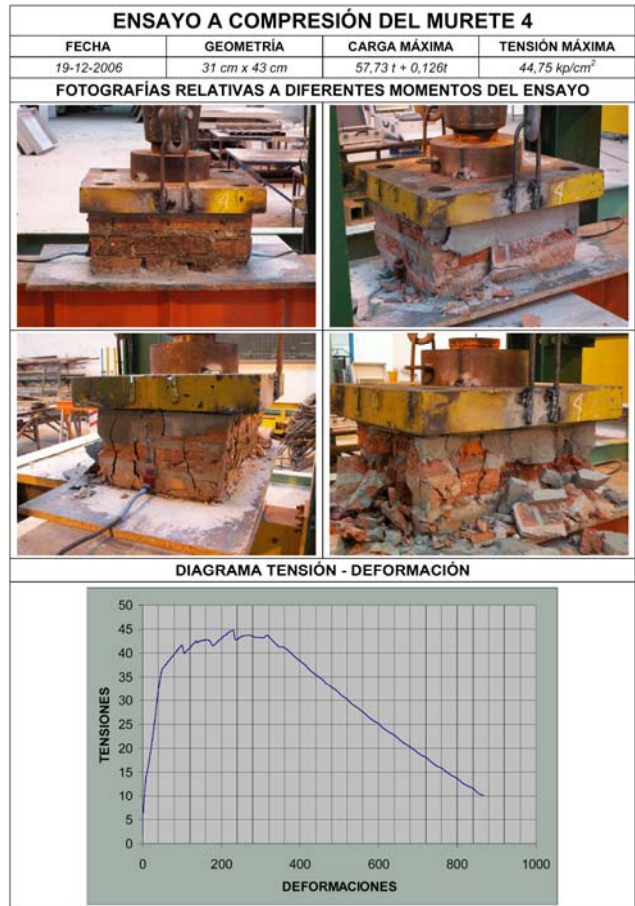
Se realizaron una serie de ensayos en el Laboratorio de Estructuras de la UC sobre muretes de fábrica de ladrillo extraídos de la construcción, para determinar la resistencia característica a compresión de la fábrica de ladrillo existente y tener un orden de magnitud de otras propiedades mecánicas relacionadas. Asimismo, en función de los materiales componentes de las mamposterías de piedra se estimaron sus características resistentes.



Extracción de de las muestras

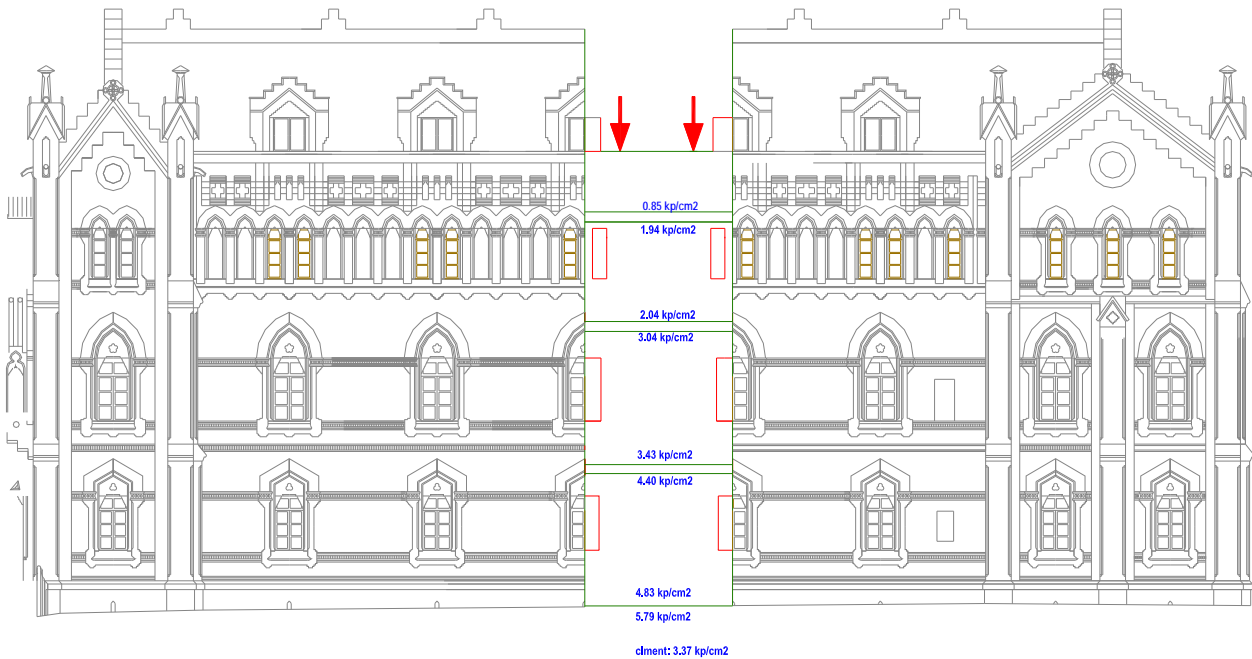


Configuración general del ensayo



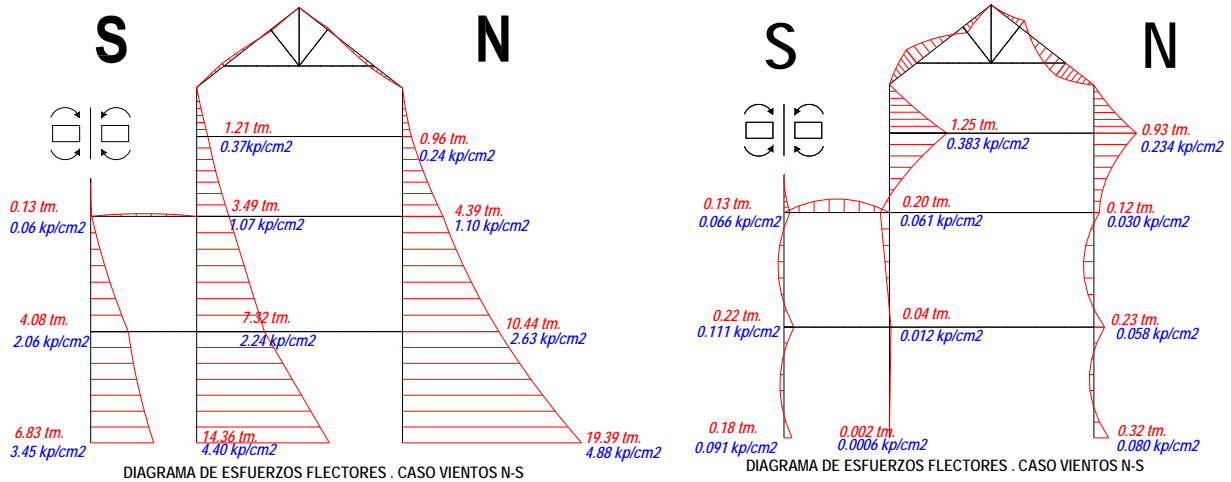
Resultados de uno de los ensayos realizados

Para cada uno de los **muros portantes de la cruzía 3-3'** se realizó una evaluación mediante cálculo manual de los niveles tensionales medios en servicio asociados a las cargas de peso propio y sobrecargas de uso, teniendo en cuenta los efectos de la excentricidad de los forjados.

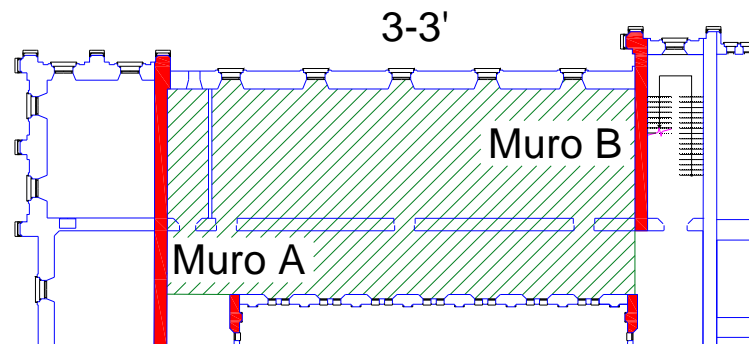


Croquis en el que indican los niveles de tensión medios en servicio (sin mayorar cargas) de distintos puntos críticos de los paños del muro de fachada norte de la sección 3-3'

De la misma forma, mediante un modelo de barras, se evaluaron los niveles tensionales en servicio asociados a las acciones de viento, tanto en la situación actual como en la situación futura.



Para la situación futura se ha considerado que todos los forjados existentes han sido demolidos y rehechos de hormigón armado. Bajo esta hipótesis el esquema estructural varía, en tanto que los forjados tienen capacidad de transmitir cargas en toda la longitud del muro comportándose como diafragmas rígidos que transmiten las sollicitaciones horizontales a los muros arriostrantes transversales que, mediante mecanismos de flexión y sobretodo de cortante, ofrecen una gran estabilidad a la construcción frente a dichas sollicitaciones (para ello se verificaron los muros transversales frente a esfuerzos de corte).



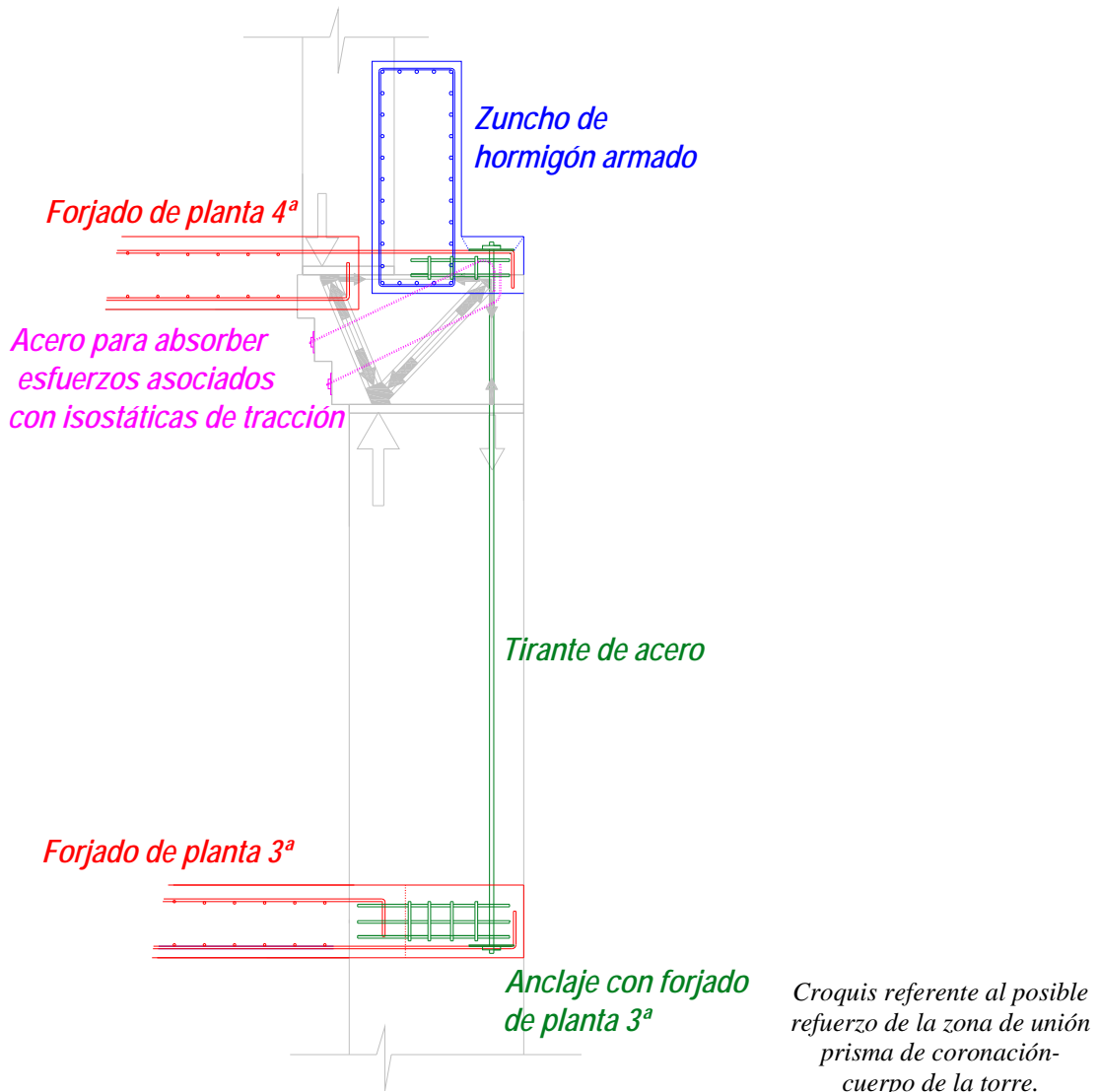
*Muros arriostrantes frente a esfuerzos horizontales en las inmediaciones de la crujía 3-3'*

En relación a los muros de la crujía 3-3' se concluye que todas las verificaciones realizadas para los puntos de control de tensiones analizados cumplen, a excepción del nivel tensional en cimentación del muro interno de la crujía 3-3'.

Por su parte, en relación con la comprobación estructural de los **muros de carga de la torre SW** puede concluirse que, en general, todas las verificaciones realizadas frente a mecanismos de compresión en los puntos de control de tensiones analizados cumplen. Además en el plano de entronque entre el prisma de coronación y los muros portantes subyacentes las mayores tracciones se producen en la zona central del paño y no en las esquinas, ya que en éstas últimas las cargas asociadas a los pináculos contribuyen a centrarnos la resultante de cargas aplicadas en ese plano, por lo que la excentricidad de la resultante se reduce bastante y por tanto las tracciones producidas.

Ante la necesidad de absorber dichos esfuerzos de tracción se propusieron diversas soluciones de posible refuerzo. Una posible solución apuntada es la disposición de una

cadena de atado de hormigón armado que zunche los cuatro muros, un forjado a modo de placa de hormigón con armado bidireccional que empotre puntualmente (a nivel de cada nervio) en dicho zuncho, y un tirante vertical anclado bien al muro de fábrica o bien al forjado del nivel inferior.



También se cree conveniente dejar constancia de que lo referido se deduce de la comprobación realizada para una hipotética situación futura en que todos los forjados existentes han sido demolidos y rehechos de hormigón armado. Asociado a dicha actuación los niveles tensionales normales debidos al peso propio del forjado y las sobrecargas de uso vinculadas a los usos que se pretende dar al inmueble, son mayores que los actuales, y además como los forjados de hormigón tienen capacidad de transmitir cargas en toda la longitud del muro (comportándose como diafragmas rígidos que transmiten la carga de unos muros a otros) el reparto de cargas entre éstos siempre se ve favorecida, es decir que las acciones predominantes de viento sobre uno de los muros (por ejemplo sobre el muro W en un viento con dirección W-E) se diluyen en ambos muros W y E, repartiéndose bastante. Lo aludido con anterioridad explica que en la actualidad se presenten importantes procesos patológicos de agrietamiento en la torre SW que han llevado incluso a motivar su “apuntalamiento” exterior, ya que en la situación actual los niveles tensionales normales son menores que los futuros (menor peso propio de los forjados y menores sobrecargas de uso), es decir los muros están más descargados, y dada la poca rigidez de los forjados de madera el

reparto de las acciones eólicas en los muros es limitada, concentrándose en el muro a barlovento (por ejemplo frente a un viento con dirección W-E las cargas mayoritariamente las absorbe el muro W), circunstancia esta última que motiva que las flexiones en dicho muro sean mayores y por ende los niveles tensionales en la cara de tracción también sean mayores, de forma que al combinar los estados tensionales referentes a peso propio y sobrecargas (menores que en el futuro) y los referentes a la acción del viento (mayores que en el futuro), las secciones con fibras a tracción crecerán en número, así como en el nivel de las tracciones. Por todo ello que los procesos patológicos en la actualidad sean bastante significativos.

Para finalizar este epígrafe cabe aludir a que la valoración estructural realizada tanto para los muros de las crujiás 3-3' como de la torre SW responde a una previsión de disposición de forjados de muro a muro, sin jácenas de carga. La idea de utilizar un número suficientemente amplio de elementos que apoyen en los muros (sin concentrar mucho las cargas en un número reducido de jácenas portantes), debiera, en nuestra opinión, tenerse en cuenta a nivel de proyecto. Ello permite repartir adecuadamente las cargas en los muros portantes, sin concentrar excesivamente aquéllas en los mismos.

Caso de adoptar como solución constructiva la disposición de jácenas de carga para acortar las luces de forjados, sería necesario llevar a cabo una comprobación de los niveles tensionales en las secciones de los muros en que apoyen dichas jácenas.

## **5.- ESTUDIO ESTRUCTURAL DE OTROS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS**

El Estudio de Ingeniería DÍNAMIS ha realizado la comprobación estructural de diferentes zonas de la edificación. Entre las zonas verificadas cabe relacionar las siguientes:

- Nave central de la iglesia que incluye una estructura principal formada por contrafuertes y arcos ojivales junto a las cúpulas, forjados, cerchas de cubierta y torres de la misma.
- Zona central sur, que esta formada por el hall de entrada, paraninfo, cubierta y torre del reloj, en esta zona también se analiza la fachada que cierra estos habitáculos.
- Forjados de madera del edificio.
- Aljibe situado en uno de los claustros del edificio.

## **6.- ESTUDIO GEOTÉCNICO**

Ha sido llevado a cabo por TRIAX y su objetivo fue el establecer las condiciones de cimentación de las diferentes zonas y elementos del edificio, con especial consideración de aquéllas que pudieran tener que ver con patologías estructurales, observadas en fachadas exteriores, y en tabiquerías y solados interiores; conocer la tipología y capacidad portante de nuevos apoyos, y discernir cuáles pueden resultar precarios necesitando proceder a su refuerzo o recalce.

En relación a las características geotécnicas de los materiales afectados aludir a que bajo el edificio a estudiar, tiene lugar el contacto entre dos formaciones rocosas:

- Areniscas poco cementadas y lutitas en la zona N y NW del edificio.
- Calizas y dolomías en el resto del inmueble.

En relación a las cimentaciones puede concluirse que la tipología de cimentación utilizada en todos los casos es muy similar, con muros de carga apoyados sobre zanjas rellenas de gravas

calcáreas, con cierto grado de cementación. Sin embargo, la geometría y composición de la cimentación difiere de unos puntos a otros. Aparentemente, en todos los casos, con una mayor o menor profundidad y anchura de la zanja de gravas calcáreas, la transferencia de las cargas se realiza al sustrato rocoso.

En lo que respecta a las tensiones admisibles asociadas a cada situación, cabe referir que para el caso de las calizas y dolomías puede considerarse una presión admisible  $p_{adm} = 16,1 \text{ kp/cm}^2$  y para el caso de las areniscas poco cementadas y lutitas una de  $p_{adm} = 4,50 \text{ kp/cm}^2$ .

## **7.- ESTUDIO DE LOS MATERIALES PÉTREOS, LADRILLOS Y MORTEROS. POSIBLES TRATAMIENTOS ASOCIADOS.**

La caracterización de los materiales de referencia fue llevada a cabo por LADICIM-UC y fue realizada en dos fases de trabajo, la primera comprende las acciones experimentales para la caracterización física, química y mecánica de los materiales utilizados en la construcción original del edificio, y la segunda fase de trabajo, la realización de estudios específicos de durabilidad de los materiales considerados.

Se han planteado una serie de experimentos aplicados a cada grupo de materiales considerados (piedras, ladrillos y morteros). La caracterización de la **composición química** de los materiales se ha realizado mediante microanálisis elemental con sonda electrónica (EDAX) y análisis mineralógico por difracción de rayos X (XRD). La **caracterización física** de los elementos pétreos, con la realización de ensayos para la determinación de las densidades aparente y relativa, la porosidad y la absorción de agua de cada uno de ellos. La **caracterización mecánica** de los elementos de piedra y ladrillo se ha llevado a cabo mediante ensayo de probetas para estimar la resistencia mecánica a compresión. Los ensayos encaminados a caracterizar la **durabilidad** de las probetas de material, ensayos de heladicidad y ciclos de humedad/sequedad, tratan de establecer el control de la pérdida de masa de una probeta después de estar sometida a un programa de ciclos así como la posterior estimación de la pérdida de propiedades mecánicas mediante la realización de ensayos de rotura a compresión tras completarse un programa de ciclos.

La empresa CHEMPRO ha analizado el estado de conservación de los materiales pétreos, ladrillos y morteros involucrados en las fachadas, con el objetivo de tomar consciencia de su situación actual, así como proponer tratamientos terapéuticos aplicables a dichos materiales para protegerlos y consolidarlos. Para ello se realizó una campaña experimental en base a ensayos de absorción de agua, ensayos de succión de agua, ensayos de eflorescencias y ensayos de abrasión.

En base a los estudios desarrollados se recomendó un saneamiento previo de todo el conjunto a tratar y ,posteriormente, realizar sobre las fábricas de ladrillo una consolidación, seguida de una hidrofugación superficial. La finalidad es reforzar la estructura microcristalina de los ladrillos y reducir su absorción de agua. En el caso de las piedras calizas y calizas margosas, se recomienda la aplicación de una sola mano de producto hidrofugante, porque debido a su baja absorción al aplicar el tratamiento completo (dos capas de material hidrófugo) se produce una leve alteración del aspecto original de la piedra (una ligera subida del tono de color de la piedra).

Además, en base a los resultados de resistencia a la abrasión de que se dispone puede concluirse que el tratamiento mejora levemente la resistencia a la abrasión en todos los casos, circunstancia que motiva una mayor resistencia a la erosión eólica del material expuesto al exterior.



## **8.- ESTUDIO DE HUMEDADES.**

Este trabajo fue sido confiado a los Profesores Gerónimo Lozano y Alfonso Lozano. De forma general, desde el punto de vista de las humedades, se entiende que el inmueble fue objeto de dos intervenciones desafortunadas que, unidas a su antigüedad, a la diferente calidad respecto a diseño y materiales de la zona noble y del resto del inmueble, y a la falta de mantenimiento y el abandono sufrido por el mismo durante más de un tercio de su existencia, explican y justifican la situación actual. Dichas intervenciones han sido en primer lugar el corte del atirantado transversal, acaecido en un momento de su historia, que ha roto la enlazabilidad necesaria a una estructura de muros de carga con elevadas luces en los vanos y esbelteces en las fábricas. Como consecuencia, sus encuentros se han transformado en vías de agua. Y en segundo lugar la modificación de la red de pluviales y la posterior obturación de algunas bajantes que ha sobrecargado a otras, y así una parte de los canalones, que en lugar conducir las aguas al exterior, las vierten al interior del bajo cubierta del que descienden a través de los alfarjes.

En base a las lesiones observadas, tras el proceso deductivo desarrollado y con la ayuda de la instrumentación, puede diagnosticarse la existencia de un proceso primero y principal de filtraciones de agua desde la envolvente superior (cubiertas y terrazas) y a través de los buhardillones, éstas en colaboración con la acción de las plantas. Principalmente dicho proceso se inició con el corte de los tirantes existentes a nivel del bajo cubierta, encargados de garantizar el monolitismo del edificio al arriostrar sus fábricas y reducir sus longitudes de pandeo. Posteriormente, el agua infiltrada provocó otros procesos secundarios muy diversos. Los más virulentos para el edificio fueron los debidos a los agentes xilófagos sobre los componentes de madera, los procesos físicos de capilaridad y de expansión y retracción hídrica que afectan las fábricas, y los procesos químicos de disolución y cristalización de las sales solubles que arenizan los ladrillos y exfolian los sillares.

En relación a la terapéutica a aplicar referente a los procesos patológicos debidos al agua, se recomienda reestructurar el edificio a fin de cortar la entrada de agua a través de las fracturas de sus fábricas y de devolverle la enlazabilidad perdida, remodelar la red de evacuación de pluviales para cortar las filtraciones y erradicar la vegetación de la cobertura, impermeabilizar las terrazas de los claustros y así evitar la entrada de agua a los mismos, el saneamiento de los patinillos que circundan la iglesia, la instalación de una red de drenaje que recoja el agua de las bajantes y corte el ascenso del agua capilar.

## **9.- ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL.**

Este trabajo ha sido realizado por MONTAÑESA DE DESINFECCIÓN con el objetivo de analizar la degradación existente sobre determinados elementos de madera del Seminario Mayor de la Universidad Pontificia de Comillas, para ello se escogieron varias zonas de muestreo, donde el estudio fue más intenso, así como otras zonas concretas. Para llevar a cabo el análisis se realizó:

- Inspección visual de los signos de deterioro producidos por organismos xilófagos mediante observación de superficie y/o técnicas de visión artificial (endoscopio).
- Medición de la humedad relativa de las piezas de madera, mediante análisis instrumental.
- Realización de catas con brocas específicas para madera para determinar la dureza y su profundidad (métodos pseudo no destructivos).

- Métodos sónicos para la determinación de actividad de los hipotéticos organismos xilófagos.
- Análisis de la información recogida en las visitas a obra para detectar el estado en que se encuentra la madera en las zonas investigadas.
- Propuesta de soluciones eficaces para su posterior tratamiento, adecuándolo a cada situación.

En general, la infestación que presenta el edificio respecto a anóbios y líctidos es totalmente aceptable teniendo en cuenta los años de construcción y es solucionable con tratamientos de inyección (riesgo 3) y pulverización (riesgo 1 y 2) en la madera que se vaya a dejar en la rehabilitación. Los problemas de hongos se solucionarán, en cuanto se rehabilite el edificio y desaparezcan las humedades, mediante una impregnación de productos fungicidas. El hecho de la rehabilitación va a suponer que se disminuyan los porcentajes de humedad en la madera y en paredes, lo que hará que la madera tenga una humedad insuficiente para la supervivencia de termitas y hongos. Es necesario realizar una inyección en las cabezas de vigas y viguetas empotradas en muros con productos fungicidas e insecticidas, puesto que la humedad tardará en eliminarse por completo y así evitamos la nueva proliferación de esporas o termitas mientras dura este proceso de secado.



*Inspección visual de signos producidos por organismos xilófagos mediante técnicas de visión artificial (endoscopio). Cortesía Montañesa de Desinfección.*



*Métodos sónicos para la determinación de actividad de los hipotéticos organismos xilófagos. Cortesía Montañesa de Desinfección.*

Se ha detectado la presencia de térmitas en varias zonas del edificio. Para solucionarlo habría que empezar los trabajos de control antes de comenzar las obras de rehabilitación en el edificio, ya que el movimiento ocasionado durante éstas, haría que desaparecieran temporalmente las termitas hacia los termiteros exteriores, hacia el interior de muros, zonas libres de obras o edificios colindantes, volviendo al inmueble que nos ocupa en cuanto terminasen los trabajos de rehabilitación. Para evitarlo es necesario comenzar a colocar cebos atrayentes hacia los exteriores, intentando tomar contacto con las diferentes colonias de termitas, y a partir de ahí, comenzar su tratamiento. En relación a los tratamientos susceptibles de aplicación frente a termitas cabe distinguir entre:

- Tratamiento inicial (antes de comenzar las obras). Constaría de cuatro fases, la inspección de zonas a tratar y determinación de puntos de control; la colocación de cebaderos para mapeo; la revisión cada 15 días y cuantificación de resultados; y por último la colocación de cebos biocidas en las estaciones de control. El tiempo mínimo estimado para establecer contacto con termitas en el exterior de los inmuebles es de seis meses.

- Tratamiento de control total. Consistiría en el seguimiento mensual o bimensual de todas las estaciones de cebo con reposiciones de las que sean necesarias; y la colocación de nuevos cebaderos en el interior del inmueble a medida que vaya avanzando la obra de restauración dejando accesibilidad a estos cebaderos. El tiempo mínimo de tratamiento estimado en un control total de térmitas será de cinco años.
- Tratamiento preventivo. A este respecto se dejarán instaladas varias estaciones de cebo sin biocidas y su revisión se efectuará cada 4 meses. En el caso de aparición de termitas se actuará de forma de choque aumentando las revisiones y aplicando biocidas inhibidores de quitina.

La madera que no sea susceptible de sustitución por exigencias mecánicas, es decir la que se vaya a mantener en la restauración, es imprescindible tratarla para su protección y eliminación de la infestación existente, bien por sistemas de inyección (cabezales o empotramientos) o por impregnación según el tipo de infestación y grado de ataque que padezcan. En caso de emplear nuevos elementos de madera durante las obras de rehabilitación será imprescindible que toda esta madera se encuentre tratada por el sistema de autoclave de vacío-vacío con productos orgánicos (vigas, viguetas, tarima de suelos, rastreles, marcos de puertas, marcos de ventanas, ventanas) cubriendo el tipo de riesgo 3. Toda la madera nueva deberá ir certificada en su tratamiento con garantía al efecto y el tipo de riesgo que cubre.

## **10.- CONCLUSIONES**

Una vez realizado el estudio entendemos que los principales procesos patológicos que presenta la estructura del Seminario Mayor de Comillas, a la postre nueva sede de la Fundación Comillas, han sido detectados y se han diagnosticado cuáles de ellos son graves y debieran ser objeto de reestructuración en la fase del proyecto de ejecución.

## **11.- RECONOCIMIENTO**

Los autores de este artículo técnico desean agradecer a la Sociedad de Activos Inmobiliarios Campus Comillas, S.L. y al Plan de Gobernanza Tecnológico 2006 (Exp. PGT 33/2006) del Gobierno de Cantabria el habernos confiado los “Estudio previos” a la rehabilitación del Seminario Mayor de Comillas, de los cuáles se han recogido la mayoría de las fotografías y dibujos que ilustran el presente artículo.

## **Conservación del patrimonio construido: caracterización de los materiales pétreos originales del edificio de la Universidad Pontificia de Comillas**

C. Thomas<sup>1</sup> ([thomasc@unican.es](mailto:thomasc@unican.es)), J. Setién<sup>1</sup> ([setienj@unican.es](mailto:setienj@unican.es)) y J. A. Polanco<sup>2</sup> ([polancoa@unican.es](mailto:polancoa@unican.es))

<sup>1</sup> *Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, España.*

### **1.- INTRODUCCIÓN**

La presente actuación se enmarca dentro del conjunto de acciones y pautas previstas para la realización de un estudio previo de viabilidad técnica para la redacción del proyecto de rehabilitación del conjunto de edificios que constituyen la Universidad Pontificia de Comillas, erigido en la Villa de Comillas (Cantabria, España) en el año 1890.

En el presente artículo, se presentan los resultados experimentales encaminadas a lograr la completa caracterización física, química y mecánica de los materiales pétreos utilizados en la construcción original del edificio. Asimismo, este trabajo contempla la realización de estudios específicos de durabilidad de los materiales considerados.

### **2.- MATERIALES**

Como resultado de la inspección visual previa llevada a cabo sobre el cerramiento del edificio, se han identificado tres tipos principales de materiales de construcción perfectamente diferenciados: ladrillos de arcilla cocida y piedras naturales en fachadas, paramentos, tabiques, muros y otros elementos arquitectónicos, y el mortero de unión que los mantiene cohesionados, confiriendo estabilidad e integridad estructural al conjunto.

Los ladrillos, de distintas calidades, manifiestan grados de conservación dispares, por lo que será necesario caracterizar tanto aquéllos que se encuentran sensiblemente deteriorados, como los que presentan buen estado, centrándose, esencialmente, en la evaluación de sus capacidades portantes a través de la determinación de las correspondientes resistencias mecánicas en cada caso.

Por otra parte, el análisis visual previo ha revelado la existencia de tres tipos distintos de piedra natural empleada en la mampostería del edificio: piedra caliza, areniscas y rocas intermedias de composición presumiblemente margosa. En este caso, además de la caracterización mecánica, resulta pertinente la realización de ensayos físicos para la determinación de densidades y porosidades que puedan condicionar su durabilidad.

En el caso de los ladrillos, en una segunda inspección más detallada, se han podido diferenciar cuatro tipos distintos, según forma y grado de cocción, localizados en distintas zonas del edificio y encontrándose, a menudo, combinados formando parte de la misma construcción.

Por último, es relevante determinar el estado en que se encuentra el mortero empleado como elemento de unión, para lo cual es preciso llevar a cabo una completa caracterización, tanto química como mineralógica, de sus componentes.

### **3.- CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA DE LOS MATERIALES**

Para la caracterización analítica de los materiales considerados, se ha procedido a tomar una fracción de cada muestra y desecarla en estufa a 105 °C hasta peso constante. Una vez secas, las muestras son trituradas en un molino de ágata hasta hacerlas pasar enteramente por el tamiz N° 100 de la serie ASTM. Por su parte, las muestras destinadas a observación y análisis por microscopía electrónica de barrido, no han requerido de ninguna preparación adicional.

#### **3.1.- Microanálisis elemental con sonda electrónica (EDAX)**

Para estos análisis, se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM – 5800 LV, equipado con microanálisis por energía dispersiva de rayos X. Se han realizado tres determinaciones distintas en otras tantas zonas de la muestra y, los resultados obtenidos, son presentados como los correspondientes valores medios. Para la cuantificación de los elementos presentes en la muestra, se ha utilizado la corrección estándar ZAF 4. Esta técnica permite, asimismo, la observación microscópica de las muestras, por lo que también es posible discernir algunos detalles morfológicos.

##### **Rocas naturales**

En el caso de las rocas naturales, morfológicamente, las microestructuras de la caliza, la marga y la arenisca son normales, siendo la estructura más abierta de todas, como cabía esperar, la correspondiente a la arenisca.

Analíticamente, las composiciones son las propias de este tipo de materiales: calcio mayoritario (82.34%) en el caso de la caliza margosa, con algunas trazas de silicio (7.43%), magnesio (4.76%), aluminio (2.43%) y hierro (1.74%); calcio, oxígeno y carbono como elementos principales en la caliza (42.7%, 42.41% y 14.89%, respectivamente); y, finalmente, presencia mayoritaria de silicio (69.59%) en la arenisca, con contenidos también considerables de potasio (14.75%), aluminio (9.51%) y, en menor medida, hierro (4.72%).

##### **Ladrillos**

En el caso de los ladrillos, se ha encontrado silicio (33.34%) como elemento mayoritario, así como aluminio (14.08%), hierro (6.87%), potasio (5.85%) y calcio (3.51%). Asimismo, se han registrado contenidos importantes de elementos no usuales en este tipo de materiales, como pueden ser el cloro o el sodio. Así, por ejemplo, los contenidos de cloro en el ladrillo ascienden a la cifra de 22.93%, con niveles de sodio de 9.98%. No se aprecian cantidades significativas de cloro y/o sodio en las rocas naturales, aunque sí en los morteros analizados.

La aparición combinada de estos dos elementos hace suponer la presencia de cloruro sódico, cuyo origen puede estar en la exposición prolongada de estas superficies porosas a un ambiente marino por proximidad a la costa o bien a que en la elaboración del mortero se ha empleado agua de mar, no descartándose en ningún caso la contribución de ambos factores. Para contrastar este extremo, se han realizado determinaciones equivalentes a las anteriores sobre una porción de mortero.

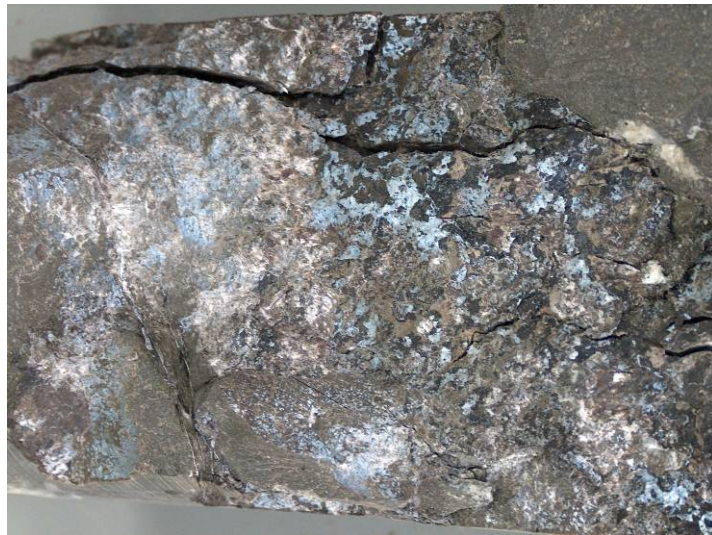
##### **Mortero**

Su estructura se comprueba que es abierta, por lo que, previsiblemente, su porosidad será elevada; además, se registra la presencia de pequeñas partículas de naturaleza silíceas utilizadas como relleno. En lo que respecta a los análisis elementales, destaca la

abundancia relativa del calcio (46.49% para el mortero de la piedra natural y 55.46% para el mortero de la fábrica de ladrillo); el silicio, siendo el segundo elemento en importancia (oscilando entre 4.3% y 9.31%), proviene del árido empleado. Se completa el análisis con cantidades variables de aluminio (3.51% y 1.11%), magnesio (0.93% y 0.55%) y, en menor medida, de potasio (0.85% y 0.6%) y hierro (1.34% y 0.93%). De los resultados obtenidos se desprende que se trata, en todos los casos, de un mortero de cal, arcilloso en el caso del mortero de la piedra natural, lo cual justifica su tono amarillento característico. En cuanto a los contenidos de cloro y sodio, son sensiblemente más altos en el mortero de ladrillo que en el de piedra natural, 2.92% y 1.33%, respectivamente.

### Cristalización

Tras los ensayos mecánicos, se detectó, en el interior de una veta de un testigo de caliza margosa, una cristalización de color azulado que también fue analizada mediante microsonda electrónica de barrido, revelando la presencia de azufre (24.03%) y hierro (6.22%).



*Figura 1: Cristalización interna en caliza margosa.*

Según la interpretación de los diversos análisis realizados, los cristales de esta muestra probablemente corresponden a un sulfato de hierro hidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) mineralógicamente conocido como melanterita.

La melanterita es uno de los pocos sulfatos minerales solubles en agua, que da lugar a eflorescencias que forman incrustaciones con tonos que varían desde el blanquecino hasta el azul verdoso, y procede de la transformación de otros sulfatos de hierro como la pirita, la pirrotita, la marcasita o la calcopirita.

### Tierra

Asimismo se ha analizado una pequeña cantidad de tierra recogida del suelo de la zona noble como posible origen de las eflorescencias encontradas en el interior del edificio. Se descarta esta causa debido a que la proporción de azufre encontrada, inferior al 2%, no es suficiente como para justificar la gran cantidad de sulfato de sodio encontrada en las eflorescencias, como se verá a continuación. Por lo tanto, el origen de tales cristalizaciones debería buscarse en las filtraciones de aguas de lluvia que, a lo largo de los años, han tenido lugar y que han circulado a través de distintos materiales,

arrastrando, con ellas, unas cantidades de azufre suficientes como para producir las eflorescencias.

### **3.2.- Análisis mineralógico por difracción de rayos X (XRD)**

Para la caracterización por difracción de rayos X, se ha utilizado un difractómetro de rayos X PHILIPS PW 1820. La técnica empleada ha sido la del polvo cristalino, (método de DEBYE – SCHERRER, modificado por sustitución de la cámara de registro fotográfico por un detector proporcional) realizándose un barrido angular de la muestra entre  $2\theta = 4^\circ$  y  $2\theta = 80^\circ$ , siendo  $\theta$  el ángulo de Bragg. La interpretación del difractograma obtenido, se realiza en base al método HANAWALT, haciendo uso de las fichas compiladas en el Powder Diffraction File Search Manual publicado por la American Society for Testing Materials (ASTM).

#### Morteros

Mineralógicamente el mortero utilizado para la piedra y el utilizado para el ladrillo son básicamente idénticos, confirmándose la utilización de arena de sílice y cal para su fabricación. De igual manera, el mortero utilizado como revoco en la fachada del claustro posee una composición mineralógica similar, tratándose, por lo tanto, de otro mortero en base a cal. Asimismo, en los tres casos se encuentran cristalizaciones de cloruro de sodio.

#### Eflorescencias

En el caso de las eflorescencias recogidas de las paredes, destacan los sulfatos de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , thenardita) con una procedencia pendiente de investigar. Las dos muestras, correspondientes al claustro oeste y a las escaleras de la entrada principal, presentan la misma estructura cristalina con la única diferencia de que en el caso del claustro las sales se encontraban hidratadas ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , mirabilita), deduciéndose, de ello, que las cristalizaciones de las escaleras de la entrada principal han sufrido un proceso de desecación.

## **4.- CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS MATERIALES**

La caracterización física de las piedras objeto de estudio, ha comprendido la realización de ensayos para la determinación de las densidades aparente y relativa, la porosidad y la absorción de agua de cada una de ellas. Para ello, se han seguido las directrices especificadas en la Norma española UNE – EN 1936: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total”.

La metodología experimental utilizada ha consistido en el secado inicial de las piedras en estufa a  $105^\circ\text{C}$  hasta peso constante. Una vez alcanzado este estado, se pesan las muestras secas. A continuación, se introducen las muestras en una celda en la que se hace el vacío durante 24 horas con ayuda de una bomba, de tal forma que se extrae el aire del interior de la porosidad abierta del material.

Seguidamente, se introduce lentamente agua en la celda hasta cubrir las muestras, de modo que la sobrepresión creada facilita la introducción del agua en sus poros accesibles; en este estado, se mantienen las muestras durante otras 24 horas. Finalmente, se coloca la celda de vacío a presión atmosférica y se mantienen las probetas sumergidas durante 24 horas más. Concluido el proceso, se seca rápidamente la superficie de las muestras con un paño y se pesan en condición de saturación.

Por otra parte, para determinar el volumen aparente de las muestras, se hace uso de una balanza hidrostática modificada; para ello se evalúa el peso de las muestras completamente sumergidas en agua, suspendidas de un hilo de nylon. Estas medidas proporcionan directamente el volumen de agua desplazado por las muestras (puesto que la densidad del agua es 1 g/cm<sup>3</sup>) y, consecuentemente, el volumen aparente (V<sub>a</sub>) de la misma.

En la Tabla 1, se presentan los resultados correspondientes a la caracterización física de las muestras de roca natural seleccionadas.

	Arenisca	Caliza	Marga
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.35	2.60	2.68
Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> )	2.64	2.69	2.70
Coefficiente de absorción (% en peso)	4.51	1.29	0.26
Porosidad (% en volumen)	11.11	3.40	0.71

Tabla 1: Propiedades físicas. Rocas naturales

Como era previsible a partir de la observación macro y microestructural de las rocas, la mayor porosidad corresponde a la piedra arenisca y la menor a la caliza margosa.

De acuerdo con la clasificación de las calizas de construcción (ASTM – C568 y C503) como ligeras, medias y pesadas en función de su densidad, absorción y resistencia, la caliza analizada corresponde al tipo medio dado que su densidad aparente es superior a 2.56 g/cm<sup>3</sup>, su coeficiente de absorción es inferior al 3% pero su resistencia a compresión, como se verá, no supera los 53 MPa. La piedra caliza margosa presenta una porosidad y un coeficiente de absorción prácticamente despreciables.

En la Tabla 2, se presentan los resultados correspondientes a la caracterización física de las muestras de ladrillo seleccionadas.

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.01	1.69	1.70	1.61
Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> )	2.43	2.27	2.44	2.32
Coefficiente de absorción (% en peso)	7.99	13.14	15.05	15.95
Porosidad (% en volumen)	17.44	25.62	30.11	30.56

Tabla 2: Propiedades físicas. Ladrillos

En el caso del ladrillo, la porosidad llega a alcanzar valores por encima del 30 % y la absorción se sitúa en torno al 15 %. En este sentido, las imágenes tomadas con el microscopio electrónico confirman la poca cohesión del material debido, probablemente, a la baja temperatura de cocción.

De los resultados de los 4 tipos de ladrillo estudiados, se deduce que el Tipo 1 es el único que presenta unas propiedades bien diferenciadas del resto, presentando, también, una geometría diferente. De ello se desprende que los tipos 2, 3 y 4 son el mismo tipo de ladrillo (poseen además la misma geometría y posiblemente idéntico origen) con la salvedad de que han podido recibir distintos grados de cocción.



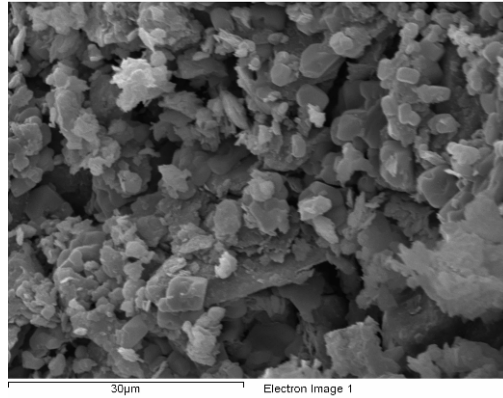


Figura 2: Microfotografía de la estructura del ladrillo.

## 5.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA. DETERMINACIÓN DE RESISTENCIAS

Para la estimación de las resistencias mecánicas a compresión, se han seguido las regulaciones establecidas en la Norma UNE – EN 1926: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión”. Se ha utilizado en la ejecución práctica del ensayo una prensa hidráulica de 150 toneladas de capacidad.

Las probetas ensayadas, extraídas de los correspondientes testigos de roca natural, tenían una geometría cilíndrica con un diámetro de  $\varnothing = 40$  mm y  $\varnothing = 80$  mm con distintas alturas (H). En algunos casos, como se aprecia en las Figuras 3, 4 y 5, no se verificaba la relación óptima  $H/\varnothing = 2$ , por lo que ha sido preciso aplicar a los resultados obtenidos la pertinente corrección multiplicativa por esbeltez. En el caso de los ladrillos, las probetas ensayadas a compresión se obtuvieron realizando una perforación, también cilíndrica, de  $\varnothing = 40$  mm, en el sentido de carga.



Figura 3: Testigos de roca arenisca



Figura 4: Testigos de roca caliza



Figura 5: Testigos de roca margosa



Figura 6: Testigos extraídos por perforación cilíndrica en dos distintos tipos de ladrillo.

En la Tabla 3, se recogen los resultados de los ensayos de resistencias mecánicas a compresión realizados sobre las muestras extraídas a partir de los testigos de roca

natural seleccionados. Estos resultados ya incluyen las pertinentes correcciones por esbeltez.

	Arenisca				Caliza			Marga		
Muestra:	A1	A2	A3	A4	C1	C2	C3	CM1	CM3	CM4
R <sub>m</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]:	834.1	904.8	728.5	772.5	353.43	452.4	539.2	1104.7	1128.8	480,6
R <sub>m</sub> [MPa]:	81.74	88.67	71.39	75.71	34.64	44.33	52.85	108.26	110.62	47.11*
$\overline{R}_m$ [MPa]:	79.38				43.94			109.44		

Tabla 3: Resistencias mecánicas a compresión de rocas naturales.

Como puede comprobarse, la arenisca presenta una resistencia a compresión muy próxima a los 80 MPa y la piedra caliza margosa supera los 100 MPa. De los resultados obtenidos, se puede deducir que tanto la piedra arenisca como la caliza margosa son de excelente calidad. La roca caliza no es tan resistente, situándose el valor medio de su resistencia a compresión en torno a los 40 MPa, lo cual podrá ser explicado atendiendo a la forma de rotura de las muestras ensayadas.

En efecto, la forma de rotura de las areniscas y la caliza margosa es la típica en estos casos, con superficies de fractura típicas a 45°. Sin embargo, la propagación de las fisuras que han tenido lugar en la rotura de la muestra de caliza, se explican como consecuencia de las muy abundantes vetas del material.

En el caso de los ladrillos, se obtuvieron varias muestras de los 4 tipos de ladrillo diferentes, muestras todas ellas en un estado de conservación bueno.

En las Tablas 4, 5, 6 y 7 se recogen los resultados de los ensayos de resistencias mecánicas a compresión realizados sobre las muestras extraídas a partir de los testigos de ladrillo de distintos tipos, consideradas las pertinentes correcciones por esbeltez de las probetas.

Ladrillo Tipo 1. Origen de la muestra: solera templete.



	Ladrillo Tipo 1				
Muestra:	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
R <sub>m</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]:	130,89	101,85	138,36	117,86	112,03
R <sub>m</sub> [MPa]:	11,68	9,35	12,36	10,80	10,37
$\overline{R}_m$ [MPa]:	10,92				

Tabla 4: Resistencias mecánicas a compresión de ladrillos Tipo 1

Ladrillo Tipo 2. Origen de la muestra: pilar templete.



	Ladrillo Tipo 2				
Muestra:	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
R <sub>m</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]:	91,17	91,79	106,55	93,51	94,33
R <sub>m</sub> [MPa]:	7,79	7,80	9,20	7,67	8,04
$\overline{R}_m$ [MPa]:	8,10				

Tabla 5: Resistencias mecánicas a compresión de ladrillos Tipo 2

Ladrillo Tipo 3. Origen de la muestra: machón templete.



	Ladrillo Tipo 3				
Muestra:	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
$R_m$ [kg/cm <sup>2</sup> ]:	101,36	58,89	158,47	135,30	109,09
$R_m$ [MPa]:	8,01	4,69	12,94	10,96	9,16
$\bar{R}_m$ [MPa]:	9,15				

Tabla 6: Resistencias mecánicas a compresión de ladrillos Tipo 3

Ladrillo Tipo 4. Origen de la muestra: sótano (lado sur).



	Ladrillo Tipo 4				
Muestra:	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
$R_m$ [kg/cm <sup>2</sup> ]:	65,94	92,54	35,45	18,66	74,08
$R_m$ [MPa]:	5,59	7,59	3,15	1,63	6,87
$\bar{R}_m$ [MPa]:	4,96				

Tabla 7: Resistencias mecánicas a compresión de ladrillos Tipo 4

## 6.- DURABILIDAD. ENSAYOS DE HELADICIDAD Y CICLOS DE HUMEDAD/SEQUEDAZ

Con el fin de evaluar la durabilidad de las distintas piedras y ladrillos, se ha optado por la realización de ensayos de heladicidad (hielo/deshielo, según la norma EN - 12371:2001 “Determinación de la resistencia a la heladicidad”) y ciclos de humedad/sequedad. En estos ensayos, tras llevar las probetas a secado hasta peso constante y pesarlas en esta condición, se saturan de agua por inmersión completa durante 48 horas. Una vez saturadas, se ejecuta un programa de ciclos de hielo – deshielo o humedad – sequedad según sea el caso. En el ensayo de heladicidad las muestras son introducidas durante 6 horas en una cámara frigorífica a la temperatura de 20 grados bajo cero y, a continuación, se sumergen durante 18 horas en agua a 20 °C. Esta alternancia de procesos hielo – deshielo se mantiene durante un total de 20 ciclos. En el caso de los ciclos de humedad – sequedad, las muestras se introducen en una estufa calefactora a una temperatura de 105 °C durante 24 horas para, a continuación, sumergirlas en agua otras 24 horas. Este proceso se repite 10 veces.

La evaluación del posible daño producido en el material a consecuencia de la acción expansiva de la transformación del agua líquida en hielo en el caso de los ciclos de hielo - deshielo o la producida por la acción de la evaporación del agua en el caso de los ciclos de humedad - sequedad, puede abordarse de distintas maneras. La más usual es el control de la pérdida de masa experimentada por la probeta en estado seco a la finalización del programa de ciclos. Un método alternativo es la estimación de la posible pérdida de propiedades mecánicas mediante la realización de ensayos de rotura a compresión de las probetas tras haber completado el programa de ciclos previsto.

En las Tablas 8 y 9, se presentan los resultados correspondientes a la durabilidad frente a ciclos de heladicidad de las muestras seleccionadas.

	Arenisca		Caliza		Marga	
Pérdida de masa [g]:	0,21	0,20	0,10	0,21	0,20	0,20
Pérdida de masa [%]:	0,09	0,13	0,03	0,09	0,13	0,13
Pérdida media de masa [%]:	0,10		0,02		0,10	

Tabla 8: Rocas naturales. Pérdida de masa por Ciclos de hielo/deshielo

	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	Tipo 4
Pérdida de masa [g]:	0,12	0,11	0,22	0,24	0,24	0,18
Pérdida de masa [%]:	0,15	0,14	0,27	0,29	0,31	0,23

Pérdida media de masa [%]:	0,14	0,28	0,31	0,23
----------------------------	------	------	------	------

*Tabla 9: Ladrillos. Pérdida de masa por Ciclos de hielo/deshielo*

Destacan, por un lado la poca o ninguna pérdida de masa sufrida por la roca caliza y, por otro, la pérdida sufrida por los ladrillos de Tipo 2, 3 y 4.

En las Tablas 10 y 11, se presentan los resultados correspondientes a la durabilidad frente a ciclos de humedad-sequedad de las muestras seleccionadas de roca natural y ladrillo, respectivamente.

	Arenisca		Caliza		Marga	
Pérdida de masa [g]:	0,18	0,12	0,00	0,20	0,31	0,16
Pérdida de masa [%]:	0,07	0,06	0,00	0,06	0,19	0,08
Pérdida media de masa [%]:	0,07		0,03		0,13	

*Tabla 10: Rocas naturales. Pérdida de masa por Ciclos de humedad/sequedad*

	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	Tipo 4
Pérdida de masa [g]:	0,12	0,10	0,26	0,40	0,23	0,13
Pérdida de masa [%]:	0,15	0,14	0,32	0,51	0,29	0,17
Pérdida media de masa [%]:	0,14		0,41		0,29	0,17

*Tabla 11: Ladrillos. Pérdida de masa por Ciclos de humedad/sequedad*

Como en el caso de las pérdidas de masa tras los ensayos de heladicidad, destaca la poca o ninguna pérdida sufrida por la roca caliza y la pérdida sufrida por los ladrillos de Tipo 2, 3 y 4.

## **7.- CONCLUSIONES**

A la vista de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones de carácter general:

Se han identificado tres tipos principales de rocas en la mampostería del edificio: una roca caliza con presencia mayoritaria, alternada con algunos sillares poco numerosos de marga, y presencia de roca arenisca en algunas zonas concretas de los paramentos.

Las composiciones químicas de estas rocas son las típicas, con predominio del carbonato cálcico en la caliza, sílice en las areniscas y mezcla de ambas mineralogías en la marga.

Se han estudiado tres morteros recogidos en tres distintas zonas y cada uno con distintas aplicaciones, todos ellos exteriores. Por una parte, se distingue el mortero empleado como adhesivo para la unión de ladrillos y rocas de sillería y, por otro lado, el mortero empleado en el revoco exterior del claustro. Todos ellos son morteros de cal y arena silíceas, posiblemente arenas de origen marino. Este hecho, junto con el severo ambiente marino al que están sometidos, justificaría los contenidos de cloruro sódico detectados tanto en el mortero como en la superficie de las rocas analizadas, particularmente en aquellas con porosidades más acusadas.

Se han distinguido dos tipos esenciales de ladrillo según sus características físicas y geometría. El ladrillo Tipo 1 presenta mejores características físicas y mecánicas que el resto; asimismo se distingue fácilmente del resto por un menor grosor y una forma más homogénea. Presumiblemente, el ladrillo Tipo 1 pertenece a un tipo de fábrica más

moderna. Los ladrillos denotados como Tipo 2, 3 y 4 pertenecen, probablemente, a la misma fábrica, aunque con distintos grados de cocción y degradación.

La absorción de agua es muy acusada en los testigos extraídos de los ladrillos Tipo 2, 3 y 4, con porosidades que rondan el 30%, mientras que en la arenisca la porosidad, también considerable, desciende hasta el 13%. La absorción de agua es significativa en la roca caliza, cuya porosidad se mantiene por encima del 3%. En el caso de la marga, la porosidad es insignificante, manteniéndose por debajo del 0.8%.

En lo referente a las resistencias mecánicas a compresión, las areniscas arrojan valores altos comprendidos entre los 75 y los 81 MPa. En cuanto a la piedra caliza, su resistencia es adecuada para el uso que se le da, con valores situados entre los 35 y los 52 MPa. La resistencia mecánica de la roca margosa es excelente, con valores de resistencia a compresión por encima de los 100 MPa a excepción de uno de los testigos atacados interiormente por cristalizaciones solubles provenientes de la transformación de sulfuros de hierro. Los ladrillos presentan una resistencia a compresión entre los 5 MPa del ladrillo Tipo 4, correspondiente al ladrillo con presumiblemente menor grado de cocción, y los 10 MPa del ladrillo Tipo 1, correspondiente a una fábrica algo más moderna.

En cuanto a los ensayos de heladicidad, la pérdida de masa sufrida por los testigos de roca natural y ladrillo es pequeña. Tras 20 ciclos de hielo-deshielo, entre las rocas naturales cabe destacar un óptimo comportamiento de la roca caliza, con una pérdida de masa de 0,02 %, un buen comportamiento de la roca arenisca, con una pérdida de 0,1 %, y un aceptable comportamiento para la caliza margosa (0,14 %), observándose en éste último tipo de roca natural pequeños desconchamientos debidos a procesos de gelivado cuyo origen puede ser explicado por las pequeñas fisuras observables y la propia dureza de la roca. El ladrillo Tipo 1 presenta un buen comportamiento a los ciclos de hielo-deshielo, 0,14 % de pérdida de masa, inferior a la de los ladrillos Tipo 2, 3 y 4 con 0,28 %, 0,31 % y 0,23 %, respectivamente.

Los ensayos de humedad-sequedad originan unas pérdidas de masa en rocas naturales y ladrillos muy similares a las provocadas por los ciclos de hielo-deshielo, afectando notablemente a los ladrillos de Tipo 2, 3 y 4. Cabe mencionar que algún componente del ladrillo Tipo 2 ha sufrido disolución parcial en el seno del agua de ensayo utilizado durante la ejecución de los ciclos.

En cuanto a la pérdida de resistencia a compresión de los testigos sometidos a ciclos de hielo-deshielo y humedad-sequedad, no se aprecia, en ningún tipo de ladrillo, una pérdida de resistencia relevante. Los valores obtenidos para la roca caliza y arenisca entran dentro del error cometido en los cálculos de las resistencias de referencia, aunque en la caliza margosa sí que se detecta una pérdida importante de resistencia debida a los ciclos de heladicidad, encontrando una resistencia a compresión tras los ciclos de hielo-deshielo de 64.34 MPa y 84.91 MPa para el caso de los ciclos de humedad-sequedad, lo que supone, respecto de la resistencia de referencia (109.44 MPa) una reducción del 41,2 % y 22.4 %, respectivamente,

## **8.- AGRADECIMIENTOS**

Se agradece la financiación de estos estudios a la Fundación Campus Comillas y al Grupo de Tecnología de la Edificación por la coordinación de los trabajos que han sido realizados en las dependencias de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.

## PROCESOS PATOLÓGICOS DEBIDOS AL AGUA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS

Gerónimo Lozano Apolo<sup>1,3</sup> ([geronimolozano@terra.es](mailto:geronimolozano@terra.es))  
Alfonso Lozano Martínez – Luengas<sup>2,3</sup> ([alozano@uniovi.es](mailto:alozano@uniovi.es))  
Juan J. Del Coz Díaz<sup>2,3</sup> ([juanjo@constru.uniovi.es](mailto:juanjo@constru.uniovi.es))

<sup>1</sup> Catedrático del Área de Ingeniería de la Construcción.

<sup>2</sup> Profesor del Área de Ingeniería de la Construcción.

<sup>3</sup> Universidad de Oviedo.

### RESUMEN

El estado de algunos componentes del Edificio Histórico de la Universidad de Comillas se encuentra en una fase de deterioro ciertamente importante. Afortunadamente el Gobierno de Cantabria, actual propietario de la Institución, decidió reestructurar y rehabilitar el edificio.

Cuando se trata de intervenciones sobre construcciones históricas, y máxime como es el caso que nos ocupa, previamente a la redacción del proyecto de rehabilitación, resulta imprescindible conocer el estado actual que presenta el inmueble

En el caso particular de la Universidad Pontificia de Comillas, la entidad del edificio y el alcance de los daños eran de tal magnitud que resultó imprescindible diferenciar las distintas actuaciones previas a llevar a cabo, según el tipo de daño y la causa que lo originaba. Entre los primeros se encontraban los problemas relativos al agua y a la humedad. Los estudios previos correspondientes fueron asignados a los profesores del Área de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Oviedo.

### 1. INTRODUCCIÓN

El estado de algunos componentes del Edificio Histórico de la Universidad de Comillas se encuentra en una fase de deterioro ciertamente importante. Tal es así que probablemente su reestructuración y su adecuación al Documento Básico DB SE-AE Acciones en la Edificación, muy posiblemente lo situasen en los supuestos de Ruina Técnica y/o Ruina Económica. Las razones son varias:

- 1ª) La antigüedad del edificio, con más de un siglo de existencia.
- 2ª) La diferente calidad respecto a diseño y materiales de la zona noble y del resto del inmueble.
- 3ª) La falta de mantenimiento y el abandono sufrido por el edificio, y en particular sus instalaciones de saneamiento, durante el último tercio de su existencia.

Además de esto, el inmueble fue objeto de dos intervenciones desafortunadas que, unidas a las anteriores, explican y justifican la situación actual:

- 4ª) El corte del atirantado transversal, acaecido en un momento de su historia, que ha roto la enlazabilidad necesaria a una estructura de muros de carga con elevadas luces en los vanos y esbelteces en las fábricas. Y como consecuencia, sus encuentros se han transformado en vías de agua.



5ª) La modificación de la red de pluviales y la posterior obturación de algunas bajantes que ha sobrecargado a otras. Y así, una parte de los canalones, en lugar conducir las aguas al exterior, las vierten al interior del bajocubierta del que descienden por gravedad afectando a los componentes estructurales de madera.

Afortunadamente el Gobierno de Cantabria, actual propietario de la Institución, decidió reestructurar y rehabilitar el edificio.

Cuando se trata de intervenciones sobre construcciones históricas, y máxime como es el caso que nos ocupa, previamente a la redacción del proyecto de rehabilitación, resulta imprescindible conocer el estado actual del inmueble.

Sin embargo, la complejidad y amplitud del estudio sobre la Universidad Pontificia de Comillas era tal que se hizo necesaria la figura de un coordinador que definiese y ordenase las diferentes actuaciones a llevar a cabo en el edificio. Esta labor recayó en Don Luis Villegas Cabredo, catedrático de la Universidad de Cantabria, quien a su vez encargó el estudio relativo a los problemas causados por el agua a los profesores del Área de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Oviedo.

En el trabajo deberían figurar los procesos patológicos debidos a las humedades, diagnosticar su origen y recomendar los tratamientos de saneamiento y desecación a aplicar en el edificio. De acuerdo con estas premisas, y posteriormente a la entrega del informe geotécnico, se programaron una serie de visitas de inspección y de toma de datos, en los que observaron las lesiones relacionadas a continuación.

## 2. LESIONES OBSERVADAS

Desde la planta baja y hacia arriba las lesiones de mayor entidad son las siguientes:

1.- Manchas de sales eflorescidas en forma de zócalo capilar sobre los muros de fábrica. Presentan altura constante en los paños ciegos, se elevan en las esquinas entrantes, y se reducen en las salientes o en el entorno de los huecos. Fotografía 1. Cuando los muros son de sillería, la cristalización de las sales provoca la exfoliación de los paramentos verticales de los mampuestos; y si existen revestimientos que dificultan la evaporación, las sales eflorescen con mayor virulencia. Al igual que la imagen anterior, la fotografía principal.



*Figura 1*



*Figura 2*

2.- La cristalización de las sales solubles se acusa aún más en los patios, donde los contenidos en agua son mayores, al igual que la porosidad del ladrillo macizo que conforma los antepechos de los huecos. Fotografía 3. Y como en el recinto de entrada, la virulencia del ataque hace desaparecer las piezas correspondientes a las hiladas dispuestas sobre los arranque de sillería de los machones. Fotografía 4.



Figura 3



Figura 4

La arenización de los ladrillos en los antepechos de los patios, al cristalizar las sales solubles, se manifiesta también en el pavimento y en los machones de los pasillos del claustro.

3.- Desagregaciones de las soleras de los pasillos, en particular en los encuentros con las conducciones subterráneas encargadas de recibir las bajantes interiores. Este tipo de fallo se aprecia más claramente en los chapados de madera de los paramentos verticales, cuyos arranques aparecen deslignificados por la acción de los hongos de pudrición.

4.- Pasando ahora al intradós de los alfarjes del claustro y del salón de actos, caracterizados por sus acabados, y por la solución estructural, aparecen tapizados de manchas blanquecinas de hongos, posiblemente procedentes del ataque conocido como pudrición blanca. Fotografía 5. Como es sabido, la producen familias de agentes xilófagos que se alimentan de la lignina, dejando libres las manchas blancas de la celulosa.



Figura 5



Figura 6



Figura 7

5.- Arroyamientos de agua en los tabiques de la planta baja (fotografía 6), y más aun en los correspondientes a las superiores. Y aunque en los días de la visita estaban prácticamente secos, es evidente que se han visto lavados durante años por el agua proveniente de las plantas superiores. Fotografía 7.

6.- Siguiendo el camino contrario al descenso del agua, se detectan importantes puntos de infiltración en los encuentros del forjado del bajocubierta con los muros de la fachada de los patios interiores (fotografía 8), en las uniones entre los muros longitudinales y los transversales y en las bajantes existentes en estos.

7.- Por otra parte, se observan charcos de agua en el extradós de los alfarjes de la planta 2ª.

Y aunque en el momento de las visitas presentaban bajos contenidos de humedad, como consecuencia de un verano tan seco como el correspondiente al año 2006, las manchas dejadas por el agua demuestran que en algún tiempo se formaron charcos desde los cuáles se producían filtraciones al recinto situado debajo.

Para localizar la procedencia del agua es suficiente con observar el intradós del alfarje de techo, así como los muros de carga: como resulta evidente, el agua ha caído desde las plantas superiores y ha deslizado por gravedad sobre los paramentos interiores de las fábricas.



*Figura 8*

8.- Efectivamente existen importantes entradas de agua en el bajo cubierta a través de los buhardillones, que posteriormente arroyan por el pavimento. Fotografía 9.

Y también por los encuentros de la cubierta con los muros de fachada (fotografía 10), al perderse la enlazabilidad producida por el corte de los tirantes encargados de arriostrar las fachadas exteriores con las de los patios. Fotografía 11.



*Figura 9: Puntos de infiltración del agua de lluvia.*



*Figura 10: Puntos de infiltración del agua de lluvia.*



*Figura 11: Puntos de infiltración del agua de lluvia.*



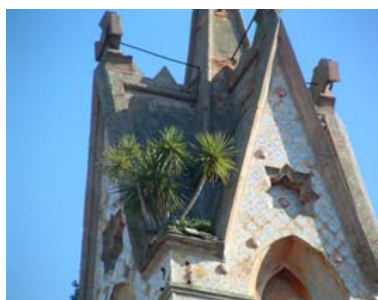
*Figura 12: Lesiones producidas por el agua en la capilla.*

9.- Aunque con menor intensidad, también aparecen filtraciones en los encuentros de las bóvedas de la capilla y de la iglesia. Fotografía 12.

Dada su ubicación, las filtraciones proceden de embalsamientos en los riñones de las bóvedas, posiblemente debidos al desajuste por la pudrición de los nudos de las vigas Pratt de la cubierta por la presencia de hongos de pudrición.

10.- Como consecuencia del alto contenido en agua se ha detectado, en particular en las plantas más altas, la presencia de agentes xilófagos en forma de termitas y otros organismos xilófagos.

11.- También la cobertura aparece colonizada por la vegetación que cubre los tejados, invade los canalones y sirve de enraizamiento y de soporte a las plantas superiores. Fotografía 13. Por otra parte, al clausurar las gárgolas y no mantener las cabezas de las bajantes, el agua ha inundado la terraza, por lo que los ladrillos de la imposta (fotografía 14) se ven sometidos a la acción del agua y a los procesos de cristalización, crioclastia y movimientos hídricos que genera.



*Figura 13: Falta de mantenimiento de cubiertas y terrazas causa daños sobre las fábricas.*



*Figura 14: Falta de mantenimiento de cubiertas y terrazas causa daños sobre las fábricas.*

### 3. PREDIAGNÓSTICO

A la vista de un síndrome caracterizado por:

1º) Entradas francas del agua a través de los buhardillones, de la terraza del claustro, de las fracturas de los encuentros de los muros y de la embocadura de las bajantes obstruidas;

2º) De los descensos de aquélla atravesando los forjados, afectando a los muros, o por el entorno de las bajantes hasta llegar al suelo de la planta baja;

3º) De otro síndrome, de sentido contrario al anterior, caracterizado por el ascenso de agua del subsuelo, que en este caso no puede existir dada la ubicación del edificio, y así lo ha confirmado el estudio geotécnico realizado por otro de los equipos;

4º) De la existencia de síntomas y lesiones característicos de diversos procesos de orígenes biótico y abiótico debidos a la acción del agua, tanto más virulentos cuanto más elevado es el campo de actuación;

los profesores consultados prediagnostican que el edificio padece:

1.- Un síndrome muy activo de humedades debidas a la acción del agua que se infiltra desde su envolvente superior; en definitiva, de humedades de cubierta.

2.- Y como consecuencia del proceso principal anterior, síntomas, lesiones y estados límites correspondientes a otros procesos patológicos secundarios de caracteres muy diversos. Entre estos:

- La acción de agentes bióticos (termitas y hongos) en los componentes de madera.
- Procesos físicos de expansión y de retracción hídrica, generados por las variaciones volumétricas de entumecimiento y merma en los ladrillos y en determinadas rocas, cuando el agua exterior se infiltra en su red capilar.
- Procesos químicos de disolución y cristalización de las sales solubles, que a su vez arenizan los ladrillos de la fachada y exfolian los sillares de arranque de las fábricas.
- Procesos mixtos, aunque de menor cuantía y proporción, debidos a la acción conjunta de la lluvia, del viento y de la atmósfera marina, responsables del ensuciamiento y de lavados diferenciales en los paramentos de las fachadas y de los muros de carga.
- La acción de las plantas, que arraigan en las grietas, entre las tejas o sobre el polvo acumulado en las impostas, las cornisas, los canalones e incluso las torres.

La acción y el efecto del proceso principal lo sintetiza la fotografía 15, que define el camino seguido por el agua y los síntomas y lesiones que provocan sobre la fachada del patio interior.



Figura 15: Obstrucción de la gárgola, desbordamiento de la bajante y lesiones en las fábricas.

#### 4. ESTUDIO PATOLÓGICO

Dado que el estudio se limitaba al análisis y estudio de los procesos patológicos debidos al agua en el edificio, con el fin de recomendar la terapéutica curativa en su caso, y a la preventiva para evitar su repetición, el estudio patológico se ha centrado en la determinación de los contenidos de agua sobre los siguientes componentes:

a) Los muros, para confirmar la existencia de humedades de fachada; es decir, no se han obtenido muestras para determinar, por ejemplo, los coeficientes de expansión hídrica de los ladrillos para definir el alcance del proceso de expansión y de retracción hídrica.

Ni tampoco la determinación del tipo de sal que afecta a los sillares de la escalera principal, ya que el interés es conocer la procedencia del agua para cortar el proceso y evitar su repetición “secando la fuente”

b) Los componentes estructurales de madera, para recomendar el tratamiento a aplicar, caso de mantenerlos, y la terapéutica curativa para erradicar la presencia de termitas.

La determinación de los contenidos en agua se realizó mediante xilohigrómetros (fotografía 16) en el caso de componentes de madera, y distintos tipo de higrómetros específicos para elementos pétreos o cerámicos, según el caso.



*Figura 16: Determinación del contenido de humedad en madera mediante xilohigrómetro.*

#### 5. DIAGNÓSTICO Y PROCESOS PATOLÓGICOS

Confirmadas con la ayuda de la instrumentación las hipótesis planteadas en el prediagnóstico, se diagnostica la existencia de un proceso primero y principal de filtraciones de agua desde la envolvente superior (cubiertas y terrazas) y a través de los buhardillones, éstas en colaboración con la acción de las plantas.

Posteriormente, el agua infiltrada provocó otros procesos secundarios muy diversos. Los más virulentos para el edificio fueron los debidos a los agentes xilófagos sobre los componentes de madera, los procesos físicos de capilaridad y de expansión y retracción hídrica que afectan las fábricas, y los procesos químicos de disolución y cristalización de las sales solubles que arenizan los ladrillos y exfolian los sillares.

En los apartados siguientes se explican y justifican siguiendo un orden cronológico y secuencial.

### 5.1. FILTRACIONES A TRAVES DE LA COBERTURA

Se considera que el proceso se inició con el corte de los tirantes existentes a nivel del bajocubierta, encargados de garantizar el monolitismo del edificio al arriostrar sus fábricas y reducir sus longitudes de pandeo. Al desaparecer el atirantado, fracturaron los encuentros de los muros, al tiempo que se inició la pérdida de verticalidad y el desplome de las fachadas. La fotografía 17 muestra uno de los cortes, mientras que la fotografía 18 corresponde a una de las cabezas de retención. Su cuidado diseño y las formas modernistas explican el interés del arquitecto proyectista en estos indispensables elementos de enlace.



*Figura 17: Tirante cortado en el interior*



*Figura 18: Cabeza de retención exterior*

### 5.2 FILTRACIONES DESDE LA RED DE PLUVIALES

Sin embargo, las entradas de agua más importantes se están produciendo desde la propia red de evacuación que, en lugar de verter las aguas al exterior, las introduce en el edificio desde la terraza de los claustros y, curiosamente, a través de los buhardillones.

El primero es consecuencia de otra intervención desafortunada, fruto del desconocimiento de la época, consistente en sustituir la primitiva red de bajantes por otra que vierte directamente a nivel de la planta segunda, en la eliminación de la antigua terraza a la catalana y en la sustitución por la actual cubierta plana tradicional de lámina asfáltica que, por el tipo de la misma, debió efectuarse poco después de la guerra civil.

Efectivamente, como puede verse en la fotografía 19, las nuevas bajantes vierten directamente sobre la terraza, mientras que el colector de la fotografía 20 recibe las aguas exteriores para conducir las y verterlas en la terraza interior. Por los materiales utilizados debió coincidir con la colocación de la lámina asfáltica existente sobre la primitiva azotea a la catalana, que actualmente presenta una evidente rigidez, así como una importante degradación y pérdida de características físico mecánicas.



*Figura 19: Deficiente diseño y ejecución de la actual red de recogida de pluviales.*



*Figura 20: Deficiente diseño y ejecución de la actual red de recogida de pluviales.*

La tercera infiltración, por extraño y raro que parezca, la genera el agua de la cubierta que, en lugar de desaguar en los canalones, se desborda por la fachada y penetra por los buhardillones. Efectivamente, a consecuencia de la colonización de las plantas en la cobertura (ver fotografías 13 y 14 anteriores), algunos canalones se han convertido en jardineras.

Así, el agua de lluvia queda atrapada en los pesebrones, parte se desborda por la fachada y el resto penetra por los buhardillones, inundando las habitaciones de la planta del bajocubierta (ver fotografías 9 y 11 anteriores), desde donde atraviesa los diferentes alfarjes hasta llegar a la solera del bajo.

### 5.3. PROCESOS DEBIDOS A LOS AGENTES XILÓFAGOS

Resulta del todo evidente que la presencia continua de agua y las condiciones ambientales de falta de ventilación y de oscuridad, justifican el desarrollo de agentes xilófagos tan temibles como hongos del género *coniphora* y las termitas (fotografías 21 y 22). Dado que existe un estudio específico sobre los componentes de madera, no se cree necesario abundar más en este apartado.



*Figura 21: Hífas de Coniphora*



*Figura 22: Chimeneas de terminas*

### 5.4. OTROS PROCESOS

El agua que desciende desde las cubiertas genera después otros procesos patológicos que, por ser de sobra conocidos, únicamente se referencian testimonialmente indicando



su origen, procedencia y ubicación. En el apartado siguiente se comentarán las recomendaciones para su erradicación.

El que más afecta a los antepechos de los huecos de los claustros existentes en los patios interiores son las eflorescencias. Se producen al evaporarse el agua del terreno que, proveniente de las cubiertas, asciende sobre los petos, cristalizando posteriormente las sales que ha disuelto en su camino en el interior de los poros de los ladrillos.

Como puede verse en numerosas piezas cerámicas, el problema no es nuevo, ya que algunas de las hiladas superiores afectadas son de tipo hueco y por lo tanto no existían en el momento de la construcción del edificio. Se trata por consiguiente de una intervención de sustitución posterior.

También consecuencia de la cristalización de las sales es el proceso de desplazación que afecta a los sillares de arenisca de los dos tramos de arranque de la escalera principal del hall de acceso y a su entorno inmediato. Sin embargo, su carácter es puntual ya que no se ha detectado en otras zonas.

Otro proceso de carácter generalizado, aunque benigno salvo en las esquinas de los patios donde adquiere gran virulencia, corresponde al agotamiento por expansión y merma de los ladrillos.

## **6. TERAPÉUTICA A APLICAR**

Dado que el proceso primero y principal es la entrada de agua exterior, las recomendaciones sobre la terapéutica a aplicar en relación con los procesos patológicos debidos al agua son evidentes y se reducen a:

- 1º) Reestructurar el edificio a fin de impedir la entrada de agua a través de las fracturas de sus fábricas y de devolverle la enlazabilidad perdida.
- 2º) Remodelar la red de evacuación de pluviales para cortar las filtraciones de las bajantes.
- 3º) Impermeabilizar las terrazas de los claustros y así evitar la entrada de agua a los mismos.
- 4º) Saneamiento de los pequeños patios que rodean la iglesia, así como sus bóvedas.
- 5º) Instalar una red de drenaje que recoja el agua de las bajantes y corte el ascenso del agua capilar. Y un sistema de desecación de muros en el entorno de los patios.
- 6º) Como complemento a la segunda, erradicar la vegetación de la cubierta y de las terrazas.
- 7º) Para salvaguardar los alfarjes y los mocárabes de la zona noble, aplicar un tratamiento contra los insectos xilófagos y otro fungicida.

### **6.2. ÍDEM DE LA RED DE EVACUACIÓN Y DE LA IMPERMEABILIZACIÓN**

Previa limpieza de la red de los canalones, incluidos los rebosaderos, se propone recuperar los existentes en el proyecto original, aunque disponiendo un mayor número de bajantes y/o rebosaderos a razón de dos por cada lado del patio, además de las cuatro existentes en las esquinas. De esta forma se incrementaría en un 25 % la capacidad de evacuación, e incluso más de ser necesario, aumentando el diámetro de aquéllas.

Se recomendaría además:

- a) Eliminar el colector existente en la zona central que conduce las aguas al patio situado a la derecha, cuyas pérdidas son responsables de los ataques de hongos que afectan a la puerta de salida al mismo.
- b) Disponer canalones en los aleros de los faldones que vierten a los pequeños patios del entorno de la iglesia. Efectivamente, habida cuenta que las aguas han de recorrerlos para evacuar a través de una bajante, (por su ubicación muy proclive a la obturación), en el caso de una lluvia torrencial no existe capacidad de desaguar, máxime si no hay posibilidad de disponer rebosaderos.
- c) Tanto en estos pequeños patios como en las terrazas de los claustros a nivel de planta segunda, se recomienda impermeabilizarlos según la sección HS 1 del DB HS Salubridad. Y para evitar sobre aquéllas los recorridos del agua que desciende desde las cubiertas, conectar entre sí ambas bajantes a través de una pequeña arqueta prefabricada y un colector intermedio alojado en el hueco de la antigua terraza catalana, al igual que la canaleta perimetral.

### 6.3. ÍDEM DE LA RED DE DRENAJE Y DE LA BARRERA CAPILAR

Para recoger y evacuar al exterior las aguas de las bajantes se propone construir:

- a) Una zanja de drenaje en el perímetro de los patios que, al conectar con las arquetas de las bajantes, se encargaría de evacuar las aguas pluviales y las de riego. Consideramos suficiente una anchura de 25 cm, paredes de fábrica con juntas abiertas para dar salida a los gases migratorios del subsuelo reduciendo la presión hidráulica que coadyuva a la ascensión capilar, fondo enlucido y rematado en media caña, pendiente mínima del 1% y tapa de rejilla para recibir verticalmente el agua de las impostas y de los rebosaderos en su caso.
- b) Otra zanja similar, exterior y perimetral al edificio, que haría lo propio con las bajantes exteriores.
- c) La primera desaguaría en la segunda por medio de dos colectores, situados en los puntos medios de los lados longitudinales y bajo la planta baja, de sección Ø30 cm y de sendas arquetas en los encuentros. La diferencia de cota entre los patios y las calles exteriores proporcionan pendiente más que suficiente.

En la fotografía 23 se muestra un sistema de drenaje de cintura tipo, cuyo diseño y ejecución son ya sobradamente conocidos.



*Figura 232: Drenaje de cintura.*

Por otra parte, para cortar la ascensión capilar, y puesto que se supone se sustituirán los antepechos, se propone colocar entre el cimiento y la primera hilada una lámina impermeabilizante que ascendería en los machones laterales 15 cm sobre el nivel del patio, o emplear mortero hidrófugo, etc. En caso contrario convendría recurrir a un sistema de desecación para el que se recomienda los higoconvectores Knapen.

#### 6.4. TRATAMIENTOS CONTRA LOS AGENTES XILÓFAGOS

Como ya se dijo en apartados anteriores., los altos contenidos de humedad a que se ha visto afectado el edificio han propiciado la aparición de depredadores tan peligrosos para las estructuras de madera como son los hongos y las termitas.

Asimismo, en la zona central del edificio existen alfarjes que rememoran las antiguas lacerías mudéjares y los techos de mocárabes rodeados de la profusión imaginativa del modernismo catalán como los representados en la fotografía 24.

Lo mismo puede decirse de los artesanados del paraninfo y del salón de actos, ya afectados de pudrición blanca como muestra la fotografía 25.



*Figura 24: El Paraninfo requiere una intervención inmediata.*



*Figura 25: La zona interior, igualmente, requiere una intervención inmediata.*

*PROCESOS PATOLÓGICOS DEBIDOS AL AGUA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE  
COMILLAS*

Por ello, a la vista de que las infiltraciones están muy próximas al entorno de estas obras de arte y de la técnica, al igual que las termitas, presentes ya en uno de los cargaderos de la iglesia. Por este motivo se recomendaría que:

1º Con urgencia, y a ser posible mientras se redacta el proyecto, se aplique un tratamiento contra los xilófagos a dichos alfarjes.

2º Como primera fase de la obra se acometa la cubierta de la iglesia. De esta forma se protegerían sus pinturas murales, se evitaría el riesgo de ataque de hongos y termitas que necesitan de humedad, y se impediría su posible desplome, ya que algunos de los nudos también están atacados de hongos.

## Aplicación de tecnologías fotónicas en la rehabilitación del Seminario Mayor de Comillas

José M. López-Higuera<sup>1</sup> ([higuera@teisa.unican.es](mailto:higuera@teisa.unican.es)), Francisco J. Madruga<sup>1</sup> ([madruga@teisa.unican.es](mailto:madruga@teisa.unican.es)), Antonio Quintela<sup>1</sup> ([aquintel@teisa.unican.es](mailto:aquintel@teisa.unican.es))

<sup>1</sup> Grupo de Ingeniería Fotónica – Universidad de Cantabria <http://gif.teisa.unican.es>

### Resumen

Tanto para su mantenimiento predictivo como para la rehabilitación de estructuras de edificación pueden utilizarse con éxito tecnologías fotónicas. A modo de ejemplo, en este artículo se presentan tres técnicas: una basada en termografía infrarroja y dos basadas en sensores de fibra óptica. Se ofrecen perspectivas y resultados preliminares de la aplicación de dos de estas técnicas en la rehabilitación del seminario mayor de Comillas en Cantabria, España.

### 1.- Introducción

La Fotónica es uno de los campos de conocimiento que ya influencia de manera decisiva nuestras vidas y es, sin duda alguna, un elemento tractor para la innovación tecnológica y una herramienta fundamental para la I+D en todos los campos de conocimiento. Por ello se considera una disciplina **HORIZONTAL** de aplicación en un sinfín de campos, áreas y sectores tanto en aspectos relacionados con la investigación como con el desarrollo tecnológico como para la mejora de la productividad industrial entre otras. Es reconocido que muchas de las empresas europeas, desde las encargadas de fabricación de chips, visualización, ciencias de la salud y de la vida, espacio, la ingeniería civil, la construcción, la defensa, transporte y automovilísticas, entre otras, requieren conocimiento, técnicas y tecnologías del campo fotónico.

*Por Fotónica se entiende el campo de conocimiento que trata de la generación, transmisión, procesado, manipulación, tratamiento, amplificación, detección y, lo que es más importante la utilización de la luz como herramienta para el beneficio de la humanidad. La Fotónica engloba a la óptica, a la fibra óptica, la metrología óptica, la detección y medida, los sensores etc..., que se consideran áreas de aquella.*

Hoy día se reconoce que i) La fotónica ofrece nuevas y únicas soluciones en donde las tecnologías tradicionales están llegando o han llegado a sus límites en términos de velocidad, capacidad y exactitud. La fotónica posibilita el procesado, almacenaje, transporte y visualización de enormes flujos de datos; en el futuro los sistemas ópticos van a posibilitar anchos de banda 1000 veces los actuales posibilitando la banda ancha para todos. ii) progresos futuros en áreas clave de la industria y la tecnología tales como ciencias de la vida y de la salud, la información y las comunicaciones, energía y producción van a depender, literalmente de la Fotónica. En la fabricación el láser se utiliza como una rápida y precisa herramienta para un número grande de tareas: soldadura, corte, metrología, en sectores tan variados que pueden ir desde el aeroespacial, el del automóvil hasta la fabricación de nanoestructuras. La luz posibilita que las máquinas e ingenios dispongan de *ojos digitales* con los que controlar sus procesos o los de producción. iii) Nuevas tecnologías de señalizado y visualización basadas en nuevos diodos emisores de luz se introducirán masivamente en los próximos años posibilitando increíbles ambientes y facilitando el ahorro de más de 2 billones de barriles de petróleo por año para el 2010. iv) La supervisión y cuidado de la salud del ser humano está siendo revolucionada por el uso sistemas ópticos en las inspecciones,

diagnósticos, terapias y cirugía y, en un futuro próximo, las nuevas innovaciones que se espera alcanzar posibilitarán microsensores ópticos para diagnosis remota, por mencionar una de las líneas en curso. v) La luz es clave para la investigación de la vida del microcosmos lo que es de impacto directo en la biotecnología, en el diseño y fabricación de nuevos medicamentos y en la Genética. Así, por ejemplo, las herramientas fotónicas serán capaces de manipular moléculas y células vivas, sin contacto.

Es hoy admitido que el siglo XXI, ya comenzado, se conocerá como el siglo del fotón, como el siglo pasado fue conocido como el del electrón.

En los últimos tiempos se está produciendo un gran auge de técnicas para detectar, supervisar, monitorizar y medir, todo tipo de variables físicas y químicas utilizando luz con y sin contacto. Sin duda alguna, uno de los sectores en los que se está utilizando con ventaja, es en el monitorizado estructural de estructuras en general y de las propias de la edificación en particular. Sólo a modo de ejemplo de lo anterior, en lo que sigue se presenta la termografía infrarroja como técnica que, sin contacto, permite obtener distribuciones espaciales de temperatura y dos basadas en sensores de fibra óptica para medir temperatura y elongaciones (strain) tanto cuasi-distribuidamente como distribuidamente. De las dos primeras se ofrecen algunos resultados preliminares de los trabajos realizados en partes concretas del Seminario Mayor de Comillas con vistas a obtener informaciones y datos valiosos para su rehabilitación.

## **2.- Termografía Infrarroja**

La termografía infrarroja es la técnica de producir una imagen visible consecuencia de la luz infrarroja (no visible para el ojo humano) emitida por objetos atendiendo a su condición térmica en un escena (1). Con ella, cada una de las imágenes o termogramas son “fotografías del calor” que emiten los objetos. La temperatura del objeto puede ser determinada midiendo el calor emitido en una porción del infrarrojo y aplicando el correspondiente procesado. Cuatro aspectos fundamentales deben ser tenidos en cuenta en este proceso: la superficie del objeto, la transmisión de la radiación entre el objeto y el instrumento de medida (cámara infrarroja), las condiciones del entorno al objeto medido y finalmente la propia cámara.

Cualquier objeto que se encuentre a una temperatura superior al cero absoluto emite energía en el infrarrojo según una distribución que puede ser caracterizada por tres leyes físicas: *la ley de Planck*, *la ley Stephan-Boltzmann* y *la ley del desplazamiento de Wien* (2).

No todos los cuerpos emiten toda la radiación descrita por la ley de Planck sino que emiten una fracción de ésta. Esta fracción es la emisividad y, en general, varía con la longitud de onda, la forma del objeto, su temperatura, el ángulo de emisión de la radiación, las irregularidades de la superficie, factores ambientales.... Las características del medio de transmisión existente entre el cuerpo bajo inspección y el instrumento de medida también afecta a las medidas de temperatura sin contacto. No existiría pérdida de energía si la medida se realizase en el vacío pero, incluso para distancias cortas, cualquier medio puede absorber energía y, por tanto, la medida está limitada por las condiciones ambientales. Finalmente las cámaras se caracterizan por el rango de temperatura que cubren, la precisión, la repetitividad, la sensibilidad térmica, la velocidad de respuesta, la resolución espacial de la medida en el objeto y la distancia de trabajo, el rango espectral de trabajo, que también son factores limitantes en la medida.

## 2.1.- La termografía infrarroja aplicada a la edificación.

La aplicación de la termografía infrarroja a la inspección de edificios cubre dos propuestas específicas:

1. Control de calidad de nuevas edificaciones. Con las problemáticas asociadas de que no existen síntomas visibles de fallos.
2. Estimación de las condiciones de edificios existentes donde dado su alto valor artístico-histórico-cultural no se puede aplicar otros métodos cuasi-no destructivos.

Tres son los mecanismos de transferencia de calor que se emplean habitualmente en la inspección de edificaciones: las diferencias de conductividad, el cambio de estado (evaporación) y el fenómeno del transporte de masa (3). La figura 1a) describe de forma gráfica como la diferencia de conductividad sirve para identificar tanto puentes térmicos como humedades al tener mayor conductividad térmica que el muro de aislamiento.

Cada gramo de agua necesita 539 Kcal para evaporarse, lo cual las superficies por donde se evapora agua se encuentran más frías que el resto como muestra la figura 1b).

El fenómeno de transporte de masa se genera debido a grietas que presentan filtraciones de aire. Se observa a través de un calentamiento de la zona alrededor de la grieta si la zona interna está más caliente.

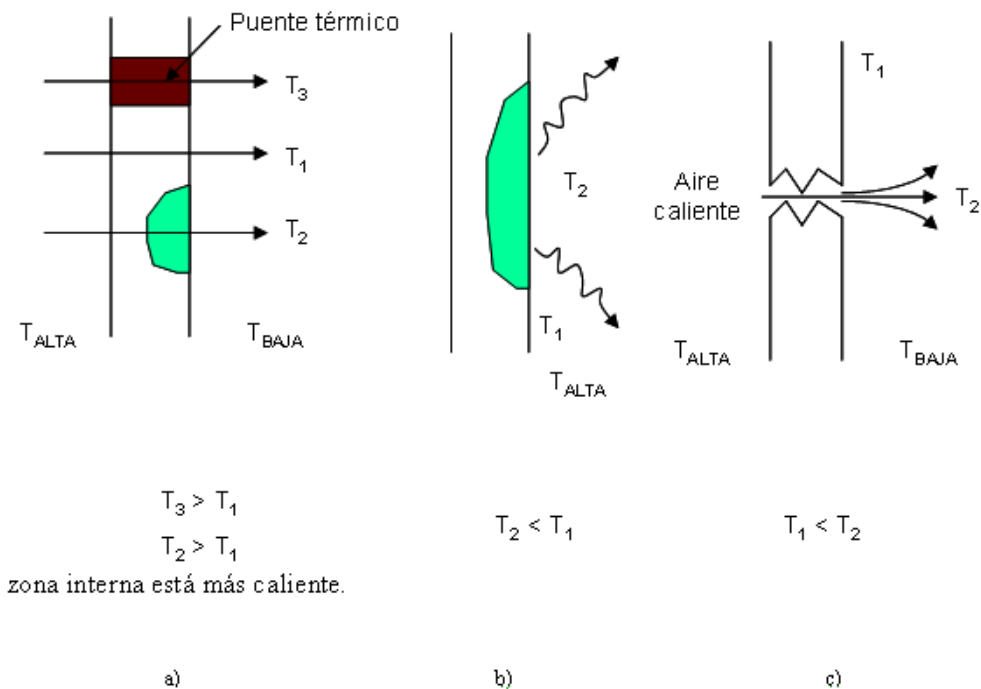


Figura 1: Mecanismos de transferencia de calor útiles en la inspección de edificios  
a) diferencias de conductividad; b) evaporación y c) transporte de masa.

A través de estos mecanismos se pueden deducir problemas de aislamiento, de puentes térmicos, humedades y fugas de aire por medio de grietas, entre otras anomalías.

Otras características que se tienen que tener en cuenta al aplicar la termografía en edificación son:

- Los materiales usados en construcción presentan diferentes emisividades. Este efecto puede ser confundido con defectos al aparecer en la imagen como zonas más frías o calientes que otras. Además la emisividad depende del ángulo de visión induciendo a errores.
- La inspección debe realizarse en momentos donde el intercambio térmico objeto-entorno sea máximo. Así se suele recomendar para inspecciones exteriores la realización de las mismas por la noche, al menos 2 horas después de la puesta del sol para materiales de baja inercia térmica, y 4 horas después para materiales de mayor inercia térmica.

## 2.2.- Aplicación de la termografía infrarroja en Comillas.

La primera piedra del edificio inicial del Seminario, que sería conocido como la Cardosa por el nombre del sitio donde Antonio López decidió construirlo, se colocó el 20 de mayo de 1883. La mayoría de los edificios construidos entre 1880 y 1940 destacan por su sólida construcción con una alta calidad de la mano de obra (4). Las partes más débiles de estas construcciones residen en las uniones muro-muro o muro-tejado, por lo que los problemas de humedades son los más frecuentes.

La inspección termografía del seminario Mayor de Comillas se va a realizar en dos campañas. Una primera ya efectuada durante el verano (agosto 2007) y una segunda a efectuar durante el invierno (enero 2008). Al tratarse de un edificio no habitado no son aplicables normas de medidas habituales como aprovechar las épocas de uso de la calefacción para disponer de un mayor contraste térmico exterior e interior. Por este motivo se han programado dos campañas en momentos en los cuales se puede conseguir un buen contraste térmico (5).

<b>Rango de medida de temperatura del objeto</b>	-40→500°C (2 rangos) hasta 2000°C con la opción de alta temperatura
<b>Precisión de las medidas</b>	±2%
<b>Sensibilidad térmica</b>	<0.1°C
<b>Campo de visión</b>	24° x 18°/5 m
<b>Tipo de detector</b>	microbolómetro no refrigerado, tipo FPA de 320x240 píxeles
<b>Banda espectral</b>	7.5-13 $\mu$ m
<b>Almacenamiento</b>	PCMCIA Flash Card de 100 Mbytes para imágenes en formato IMG en 14 bits o BMP 8 bits
<b>Sistema de baterías</b>	NiMH con autonomía de 2 horas
<b>Zoom</b>	Electrónico (x1-x4)
<b>Peso</b>	2.3 Kg incluyendo batería
<b>Dimensiones</b>	220x133x140 mm

Tabla 1: Características de la cámara termográfica SC2000 (FLIR SYSTEMS)

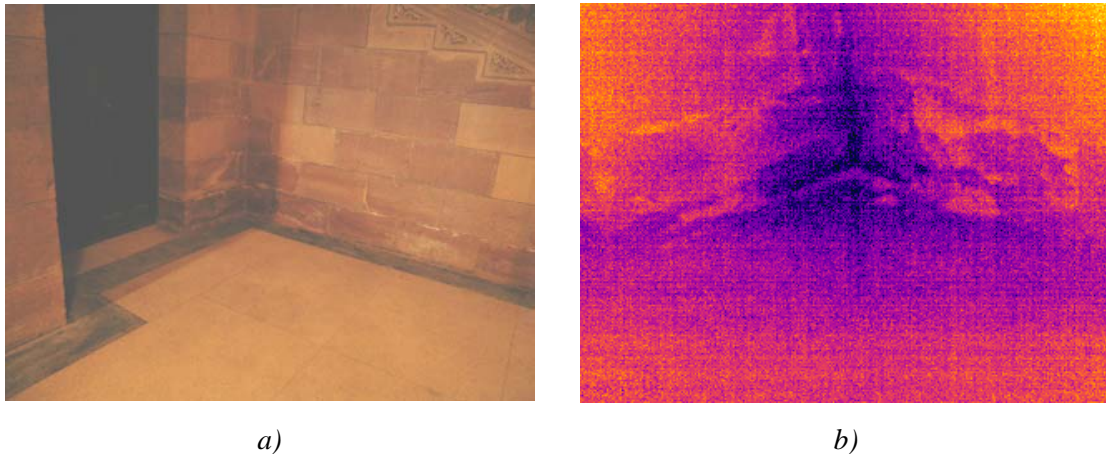
La cámara infrarroja utilizada en la inspección del seminario mayor de Comillas es la FLIR-SC2000 cuyas características se detallan en la tabla I.

En las siguientes líneas y figuras se van a presentar termogramas adquirido en el Seminario Mayor de Comillas durante la campaña de verano de 2007. De ellas, se



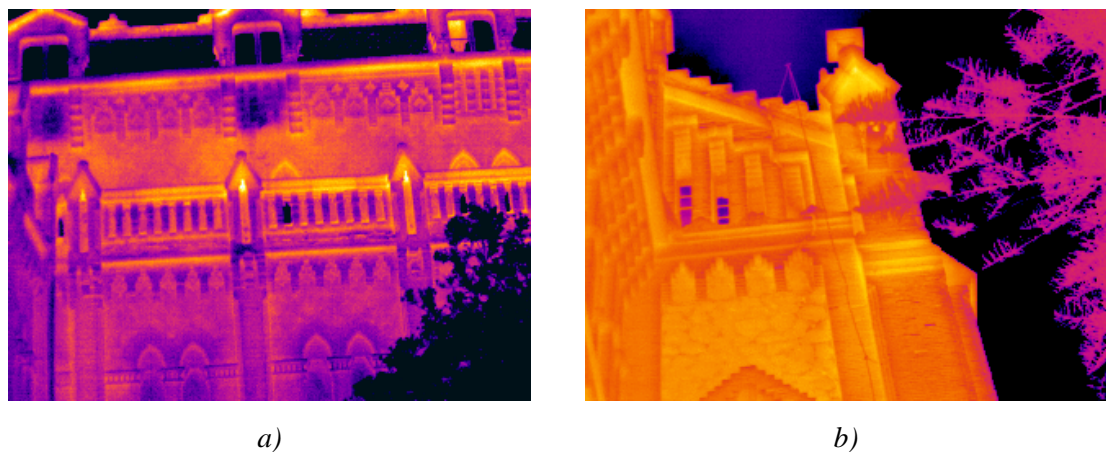
pueden deducir algunos defectos en la estructura (incluidas humedades) y, asimismo, se mostrarán algunos ejemplos de termogramas que puede parecer que sugieren defectos pero que, en realidad, no lo son. Ello servirá para ilustrar algunas de las posibles fuentes de errores típicos de las medidas termográficas aplicadas a edificios.

En la figura 2 se presentan las imágenes real y termográfica de una zona interior con humedades. Tomada a última hora de la tarde de un día de verano donde la temperatura ambiente era elevada y se observa como las zonas con humedades atrapadas se muestran más frías debido al efecto de evaporación



*Figura 2: Presencia de humedades en el interior del edificio a) imagen real, b) imagen termográfica donde se observan zonas más frías en la zona húmeda.*

Las figura 3a) muestran defectos encontrados en los muros bajo ciertas ventanas del patio interior como zonas más frías (color azul) que representan humedades. El comportamiento no idéntico en otras ventanas (parte derecha de la imagen) nos permite indicar la presencia de humedad. En la figura 3b) se observa una grieta como una línea más fría en la parte central del tejado.



*Figura 3: Termogramas a) que muestra humedades bajo ventanas exteriores, b) que muestra grietas y humedades.*

La figura 4 muestra la potencialidad de la termografía para, en determinadas situaciones y condiciones, resaltar detalles internos no visibles superficialmente. En el caso que se presenta, la imagen termográfica destaca un punto caliente perfectamente caracterizado por presentar un gradiente térmico por conducción con él como origen. Ello indica un material de mayor inercia térmica en el vértice y que a falta de más estudios o

documentación se puede aventurar una posible restauración del tejado posterior a la construcción utilizando una vigueta metálica central.

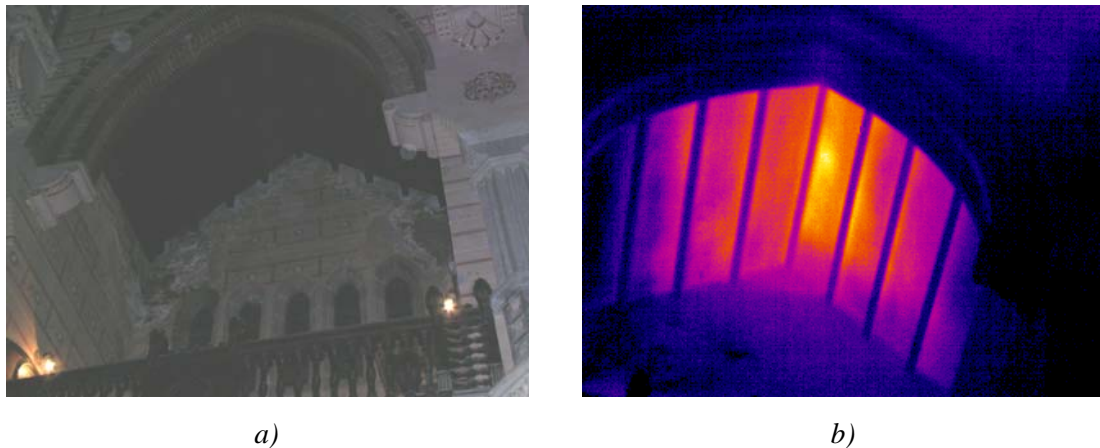


Figura 4: a) imagen real del tejado de la iglesia central, b) termograma que muestra un punto caliente en el centro.

La figura 5 muestra unos termogramas donde se aprecian puntos a distintas temperaturas pero que no son defectos. Así en la figura 5a) se observa el efecto del calentamiento por el sol encontrándose la fachada oeste a más temperatura que la norte en una termografía tomada a las dos horas de la puesta de sol. La figura 5b) muestra el efecto de zonas esquinadas (bajo ventanas) que presentan mayor emisividad. El efecto se repita de forma idéntica en todas las que permite deducir que no se trata de defectos (no hay dos defectos idénticos). Por último en la figura 5c) se puede observar la distinta emisividad de los distintos materiales y como los efectos esquinas o salientes afectan a la medida.

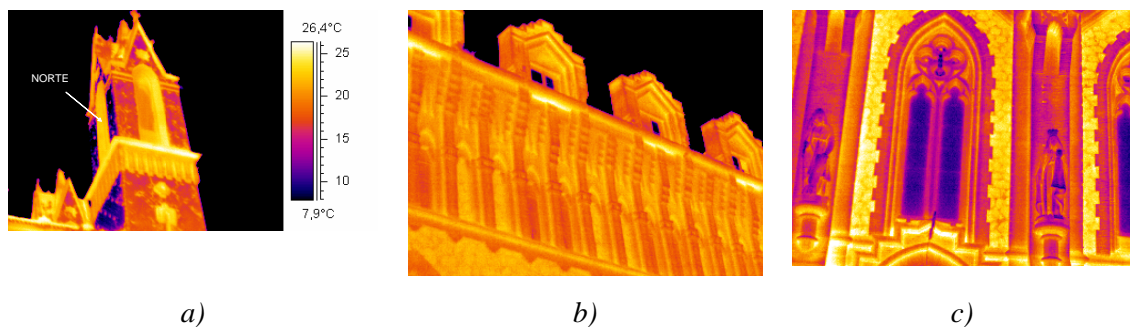


Figura 5: ¿Problemas en los termogramas? a) torre orientaciones norte y oeste tras la puesta de sol, b) Fachada oeste con entrantes más emisivos c) Fachada sur con materiales distintos, grabados y estatuas.

La potencialidad y limitaciones de la termografía infrarroja se han demostrado tras la primera campaña de medidas realizadas en el Seminario mayor de Comillas. Destacando como resultados más interesantes la detección de humedades en los patios interiores y la detección de elementos de mayor inercia térmica en los vértices de los tejadillos laterales de la capilla.

### 3.- Medidas con sensores de fibra óptica

Se describirán, brevemente, medidas de temperatura y de elongación cuasi-distribuidas y distribuida. Las primeras se realizarán mediante sensores basados en redes de difracción y, las segundas, utilizando la dispersión (scattering) estimulada todo ello en fibras ópticas.

### 3.1.- Sensores cuasi-distribuidos de fibra óptica

Conceptualmente un sensor se considera cuasi-distribuido cuando es capaz de medir la variable física objeto de la medida en una sucesión de puntos concretos situados físicamente sobre/en el objeto de medida y su conexión con la unidad que los interroga se hace a través de un único canal de comunicaciones. De acuerdo a lo anterior un sensor cuasi-distribuido de fibra óptica medirá la variable objeto de medida en N puntos *concretos* situados en un único canal de fibra óptica. Lo anterior puede realizarse utilizando redes de difracción en fibra óptica (6).

Una red de difracción en fibra óptica (RDFO) puede considerarse como una estructura óptica en la que se ha modificado parte del núcleo de la fibra inscribiendo una modulación axial periódica o cuasiperiódica de su índice de refracción. Como consecuencia, si a una RDFO se introduce luz blanca (que contiene todas las componentes espectrales – todas las longitudes de onda-) dentro de una banda, resulta que la luz centrada entorno a una banda muy estrecha de longitudes de onda resulta reflejada hacia atrás y, el resto, se transmite sin sufrir modificación alguna. La longitud de onda entorno a la cual se refleja la banda muy estrecha de luz mencionada, recibe el nombre de longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) queda expresada por (7):

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

donde  $n_{eff}$  es el índice efectivo del núcleo de la fibra y  $\Lambda$  es el periodo de la variación periódica del índice de refracción en el núcleo de la fibra. En la figura 6 se ilustra esquemáticamente el comportamiento de una RDFO, en donde se observa que cuando se introduce luz blanca (luz con potencia en un rango grande de longitudes de onda) la citada refleja se refleja una banda muy estrecha centrada entorno a la longitud de onda de Bragg y se transmite el resto.

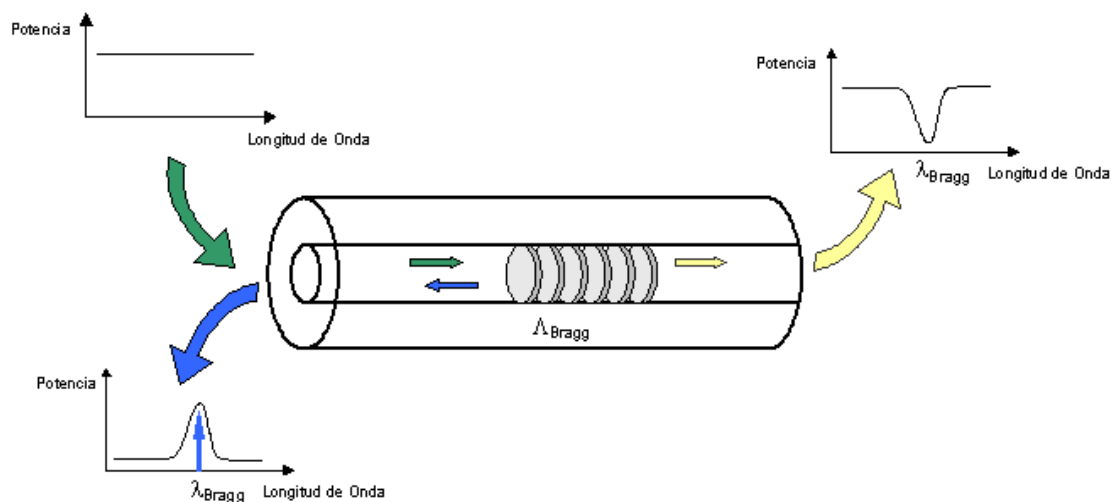
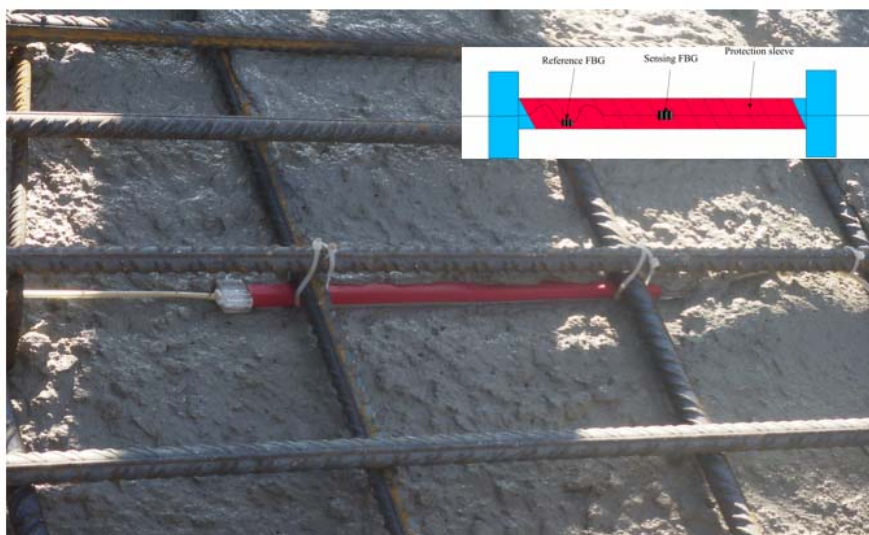


Figura 6: Esquema del comportamiento de una RDFO

La clave para poder utilizar las RDFO como sensores recae en la dependencia de la longitud de onda de Bragg con el periodo de la red y con el índice de refracción del núcleo de la fibra. Si la variación de un parámetro externo modifica uno de estos

valores, o ambos, se producirá una variación en la longitud de onda de la luz reflejada, pudiendo cuantificar a partir del citado desplazamiento la variación del citado parámetro externo. Como se pueden diseñar y fabricar redes de difracción que reflejen la luz en diferentes longitudes de Bragg, se pueden situar una N RDFO a lo largo de una fibra óptica y, por tanto, obtener en reflexión N respuestas diferentes multiplexadas en el dominio de la longitud de onda. De esta manera usando una única fibra óptica que contiene en línea N RDFO diferentes, se puede realizar medidas en “N” puntos de una estructura de forma cuasidistribuida.

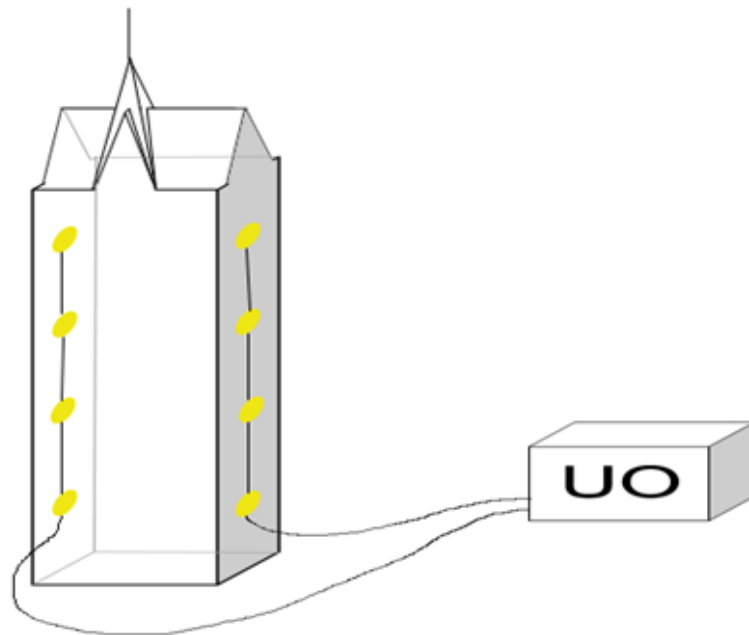
La longitud de onda de Bragg de una RDFO depende fundamentalmente de la temperatura y de la elongación o deformación axial de la fibra (strain). Como los coeficientes de temperatura y de deformación de la longitud de onda de Bragg son en ambos casos positivos, si se elonga la zona de la fibra donde está grabada la RDFO, el periodo de RDFO aumenta y por lo tanto la longitud de onda de Bragg se desplaza hacia longitudes de onda mayores de forma totalmente lineal. De igual modo si se incrementa la temperatura de la zona de la fibra donde está la RDFO debido a la dilatación de la misma y al efecto termoóptico (que incrementa el índice efectivo del núcleo de la fibra) se produce un desplazamiento lineal en la longitud de onda de Bragg reflejada. En un principio el hecho de que las RDFO sean sensibles principalmente a dos parámetros puede verse como una ventaja, ya que permite realizar sensores para diferentes parámetros, pero también hay que verlo como un inconveniente a tener en cuenta. Al ser sensible a dos parámetros en un principio es imposible discriminar si una variación en la longitud de onda es debido a variaciones de temperatura y/o strain. Así a la hora de diseñar sensores basados en esta tecnología hay que utilizar técnicas de discriminación, como por ejemplo poner en un mismo sensor dos RDFO, una de ellas aislada de uno de esos parámetros. En la figura 7 se muestra un ejemplo de un transductor diseñado por el grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria (8), en el que una de las RDFO está relajada responde solo a la temperatura y, la otra, es sensible tanto a la temperatura como a la elongación.



*Figura 7: Esquema de un sensor de  $T^a$  y strain basado en RDFO y foto de una instalación de una red de 35 sensores embebidos dentro de las estructuras de hormigón en el viaducto de las Navas en la autovía A8 del Cantábrico en 2001. Tecnología totalmente desarrollada, realizada e instalada por el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria [8].*

### 3.1.1.- Aplicación en el seminario Mayor de Comillas.

La tecnología descrita en el apartado anterior se utilizará para monitorizar el comportamiento de una de las torres de la iglesia del Seminario Mayor de Comillas. En la figura 8 se muestra un esquema de cómo será la distribución de los 8 sensores que se instalarán. Debido a su situación, cuando cuatro de ellos trabajen en compresión los otros cuatro se elongarán y viceversa. A través de ellos se medirán las contracciones y elongaciones en las condiciones ambientales reales (vientos, tormentas,...) que se den durante un periodo suficientemente largo.



*Figura 8: Esquema de la instalación de transductores en una torre de la iglesia del seminario Mayor de Comillas. Se observa que los 8 transductores serán interrogados a distancia por la Unidad Optoelectrónica que se une con los mismos mediante cables de fibra óptica.*

Si bien en esta aplicación los sensores se instalarán en superficie, esta tecnología puede ser utilizada para ser embebido en estructuras de hormigón (9).

### 3.2.- Sensores distribuidos de fibra óptica.

Conceptualmente un sensor distribuido puede realizar medidas de la variable objeto de medida de forma distribuida con una determinada resolución espacial. Este concepto se puede desarrollar exitosamente mediante la tecnología de sensores de fibra óptica. Con esta tecnología se puede medir la variable objeto de medida de forma distribuida (en cualquier punto) a lo largo de una fibra óptica que actúa simultáneamente como transductor distribuido y como canal. Lo anterior implica que con un sensor distribuido se pueden medir, simultáneamente, miles de puntos del estado de la variable objeto a lo largo de una fibra. Esta última puede ser muy larga (desde centenas de metros hasta más de 100 km). Por tanto, el sensor distribuido estará compuesto por un transductor distribuido que a la vez es canal y la unidad optoelectrónica (UO) que es la encargada de interrogar el transductor de fibra y ofrecer el resultado de la medida de la variable objeto de medida en el dominio eléctrico. Para una clarificación de este concepto y ofrecer al lector la posibilidad de pensar en la enorme potencialidad de aplicaciones que

esta tecnología fotónica ofrece, en general y, en particular para el sector de la construcción y de la ingeniería civil, seguidamente se ilustra con un ejemplo sobre un edificio conocido.

Suponga a lo largo de la red de paneles solares recientemente instalados (verano de 2007) se sitúa un cable transductor de fibra óptica (en rojo) tal y como se indica en la figura 9. El extremo del cable finaliza en la Unidad Optoelectrónica que el grupo de ingeniería fotónica dispone. Con ello se puede medir la temperatura y la elongación (strain) a lo largo de la fibra óptica y, por tanto, de todos los objetos sobre los que el cable se ha situado. Se puede obtener, por tanto, un “mapeado” de temperatura y “strain” de todos lo paneles solares del edificio.



Figura 9: Ilustración de un sensor distribuido de fibra óptica situado sobre los paneles solares de la fachada sur de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria. En rojo la fibra sensora sobre la que se puede medir la elongación y/o la temperatura de forma distribuida al ser interrogada por la Unidad Optoelectrónica (UO). La UO de la fotografía, cuyo funcionamiento se basa en dispersión estimulada de Brillouin, es la que el Grupo de Ingeniería Fotónica dispone en la UC. <http://gif.teisa.unican.es>

Para contribuir a excitar todavía un poco más la imaginación del lector suponga que la fibra anterior se embebe en estructuras de hormigón de puentes, presas,.....

#### 4.- Conclusiones

En este artículo divulgativo se ha pretendido comunicar al lector la gran potencialidad que ofrecen las nuevas tecnología fotónicas para detección y medida de variables objeto, en general y, en particular en estructuras propias de la ingeniería civil, de la construcción y de edificios. Se han presentado una muestra de tres tecnologías fotónicas apta para su aplicación en la monitorización de parámetros en estructura en general y en particular en las de edificios objeto de procesos de rehabilitación. La potencialidad de

las tres tecnologías se manifiesta en las características de uso de la imagen (termografía infrarroja), y de sensado cuasidistribuido (en varios puntos) y distribuido (puntos distribuidos de manera continua –miles-) a lo largo de un canal de fibra óptica. La puesta en campo de dos de estas tecnologías se ha realizado o se está realizando en medidas para facilitar la rehabilitación del Seminario Mayor de Comillas ofreciendo en este artículo algunos de sus resultados preliminares.

## **Agradecimientos**

Los resultados aquí presentados proceden de proyecto financiados por los gobiernos de España (MEC) y de Cantabria (Plan de Gobernanza). En particular de los habidos en los proyectos TEC2004-05936-C02 y TEC2007-67987-CO2-01.

## **Referencias**

- 1) T. Astarita, G. Cardone and G.M. Carlomagno, Infrared thermography: An optical method in heat transfer and fluid flow visualisation, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, Issues 3-4, March-April 2006, pag. 261-281.
- 2) X.P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 684 páginas, 2001
- 3) G.C. Holst, *Common sense approach to thermal imaging*, Copublicado por JCD Publishing y SPIE- The International Society for Optical Engineering, 377 páginas, 2000.
- 4) S.A. Ljungberg, Infrared Survey of Fifty buildings constructed during 100 years. Thermal performances and damage conditions, *Thermosense XVII SPIE proceedings Vol 2473*, pg 36-54, 1995.
- 5) F. J. Madruga, J. M. Muñoz, D. A. González, J. I. Tejero, J. M. Lopez-Higuera, J. L. Gil, Field test of infrared thermography applied to biogas controlling in landfill sites, *Thermosense XXIX SPIE proceedings Vol 6541*, pg 1B1-1B6, 2007
- 6) JM López-Higuera, Editor y co-autor del libro “Handbook of fibre sensing Technology”. 800 páginas, Wiley and Sons, UK, 2002.
- 7) Mizrahi, V., Sipe, J.E. “Optical properties of photosensitive fiber phase gratings”, *Journal of Lightwave Technology*, v 11, n 10, pt.1, Oct. 1993, p 1513-17
- 8) A. Quintela, C. Jáuregui, J. Echevarría, J.M. López-Higuera., “Embedded temperature-strain fibre Bragg grating sensor system validation for concrete structures”, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, pp s387-s390, 2002
- 9) J.M. López-Higuera, C. Jáuregui, A. Quintela, J. Echevarría, “Fiber Optic Civil Structure Monitoring System”, *Optical Engineering*, Vol 44, pp: 0444401-1 \_ 044401-10, Abril 2005.

## **SAYME, Wireless Sensor Networks. Sensórica inalámbrica remota de bajo consumo y gestión de VideoIP del Seminario Mayor de Comillas**

*Jesús M<sup>a</sup> Ibáñez Díaz<sup>1</sup>, J. Alfonso Murat Moreno<sup>2</sup>, Marta Alonso Domínguez<sup>2</sup>, David Santo Orcero<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Universidad de Cantabria, Dpto. Ingeniería de Comunicaciones (GTAS)*

<sup>2</sup> *INNOVA CONSULTING*

<sup>3</sup> *Universidad de Málaga*

### **Resumen:**

En este artículo se describen las tecnologías empleadas en el proyecto de monitorización basado en sensórica inalámbrica remota de bajo consumo y videovigilancia mediante VideoIP desarrollado por la empresa Innova Consulting para la rehabilitación del Seminario Mayor de Comillas.

### **1.- Introducción**

La integración de diferentes tecnologías en un sistema permite maximizar los recursos al tiempo que otorga mayor flexibilidad y funcionalidades de valor añadido a un determinado proyecto.

- El sistema que nos ocupa en este artículo hace uso de dos tecnologías de monitorización diferentes, integradas bajo una misma herramienta de gestión que permite llevar a cabo las labores de administración del sistema de forma centralizada, al tiempo que facilita el acceso a la información recogida por cada uno de los subsistemas.

### **2.- Sistema Global de monitorización inalámbrica y VideoIP**

Bajo esta filosofía de integración de tecnologías se ha desarrollado el proyecto “Sensórica inalámbrica remota de bajo consumo y gestión de VideoIP del Seminario Mayor de Comillas”, el cual se describe en este artículo.

Este sistema consta de dos partes bien diferenciadas:

- Sistema de monitorización mediante sensórica inalámbrica de bajo consumo
- Sistema de videovigilancia, basado en tecnología VideoIP

Ambos subsistemas son accesibles mediante un gestor de información común basado en entorno Web, que permite administrar y consultar la información reportada por el sistema desde cualquier ubicación dotada con conexión a Internet, de forma descentralizada, y sin más herramientas que un navegador Web.

### **3.- VideoIP. Origen y Evolución.**

El origen de los CCTV [1] (Closed Circuit Television System) se remonta a los años 50 [1]. Posteriormente, en los años 70 la videovigilancia se convierte en una realidad, gracias a los desarrollos de sistemas de grabación analógica y cámaras de estado sólido. Este sistema consistía en un conjunto de cámaras analógicas, conectadas a través de un cable coaxial y un multiplexor a varias grabadoras de video en un cuarto de control



central. La visualización se realizaba en tiempo real a través de monitores con un switch que permitía conmutar entre las cámaras deseadas, o monitores capaces de aceptar múltiples entradas de video.

La implantación de este tipo de sistemas era costosa, y además, dado que se trataba de un sistema centralizado, el centro de seguridad constituía un punto de fallo crítico en el sistema. Además, instalar una nueva cámara en el sistema, implicaba tirar de nuevo cable desde su ubicación hasta la central de control. Por otro lado, las tecnologías empleadas para la grabación de las imágenes eran susceptibles a descargas magnéticas o electrostáticas. Por otro lado, requería de constante intervención humana, ya que era necesario cambiar físicamente las cintas, y monitorización las sesiones de grabación.

La segunda generación de sistemas de videovigilancia llegó gracias al cable UTP que permitía incorporar cámaras direccionables mediante IP a la infraestructura de existente en los edificios a través de conectores RJ-45, sin necesidad de emplear cable coaxial (las cámaras tradicionales se acondicionaban con un adaptador). A pesar de reducir considerablemente los costes de instalación, el sistema seguía siendo centralizado, y se mantenía métodos de grabación poco robustos y que requerían de la intervención humana.

Muchos de los programas relacionados con los soportes de grabación fueron solventados con las grabadoras de video digital (DVRs – Digital Video Recorders), que grababan las imágenes directamente en un disco duro, lo que permitía descentralizar los procesos, implementar mecanismos de redundancia de datos, mejorar los niveles de calidad de la imagen, y todo ello sin requerir la intervención humana. Además, este tipo de transmisión digital permitía incrementar la capacidad de grabación mediante el empleo de algoritmos de compresión de las secuencias de video, y se puede acceder a la visualización simultánea de las diferentes cámaras de forma remota, de acuerdo a las políticas de seguridad establecidas en la red.

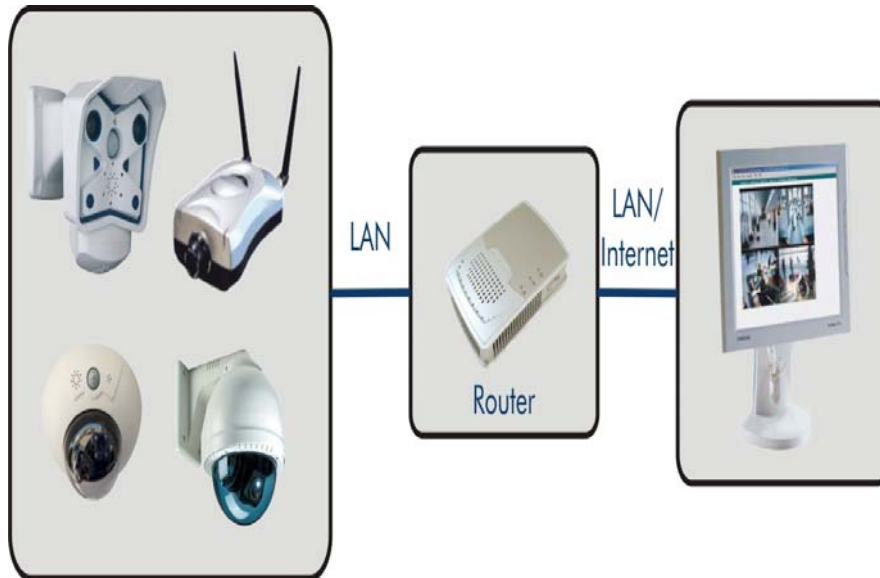
Este modelo de cámaras digitales direccionables mediante protocolo IP pueden ser ubicadas en cualquier punto de la estructura de la red. La señal de video que generan se transmite como tráfico de datos en la red y es gestionada a través de los dispositivos de enrutamiento de la red.

Actualmente, el protocolo estándar para las redes es TCP/IP. Su arquitectura abierta permite que se puedan desplegar diferentes sistemas y servicios bajo una misma infraestructura, de forma que se consigue un aumento de su capacidad, confiabilidad y accesibilidad de los recursos de la red, permitiendo que las tareas de administración y control de estos sistemas y servicios se puedan realizar desde cualquier puesto de trabajo con acceso a dicha red. Por otro lado, con este esquema de implementación, los puntos de fallo críticos están distribuidos y se corresponden con cada uno de los dispositivos de red que forman el sistema. Una cámara IP [2] combina una cámara y un ordenador en una unidad, lo que incluye la digitalización y la compresión del vídeo así como un conector de red. El vídeo se transmite a través de una red IP, mediante los conmutadores de red y se graba en un PC estándar con software de gestión de vídeo.

Un sistema de vídeo IP que utiliza cámaras IP añade las ventajas siguientes:

- Cámaras de alta resolución (mega píxel)
- Calidad de imagen constante
- Alimentación eléctrica a través de Ethernet y funcionalidad inalámbrica

- Funciones de PTZ (Pan/tilt/zoom), audio, entradas y salidas digitales a través de IP, junto con el vídeo, DSP (Digital Signal Processing), manejo de alarmas, automatización, etc.
- Flexibilidad y escalabilidad completas
- Administración remota



*Figura 1. Esquema de implementación Video IP*

#### **4.- Wireless Sensor Networks: Evolución**

- La historia de las redes de sensores [3-6] (“sensor networks”) comienza a mediados del siglo XX, cuando, en plena guerra fría, se desarrolló un sistema de sensores acústicos (hidrófonos) instalados en el fondo del mar con el fin de detectar y seguir los movimientos de los submarinos soviéticos. Con el paso de los años, este y otros sistemas similares evolucionaron, permaneciendo algunos de ellos aún hoy en uso. Sin embargo, es en torno al año 1980 cuando se inicia el desarrollo de las redes de sensores modernas, aunque lastrado por las dificultades tecnológicas y su alto coste, lo que explica su escasa difusión fuera del ámbito militar.
- Es a partir del inicio del siglo XXI cuando se produce el definitivo impulso. Como en muchos otros campos, los avances en la fabricación de semiconductores han jugado un papel crucial en el desarrollo de las redes de sensores inalámbricas. El número de transistores en un chip se ha duplicado cada 1.5 o 2 años (y es una tendencia que se mantendrá en los próximos lustros), reduciéndose proporcionalmente el coste, el consumo y creciendo la capacidad de integración y la velocidad de procesamiento.
- Estos avances microelectrónicos han permitido construir, en los últimos años, sistemas de comunicaciones vía radio extraordinariamente pequeños, eficientes y baratos. Esta ha sido, sin duda, la fuerza impulsora que ha permitido que multitud de técnicas y algoritmos de comunicaciones inalámbricas que eran perfectamente conocidos desde décadas atrás hayan visto la luz de la implementación práctica y, lo que es más importante, de la comercialización a gran escala.

- Que duda cabe que los esfuerzos de estandarización de la comunidad internacional también han contribuido enormemente al reciente “bum” de la monitorización inalámbrica (y de otras aplicaciones). En concreto, el IEEE desarrolló en 2003 el estándar 802.15.4 [7] cuyo objetivo era literalmente: “proporcionar un estándar para conectividad inalámbrica entre dispositivos de ultra-baja complejidad, ultra-bajo coste, ultra-bajo consumo (alimentados con baterías con una vida útil de varios meses o años), baja velocidad binaria y operando en una banda frecuencial internacional y sin licencia”. De forma paralela y complementaria, durante la elaboración del estándar, una agrupación de empresas formó la conocida como Zigbee Alliance [8], que se marcó como objetivo desarrollar una tecnología que satisficiera las necesidades de monitorización y control inalámbricos que existían en el mercado. Con el afán de crear una tecnología global, basaron su elaboración sobre el estándar IEEE 802.15.4, entonces en desarrollo. Así, se fijaron como objetivo definir las capas superiores al estándar del IEEE: las capas de red y aplicación. Para 2004 la alianza contaba con más de 100 miembros en 22 países, siendo parte de ellas empresas de gran peso en el mercado mundial como Philips, Samsung, Mitsubishi Electric, Ember o Siemens, entre muchas otras. En diciembre de 2004 se publicaba la primera especificación del protocolo Zigbee, que se ha visto actualizada en 2006 tras ver la luz una nueva especificación del IEEE 802.15.4 en la que se mejoran algunos aspectos de la anterior versión, especialmente en términos de seguridad y encriptado.
- En la actualidad, y ante la seguridad que aporta la existencia de un estándar internacional, numerosos fabricantes están desarrollando componentes bajo el sello 802.15.4/ZigBee, contribuyendo aún más a su difusión y a la reducción de costes que implica la competencia entre múltiples proveedores.
- Otros dos aspectos tecnológicos están potenciando el desarrollo de redes de sensores inalámbricas. Por un lado, el incremento en la capacidad energética por unidad de volumen de las baterías. Por otro, las técnicas de integración SoC (“system on a chip”) que posibilitan incluir microsensores, circuitos analógicos de acondicionamiento, microprocesadores para control/procesamiento y electrónica para la comunicación inalámbrica en un único circuito integrado, lo que redundará en la disminución de tamaño, coste y consumo del sistema.
- Finalmente, mencionar que también se están dedicando grandes esfuerzos en el desarrollo de nuevos sensores de reducido tamaño, de bajo consumo y operando con tensiones de alimentación reducidas, de manera que encajen con las limitaciones (que mantengan las ventajas) de las redes de sensores inalámbricas. Un ejemplo son los sistemas microelectromecánicos (MEMS: “microelectromechanical system”) [9], dispositivos sensores y/o actuadores de tamaños microscópicos.
- Hoy en día, y como consecuencia de todo lo anterior, existen multitud de sistemas de redes de sensores inalámbricas, como la arquitectura WiseNET [10], la IrisNet [11], las distintas implementaciones de la tecnología Mota, como puedan ser las Mica [12,13] (tecnología empleada por el ejército estadounidense en entornos de guerra real).

## **5.- La monitorización inalámbrica frente a la monitorización tradicional**

Los sistemas tradicionales de sensórica que se emplean para monitorizar estructuras y construcciones están compuestos por un conjunto de sensores distribuidos por el entorno que se desea monitorizar y conectados físicamente mediante cables a un registrador o *datalogger* (en ocasiones sustituido por un ordenador convencional y una unidad de acondicionamiento/adquisición). Los problemas que presentan este tipo de soluciones son múltiples y diversos:

- Elevado coste de los equipos, pues el datalogger, o el sistema de adquisición equivalente, constituye un porcentaje importante del coste total.
- Instalación costosa, debido a la necesidad de tender cables hasta los distintos sensores y proporcionar la alimentación externa al sistema, lo que se traduce en una sucesión de canaletas, rozas, bandejas, etc.
- Expansibilidad limitada y costosa, pues el sistema se diseña para un número máximo y un tipo de sensores concreto, siendo necesario replicar componentes para incrementar el número de sensores, lo que equivale a instalar tantos sistemas completos adicionales como sea necesario.
- Integridad de las señales comprometida, dado que las señales provenientes de los sensores son susceptibles de sufrir distorsión e interferencias en su camino hasta el datalogger, hecho este acentuado por el bajo nivel de señal que habitualmente producen los sensores y por su localización más o menos dispersa (y alejada) respecto al datalogger.
- Enorme riesgo de averías/sabotajes. Debido a las dimensiones físicas del sistema y al número de cables tendidos en un entorno que puede ser considerado cuanto menos hostil (piénsese en una obra), la probabilidad de corte o rotura accidental o intencionada de alguno de los cables del sistema es muy elevada.
- Gran impacto visual, motivado, de nuevo, por las dimensiones físicas del sistema y el cableado del mismo.

Un sistema de monitorización equivalente, pero que emplee la tecnología wireless heredará las características intrínsecas de las redes de sensores inalámbricas, en concreto, la ausencia de cables y su reducido coste, consumo y tamaño. De esta forma se da solución a los problemas antes planteados:

- El coste de cada una de las unidades inalámbricas es, en la mayoría de los casos prácticos, mucho menor que el coste del sensor empleado. Además, desaparece la necesidad de un datalogger.
- Instalación simple, debido a la ausencia total de cables. Las unidades inalámbricas se colocan allí donde está el sensor (incluso pueden contener el sensor integrado), por lo que no es necesario tender los correspondientes cables. Además, debido al bajo consumo de las unidades, éstas emplean pilas o baterías, haciendo innecesario instalar cables que aporten alimentación.
- Expansibilidad sencilla, puesto que sólo es necesario colocar nuevas unidades inalámbricas (con su sensor correspondiente) allí donde sea preciso.
- Integridad de la señal garantizada, pues la adquisición se produce muy próxima

al sensor.

- Menor riesgo de averías/sabotajes y bajo impacto visual, debido a la ausencia total de cables y a las pequeñas dimensiones de los dispositivos.

## 6.- Propuesta SAYME para la monitorización del Seminario Mayor de Comillas

- Innova Consulting ha desarrollado la arquitectura SAYME (Sistema de Adquisición Y Monitorización Estructural) como solución de monitorización inalámbrica distribuida para la industria y la construcción.
- En lo que se refiere a la instalación en planta/obra, SAYME está compuesto por una serie de Módulos Sensores y un Módulo de Control, tal y como muestra la Figura 2. Cada Módulo Sensor es capaz de capturar la señal de uno o varios sensores. Se trata de módulos de pequeño tamaño y bajo coste y consumo que incorporan la electrónica necesaria para acondicionar la señal del sensor correspondiente, un microcontrolador para capturar la señal y gestionar el proceso de transmisión de la información al Módulo de Control, y la electrónica que implementa la comunicación ZigBee.
- El Módulo de Control, alimentado bien con energía eléctrica estándar bien con baterías, preprocesa los datos transmitidos por los Módulos Sensores, los almacena temporalmente y se encarga de transmitir periódicamente vía GPRS toda la información al servidor central remoto, el cual realiza las tareas de almacenamiento definitivo, análisis y diseminación de la información.

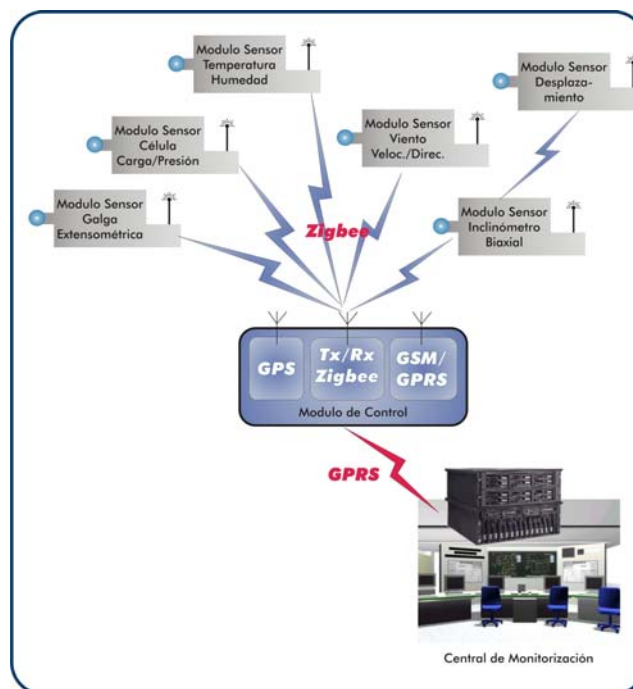


Figura 2. Esquema de la arquitectura SAYME.



Figura 3. Fotografía de un Módulo Sensor de Temperatura y Humedad.

- El sistema propuesto, ofrece una gran versatilidad y capacidad de adaptación a las especificaciones de la aplicación. Por un lado, es posible integrar una gran variedad de sensores, pues, en su catálogo actual, SAYME ofrece Módulos Sensores capaces de medir humedad, temperatura, dirección y velocidad del viento, galgas extensiométricos, células de carga e inclinómetros. Es más, en aquellas aplicaciones que requieran medir otras magnitudes físicas, SAYME ofrece la flexibilidad y la capacidad técnica de integrar el correspondiente sensor. En este último caso, cobra gran importancia la labor de ingeniería necesaria para llevar a cabo dicha integración manteniendo las características fundamentales de los módulos en lo que a tamaño, consumo y precio se refiere.
- Por otro lado, y heredando las ventajas ya comentadas de las redes de sensores inalámbricas, SAYME aporta una gran sencillez de instalación/ampliación, gracias a la característica “wireless” de todos sus componentes y al radio de acción de la comunicación ZigBee entre los distintos sensores y el Módulo de Control. En este sentido, el sistema ofrece un radio de acción superior a 100 metros en campo abierto y la posibilidad de implementar técnicas multisalto (“multihop”) y enrutamiento que permiten desplegar una red de sensores mallada (“mesh”), incrementando de esta forma la cobertura del sistema de forma arbitrariamente grande.
- El pequeño tamaño de los distintos componentes y la ausencia de cables convierten a SAYME en la solución ideal para edificios histórico/artísticos que deben mantener su apariencia y funcionalidad mientras se lleva a cabo la monitorización. De igual manera, se trata de la solución más robusta cuando simultáneamente se llevan a cabo trabajos de restauración o modificación de dichos edificios.
- Los Módulos Sensores SAYME, alimentados con 2 pilas AA convencionales, proporcionan una autonomía energética de entre 4 y 24 meses en función del tipo de sensor y de la frecuencia con la que se recogen los datos, lo que redonda en unos costes de mantenimiento muy bajos.

## 7.- Conclusiones

La última generación de sistemas de videovigilancia basados en tecnología IP ofrece un amplio abanico de funcionalidades no disponibles en las tecnologías anteriores, al

tiempo que permite incrementar tanto la robustez como la flexibilidad del conjunto del sistema. Entre las ventajas más significativas cabe enumerar las siguientes:

- Las cámaras permiten resolución del orden del mega píxel con una calidad constante.
- La alimentación eléctrica se puede proporcionar a través de Ethernet (PPPoE).
- Las cámaras pueden conectarse a la red de forma inalámbrica.
- Funciones de PTZ (Pan/tilt/zoom), audio, entradas y salidas digitales a través de IP, junto con el vídeo, DSP (Digital Signal Processing), manejo de alarmas, automatización, etc.
- Flexibilidad y escalabilidad completas.
- El sistema puede ser administrado de forma remota de forma centralizada.

El objetivo del estándar IEEE 802.15.4, Zigbee, cuyo borrador se publicó en el año 2003, y cuya última versión data del año 2006 es: “proporcionar un estándar para conectividad inalámbrica entre dispositivos de ultra-baja complejidad, ultra-bajo coste, ultra-bajo consumo (alimentados con baterías con una vida útil de varios meses o años), baja velocidad binaria y operando en una banda frecuencial internacional y sin licencia”.

- Bajo esta filosofía Innova Consulting ha desarrollado SAYME, Sistema de Adquisición y Monitorización Estructural, como solución de monitorización inalámbrica distribuida de bajo coste y ultrabajo consumo, con aplicación en el sector industrial y la construcción.

El sistema SAYME está compuesto por un conjunto de Módulos Sensores, que se encuentran distribuidos por la estructura que se desea monitorizar y un Módulo de Control. Cada Módulo Sensor puede capturar la señal de uno o varios sensores. Estos módulos son de pequeño tamaño, bajo coste y ultrabajo consumo, e incorporan la electrónica necesaria para acondicionar la señal de los sensores, y comunicarse mediante con el Módulo de Control.

Por otro lado, el Módulo de Control, puede ir alimentado bien con energía eléctrica estándar bien con baterías. Éste preprocesa los datos que ha recibido de los Módulos Sensores, los almacena temporalmente y se encarga de transmitir periódicamente vía GPRS toda la información al servidor central remoto, el cual realiza las tareas de almacenamiento definitivo, análisis y diseminación de la información.

- El sistema tiene una cobertura superior a 100 metros en campo abierto y permite implementar redes tanto en topología en estrella, como malladas (mesh) con técnicas multisalto, lo que permite incrementar considerablemente el radio de acción.
- El pequeño tamaño de los distintos componentes, la ausencia de cables, el ultrabajo consumo (hasta 2 años con 2 pilas AA), y la ausencia de mantenimiento convierten a SAYME en la solución ideal para edificios histórico/artísticos que deben mantener su apariencia y funcionalidad mientras se lleva a cabo la monitorización. De igual manera, se trata de la solución más robusta cuando simultáneamente se llevan a cabo trabajos de restauración o modificación de dichos edificios.

## **8.- Bibliografía**

- (1) CCTV y vigilancia por video. <http://www.simon.com>

- (2) La evolución de los sistemas de vigilancia por video. <http://www.axis.com>
- (3) E. H. Callaway, *Wireless sensor networks: architectures and protocols*. Auerbach Publications, Florida, 2004.
- (4) N. Bulusu, S. Jha, *Wireless sensor networks: a system perspective*. Artech House, Boston, 2005.
- (5) I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci: "Wireless sensor networks: a survey" *IEEE Computer*, vol. 38, N° 4, pag. 393-422, Marzo 2002
- (6) C. Chong, S. P. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges", *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, N° 8, pag. 1247-1256, Agosto 2003.
- (7) IEEE, *IEEE 802.15.4 specification: wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*. 2005. <http://www.ieee.org>
- (8) ZigBee Alliance, *ZigBee Specification 2004*, document part number 053474r06, <http://www.zigbee.org/>
- (9) J. W. Gardner, V. K. Varadan, O. O. Awedelkarim, *Microsensors, MEMS and smart devices*. Ed. Wiley, New York, 2001.
- (10) C. C. Enz, A. El Hoiydi, J. Decotignie, V. Peiris: "WiseNET: an ultralow-power wireless sensor network solution" *IEEE Computer*, vol. 37, N° 8, Agosto 2004
- (11) P. B. Gibbons, B.Karp, Y. Ke, S. Nath,, S. Sessa: "IrisNet: an architecture for a world-wide sensor web", *IEEE Pervasive Computing*, vol. 2, N° 4, pags. 22-33, Octubre/Diciembre 2003.
- (12) J. L. Hill, D. E. Culler, "Mica: a wireless platform for deeply embedded networks" *IEEE Micro*, vol. 22, N° 6 pags 12-24 Noviembre/Diciembre 2002.
- (13) Crossbow: *Mica 2 wireless measurement system datasheet 2004*, document part number 6020-0042-04, <http://www.xbow.com>



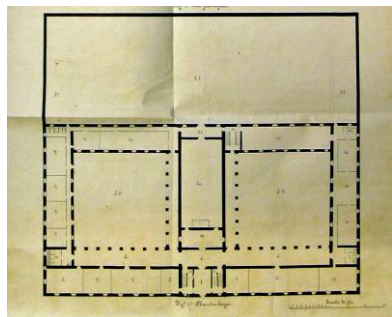
## LA REHABILITACIÓN DEL ANTIGUO SEMINARIO DE LA UNIVERSIDAD DE COMILLAS

*Luis Alberto Alonso Ortiz, Joaquín Barrientos Barquín, Eduardo Fernández-Abascal Teira, Floren Muruzábal Sitges, Eduardo Pesquera Gutiérrez, Jesús Ulargui Agurruza.*

### La construcción del Seminario Mayor

La primera idea de construir un edificio para “Seminario de Pobres” en Comillas tomó forma al final del verano de 1881. Aquel agosto la villa marinera recibió al rey Alfonso XII y a su familia, invitados por el indiano Antonio López y López, quien mucho había ayudado política y económicamente a la restauración borbónica. El marqués de Comillas empresario y hombre de negocios, se había enriquecido tras su periplo cubano ayudado por sus relaciones familiares y comerciales con el mundo empresarial catalán. El marqués volvía los veranos a su pueblo natal donde construyó su vivienda de descanso (La casa Ocejo) y, en torno a ella, sus familiares levantaron las suyas (Casa del Llano, Casa de la Portilla, Las Cavaduchas). En el mismo parque, aquel fastuoso verano de 1881, se inauguró la Capilla Panteón y se puso la primera piedra del que iba a ser su palacio de Sobrellano, ambos proyectos, de Joan Martorell y del joven Cristóbal Cascante que dirigió las obras. Cascante colaboraría también con Oriol Mestres en la transformación urbanística de Comillas en aquel año; se construyeron paseos, puentes, arcos de recibimiento, casetas de baño... Colaboraron en las obras los jóvenes arquitectos que trabajaban en el estudio de Martorell: Lluís Doménech y Antoni Gaudí, y se desplazaron hasta la villa artesanos, escultores, pintores, metalistas, vidrieros, ceramistas, tapiceros, decoradores, jardineros, contratistas..., construyéndose un sofisticado escenario para el veraneo regio que vislumbraba las maneras de lo que más tarde sería el Modernisme y que puso a prueba la capacidad emprendedora catalana, que se vio compensada siete años más tarde con la celebración de la Exposición Universal de Barcelona.

Tras la euforia de aquel verano, Antonio López decide la construcción de un seminario en Comillas. Fue el P.Tomás Gómez Carral, jesuita nacido en Cabezón de la Sal, fundador de los colegios de La Guardia y Deusto, quien logró convencer al marqués. Este mismo se encargó de comprar los terrenos elegidos por Antonio López, la colina de Velecio, el sitio que llamaban La Cardosa. Un lugar muy expuesto a las inclemencias del clima pero que remataría de forma monumental el conjunto de obras que promovía la familia López.

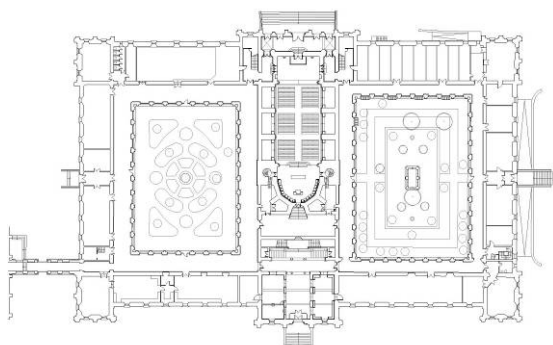


Para diciembre de 1881 el jesuita ingeniero de Caminos Miguel Alcolado había dibujado los primeros planos de un “Seminario para 200 alumnos”. Este primer proyecto establece una ordenación general del edificio que básicamente se mantuvo hasta el final: planta general rectangular, dos patios para iluminar las crujías de habitación, y un singular volumen transversal que divide en dos cuerpos los usos domésticos y docentes en donde se localizan los espacios más representativos del seminario. Salvo este esquema de partida, poco se mantuvo de la idea de edificio proyectado por Alcolado

caracterizado por una solución academicista y por la sencillez con la que se planteaban cuestiones como la articulación entre las piezas y las soluciones formales de los

volúmenes. Los patios interiores solo tenían galerías cubiertas en dos de sus lados y el edificio sólo contaba con dos núcleos de comunicación vertical: en el vestíbulo de ingreso sur y de forma asimétrica una escalera en la fachada norte. La iglesia, con el altar al sur, se resuelve como una caja prismática que se cubre a dos aguas y se remata con una espadaña de aspecto rural.

Habían comenzado las obras de cimientos por el lado oriental cuando en enero de 1883 muere Antonio López y López. Su hijo, el segundo marqués de Comillas, Claudio López Bru, se implicaría desde entonces en este proyecto interviniendo de forma muy personal en su realización. La primera decisión fue encargar un nuevo proyecto a Joan Martorell, uno de los arquitectos de la familia López, que en aquel momento levantaba el palacio de Sobrellano.

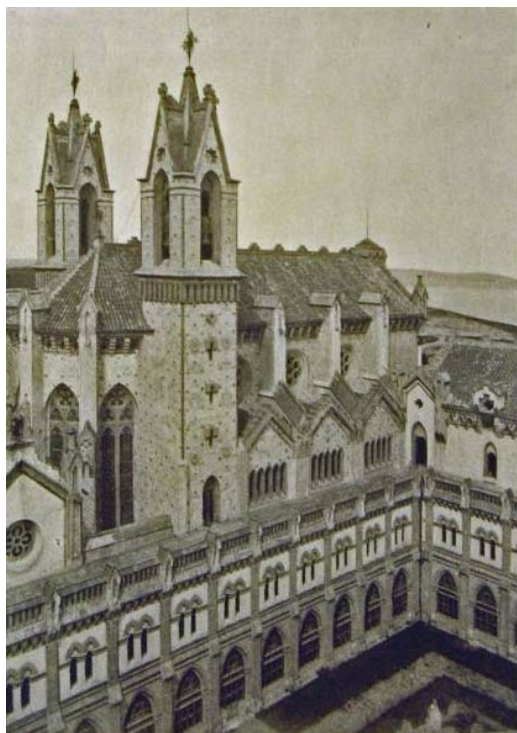


Joan Martorell aumentó la dimensión original del edificio hasta una ocupación de 100 por 60 metros, dispuso una planta más y cambió radicalmente la imagen final del conjunto. Racionalizó las comunicaciones disponiendo más escaleras y completó con galerías los cuatro lados de los patios; las articulaciones entre las partes son más evidentes. Amplió el programa representativo original con una yuxtaposición muy elaborada de cajas en el cuerpo central. Con un planteamiento clasicista de orden, jerarquía y simetría, se introducen eclécticamente elementos medievalistas, mudéjares y otros que parecen anticipar el modernismo. Las composiciones se enriquecen con los juegos de materiales, texturas y colores: piedra caliza concertada, piedra arenisca rojiza de Carrejo y ladrillo visto. Si en la capilla panteón optó por un neogótico con el rigor de un fiel seguidor de las teorías de Viollet le Duc, en este caso, optó por una actitud más libre.

La primera piedra del nuevo edificio se colocó oficialmente en mayo de 1883. Tomó la dirección de las obras Cristóbal Cascante, que dirigía también el palacio y el Capricho proyectado por Antoni Gaudí. En los años que permaneció en Comillas, Cascante proyectó el edificio de Hospital y el monumento conmemorativo del 1º Marqués. Su trabajo, poco valorado, fue determinante para finalizar los proyectos comillanos. En el Seminario no solo interpretó los planos de Martorell, sino que intervino como proyectista en muchas de las soluciones finales del Seminario, incluidos los diseños para carpinterías, mobiliario y objetos litúrgicos.

La obra se desarrolló con graves problemas de construcción debido a la mala calidad de los materiales empleados y a las forzadas decisiones de diseño. En diciembre de 1886 se desploman las cubiertas del cuerpo sur derribando los muros del patio y al año siguiente después de abovedar la iglesia, se abrieron varios muros. Se modificaron parte de los alzados previstos, se macizaron las tribunas y se decidió no construir las esbeltas agujas

proyectadas en las torres. En este momento la obra entró en crisis, Cascante estaba cansado y decepcionado (murió un año más tarde), Martorell se dedicaba más a sus importantes encargos catalanes y don Claudio no disponía de los suficientes recursos para destinarlos al Seminario. Los trabajos se ralentizaron, cobrando un nuevo y definitivo impulso en 1889, cuando se resolvieron los problemas económicos y se encargó al prestigioso arquitecto Lluís Domènech i Montaner que concluyese las obras.



Las primeras decisiones fueron las estructurales: refuerzo de forjados, atirantado de cubiertas, contrapesos en las arquerías de la iglesia, reforma de las recogidas de aguas, entre otras. Pero la aportación más brillante de Domènech fue la reestructuración de los espacios más representativos del seminario así como la introducción de un programa simbólico-decorativo, materializando en Comillas las nuevas ideas del Modernismo. Durante tres años los trabajos se concentrarán en la reconstrucción y decoración del cuerpo principal: vestíbulo, escalera principal, capilla de san Antonio, paraninfo y un recubrimiento exterior de la caja de iglesia y cuerpos de las torres con piezas cerámicas, decisión que logra caracterizar de modo singular al conjunto.

Es notable la contribución en estas intervenciones de artistas del entorno de Domènech, siendo el mismo responsable de los diseños de las puertas de bronce y de las vidrieras y artesonado de la escalera.

Un año antes de acometer estas obras había agrupado en su taller situado en el Café-restaurant de la Exposición de Barcelona, a profesionales y artesanos con el espíritu de explorar y recuperar los procedimientos y técnicas artesanales. La mayor parte de los elementos decorativos y las aplicaciones del seminario se construyeron en Cataluña, colaborando numerosos artistas. Los fundidores Masriera y Camping se encargaron de los bronceos en las puertas de Las Virtudes; el escultor Francisco Font esculpió el busto del marqués; Eusebi Arnau i Mascort realizó las puertas de bronce (la puerta Norte de la iglesia, con planchas de latón repujado a martillo, fue diseñada por Domènech pero carece de firma), también se le atribuye a Arnau la talla del escudo monumental en la portalada de ingreso a la finca; Alfonso Juyol ejecutó los capiteles vegetales de las arquerías, el modelado y composición ornamental de las puertas en el vestíbulo del paraninfo y las gárgolas del artesonado de la escalera; Juan Soler Roig realizó los arcos trilobulados del vestíbulo, las tallas de los cuatro evangelistas, los capiteles de las mismas arquerías y los ángeles músicos de la capilla; y Ramón Núñez fue el autor de la estatua de la Virgen Stella Maris de la fachada Norte (la primitiva) y de las estatuas de la Iglesia y la Sinagoga en la fachada Sur así como de los tímpanos de las cinco puertas de la fachada Norte. De la decoración pictórica fue responsable Eduardo Llorens Masdeu autor del friso en el Paraninfo, de los paneles de la Filosofía y la Teología y de la decoración esgrafiada de los vestíbulos y del nartex. Intervinieron también los pintores José M<sup>a</sup> Tamburini Dalmau y Juan Llimona Bruguera autores de las doce pinturas sobre tabla que forman parte de los retablos de la iglesia. Las vidrieras, de la

escalera diseñadas por Doménech y las de la iglesia y capilla de Rigalt, fueron construidas por el taller Amigó. Los diseños de los pavimentos de mosaico y terrazo son obra de Mario Maragliano Navone. El revestimiento cerámico policromo fue diseñado por el valenciano Ros y el hierro forjado por Tiestos.



La intervención de Doménech en el aspecto decorativo y en la espectacular y escenográfica solución del vestíbulo, introduce claramente elementos del modernismo ondulante catalán, el “horror vacui” de las soluciones en el artesanado de la escalera: cúpula de vidrios, gárgolas de animales fantásticos estilizados, la utilización de maderas de distintos colores, la cerámica vidriada de brillos metálicos (de tradición islámica), la conjunción de materiales, colores y técnicas que subrayan la ambigüedad entre artesanía e industria (serialización, plantillado, estampado), buscando la integración de las artes, incluso la música, con la incorporación del órgano tras una celosía en el coro.

En enero de 1892 se comienzan a impartir los cursos. Diez años más tarde el alumnado se había duplicado hasta el número de 400. El Papa Pío X había erigido en el Seminario una Universidad Pontificia y se hizo necesario ampliar las instalaciones. Fue entonces cuando se ocuparon los espacios bajo cubierta para uso de dormitorios, unas obras que eliminaron los arriostramientos metálicos de los muros y alteraron significativamente los buhardillones de la cubierta. En 1912 se construyó el Seminario Menor, proyectado por José María Basterra unido al edificio primitivo por una galería en el extremo occidental del corredor sur. Terminada la Guerra Civil el complejo fue ampliado con el edificio del Colegio Máximo inaugurado en 1944 y en 1946 se inician las obras del Pabellón Hispano-Americano. En 1955 se proyectó una gran biblioteca general, obras apenas iniciadas pues el futuro de la institución iba a estar en Madrid a donde se trasladó en 1960 la Facultad de Derecho Canónico y en 1968 todo el cuerpo docente de la Universidad Pontificia de Comillas.



### **El edificio construido**

El seminario se construye en un lugar privilegiado y expuesto, una de las últimas lomas libres del entorno de la villa de Comillas, estableciendo un diálogo con el núcleo histórico, otros edificios situados en las cotas altas, como el Palacio de Sobrellano, y el mar. Esta acertada posición le convierte en un hito en el paisaje visible desde un amplísimo territorio. Las posteriores ampliaciones han reducido su presencia relativa.

El edificio construido responde a una planta clasicista, con un cuerpo central, donde se dispone la iglesia, y dos claustros con las circulaciones en planta baja y primera. En la planta segunda el claustro se escalona, dejando una cubierta plana. Las irregularidades y asimetrías provocadas por las dudas y transformaciones del proyecto apenas se aprecian.

La iglesia, una pieza autónoma, se inserta en el edificio, en sentido inverso al habitual, con una escala que provoca fuertes tensiones en el contacto con el resto del edificio. El acceso desde el exterior es excesivamente reducido, las conexiones con las otras estancias del seminario no están resueltas y la girola, con sus vidrieras, necesita más aire. Se utiliza un modelo conocido para resolver un programa singular con 19 altares, para facilitar los ritos simultáneos.

El resto de los espacios de mayor interés del edificio, el vestíbulo, la capilla de San Antonio y el Paraninfo también se disponen en el cuerpo central. El espectacular vestíbulo es uno de los espacios más cualificado del modernismo, con su exhuberancia ornamental y la hábil manipulación de los espacios, comprimido primero bajo el peso de la torre y dilatado en el ascenso a la planta superior.

En los otros cuerpos cabe resaltar la biblioteca, el aula de música...Las estancias de las torres compartimentadas pasan casi desapercibidas.

Los accesos, situados en los ejes de las cuatro fachadas, están claramente jerarquizados, valorándose los principales con exquisitas intervenciones. El vestíbulo o nártex de la iglesia, como ya se ha dicho, resulta insuficiente.

El sistema de claustros y la disposición de las escaleras resuelve adecuadamente las comunicaciones entre las estancias en las planta bajas, salvo la conexión con la iglesia. En las dos plantas superiores, los pasillos centrales dejan celdas de pequeñas dimensiones, que se ajustan al programa de la época. El aprovechamiento y reparto de la bajocubierta, realizado posteriormente, provocó dudosas transformaciones.

Las fachadas, pensadas en inicio en clave académica, son el resultado de la superposición de diversos sistemas: la articulación volumétrica originada por la planta clasicista, la construcción de las fábricas en piedra y ladrillo, los elementos

compositivos medievalistas o neomudéjares y la aplicación de algunos elementos ornamentales de aire modernista. Cabe destacar el tratamiento de la falsa loggia de la última planta, con variantes en las diversas orientaciones, la atrevida coronación del cuerpo central, la cornisa quebrada con los buhardillones y el perfill dentado de la cumbra, que crea una pintoresca y expresiva silueta en el territorio. El cuerpo de la iglesia adquiere mayor protagonismo, tanto en la fachada norte como en los claustros, con el revestimiento de los hermosos azulejos.

Las fachadas interiores de los claustros, casi unitarias, quedan definidas por la sección, la permeabilidad de la planta baja, la presencia del volumen de la iglesia en las plantas superiores y las cubiertas inclinadas ligeramente retrasadas.

A la crudeza constructiva, que caracteriza las formas y los espacios del seminario, se superpone en el cuerpo central un laborioso tratamiento de los paramentos verticales y los falsos techos con la aportación del trabajo de numerosos artesanos: coloristas pavimentos, zócalos, esgrafiados, vidrieras, pinturas en telas, falsos techos... Esta exhuberancia deja en un segundo término el resto del edificio, que mantiene un carácter seco y sombrío, casi tenebroso.

El seminario se construyó con los sistemas y materiales habituales en los grandes edificios de finales del siglo XIX, con la incorporación de técnicas de la tradición catalana y ciertas maneras del estilo gótico mudéjar. Estos modos se aprecian en el aparejo de los muros mixtos, en las bóvedas de las escaleras, en la solución de las cubiertas, excesivamente complejas y fragmentadas....

La estructura de la mayor parte de los espacios, salvo la iglesia, está prácticamente ausente, superponiéndose falsos techos con simulaciones estructurales en el vestíbulo, la biblioteca, el cine... Resulta curiosa la voluntad de construir con sistemas direccionales de vigas y viguetas soluciones que parecen losas, forzando los apoyos. En diversos puntos del edificio se observa la intención de crear equilibrios inestables, con vuelos exagerados en la iglesia y los buhardillones o apoyos extraños en las torres.

La construcción de la piedra y ladrillo, que tan buenos resultados ha dado en otros edificios, tiene aquí graves problemas en la trabazón de los aparejos, generando o agravando diferentes patologías.

Otros problemas del edificio, ya detectados en la fase de construcción, derivan del complejo sistema de evacuación de aguas, previsto inicialmente con bajantes ocultas interiores y nunca resuelto definitivamente.

El análisis de otras patologías del edificio, posibles fallos de cimentación de los pilares de la torre del reloj, humedades de capilaridad, muros de fachada mal arriostrados y con empujes horizontales de cubierta, deformaciones de forjados, maderas con xilófagos, deterioro general de los revestimientos..., queda fuera del alcance de este texto.

## **El proyecto**

### **Ordenación**

Entendemos que el proyecto no debe ser una simple rehabilitación del antiguo Seminario Mayor; ha de ser una oportunidad para revitalizar y poner en valor el edificio y el conjunto original de la antigua Universidad Pontificia de Comillas.

No siempre es posible comenzar por el inicio. La implantación del ambicioso proyecto del Campus Comillas debe realizarse de manera paulatina, consolidando cada paso a realizar mediante una gestión dilatada en el tiempo. Por ello entendemos que -en esta ocasión- es aconsejable actuar sobre un elemento y no sobre la totalidad del conjunto. A pesar de ello, proponemos una posible actuación sobre el conjunto del futuro Campus Comillas, que apoye -pero no condicione- la rehabilitación del antiguo Seminario Mayor.

El edificio debe recuperar su carácter de pieza fundamental en el Campus, como lo fue en los orígenes de la Universidad Pontificia. Para ello el proyecto contempla el tratamiento de la urbanización de su entorno próximo y la resolución de los accesos a través de la finca. Se recupera como acceso principal la Portalada histórica situada en la vertiente sur, con su recorrido ceremonial hasta la plataforma donde se implanta el Seminario; recorrido que se completa hasta una salida en la vertiente norte con una conexión con la carretera de Comillas-Trasvía, por donde también se produciría el acceso de autobuses. De esta manera se libera el acceso histórico del intenso tráfico que generará la actividad del Campus y las actuales visitas de turistas. Continuando con la labor iniciada de rehabilitación de las edificaciones anejas al Seminario, el proyecto contempla la reutilización del edificio de la antigua Panadería como Central de Instalaciones, dimensionada para dar servicio al conjunto de las edificaciones futuras del Campus Comillas. En definitiva, continuar con actuaciones arquitectónicas que se adecuen al carácter de campus abierto y verde, donde el Seminario Mayor sea el elemento arquitectónico en torno al cual se articulen el resto de las construcciones del Campus Comillas.

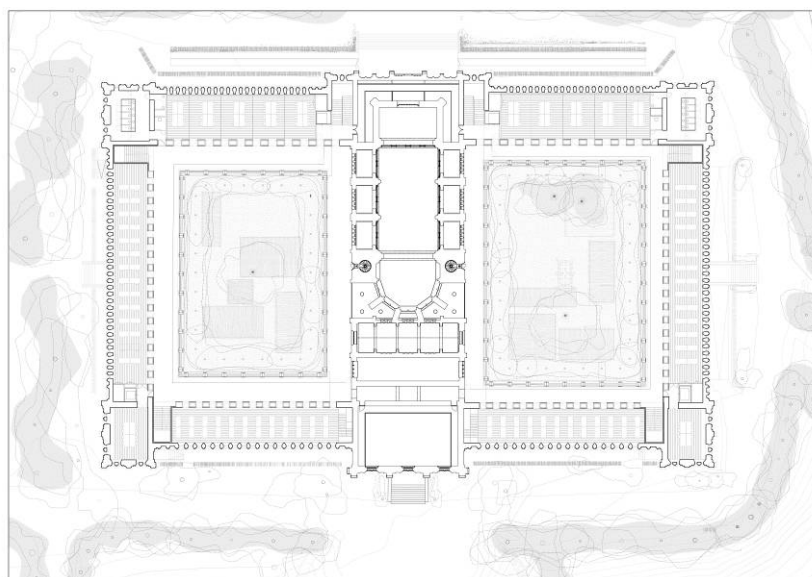
### **Intervención**

Nadie discute en la actualidad el valor arquitectónico del edificio: por lo tanto el proyecto contempla la conservación de los espacios arquitectónicos más significativos del edificio (vestíbulo, iglesia, paraninfo, capilla y claustros) y de toda su configuración exterior, con sus fachadas que dibujan la silueta tan característica del Seminario. Una restauración respetuosa de estos elementos arquitectónicos de nuestro Patrimonio que devuelva nuevamente su esplendor original. Estos trabajos de restauración se complementan con una labor de rehabilitación más intensa sobre el área del edificio cuyo estado de conservación y falta de adecuación funcional, estructural e instalaciones inexistentes aconseja un grado de intervención más importante. Los estudios realizados por el GTED de la Universidad de Cantabria confirmaron las iniciales hipótesis sobre el mal estado de las crujiás de los claustros.

### **Los claustros**

El antiguo Seminario Mayor se estructura en una crujía central representativa y dos plantas (baja y primera) con unos espacios de mayor escala, frente a dos plantas superiores (segunda y bajocubierta) con un programa menudo de habitaciones. Sus comunicaciones internas (pasos y escaleras) se adecuaban a la escala y carácter de cada uno de los espacios actuales. El nuevo uso de las instalaciones de la Fundación Campus

Comillas, compuesto fundamentalmente por salas de usos polivalentes (docentes, reuniones, biblioteca, exposiciones, restauración, administrativo,...), requiere de una adaptación de escala y carácter en todo el edificio. La estructura arquitectónica de las plantas baja y primera con los claustros que rodean los patios y las crujías perimetrales a dichos claustros, configuran un tipo arquitectónico de sencilla adaptación a los nuevos usos. Tras una primera acción de eliminación de los elementos interiores añadidos, el proyecto propone una serie de actuaciones que se adaptan a la estructura arquitectónica del edificio. En primer lugar se incorporan e incrementan las escaleras en el espacio de los claustros, manteniendo la ubicada en la crujía norte e incorporando una más en cada una del resto de las crujías, siguiendo el mismo esquema compositivo que la existente. A continuación se incorporan los elementos de servicio con el que es necesario dotar al edificio (aseos, ascensores, oficinas,...) en las esquinas del edificio, lugares que aunque disfrutan de una relación privilegiada con el exterior, funcionan como áreas más privadas respecto a las circulaciones del claustro. Y, una vez concentrados los usos servidores en los límites de la planta –las esquinas- incorporamos los espacios de trabajo que dan sentido a este proyecto en las crujías perimetrales: unas salas diáfanas, con posibilidades de división para adaptar al aforo solicitado con sistemas de puertas o tabiques móviles que se incorporen a la estructura arquitectónica del edificio. El cambio más significativo en escala del edificio se ha de producir en las plantas superiores; a excepción de las crujías norte donde se aprovecha el espacio del bajo cubierta para la ubicación de una serie de doce habitaciones con vistas al Cantábrico, en las demás crujías superiores del edificio se elimina el actual forjado del bajo cubierta para aumentar la escala de las salas de planta segunda con dobles alturas. Así aparecen unos nuevos espacios continuos y diáfanos para uso de bibliotecas y salas de estudio, que se abren a las actuales terrazas situadas sobre los claustros y al exterior a través de la apertura de la secuencia de huecos del friso exterior; además este nuevo espacio se ilumina cenitalmente mediante las actuales mansardas de la cubiertas, que aparecen así en una nueva configuración del interior como una serie de lucernarios ubicados a ambos lados de la cubierta.



Una vez realizadas todas las acciones de incorporación del programa funcional solicitado por la Fundación al edificio, el proyecto ha de proponer la solución de consolidación estructural y de inclusión de todas las nuevas instalaciones que demanda



el edificio (climatización, eléctricas, comunicaciones, seguridad,...). La propuesta de rehabilitación de esta área de los dos claustros del edificio ha de aunar con una única acción todas las demandas solicitadas; un único elemento constructivo que además de cumplir con las solicitudes estructurales e integrar las instalaciones sea capaz de configurar el nuevo carácter de los espacios interiores del antiguo Seminario. Se ha optado por actuar en el muro interior que divide el claustro de las crujiás perimetrales; un elemento constructivo que ha sufrido todos los avatares de las sucesivas intervenciones en el edificio y que su único valor arquitectónico actual es su importante sección. Así pues, se sustituye dicho muro por un nuevo muro compuesto por dos muros arriostrados entre sí y que libera su espacio interior para introducir los necesarios patios de instalaciones. Se mantiene la sección total del muro actual para así mantener la dimensión del ancho del umbral de paso entre claustro y salas. De esta manera el actual muro se convierte en un nuevo “muro técnico” que articula la relación entre salas polivalentes y los dos claustros del edificio. Un muro cuyos huecos de paso a las salas están ordenados y se prolongan de suelo a techo permitiendo una mayor conexión visual entre ambos espacios. Un muro técnico construido por dos muros de 15 centímetros de espesor con un patio interior de 70 centímetros que comunica todo el edificio desde la planta sótano hasta la última planta. Por su interior respiran las climatizadoras ubicadas en sótano –lo que consigue liberar de instalaciones la cubierta- y se ubican todas las instalaciones que dan servicio a cada planta. En dicho muro técnico apoyan las nuevas losas planas, también de hormigón blanco, con vigas peraltadas para salvar la luz de las salas. La cara inferior de hormigón blanco configura los nuevos techos de las salas, mientras que en su cara superior apoya una subestructura de falso suelo que contiene un plenum para la difusión de la climatización por difusores a baja velocidad, garantizando así una mejor distribución y mayor confort térmico en las salas. Los retornos se producen a través de la parte superior de los muros. A través de la sección de dicho suelo técnico se organiza y distribuyen el resto de las instalaciones (eléctricas, comunicaciones, seguridad,...). La iluminación se descuelga desde los techos hasta una altura de unos 2,50 metros, para así acercarse a los planos de trabajo y además permitir luz indirecta a través de la proyección de las nuevas losas de los techos; un control de la intensidad garantiza un grado de confort luminoso en función del uso requerido.



La nueva apertura de huecos entre claustros y salas permite una nueva conexión visual y de uso de los patios. En ambos patios se proyecta un tratamiento paisajístico con la recuperación y puesta en valor de las especies vegetales más significativas (tejo,...) y la incorporación de masas perimetrales de arbolados de hoja caduca. Los patios se convierten con este proyecto en unos espacios de estancia al aire libre.

### **El cuerpo central**

Las intervenciones en el cuerpo central del seminario son escasas pero significativas, centrándose especialmente en la restauración de los espacios más cualificados del seminario. Entre otras cabe reseñar las siguientes intervenciones:

- Restauración del volumen, forma textura y color del edificio, prestando especial atención al tratamiento de la piel y la solución de la cubierta, recuperando los faldones originales de la capilla y sistematizando la recogida de aguas.
- Transformación de la iglesia en un espacio polivalente, sala de conferencias y conciertos..., sin perder el uso religioso.
- Apertura de huecos en las capillas laterales de la iglesia y ejecución de rampas para aumentar la accesibilidad y permeabilidad de la iglesia. La solución facilita las conexiones funcionales y visuales en sentido este-oeste.
- Aplicación de un revestimiento vítreo seriegrafiado en los paramentos de la planta baja de la iglesia, que recuerda la azulejería superior, valorando el protagonismo de la iglesia. Este protagonismo se acentúa con la apertura de otros huecos en las plantas primera y segunda, visualizando la girola, que puede respirar e introducir más luz mediante las vidrieras..
- Restauración y valoración de los espacios más significativos del Seminario: el vestíbulo, el paraninfo, la capilla de San Antonio...
- Uso y cualificación de espacios infrutilizados: el espacio sobre el paraninfo, las estancias y patios tras la girola, la hermosa y desconocida bajocubierta de la iglesia, el trascoro y el nártex que se intenta ampliar virtualmente con el tratamiento del acceso exterior y las transparencias.
- Restauración de los elementos ornamentales aplicados más significativos: maderas, vidrieras, esgrafiados, pinturas...
- Introducción de nuevas instalaciones que resuelvan las exigencias de un edificio contemporáneo con un mínimo de impacto y criterios de racionalidad y sostenibilidad. Esta solución se complementa con la rehabilitación y ampliación de “la panadería”, que permite reducir las servidumbres en el edificio histórico.

### **Construcción e instalaciones.**

En base al estado del edificio, analizado minuciosamente en el informe elaborado por el Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria y diversos colaboradores, y en el estudio sistemático de la ornamentación artística aplicada que hemos elaborado, considerando las propuestas generales de la intervención, se han definido las soluciones estructurales, constructivas, el diseño de las instalaciones y los sistemas de restauración de los diversos paramentos. El inventario de los revestimientos de los paramentos y ornamentos se ha efectuado en fichas pormenorizadas de cada estancia. El estudio de los estados de conservación debe continuarse en el desarrollo de las obras.

La rehabilitación exige: refuerzos puntuales de cimentación, drenajes y soleras de saneamiento, recuperación de la trabazón de muros y cosido de fisuras, restitución de volumetría de muros, impermeabilización de los mismos, nuevos muros de hormigón, reconstrucción y refuerzo de forjados horizontales e inclinados, nuevas losas de hormigón, cerchas reconstruidas o nuevas, atirantado de fachadas, solución global del sistema de evacuación de aguas, nuevos repartos, en su mayor parte con mamparas

móviles, nuevas carpinterías, nuevas instalaciones, restauración de artesonados, zócalos, alicatados, esgrafiados, estucados, pinturas y diversos pavimentos, nuevos pavimentos pétreos y de madera, nuevos revestimientos vítreos y de madera, pinturas al silicato, otras terminaciones, obras varias de urbanización y jardinería...

Las soluciones de estricta conservación coexisten con las reconstrucciones o la construcción de nuevos elementos. En estas obras se utilizan sistemas y materiales tradicionales o nuevos, que conviven con naturalidad con las preexistencias, estableciendo un sereno diálogo.

Las instalaciones requeridas, de gran complejidad, se resuelven silenciosamente. Su descripción queda fuera de este texto.

### **Las fachadas**

Las fachadas del edificio están construidas con ladrillos vistos de baja calidad, elaborados en la propia finca, varios tipos de piedra, calizas y areniscas, morteros de terminación, alicatados...

El ladrillo, especialmente en las zonas más expuestas, presenta un gran deterioro provocado por diversos procesos de alteración: pátina de suciedad, pátina biogénica con crecimiento de plantas, escorrentías variables, humedades de filtración y capilaridad, eflorescencias, erosión con disgregaciones y desprendimientos, fisuras y fracturas, restos de patinas originales, sustituciones y repasos ejecutados en reformas anteriores...

En las calizas, utilizadas en las mamposterías, los daños son menores, básicamente superficiales y estéticos, que afectan a las veladuras originales. Se aprecian deposiciones de polvo, crecimientos de microorganismos... Las esculturas de caliza y hormigón presentan problemas similares.

La piedra arenisca rojiza, más delicada, presenta además en algunas zonas erosiones, desprendimientos, fracturas...

Los morteros de terminación, que simulan piedra en algunos paramentos, están bastante deteriorados en las zonas más expuestas, con fisuras y desprendimientos. dejando visto el soporte.

Los alicatados presentan igualmente manchas de suciedad de diverso origen, fisuras, pérdidas del vidriado de las piezas y grietas de los muros soporte.

La restauración de las fachadas se efectúa desde un planteamiento de mínima intervención para alcanzar la máxima conservación. Los tratamientos planteados deben ser estables y compatibles con el soporte y en la medida de lo posible reversibles. Los estudios previos y la limpieza son las fases más importantes de la restauración. En algunos casos, previa a la limpieza, será necesario efectuar una consolidación.

Los materiales más delicados, ladrillos, arenisca y morteros de revestimiento, se limpiarán mediante la proyección de abrasivos en húmedo. En función de las pruebas efectuadas, se seleccionarán los abrasivos (piedra pómez, granulado vegetal, microesferas de vidrio, silicato de aluminio u óxido de aluminio), su tamaño y las condiciones de proyección, (diámetro de la boquilla, cantidad de agua, distancia y ángulo de impacto, presión...). Se utilizarán boquillas que expulsen el abrasivo de manera rotacional. Las eflorescencias se eliminarán mediante la colocación de apósitos de pulpa de celulosa con sepiolita y agua desionizada. Ejecutada la estructura general del edificio, se procederá al cosido y sellado de grietas con varillas de acero inoxidable

y morteros técnicos. En las fábricas de ladrillo más deterioradas se recuperará el volumen sustituyendo las piezas deterioradas por otras nuevas de las mismas características. En otros casos se utilizarán morteros de reintegración, previo el tratamiento del soporte y la ejecución de microestructuras de fijación. En los rejunteos se utilizarán morteros similares a los existentes.

En la restauración de los morteros de revestimiento se utilizarán morteros de cal en diversas capas, previa preparación y regulación del soporte.

En la piedra caliza, la proyección para la limpieza podrá ser en seco. En las zonas con pátina biológica se utilizará un tratamiento biocida. En otras zonas puntuales, puede resultar precisa una limpieza química

El conjunto de las fachadas se tratará con tratamientos de conservación hidrófugos y biocidas, adecuados a cada soporte, y una pátina de entonación cromática.



### **El tratamiento de los paramentos interiores**

Con los mismos criterios se resolverá la restauración de los revestimientos y elementos ornamentales interiores, con técnicas diferenciadas para los diferentes materiales existentes en el seminario, probadas específicamente en cada elemento. En casi todos los materiales se repiten los mismos procedimientos: estudios específicos, preconsolidación, limpiezas, consolidación, recuperaciones, reintegraciones, tratamientos de conservación, patinas de entonación y control posterior.

Piedras en elementos escultóricos: extracción de eflorescencias salinas, limpieza química y física, consolidación de zonas degradadas con silicato de etileno, saneado de juntas, recuperación de volúmenes perdidos con morteros de reintegración, ajustando texturas y tonalidades, reintegración cromática puntual, control de evolución de sales...

Carpinterías aplicadas a muros o techos: limpieza de polvo con aire a presión, limpieza física con lana de acero, aceite técnico, esencia de trementina, consolidación general con resina acrílica, tratamiento contra xilófagos con fungicida, reintegración de pérdidas

con masillas específicas y encolados, tratamiento con aceites vegetales y ceras naturales y aplicación de una patina puntual.

Bronces y otros elementos metálicos: limpieza con laboratorio especializado determinando el nivel de patina con materiales a definir, pasivación del proceso de oxidación con laca protectora.

Vidrieras: Desmonte, reparación y sustitución de estructuras portantes, restitución de vidrio con piezas similares a los existentes, restauración de emplomados, limpieza de superficie de vidrios, limpieza general y aplicación de capa de protección.

Mosaicos: Limpieza superficial, preconsolidación de elementos sueltos, limpieza química y neutralización, consolidación y reposición de teselas, reconstrucción de juntas con morteros de cal y resina acrílica con aplicación de pigmentos, tratamiento cromático y capa de protección final.

Esgrafiados en pinturas y estucados: preconsolidación de la capa superior al soporte con resinas acrílicas, , limpieza de depósitos, extracción de sales solubles con apósitos de sepiolita, limpieza general química y mecánica, consolidaciones y cierres de fisuras con morteros de cal, usando en algunos casos grapas de resina epoxídica, reintegración volumétrica con mortero de cal y polvo de mármol, siguiendo criterios arqueológicos o miméticos, en algún caso con plantillas, reintegración cromática con cales y pigmentos minerales.

Pinturas sobre lienzos aplicados: preconsolidación de la capa pictórica deteriorada, extracción de los clavos, protección de la pintura con papel Japón y coleta para su desmontaje, si se considera oportuno, limpieza del reverso, restauración del soporte, limpieza de barnices y capa pictórica, consolidación, reintegración de lagunas volumétricas y cromáticas que dificulten la unidad y capa de protección final y recolocación.

Pintura mural: limpieza superficial, preconsolidación de la capa pictórica al soporte con resinas acrílicas, consolidación del soporte con inyección de cal y/o resinas, limpieza química general y neutralización, consolidación de la capa pictórica, reintegración cromática, capa de protección final.

Escayola policromada: preconsolidación puntual, limpieza en seco, limpieza con disolventes volátiles de la capa pictórica, consolidación y tratamiento de fisuras de las placas, reconstrucción volumétrica, reintegración cromática con aplicación de resinas acrílicas y pigmentos.



## EL CONTROL DE LAS INTERVENCIONES ARQUITECTÓNICAS EN EL PATRIMONIO CULTURAL DE CANTABRIA.

*José María Páez Mañá<sup>1</sup>.*

<sup>1</sup> *Arquitecto. Jefe de la Oficina Técnica de la Consejería de Cultura, Turismo y Deporte del Gobierno de Cantabria*

Versará esta ponencia sobre las condiciones normativas que limitan o direccionan el proyecto arquitectónico cuando este se refiere a bienes protegidos de nuestro patrimonio cultural.

Conocer éstos límites y directrices es fundamental para el proyectista porque no se trata de algo tan objetivo como el cálculo de las estructuras o de las instalaciones que tienen más que desarrolladas sus fórmulas y programas de cálculo así como la normativa tecnológica de puesta en obra, no, se trata de conocer algo tan subjetivo cómo cuáles sean los criterios de rehabilitación cuando el motivo de la intervención sea una fábrica (en el concepto constructivo) de valor histórico o artístico declarado. Y sobre éste asunto históricamente se ha discutido y discrepado mucho desde los más conservacionistas a los más reformista; desde los más “arqueologistas” partidarios de la congelación a ultranza de los vestigios sin más, hasta los más “innovadores” partidarios de la destrucción (documentada a partir de la Ilustración) de todo cuanto suponga una rémora o una penalización para el desarrollo del arte de la arquitectura. Y, no nos engañemos, todas las opciones son defendibles. Para que Fidias pudiera construir el Partenón de Atenas primero hubo que destruir los siete templos anteriores. Y sin irse a Grecia, el arquitecto torrelaveguense Ricardo Lorenzo proponía construir edificios en altura de Protección Oficial en la playa del Sardinero. O lo que es lo mismo ¿hasta qué punto la defensa del patrimonio cultural puede detener el avance de la civilización?

Y en términos de bienestar Social, que ahora tanto se lleva ¿Qué es más civilizado? ¿Preservar el referente histórico o construir uno nuevo en su lugar?

Comprenderéis que aquí vale todo y que la discusión tiene todos los matices que queráis dar y que desde luego tendrán como variables la época histórica, la evolución cultural, el desarrollo económico... cada caso, y en cada sitio será distinto.

Centrémonos en el Hoy en Cantabria. Hasta dónde hemos llegado Hoy en la Cantabria del siglo XXI en la definición de los parámetros que limitan el campo de actuación del arquitecto o el ingeniero cuando intervienen sobre un Bien protegido y que “posicionan” por lo tanto el criterio de nuestros gobernantes.

Pues bien hemos llegado hasta el artículo 53 de la Ley de Patrimonio Cultural de Cantabria.

Hemos avanzado tanto y trabajado tanto y bien en definirnos sobre este tema tan discutido y discutible que hemos llegado a materializarlo en un solo artículo, el 53. ¿Y de dónde hemos salido y por dónde hemos pasado para llegar hasta aquí?

Pues hemos salido de:

- La carta de Atenas de 1931 sobre la conservación de los monumentos de Arte e Historia

- La carta de Venecia de 1964 sobre la conservación y restauración de monumentos y de conjuntos Histórico-artísticos.
- La Constitución Española de 1978.
- La Ley de Patrimonio Histórico Español de 1985.
- La Ley de Patrimonio Cultural de Cantabria de 1998.
- Y el artículo 53 de esta Ley.

Algunas “perlas” de esta secuencia de 1º criterios y luego Leyes de obligado cumplimiento que han terminado en el 53.

### **Carta de Atenas**

“La Conferencia recomienda mantener, cuando sea posible, la ocupación de los monumentos que les aseguren la continuidad vital, siempre y cuando el destino moderno sea tal que respete el carácter histórico y artístico.”

Primer mazazo a los arqueólogos y un ¡viva! unánime de los arquitectos. Y perdón por la confrontación profesional que sugiero.

Entendedme. Los arquitectos estamos educados en la 4ª dimensión (no asustarse).

El rayo de luz tiene una dimensión: L (largo).

La pintura tiene dos dimensiones: LxA (largo por ancho).

La escultura tiene tres dimensiones LxAxH (largo por ancho por alto).

La arquitectura tiene 4 dimensiones LxAxHxT (largo por ancho por alto por espacio tiempo).

La cuarta dimensión, la del espacio tiempo, tiene que ver con el uso y disfrute de la arquitectura. En la pintura y en la escultura el espectador es ajeno, la ve, da vueltas alrededor, siempre desde fuera. En la arquitectura el espacio se vive, se siente y, lo que es más determinante, ocurren cosas distintas a lo largo del tiempo en función de quién, cómo y para qué se usa.

En esta sala las 3 dimensiones primarias no son suficientes para definirla, es preciso añadir que ahora es una sala de conferencias, que el sábado habrá cine que, si el director no lo remedia, el lunes habrá examen de mecánica del suelo.

Y es ese uso, la capacidad de cumplir armónicamente con el fin al que se destina, el que hará más o menos bella esta arquitectura además, por supuesto, del recreo visual.

Y ¿a dónde voy a parar? Pues a que la Carta de Atenas recomienda mantener “la ocupación de los monumentos que les aseguren la continuidad vital” on un destino moderno compatible, o como ahora se dice, “sostenible”.

Y eso es así porque si no ya no hay arquitectura. Sin el uso, sin la continuidad vital (maravillosa expresión) ya no hay arquitectura.

Volviendo al ejemplo del Partenón. El Partenón de Atenas, hoy es una hermosa escultura.

Y los arquitectos estamos muy contentos. Porque el planteamiento posible de dejar las arquitecturas pretéritas como meras ruinas hermosas no se recomienda, y se da un

espaldarazo de paso, a la Catedral de Córdoba (y que conste que no quiero abrir el debate ahora de la exmezquita de Córdoba).

Otra perla de la Carta de Atenas. “Los expertos han aprobado, para la consolidación de los edificios antiguos, el empleo juicioso de todos los recursos de la técnica moderna, muy especialmente del concreto armado.”

¡Toma ya, recomendación del año 1931!

El hormigón armado estaba entonces en sus primeros pasos, el hormigón pretensado todavía no se había inventado y la Conferencia lo eleva a la categoría de especialmente recomendable. Ni se me ocurre pensar que hubiera entonces marcas comerciales y “sponsor”. Más bien tiene que ver con esa premisa de devolver el uso a los monumentos, como la más principal de las técnicas a favor de su conservación.

Y para ello vale todo, o por lo menos, todo lo que, aunque tecnológicamente moderno, respete el carácter histórico y artístico.

### **La carta de Venecia.**

La carta de Venecia de 1964 todavía recalca y puntualiza más éste criterio en artículo 10º que dice “cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada valiéndose de todas las técnicas modernas de conservación y de construcción cuya eficacia haya sido demostrada con bases científicas y garantizada por la experiencia” y en el artículo 9º reitera “todo trabajo de complemento reconocido como indispensable por razones estéticas o técnicas aflora de la composición arquitectónica y llevará la marca de nuestro tiempo”.

Y otra perla más de la Carta de Venecia: “Las valiosas aportaciones de todas las épocas en la edificación de un monumento deben ser respetadas, puesto que la unidad de estilo no es un fin a conseguir en una obra de restauración. Cuando un edificio presenta varios estilos superpuestos, la desaparición de un estadio subyacente no se justifica más que excepcionalmente y bajo la condición de que los elementos eliminados no tengan apenas interés.

Está claro; la idea está clara y nosotros, los proyectistas del siglo XXI somos un eslabón más.

### **Constitución Española de 1978.**

De la constitución Española de 1978 destacaré el artículo 46 cuando dice que “los poderes públicos serán encargados de garantizar la conservación, promoción y enriquecimiento del patrimonio histórico, cultural y artístico de los pueblos de España y de los bienes que lo integran.”

Clara y meridiana manera de involucrar a los poderes públicos en la práctica de la conservación y enriquecimiento del Patrimonio.

### **Ley de Patrimonio Histórico Español.**

De la Ley de Patrimonio Histórico Español de 25 de Junio de 1985 sólo decir que es el precedente sustancial de nuestra Ley pero que al no haberse desarrollado en los aspectos cruciales para la conservación del Patrimonio Cultural dejó vía libre a la Comunidad de Cantabria par asentar criterios más directo y más subjetivos en su interpretación de que será su voluntad en el control de las intervenciones arquitectónicas sobre el Patrimonio.

### **Ley de Patrimonio Cultural de Cantabria.**



Y llegamos a la Ley de Patrimonio Cultural de Cantabria de 1998.

Independientemente de la gran novedad que supone el mayor ámbito de aplicación de nuestra Ley con el concepto de Patrimonio Cultural, mucho más amplio que el del Patrimonio Histórico de la Ley estatal (nótese que nuevo concepto no sólo incluirá entre los bienes culturales que deben protegerse, los bienes muebles e inmuebles, sino también el amplio patrimonio inmaterial, entre el que se encuentran las manifestaciones de la cultura popular tradicional de Cantabria) en lo que respecta a las intervenciones arquitectónicas sobre el Patrimonio Cultural, que es el motivo de ésta conferencia, el espíritu de la Ley de Patrimonio de Cantabria, al igual que los 10 mandamientos de la Ley de Dios se resumen en dos, nuestra Ley puede resumirse en un único artículo: El Artículo 53.

El artículo 53 no tiene desperdicio y es fiel reflejo de eso que llamamos “los criterios de intervención” o lo que es lo mismo, el espíritu sustantivo de la Ley.

El poder legislativo de Cantabria aquí “se moja” y desde una perspectiva realmente progresista sienta una serie de criterios que, a modo de órdenes, suponen un claro control, una toma de postura clara que incidirá muy determinadamente en la labor que tenemos que desarrollar los proyectistas a la hora de intervenir en los bienes arquitectónicos protegidos.

Y a continuación paso a leer y comentar el artículo 53 en lo que se refiere a los 7 criterios aplicables a los monumentos (dejando para otro día los que se refieren a Conjunto Histórico, Lugar Cultural, Zona Arqueológica o Lugar Natural):

***Artículo 53. De las actuaciones e intervenciones sobre bienes inmuebles.***

1.- Todas las actuaciones sobre bienes inmuebles irán encaminadas a su conservación, consolidación, rehabilitación y mejora de acuerdo con los siguientes criterios:

a) Se respetarán las características esenciales del inmueble y cualquier cambio de uso tendrá en cuenta la estructura original del edificio, decoración y su relación con el entorno, sin perjuicio de que puedan autorizarse con carácter excepcional el uso de elementos, técnicas y materiales actuales para la mejor adaptación del bien a su uso y para valorar determinados elementos o épocas.

¿Qué quiere decir? Dos cosas muy importantes: Una, tal como ya anunció la carta de Atenas, nuestra Ley está avalando la opción de cambio de uso, pero con una significativa puntualización: “se respetarán las características esenciales del inmueble y el nuevo uso tendrá en cuenta su estructura original y su relación con el entorno”.

En segundo lugar: se puede autorizar, con carácter excepcional, el uso de elementos, técnica y materiales actuales “para la adaptación del bien al nuevo uso”.

b) La conservación, recuperación, restauración, rehabilitación y reconstrucción del bien, así como su mejora y utilización, respetará o acrecentará los valores del mismo, sin perjuicio de que puedan utilizarse técnicas, formas y lenguajes artísticos o estéticos contemporáneos para conseguir la mejor adaptación del bien a su uso o la valoración cultural del mismo. Especialmente, se conservarán las características topológicas, morfológicas, espaciales y volumétricas más significativas.

Aceptado y validado el cambio de uso, éste criterio es reiterativo respecto del criterio anterior repitiéndose hasta la saciedad: primero con la lista de todas las intervenciones posibles desde la mera conservación, y pasando por la restauración hasta incluso la

reconstrucción y luego repitiendo y aclarando aún más: que su utilización será sin perjuicio de que puedan utilizarse técnicas y lenguajes artísticos o estéticos contemporáneos para conseguir la mejor adaptación del bien o a su nuevo uso o a la valoración cultural del mismo bien. ¡Más claro imposible!.

c) Se evitarán los intentos de reconstrucción, salvo cuando se utilicen partes originales de los mismos y pueda probarse su autenticidad, mediante los correspondientes estudios arqueológicos e históricos.

Esto quiere decir lo siguiente: si yo tengo una piedra original, caída o enterrada y sé positivamente donde estaba tengo la opción de volverla a poner en su sitio, o en caso contrario, si no cuento con los estudios que prueben su autenticidad, entonces evitaré su reposición pasando a interesarse el criterio anterior 2 Y aquí, yo, ampliaría el concepto de “partes originales” no sólo al material (la piedra) sino también al oficial y al oficio. Quiero decir que si no dispongo del oficial adecuado (qué pocos canteros quedan ya) o simplemente desconozco el sistema constructivo, el oficio con el que se colocó la piedra, tampoco estará indicada su reposición y por lo tanto mejor al museo.

d) Si se añadiesen materiales o partes indispensables para su estabilidad o mantenimiento, las adiciones deberán ser reconocibles y evitar las confusiones miméticas que falseen la autenticidad histórica. En cualquier caso, deberán integrarse armónicamente con el bien y su entorno.

¡Este criterio es realmente una perla y no tiene desperdicio! NO al mimetismo y al pastichismo. SI a la integración armónica con el bien y su entorno.

Con este sencillo criterio Santillana del Mar no habría crecido tanto como lo ha hecho que ya no se sabe dónde empieza y donde termina el Santillana auténtico.

e) Se respetarán las aportaciones de todas las épocas existentes. La eliminación de algunas de ellas sólo se autorizará con carácter excepcional y siempre que los elementos que traten de suprimirse supongan una evidente degradación del bien y su eliminación fuera necesaria para permitir una mejor interpretación histórica del mismo. Las partes suprimidas deberán quedar debidamente documentadas.

Más que evidente repetición de la carta de Venecia. Todos los estilos, malos o buenos, forman parte de la historia del inmueble y deben ser respetados. Como dice la Carta de Venecia “la unidad de estilo no es un fin a conseguir”.

f) Siempre que sea posible, se utilizarán técnicas y materiales tradicionales. Cuando se utilicen técnicas constructivas modernas, éstas deberán ser reversibles y adecuadas a las condiciones climatológicas y a la escala del proyecto. En cualquier caso, deberán estar avaladas por la experiencia y por anteriores utilizaciones en las que tales intervenciones hayan demostrado no representar ningún peligro para el bien intervenido.

Aquí pudiera parecer que hay un paréntesis o un retroceso en el planteamiento repetido a favor de la intervención contemporánea. No debe entenderse como tal. En realidad son dos cautelas bien lógicas. Cuando sea posible, o yo diría mejor siempre, la edificación que se conserva o restaura, la original, deberá tratarse en su proceso constructivo con las mismas técnicas y materiales originales-tradicionales. Cuando se utilicen técnicas constructivas modernas ¡ojo! Que sean técnicas avaladas por intervenciones probadas, (los experimentos en monumentos, pocos o ninguno) y mejor si son reversibles en el sentido, lógico, de respeto y no agresión a la parte original.

g) Queda prohibida la colocación de publicidad comercial y de cualquier clase de instalación aparente (entre otros, antenas, cables, conducciones y rótulos), que alteren los valores culturales del bien, sus relaciones con el entorno o la contemplación del conjunto. No obstante, podrán autorizarse por la Consejería de Cultura y Deporte aquellas instalaciones provisionales que sirvan para facilitar la conservación y rehabilitación de los Bienes de Interés Cultural y de Interés Local y sus entornos. Se valorará y, en su caso, se introducirán las medidas correctoras oportunas para restablecer las condiciones acústicas o de textura y aromas acordes con la naturaleza del patrimonio afectado.

Este último criterio es bien entendido a favor de evitar instalaciones agresivas o publicidad, etc. Llama la atención, finalmente esa especie de filosofía medioambiental que nos sugiere la recuperación de las condiciones acústicas (el oído) condiciones de textura (el tacto) y ¡sorpresa! condiciones aromáticas (el olfato). Nunca hemos visto cosa parecida.

## **"El Patrimonio como factor de desarrollo. La Fundación Santa María La Real, un modelo de gestión del Patrimonio"**

Jesús Castillo Oli<sup>1</sup> ([jcastillo@santamarialareal.org](mailto:jcastillo@santamarialareal.org))

<sup>1</sup> Director del Departamento de Conservación del Patrimonio. Fundación Santa María La Real

### **MISIÓN**

Generar desarrollo basado en la valorización del patrimonio cultural, natural y social.

### **VISIÓN**

Ser referente en la creación y puesta en marcha de modelos de desarrollo solidarios basados en el patrimonio.

### **VALORES**

**Liderazgo:** Ser referencia en la puesta en marcha de nuevas iniciativas tanto a nivel personal como institucional.

**Labor educativa del patrimonio:** Ejercer un proceso pedagógico para conocer y valorar el patrimonio en toda su dimensión.

**Calidad, innovación y creatividad aplicadas:** Actitudes hacia el trabajo interno y su proyección al exterior.

**Responsabilidad social:** Compromiso con la población y su territorio, entendiendo que nuestros recursos proceden de ellos y deben revertir en ellos.

**Vinculación territorial:** Conciencia de que nuestra actividad está vinculada al espacio geográfico en el que trabajamos y proyección de esta idea a los diferentes lugares en los que intervenimos.

**Equipo humano comprometido:** Asentar la idea de que cada miembro de la organización participa de un proyecto común y de un proceso general de desarrollo.

### **FINES FUNDACIONALES**

- Promover la conservación, restauración y mantenimiento en su máximo esplendor del Monasterio de Santa María la Real de Aguilar de Campoo.
- Impulsar cuantas actividades culturales y económicas sean necesarias para conservar, restaurar y mantener el Patrimonio natural y cultural en torno al Monasterio, con una especial dedicación al arte románico.
- Fomentar los estudios y la investigación del arte románico, de la cultura medieval y de las formas de vida monástica.
- Divulgar a nivel internacional y nacional las actividades de la Fundación mediante el intercambio de publicaciones, investigaciones y experiencias.
- Colaborar con la Administración en las tareas de índole social que faciliten el mantenimiento de la población y el crecimiento de la misma asumiendo programas de formación y empleo.

- Facilitar las actividades universitarias y de entidades culturales de ámbito nacional e internacional en relación con la divulgación del idioma castellano, y la defensa y enriquecimiento del Patrimonio.
- Fomentar la promoción de pequeñas empresas culturales, turísticas y artesanales que propicien el desarrollo sostenible.
- Redactar y actualizar planes y programas de ecodesarrollo endógeno y sostenible para enmarcar racionalmente las actuaciones de carácter público o privado.
- Fomentar la colaboración con entidades de la misma naturaleza y fines.
- Proponer la elaboración de un modelo piloto de ecodesarrollo con fuerte contenido cultural y participativo en torno al patrimonio y a la naturaleza que pueda servir de modelo en zonas rurales con abundante patrimonio cultural y natural.
- Activar la creación de un Museo del territorio para dar a conocer los distintos ámbitos de actividad histórica.
- Facilitar las relaciones de convivencia y amistad entre las personas y los pueblos.

## **ANTECEDENTES**

Todo parte –allá por 1977- de un edificio arruinado y una feliz concurrencia de ideas, personas y fondos. El monasterio era el premonstratense de Santa María la Real de Aguilar de Campoo, como tantos otros víctima del abandono, la especulación y el expolio desde su desamortización en 1835. Las dependencias monásticas iniciaron entonces un proceso de ruina que aconsejó en 1871 el traslado al Museo Arqueológico Nacional de las principales piezas escultóricas del claustro e iglesia, convirtiéndose el conjunto en cantera para los habitantes de Aguilar, y ello pese a una doble declaración como Monumento Nacional en 1866 y 1914 que evidentemente no supuso una efectiva protección. La primera intención de conservación del monasterio llegó en la infausta fecha de 1936, limitándose a una parcial actuación en las cubiertas de la iglesia. En los años 60 del siglo XX, la Dirección General de Arquitectura y el arquitecto Anselmo Arenillas acometen una intervención de corte historicista felizmente abortada que, pese a sus vicios, alcanzó a consolidar parte del conjunto, continuando el resto su proceso de degradación.

En 1977-78 nació la Asociación de Amigos del Monasterio de Santa María la Real, capitaneada por el arquitecto José María Pérez González (“Peridis”) y compuesta fundamentalmente por buena parte de los vecinos de Aguilar de Campoo. Este en muchos aspectos extraordinario movimiento asociativo inició el desescombro del conjunto monástico, al mismo tiempo que desarrolló una casi febril actividad de conocimiento del arte románico. Era el momento de las romerías del románico, descubriendo” dentro de un ambiente festivo las propias ruinas de Santa María y las numerosas ermitas e iglesias que salpican la Montaña Palentina, mezclándose los intelectuales y poetas (Santiago Amón, Antonio Gala y otros muchos) con los vecinos de los pueblos y algunos entusiastas urbanitas. Fue la primera y necesaria feliz confluencia de voluntades.

El carácter de la ruina pedía en cambio esfuerzos de más grueso calado. Hacía falta buscar un uso y un mecenas. Peridis encontró ambos: el monasterio albergaría un

Instituto Nacional de Bachillerato y el Ministerio de Educación financiaría el grueso de la obra. Así fue, y los alumnos del curso 1984- 85 inauguraron la segunda etapa de los muros de Santa María como centro formativo (ya en 1827 había sido, con los mostenses, Colegio de Artes). Tras 150 años, Santa María la Real recobraba su aliento. Pero la idea de recuperación no se quedó ahí; sus muros debían albergar, además de un centro educativo, una actividad cultural y asistir a la necesidad de desarrollo social y económico de los habitantes del entorno. Se produjo entonces la segunda y feliz confluencia de intereses, y de ella nació el Programa de Escuelas Taller del INEM, creado a mediados de los años 80 y que atendía al preocupante desempleo juvenil procurándole una formación en oficios ligados a la restauración del Patrimonio monumental, otra de las grandes asignaturas pendientes de nuestro país tras la Transición. En octubre de 1985 inició su andadura la Escuela Taller "Asociación de Amigos de Monasterio" y los alumnos de Bachillerato compartieron espacio con los jóvenes desempleados afanados en aprender el arte de la cantería, la forja, las vidrieras, la carpintería y albañilería, el maquetismo, el dibujo, etc. El monasterio contó con un nuevo magister operis al más puro estilo medieval, a la vez maestro de obras de la gran obra de restauración y maestro de los alumnos de la Escuela Taller. Como sus antecesores medievales, el maestro Canales atendía todos los oficios que intervienen en la construcción y bajo su batuta recibieron formación dos generaciones de jóvenes de Aguilar y su entorno. Con su concurso se completó la definitiva recuperación del edificio, que recibió la Medalla de Plata de la Asociación Europa Nostra de manos de la reina doña Sofía en enero de 1988.

En estos años, junto a las actividades artísticas y culturales (teatro, exposiciones, seminarios) y la intervención directa en el monumento, empezaron a trabajar historiadores, arqueólogos, arquitectos y delineantes en un proyecto que comenzó como un inventario de iglesias y bienes muebles románicos de Aguilar y su entorno y que acabó convirtiéndose en la reciente publicada Enciclopedia del Románico en Castilla y León. Las ambiciones y objetivos comenzaban a extenderse y fruto de esa consolidación fue el nacimiento de la Asociación Cultural "Centro de Estudios del Románico", creada en 1988 y entre cuyos socios figuraban miembros de la Asociación de Amigos y otros nuevos, vinculados por Peridis al proyecto. La vocación cultural quedó ratificada por la presencia de Miguel Angel García Guinea, aunque los pilares sobre los que se sustentaba, todos con el Patrimonio Monumental como bandera, eran realmente tres: el educativo y social (mediante programas de Escuelas Taller y Casas de Oficio del INEM), el económico (fomento de la creación de iniciativas empresariales y de autoempleo para los alumnos del programa) y el cultural (cursos, publicaciones, inventario y estudio del Patrimonio, Museo del Territorio, Biblioteca especializada en la época medieval, restauración de bienes muebles e inmuebles). El taller de maquetas de madera hoy expuestas en el Museo de la Iglesia dio origen a la empresa Ornamentos Arquitectónicos, dedicada principalmente a la realización y comercialización de maquetas de monumentos, los albañiles, carpinteros y canteros rehabilitaron iglesias y casas rurales, algunas de las cuales fueron luego explotadas por la empresa Posadas del Románico, etc.

Entre 1988 y 1994 se pusieron las bases de lo que hoy es la Fundación Santa María la Real, adaptándose la estructura interna a la consecución de objetivos y el constante crecimiento. Tales aspectos materiales motivaron su transformación en Fundación Cultural de ámbito nacional y duración indefinida, ratificada en la carta fundacional de 24 de junio de 1994. Siendo la independencia, por su carácter privado, el principal activo de nuestra institución, la supervivencia de la misma se fundamenta en la

continuidad y sucesión de los programas y en la confianza depositada en ellos por nuestros patronos. El precio de tal autonomía deja escaso margen para los errores, aunque nos ha obligado a evolucionar de Aguilar y su entorno y que acabó convirtiéndose en la recientemente publicada Enciclopedia del Románico en Castilla y León. Las ambiciones y objetivos comenzaban a extenderse y fruto de esa consolidación fue el nacimiento de la Asociación Cultural "Centro de Estudios del Románico", creada en 1988 y entre cuyos socios figuraban miembros de la Asociación de Amigos y otros nuevos, vinculados por Peridis al proyecto. La vocación cultural quedó ratificada por la presidencia de Miguel Ángel García Guinea, aunque los pilares sobre los que se sustentaba, todos con el Patrimonio monumental como bandera, entre realmente tres: el educativo y social (mediante programas de Escuelas Taller y Casas de Oficios del INEM), el económico (fomento de la creación de iniciativas empresariales y de autoempleo para los alumnos del programa) y el cultural (cursos, publicaciones, inventario y estudio del Patrimonio, Museo del Territorio, Biblioteca especializada en la época medieval, restauración de bienes muebles e inmuebles). El taller de maquetas de madera hoy expuestas en el Museo de la iglesia dio origen a la empresa hacia una estructura de gestión de tipo empresarial que poco a poco se va revelando como la más eficaz para alcanzar los objetivos, en nuestro caso ligados al desarrollo cultural (estudio, protección y restauración del Patrimonio, con especial atención al monasterio de Santa María la Real y al arte románico), social (Residencia Tercera Actividad) y económico (empresas) de una comarca. La idea es que las actividades empresariales de la Fundación generen los beneficios suficientes para sustentar la propia estructura de gestión de la misma y los programas culturales -que constituyen fundamento existencial- sean desarrollados como si de empresas se tratase.

## **PREMIOS**

- Premio Europa Nostra 1987
- Premio Henry Ford 1999 a la conservación
- Premio Retablillos de Oro 2000
- Premio de Especial Relevancia 2002 por la
- Cámara de Comercio de Palencia
- Premio Servir 2002 por el Rotary Club de Palencia
- Premio de Turismo 2002
- Premio Europa Nostra 2003
- Premio Castilla y León de la Restauración y
- Conservación del Patrimonio
- Premio Regional a la Restauración 2006

## **Iniciativas promovidas**

**desde las Escuelas-Taller:**

### **1.- Ornamentos Arquitectónicos S.L.**

#### **Fecha de constitución**

Septiembre de 1992.

#### **Objeto social**

Explotar, producir, comercializar, diseñar y realizar productos artesanales relacionados con el patrimonio cultural. La empresa se dedica a la reproducción a escala de

monumentos y edificios representativos del patrimonio cultural nacional e internacional para su comercialización tanto en el mercado español como en el europeo fundamentalmente.

### **Origen**

El origen de esta empresa está directamente relacionado con las Escuelas-Taller, pues los maquetistas de hoy fueron alumnos de talleres relacionados con la maquetación y el modelismo en diferentes escuelas promovidas desde la Fundación.

### **Trabajadores:**

12

## **2.- Patrimonio y Restauración S.L.**

### **Fecha de constitución**

Marzo de 2000

### **Objeto social**

Rehabilitación, restauración y conservación del patrimonio arquitectónico civil y religioso. PyR, es una pequeña empresa constructora especializada en la intervención y restauración de iglesias románicas del entorno de Aguilar de Campoo así como en la rehabilitación de casas y casonas rurales tanto para su uso como vivienda como para su explotación como establecimientos de turismo rural.

### **Origen**

Esta empresa retoma las iniciativas que emprendió en su día la Asociación de Amigos del Monasterio, más tarde Centro de Estudios del Románico y hoy Fundación Santa María La Real-C.E.R. en la línea de la restauración de la arquitectura tanto religiosa como civil de nuestro entorno. Sus actuales trabajadores se formaron en los distintos talleres de construcción y restauración de las Escuelas-Taller promovidas desde la Fundación.

### **Trabajadores**

8

## **3.- Posadas de Santa María la Real**

### **Fecha de constitución**

Mayo de 1994

### **Objeto social**

Prestación de servicios turísticos y hoteleros dentro el ámbito del turismo rural. Esta empresa gestiona una Posada de Turismo Rural de 22 habitaciones en Aguilar de Campoo, así como un conjunto de cinco casas de alquiler completo en Valoria de Aguilar y dos pequeños apartamentos rurales en Canduela.

### **Origen**

Posadas del Románico fue la primera iniciativa de turismo rural en la comarca de la Montaña Palentina, siendo aún hoy referente del Turismo Rural y de Interior en Castilla y León. Sus establecimientos son antiguos edificios de gran valor histórico y arquitectónico recuperados (mediante programas de Escuela-Taller) para la realización



de esta actividad. Sus trabajadores son antiguos alumnos de Escuela-Taller que se formaron en talleres relacionados con la gestión y explotación de los recursos turísticos.

### **Trabajadores**

9

## **4.- Residencia Tercera Actividad**

### **Fecha de inicio de la actividad**

Junio de 2001

### **Objeto**

Residencia para personas válidas y asistidas de la tercera edad que ofrece cuidados específicos al anciano, presta tratamientos médicos y rehabilitadores, incentiva la atención interdisciplinar intentando mejorar y mantener la calidad de vida y el bienestar de las personas mayores y programa distintas actividades ocupacionales y culturales que buscan facilitar la integración del residente.

### **Nº de plazas**

96

### **Ocupación actual**

70 Residentes

### **Origen**

Esta Residencia se puso en marcha mediante la rehabilitación, a través de diferentes programas de escuela-taller y talleres de empleo, de un antiguo colegio propiedad de la Fundación. En estas escuelas se formó parte de la actual plantilla de auxiliares y personal de mantenimiento que presta sus servicios profesionales en la Residencia.

### **Trabajadores**

30

## **5.- Enciclopedia del Románico**

en Castilla y León

### **Fecha de inicio**

1985

### **Fecha de finalización**

Noviembre de 2002

### **Objeto**

Realización de estudios exhaustivos de cada uno de los edificios que conservan restos de estilo románico en cada una de las nueve provincias que componen la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Los estudios abarcan los puntos de vista histórico, geográfico, administrativo, documental, arqueológico, además de los propiamente artísticos (arquitectónico, escultórico, pictórico y artes del objeto)

## **Metodología**

Gran parte del trabajo de catalogación y realización de planimetrías se ha realizado a través de un programa de escuela-taller y un taller de empleo. En ambos casos, licenciados o estudiantes del último año de las disciplinas relacionadas con este trabajo se formaron en la práctica profesional a través del trabajo de campo dirigido por el equipo de historiadores de la Fundación.

## **Resultado**

El resultado es una completa obra en catorce volúmenes, con 1808 monografías para un total de 8948 páginas, 4549 fotografías y 1661 planos.

## **Trabajadores**

10

## **6.- Museo del Románico**

### **Año de inauguración**

1996

### **Objetivo**

Situado en la iglesia del Monasterio de Santa María la Real de Aguilar de Campoo, cuenta con un doble objetivo, informativo y didáctico, ofreciendo al visitante una síntesis de la riqueza natural y monumental de la Montaña Palentina.

### **Contenidos**

Por un lado se encuentra una maqueta del territorio que permite al visitante ubicarse geográficamente entre la Tierra de Campos y la Cordillera Cantábrica; por otro lado, a través de una serie de paneles junto a una maquetas articuladas hechas en madera por alumnos de escuela-taller, se marcan diferentes rutas recomendadas para visitar el románico de la comarca.

### **Nº de visitantes anuales**

20.000

### **Trabajadores**

2, formados en los talleres de guías del patrimonio de las escuelas-taller promovidas por la Fundación.

## **7.- Oficinos en Red**

### **Año de inicio del programa**

2003

### **Objetivo**

Creación y dinamización de un portal web que permita el intercambio de información y experiencias entre las escuelas taller y los talleres de empleo de España y Latinoamérica.

### **Presupuesto anual**

150.000 euros

## **8.- Otras iniciativas**

Otras iniciativas empresariales impulsadas desde la Fundación 114 empresas, autónomos y profesionales creados o asistidos.

## **Programas culturales**

### **Enciclopedia del Románico en España**

El objeto ha sido la realización de estudios exhaustivos de cada uno de los edificios que conservan restos de estilo románico en cada una de las nueve provincias que componen la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Los estudios abarcan los puntos de vista histórico, geográfico, administrativo, documental, arqueológico, cultural, literario, eclesiástico, además de los propiamente artísticos (arquitectónico, escultórico, pictórico y artes de objeto). Tras la exitosa conclusión de la Enciclopedia del Románico en Castilla y León la Fundación Santa María la Real se ha planteado ampliar la experiencia

a todo el ámbito peninsular, catalogando y estudiando todos los testimonios de esta manifestación artística en España (salvo Cataluña, donde ya existe un trabajo similar) y Portugal, a tenor de la gran acogida que ha tenido esa obra. Se estima que el total de testimonios románicos que se reparten por estos territorios peninsulares (si se exceptúan los que ya se recogen en el trabajo hecho por nosotros en Castilla y León y los que aparecen en la Catalunya Románica, que en su día publicó la Generalitat), ascienden a unos 3.800, repartidos por el norte de Portugal y por 19 provincias de 11 comunidades autónomas españolas. Este trabajo, que se desarrollará a lo largo de varios años, dará empleo, como ya ha ocurrido anteriormente, a varias decenas de profesionales que se encargarán de la documentación planimétrica, fotográfica e histórica de cada uno de los testimonios, con un exhaustivo trabajo de campo que además servirá para recuperar la memoria olvidada de muchos de estos monumentos, escondidos en los lugares más recónditos, y tratar consecuentemente de ponerlos en valor.

### **ROM: románico y territorio**

Cogiendo el testigo del antiguo Museo del Románico, inaugurado en 1996 por la Ministra de Cultura Dña. Carmen Alborch, en los meses finales de 2003 se ha empezado a perfilar uno de los proyectos más ambiciosos de la Fundación Santa María la Real, cuyo desarrollo ha acaparado importantes esfuerzos durante los últimos años. Se trata del ROM, románico y territorio, una iniciativa que se define como “un proyecto cultural y social para Aguilar de Campoo” y que pretende aglutinar el apoyo de distintas administraciones, entidades públicas y privadas y programas de diversa índole con implantación en estas tierras. Cuenta con un doble objetivo: informativo y didáctico, ofreciendo al visitante una síntesis de la riqueza natural y monumental de la Montaña Palentina. El fundamento de este Centro ROM se basa en que es todo el territorio el ámbito a conservar, investigar y divulgar, un espacio geográfico caracterizado por una altísima densidad de edificios románicos –que le confieren su característica más personal-, pero con una naturaleza privilegiada y unas gentes que son el elemento vivo y el enlace con la tradición. La articulación de este verdadero Museo del Territorio parte de un centro receptor, que es el propio monasterio de Santa María la Real, donde se explicarán la propia historia de este cenobio, los fundamentos del arte románico y las cualidades de la comarca. Además, una serie de instalaciones museográficas se repartirán por distintos edificios del nordeste palentino, noroeste burgalés y sur cántabro, con unos montajes muy dinámicos y renovadores a través de los que el visitante pueda acceder a distintos aspectos de la cultura medieval y del arte románico que se desarrolló en un espacio común, hoy compartido por tres provincias y dos comunidades autónomas. Ese fenómeno cultural de los siglos medievales y los paisajes

en que se enclava, constituyen sin duda uno de los motores de su desarrollo, como ya se está demostrando. Por este motivo es igualmente urgente una planificación a

medio y largo plazo tendente a conservar tanto los edificios como sus entornos, iniciativa que también contempla el Centro ROM, recogiendo el testigo del Plan de Conservación y Restauración Integral de Iglesias Románicas y Entornos Rurales de la antigua Merindad de Campoo (Cantabria) y del Plan de Intervención románico norte que en estos momentos está ejecutando la Fundación Santa María la Real.

### **Programa Conservación del Patrimonio, Intervención en edificios religiosos de ámbito comarcal, provincial, regional y nacional.**

#### **Plan de Conservación y Restauración Integral de Iglesias Románicas y Entornos Rurales de la Antigua Merindad de Campoo en Cantabria**

Programa centrado en la restauración de un conjunto de 17 iglesias románicas y sus entornos en la antigua Merindad de Campoo en Cantabria. Este programa se lleva a cabo en colaboración con el Gobierno de Cantabria a través de su Consejería de Cultura y la Fundación Caja Madrid. Se articula paralelamente un programa de becas con la Universidad de la República de Santiago de Chile a través del cual estudiantes de arquitectura de dicha Universidad colaboran mediante estancias semestrales en la elaboración de los trabajos y proyectos de restauración de las iglesias.

#### **Plan Director del Monasterio de San Zolío, Carrión de los Condes. Palencia**

Redacción de un Plan Director en el año 2.000 donde se recogen todas las líneas y programas de actuación y así como todos los estudios pormenorizados desde el punto de vista histórico, artístico, arqueológico y arquitectónico, así como el potencial de desarrollo de un edificio de origen medieval con una trascendencia histórica de relevancia en el patrimonio español.

#### **Plan de Intervención Románico Norte**

En un espacio geográfico que viene a coincidir con las comarcas más próximas a Aguilar de Campoo en las zonas correspondientes al norte de las provincias de Palencia y Burgos, la arquitectura románica alcanza su máxima expresión en cuanto al número y calidad de las obras. A ello hay que añadir los yacimientos prehistóricos y romanos, y los monumentos góticos, renacentistas y barrocos que convierten a esta zona en un museo de inestimable valor y de visita obligada para especialistas y aficionados al Patrimonio. Para facilitar la puesta en marcha de programas de desarrollo basados en la puesta en valor del Patrimonio, la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Castilla y León y la Fundación Santa María la Real-Centro de Estudios del Románico han establecido un marco de colaboración para desarrollar el PLAN DE INTERVENCIÓN ROMÁNICO NORTE de la antigua Merindad de Aguilar de Campoo que nos permitirá gestionar integralmente un conjunto monumental y generar un proceso de desarrollo sostenible en un territorio de recursos alternativos. El presente plan contempla la intervención en más de cincuenta iglesias y sus entornos hasta el año 2012.

### **Cursos y Seminarios**

Seminarios sobre Historia del Monacato:

Actualmente realizadas diecisiete ediciones. Abordan de manera monográfica temas referentes a los monjes y a los monasterios desde la antigüedad tardía hasta las

postrimerías de la Edad Media. Organizados en colaboración con la Universidad de Cantabria, la dirección corre a cargo de los Catedráticos D. Ramón Teja Casuso y D. José Ángel García de Cortázar y Ruiz de Aguirre.

Cursos teórico-prácticos de Restauración:

Dirigidos por D. Juan Carlos Barbero Encinas y D. Guillermo Fernández García (Profesores de la Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Madrid).

Cursos de Cultura Medieval

Desarrollados durante el mes de septiembre, igualmente con una semana de duración, están dirigidos por D. Miguel Ángel García Guinea.

Cursos sobre la Península Ibérica y el Mediterráneo

durante los siglos XI-XII:

Dirigido por D. Fernando Valdés Fernández (Profesor Titular de Arqueología de la Universidad Autónoma de Madrid).

Cursos sobre las Claves del Románico:

Curso Teórico-Práctico de iniciación al arte románico.

Seminario internacional sobre consolidación pinturas murales

Cursos superiores de directores de Escuelas-Taller y Casas de Oficios.

Cursos de Desarrollo Territorial.

Cursos de dinamización de la Red de Escuelas-Taller.

## **Biblioteca**

Especializada en la cultura medieval cuya temática predominante es el arte románico, además de disponer de una amplia colección de documentos históricos, todo ello con la finalidad de suministrar el material necesario para trabajos de investigación sobre aspectos de la vida medieval. Entre los proyectos de mayor peso que son herederos de la recién editada Enciclopedia del Románico en Castilla y León se encuentra el Centro de Documentación del Arte Románico, una iniciativa que se ha comenzado a perfilar en 2003 y que se desarrollará a lo largo de los años venideros. El Centro de DAR surge como una idea para gestionar fundamentalmente la información recogida y elaborada para la Enciclopedia, pero donde tiene cabida también la procedente de otros proyectos propios de la Fundación e incluso de otras entidades o personas con las que pueden establecerse futuros convenios de colaboración con este fin. En estos momentos los fondos documentales de que dispone la Fundación Santa María se cifran en más de 1.800 fichas de elementos románicos, unas 70.000 fotografías –la mayor parte en soporte de diapositiva y más de 8.000 planos. Es quizás la mayor colección de este tipo que existe en España, por lo que su utilidad para los estudiosos o simples aficionados al arte románico está fuera de toda duda. A partir de esta base se irá perfilando próximamente un proyecto para facilitar el acceso a tal volumen de información, que

contemple el almacenamiento en soporte digital de todo este fondo y su gestión a través de la red de telecomunicaciones mediante varios niveles de acceso al usuario, constituyendo de este modo una herramienta hasta ahora sin precedentes.

## **Publicaciones**

Divididas en cinco grandes bloques temáticos que suman más de 50 publicaciones:

Cultura medieval

Restauración

Codex aquilarensis

Otras publicaciones

Enciclopedia del Románico en Castilla y León

## **CULTURA MEDIEVAL**

1 Actas del I Curso de Cultura Medieval. Octubre de 1989, Aguilar de Campoo, 1991.

2 Alfonso VIII y su época, Actas del II Curso de Cultura Medieval (Aguilar de Campoo, 1 al 6

de octubre de 1990), Aguilar de Campoo, 1992.

3 Repoblación y Reconquista, Actas del III Curso de Cultura Medieval (Aguilar de Campoo, 23 al

28 de septiembre de 1991), Aguilar de Campoo, 1993.

4 La fortificación medieval en la Península Ibérica, Actas del IV Curso de Cultura Medieval (Aguilar de Campoo, 21-26 de septiembre de 1992), Aguilar de Campoo, 2001.

5 Viajes y viajeros en la España Medieval, Actas del V Curso de Cultura Medieval (Aguilar de Campoo, 20 al 23 de septiembre de 1993), Aguilar de Campoo, 1997.

6 Vida cotidiana en la España Medieval, Actas del VI Curso de Cultura Medieval (Aguilar de Campoo, 26 al 30 de septiembre de 1994), Aguilar de Campoo, 1998.

7 Fiestas, juegos y espectáculos en la España

Medieval, Actas del VII Curso de Cultura Medieval (Aguilar de Campoo, 18-21 de septiembre de 1995), Aguilar de Campoo, 1999.

## **RESTAURACION**

8 En torno a la pintura mural, Actas del Segundo Curso Internacional de Restauración (Aguilar de Campoo, 26 al 30 de agosto de 1991), Dir. Gianluigi Colalucci, Aguilar de Campoo, 1993.

9 Técnicas de consolidación en pintura mural, Actas del Seminario Internacional sobre Consolidación de Pinturas Murales (Aguilar de Campoo, 19 al 21 de agosto de 1998), Aguilar de Campoo, 1998.

## **CODEX AQUILARENSIS. CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN DEL MONASTERIO DE SANTA MARÍA LA REAL**

- 10 Codex Aqvilarensis, 1 (1988), Actas del Primer Seminario sobre el Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1987).
- 11 Codex Aqvilarensis, 2 (1989), "Monacato y Sociedad", Actas del Segundo Seminario sobre el Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1988).
- 12 Codex Aqvilarensis, 3 (1990), "El monasterio como centro de producción cultural", Actas del Tercer Seminario sobre el Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1989).
- 13 Codex Aqvilarensis, 4 (1991)
- 14 Codex Aqvilarensis, 5 (1991), Actas del IV Seminario sobre el Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1990).
- 15 Codex Aqvilarensis, 6 (1992), "El monasterio en su vida cotidiana", Actas del V Seminario sobre el Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1991).
- 16 Codex Aqvilarensis, 7 (1992)
- 17 Codex Aqvilarensis, 8 (1993), "La imagen del monje en la Edad Media", Actas del VI Seminario sobre el Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1992).
- 18 Codex Aqvilarensis, 9 (1993)
- 19 Codex Aqvilarensis, 10 (1994), "Entre el carisma y la norma: la regulación del Monacato en la Historia", Actas del VII Seminario sobre el Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1993).
- 20 Codex Aqvilarensis, 11 (1996), "El diablo en el monasterio", Actas del VIII Seminario sobre Historia del Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1994)
- 21 Codex Aqvilarensis, 12 (1996), "Los monjes soldados. Los Templarios y otras Ódenes Militares", Actas del IX Seminario sobre Historia del Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1995)
- 22 Codex Aqvilarensis, 13 (1997), " La Península Ibérica y el Mediterráneo entre los siglos XI y XIII ”.
- 23 Codex Aqvilarensis, 14 (1998), "Almanzor y los terrores del milenio”.
- 24 Codex Aqvilarensis, 15 (1999), " El urbanismo de los estados cristianos peninsulares”.
- 25 Codex Aqvilarensis, 16 (2000), "Los protagonistas del año mil", Actas del XIII Seminario sobre Historia del Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1999).
- 26 Codex Aqvilarensis, 17 (2001), "Profecía, magia y adivinación en las religiones antiguas", Actas del XIV Seminario sobre Historia del Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 2000).
- 27 Codex Aqvilarensis, 18 (2002), "Sueños, ensueños y visiones en la antigüedad pagana y cristiana", Actas del XV Seminario sobre Historia del Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 2001).
- 28 Codex Aqvilarensis, 19 (2003), (Aguilar de Campoo, agosto de 2003).
- 29 Codex Aqvilarensis, 20 (2004), (Aguilar de Campoo, agosto de 2004).

30 Codex Aquilarensis, 21 (2005), (Aguilar de Campoo, noviembre de 2005).

## **OTRAS PUBLICACIONES**

31 GONZÁLEZ DE FAUVE, M<sup>a</sup> Estela, La Orden Premonstratense en España. El monasterio de Santa María la Real de Aguilar de Campoo (Siglos XI - XV). T. I.: Texto. T. II: Documentos, Aguilar de Campoo, 1992.

32 HERNANDO GARRIDO, José Luis, Escultura tardorrománica en el Monasterio de Santa María la Real en Aguilar de Campoo (Palencia), Aguilar de Campoo, 1995.

33 Cristianismo marginado: rebeldes excluidos, perseguidos I. De los orígenes al año 1000, Actas del XI Seminario sobre Historia del Monacato (Aguilar de Campoo, agosto de 1997), Aguilar de Campoo, 1998.

34 Cristianismo marginado: rebeldes excluidos, perseguidos II. Del año 1000 al año 1500, Actas del XII Seminario sobre Historia del Monacato (Aguilar de Campoo, 1998), Aguilar de Campoo, 1999.

35 Iniciación al arte románico, Aguilar de Campoo, 2002 (2<sup>a</sup> ed.)

36 Los monasterios románicos, Aguilar de Campoo, 2001

37 Varios autores, El arte románico en la ciudad de Soria, Aguilar de Campoo, 2001.

38 Perfiles del Arte Románico, Aguilar de Campoo, 2002.

39 Palencia en los siglos del románico, Aguilar de Campoo, 2002.

40 Monasterios románicos y producción artística, Aguilar de Campoo, 2003

41 Enciclopedia del Románico en Castilla y León, Aguilar de Campoo, 2002. 14 vols. (1 por cada una de las provincias de Ávila, León, Salamanca, Valladolid y Zamora; 2 de Palencia; 3 de Soria y Segovia y 4 de Burgos).

42 Tratamiento y metodologías de conservación en pinturas murales, Aguilar de Campoo, julio 2005

43 Significado y función del edificio románico, Aguilar de Campoo, agosto 2005

44 Monjes y monasterios hispanos en la Alta Edad Media, Aguilar de Campoo, marzo 2005

45 Palencia. Todo el románico, Aguilar de Campoo, mayo 2006

46 Enciclopedia del Románico en Asturias, Aguilar de Campoo, 2007. 4 tomos (2 de Prerrománico y 2 de Románico).

47 Poder y seducción de la imagen románica, Aguilar de Campoo, agosto de 2006.

48 Los grandes monasterios benedictinos hispanos de época románica (1050-1200), Aguilar de Campoo, abril de 2007.

## **Otros programas**

- Cursos de Dinamización para Directores de Escuelas Taller y Casas de Oficios en colaboración con la Universidad Autónoma de Madrid e INEM.



- Master de desarrollo territorial para directores de Escuelas Taller y Casas de Oficio en colaboración con la Universidad Autónoma de Madrid e INEM.
- Programa T.V.E. "La Aventura del Saber" Fundación Santa María La Real-C.E.R.
- Convenio con Caja de Salamanca y Soria. Enciclopedia del Románico de Castilla y León.
- Convenio con la Fundación Caja de Madrid y el Obispado de Palencia. Restauración de nueve iglesias románicas con pinturas murales del norte de Palencia.
- Convenio con Arethusa. Consorcio Italiano dedicado a la restauración de bienes culturales y turismo.
- Convenios con asociaciones y empresas de distintos países para la presentación de los
- Programas Europeos Youthstar, Leonardo Da Vinci, Now.
- Consecución del Programa Europeo Pacte en colaboración con un grupo de asociaciones ligadas a sus Ayuntamientos; Conques (Francia), Delfos (Grecia), Banberg (Alemania), Cashell (Irlanda), Aguilar de Campoo (España). Con este grupo de asociaciones prepara y dirige un seminario en cada una de las ciudades.
- Con el mismo grupo de asociaciones se presenta al programa de Acciones Culturales y Turísticas del artículo 10 de los fondos F.E.D.E.R. con un programa titulado "Tesaurus".
- Con la Universidad de Salamanca y la Fundación Joaquín Díaz (Valladolid. Urueña) se presenta al mismo programa Europeo con un programa titulado "Monasterium"
- Módulo de formación de carpintería con un programa de empleo del Ministerio de Educación, en colaboración con el Exmo. Ayuntamiento de Aguilar de Campoo.

Cursos de Formación Profesional Ocupacional de Ayuda a Domicilio y Carpintería promovidos por la Consejería de Industria de la Junta de Castilla y León.

Convenio con nueve universidades norteamericanas a través de A.P.U.N.E., asociación que coordina a los centros instalados en el Instituto Internacional, para la realización de cursos de inglés destinados a alumnos de Aguilar de Campoo. Palencia.

## LOS PLANES DIRECTORES PARA LA RECUPERACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO: APROXIMACIÓN METODOLÓGICA Y DESARROLLO EN LAS MURALLAS DE LABRAZA (ÁLAVA)

Cecilia Hugony<sup>1,2</sup> ([chugony@labein.es](mailto:chugony@labein.es))

<sup>1</sup> *Arquitecto*

<sup>2</sup> *Labein Tecnalia*

### Resumen

La restauración de un bien de interés histórico se traduce cada vez más en un proceso más amplio que la mera intervención constructiva. A parte de asegurar la conservación del patrimonio arquitectónico, constituye una ocasión de conocimiento y estudio del pasado, de recuperación de espacios significativos para la socialización, de reorganización socio-económica y física del entorno próximo al bien. Para asegurar la sostenibilidad del proceso es necesario pensarlo de forma integral a partir de un conocimiento complejo del bien y planificar las actuaciones necesarias de la mano de los agentes que se verán implicados en su ejecución (entidades públicas y privadas, ciudadanos..). El plan director se configura como la herramienta más adecuada para organizar dicho proceso. En este artículo se expone una propuesta metodológica para la ejecución de los planes directores y un caso práctico de aplicación: El Plan Director para la conservación de las murallas de Labraza, en Álava, encargado por ARABARRI, SA.

### **El plan director como instrumento de planificación interdisciplinar en la restauración del patrimonio.**

La definición más antigua de Restauración Monumental<sup>1</sup> corresponde a la actividad constructiva destinada a reparar el deterioro de edificios de importancia histórico-artística. Desde su formulación hasta primera mitad del S. XX, la disciplina se ha centrado en las técnicas y criterios a aplicar para la recuperación física de los espacios históricos. A partir de los años 60 al concepto de restauración se han ido añadiendo los de rehabilitación y recuperación. Actuar en los edificios históricos empieza a llevar aparejado el problema de las nuevas atribuciones de uso y de las formas más adecuadas de disfrute del bien por parte de la ciudadanía. La misma definición de patrimonio histórico se amplía, incluyendo los centros históricos y el patrimonio difuso. La Carta Europea del Patrimonio o Carta de Ámsterdam (1974) distingue los términos “restauración” de “rehabilitación” y “recuperación” e incluye el concepto de “conservación integrada” que establece una relación directa entre la conservación constructiva del edificio y su uso o, en otras palabras, el contexto socio económico del que forma parte<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> “Restaurar un edificio no es mantenerlo, repararlo o rehacerlo, sino restituirlo a un estado completo que quizás no haya existido nunca”, Eugène Viollet le Duc, Dictionnaire Raisonné de l’Architecture Française du XIème au XVIème siècle, 1866

<sup>2</sup> “La conservación integrada es el resultado de la utilización del conjunto de las técnicas de la restauración y de la búsqueda de usos adecuados”.

Hoy, pasados más de 30 años desde la redacción de dicho documento, la restauración de un monumento es, además de un conjunto de intervenciones constructivas orientadas a la conservación del bien, un evento complejo que influye de forma directa e indirecta sobre el medio social, cultural, económico y físico en el que se encuentra. Influye de forma directa por las modificaciones que la propia recuperación del monumento genera sobre su entorno inmediato (mejora no solo en el estado de conservación del bien sino también de su entorno). De forma indirecta, por las dinámicas de transformación que pone en marcha en el área (regeneración de áreas degradadas y creación de nuevos flujos económicos y culturales). Dicha influencia es directamente proporcional a la ambición del proyecto. Si la restauración se restringe a las características técnico-constructivas del conjunto, su influencia será limitada; si por otra parte se procede a dotar al monumento de un nuevo uso y se plantea un buen modelo de gestión, sus efectos en el contexto socio-económico y ambiental serán notables. A la vez, un uso adecuado y un buen modelo de gestión pueden facilitar el mantenimiento del conjunto monumental: al ser reconocido como fuente de ingresos económicos, directos o indirectos, será más fácil asegurar las inversiones necesarias para su mantenimiento.

Al mencionar la “ambición del proyecto” no nos referimos sólo a la inversión económica en juego (aunque, evidentemente, es un aspecto importante), sino especialmente a la concepción del proceso de recuperación, a su capacidad de dialogar con las dinámicas urbanas y territoriales en marcha, de buscar sinergias con otros procesos de transformación y de colaborar con los agentes activos en el territorio manteniendo la atención en el deber irrenunciable de legar a las generaciones futuras el capital patrimonial que hemos recibido de las anteriores.

El Plan Director se configura como la herramienta más idónea para la gestión del proceso de conservación del patrimonio histórico. Esta metodología de trabajo empezó a desarrollarse en el campo del urbanismo en los años 60, cuando resultó claro que las herramientas tradicionales de planificación se veían superadas por la velocidad frenética del desarrollo urbano y por las dificultades de prever y normalizar la complejidad intersectorial en un área delimitada<sup>3</sup>. En contraposición con las otras herramientas de planificación urbana, el Plan Director es un proyecto sectorial, dirigiendo las acciones a la resolución de un problema concreto, sea de infraestructura urbana, de transporte o de instalaciones: por ello, no conoce límites espaciales, proponiendo actuaciones desde la micro escala del edificio hasta el espacio regional o estatal, ni reconoce límites determinados por el espacio de gestión, implicando en la resolución de un problema distintos agentes y administraciones. En 2002, la nueva Llei de Urbanisme de Catalunya introduce los Planes Directores de Urbanismo como herramienta base para la planificación territorial y urbana. Respecto a las otras herramientas de planificación territorial, el plan director reúne 3 características fundamentales:

- a) ser un proceso interdisciplinar, capaz de recoger un conocimiento complejo del bien y de integrar los estudio sectoriales en soluciones concretas.
- b) Ofrecer un espacio de participación durante su elaboración entre los distintos agentes activos en el territorio con el objeto de asegurar sinergias entre los proyectos en marcha en el área y buscar acuerdos para la futura puesta en marcha de los programas de actuación
- c) Asegurar la flexibilidad necesaria para absorber los cambios en el entorno y mantener la validez de sus propuestas.

---

<sup>3</sup> Erba, V, Moretti, A., *Urbanistica e Governo del Territorio*, Cittástudi, 1992

## **Estructura del Plan Director para la restauración del Patrimonio**

Actualmente, el plan director no está reconocido por ninguna legislación como herramienta normalizada para la gestión de los bienes de interés cultural. No obstante, su adopción es cada vez más amplia, debido a los esfuerzos en esa dirección de las administraciones centrales y autonómicas. Desde 2004, la existencia de un Plan Director es perceptiva para la solicitud de financiación al fondo del 1% cultural.

En el año 2004 Tecnalía Labein desarrolló, a través de un proyecto de investigación financiado por el Gobierno Vasco, una metodología propia para el desarrollo de dichos planes, que se lleva aplicando desde entonces<sup>4</sup>. A continuación se resumen los resultados del citado proyecto.

El Plan Director debe de cumplir con los siguientes objetivos interdependientes:

- 1) Crear un corpus documental interdisciplinar de conocimiento del bien que sirva como base para la programación y planificación y como referencia para los futuros proyectos de actuación
- 2) Identificar los principales valores del conjunto monumental; prever y valorar los impactos que la intervención puede provocar y, por último, planificar las medidas correctivas que permitan proteger o valorizar los elementos identificados.
- 3) Planificar los usos del conjunto monumental y un modelo de gestión adecuado, que responda a estas características:

Compatibilidad: su implantación no debe de provocar impactos negativos en el conjunto y su entorno.

Sostenibilidad: Los costes sociales, ambientales y económicos tienen que ser acordes con los beneficios que su recuperación comporta para la colectividad.

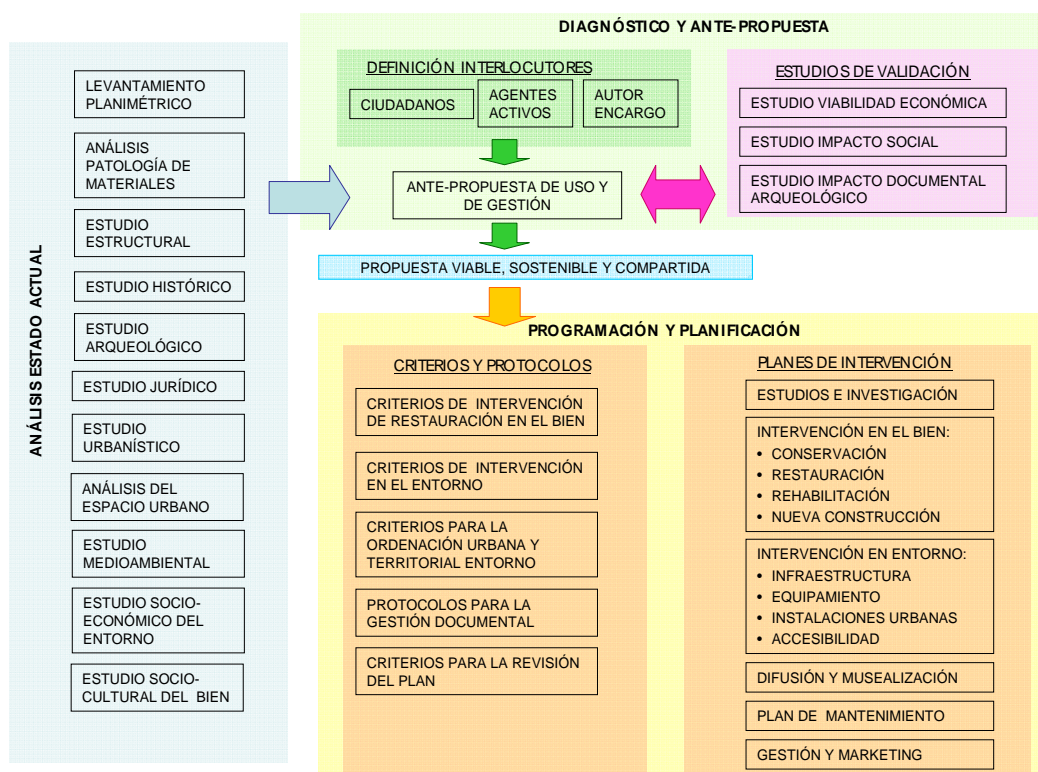
Oportunidad: su implantación tiene que resaltar y valorizar los valores positivos que caracterizan el monumento y su entorno.

- 4) Programar a largo plazo las acciones a realizar para llevar a cabo el proyecto, especificando tiempos, recursos y profesionales necesarios y definiendo los criterios y metodologías a emplear para asegurar su coherencia en la ejecución.

---

<sup>4</sup> “Planteamiento estratégico de gestión integral del patrimonio arquitectónico y su entorno”, 2004

*LOS PLANES DIRECTORES PARA LA RECUPERACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO:  
APROXIMACIÓN METODOLÓGICA Y DESARROLLO EN LAS MURALLAS DE LABRAZA (ÁLAVA)*



*Figura 1: Esquema para el desarrollo de un Plan Director.*

Según el esquema propuesto, el plan director se desarrolla en 3 fases:

1) Análisis del estado actual y conocimiento del bien.

En esta primera parte, esencialmente técnica, se desarrollan los estudios fundamentales para el conocimiento complejo del bien. Los estudios tendrán que ser orientados desde el principio para asegurar su integración en la propuesta de actuación. Para ello, es necesario diseñar y acordar los contenidos y los objetivos de cada uno en reuniones de equipo en las que intervengan todas las disciplinas interesadas. Fundamentalmente, se pueden identificar los siguientes objetivos principales:

- Identificación de los valores históricos, documentales y culturales del conjunto. Para ello es necesario reconocer y definir las distintas fases constructivas del bien, integrando los estudios históricos y documentales con los arqueológicos y estructurales. asimismo, hay que analizar las relaciones entre el monumento, los bienes en él contenidos y su entorno urbano y medioambiental. La percepción ciudadana de la importancia del bien es también una información muy valiosa.
- Diagnos de estado de conservación de las estructuras: intervienen los estudios de las intervenciones que el bien ha sufrido con el paso del tiempo; los estudios geológicos y geotécnicos, los medioambientales y, evidentemente, el análisis de patología de materiales y de degradación estructural.
- Discriminación de los usos. Los usos previstos tienen que ser compatibles con la realidad constructiva y material del bien a la vez que viables en relación con el entorno socio económico. El conocimiento interdisciplinar del estado actual constituye la base para la selección de usos admisibles.
- Identificación de los principales factores de riesgo para la conservación del conjunto. Se consideran los riesgos intrínsecos (relacionados con las características constructivas del propio bien) y extrínsecos, distinguiendo entre los factores ambientales, sociales, urbanísticos y legales y económicos.

## 2) Diagnóstico y ante propuesta.

Esta segunda fase requiere la puesta en marcha de las herramientas participativas que se hayan definido dependiendo de cada caso. La selección de los agentes a involucrar en el proceso se realiza sobre la base de los resultados de los estudios socio-económicos realizados en la fase anterior. Con ellos es oportuno discutir el diagnóstico realizado y formular las líneas de actuación que se desarrollarán en la fase de programación y planificación. Este proceso – difícil y no siempre exitoso - permite asegurar la viabilidad de la propuesta, en el momento en que se transforma desde una propuesta compatible a una propuesta compartida entre los agentes que tendrán que ponerla en marcha. El diálogo con los agentes implicados permite identificar también quién tiene que participar en el desarrollo de los programas específicos de actuación, dependiendo de sus intereses, disponibilidad y responsabilidades.

Los estudios de validación tienen como objetivo analizar los impactos de la antepropuesta, para identificar posibles efectos negativos en el bien y su entorno y proponer acciones correctoras a desarrollar en la fase de programación y planificación.

## 3) Programación y planificación.

La tercera fase del Plan Director corresponde al diseño del proceso de recuperación y puesta en valor del bien. Una vez acordadas las líneas de actuación, se trata de transformarlas en programas de ejecución y en un conjunto de criterios y protocolos que aseguren la coherencia entre las distintas intervenciones.

Los programas de intervención tienen que ser valorados económicamente e integrados en la planificación con el objeto de asegurar la viabilidad de cada uno, de aprovechar sinergias entre distintas actuaciones y de facilitar la utilización del bien durante el proceso de restauración. Es necesario prever unos mecanismos de revisión del plan y de seguimiento de los impactos de las actuaciones previstas, con el objeto de corregir posibles errores de planteamiento y de incorporar cambios en el contexto que abran nuevas oportunidades o constituyan riesgos no previstos.

### **El plan director para la conservación de las murallas de Labraza.**

El Plan Director para la conservación de las Murallas de Labraza (Álava) se redactó por encargo de ARABARRI SA en el año 2006.



*Figura 2: Vista de Labraza, ladera sur.*

Labraza se halla en el extremo sudeste de la provincia de Álava, a 10 Km. de Logroño, en la comarca de la Rioja Alavesa. El núcleo habitado ocupa la cumbre del cerro del mismo nombre y se concentra todavía en el interior de la cerca amurallada del siglo XII, contándose sólo pocas edificaciones extramuros en la ladera sur, entre las cuales destacan las escuelas y el frontón, centro de vida comunitaria. La cercanía de Logroño ha permitido que el núcleo no se despoble completamente: actualmente cuenta con 90

habitantes y se aprecia una tendencia al crecimiento con el reciente asentamiento de parejas jóvenes con niños.

El recinto amurallado se conserva entero, con excepción del lienzo norte, derribado en el siglo XVI para construir la iglesia parroquial. La peculiaridad del conjunto es que la muralla constituye hoy a lo largo de todo su trazado la fachada principal de las edificaciones adosadas. Allí donde los edificios adosados han sido abandonados, el lienzo también ha desaparecido. Como consecuencia de su función de fachada, la muralla ha sufrido varios procesos de demolición y reconstrucción puntual, conservando tramos desde el siglo XII hasta el XIX sin soluciones de continuidad.

El proceso de apropiación de la muralla por parte de la ciudad, que se traduce en la proliferación de casas adosadas, no es, ciertamente, una peculiaridad exclusiva de Labraza: desde Ávila hasta León, las murallas más famosas han constituido durante siglos las estructuras de apoyo para manzanas enteras. La singularidad de Labraza se debe a que aquí, en un pequeño núcleo rural de Álava, ningún restaurador ha actuado decidiendo que las casas adosadas habían desnaturalizado la muralla, procediendo a la destrucción de este tejido urbano y a la reconstrucción estilística del supuesto antiguo muro defensivo. Esta rareza constituye hoy el atractivo de la pequeña acrópolis, declarada conjunto de interés monumental por el Gobierno Vasco.

Objetivo del plan director era diseñar los criterios y programas de actuación para la “evolución controlada” de la muralla, asumiendo su carácter de “fachada resistente” de gran parte de las viviendas del pueblo, en la que se apoyan forjados y tejados, se abren ventanas y se clavan tuberías. Este carácter de monumento vivo corre el peligro de perderse en el momento en que la muralla deje de ser modificada, bien por falta de uso y abandono de las edificaciones adosadas, bien por restricciones urbanísticas y legales. El plan Director debía, pues, asegurar la protección de la “muralla habitada” a la vez que garantizar la conservación y puesta en valor del Bien de Interés Cultural en sí.

En este contexto, parecía claro que actuar en la muralla requería de la participación activa de la población que la habita; de hecho, ya conocíamos el fracaso de varios planes de puesta en valor y mejora del bien que incluían acciones no aceptadas por la población. Asimismo, se veía indispensable la colaboración entre distintas administraciones implicadas: a parte del autor del encargo ya citado, había que contar con la Diputación Foral de Álava, que tiene competencia directa en los BIC del territorio histórico, con el Departamento de Cultura del Gobierno Vasco, que estaba desarrollando el expediente de protección del conjunto monumental en las mismas fechas y con el Ayuntamiento, que es quien desarrolla la normativa urbanística. Por este motivo, se diseñó una estrategia de participación ciudadana e interinstitucional que permitiera una comunicación fluida entre los distintos agentes y que acompañara al desarrollo del Plan Director.

**LOS PLANES DIRECTORES PARA LA RECUPERACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO:  
APROXIMACIÓN METODOLÓGICA Y DESARROLLO EN LAS MURALLAS DE LABRAZA (ÁLAVA)**

	MARCO NATURAL	MARCO HIST.- ARQUEOLÓGICO	MARCO EDIFICADO	MARCO URBANO	MARCO SOCIAL	MARCO LEGAL	MARCO ECONÓMICO
<b>NUEVOS ANÁLISIS</b>	ESTUDIO DEL CLIMA, GEOLOGÍA,  ESTUDIO FLORA Y FAUNA  ANÁLISIS DEL PAISAJE	ESTUDIO HISTÓRICO ARQUEOLÓGICO DE LA VILLA  ANÁLISIS HISTÓRICO ARQUEOLÓGICO DE LAS MURALLAS	ESTUDIO ESTRUCTURAL Y DE MATERIALES DE LA MURALLA  ANÁLISIS DE INSTALACIONES  ANÁLISIS DE USOS	ANÁLISIS DE CIRCULACIÓN  ESTUDIO DE ESPACIOS PÚBLICOS	ESTUDIO SOCIO CULTURAL DEL CASCO HISTÓRICO	PERI  ESTUDIO NORMATIVA DE PH, TURISMO, PAISAJE  ANÁLISIS PROPIEDAD	ESTUDIO ESTRUCTURA ECONÓMICA  ANÁLISIS DINAMIZADORES ECONÓMICOS  ANÁLISIS FUENTES DE RECURSOS
<b>DIAGNÓSTICO SECTORIAL</b>	Paisaje atractivo  Necesidad de medidas de protección y puesta en valor del paisaje desde el conjunto amurallado y del propio conjunto en el paisaje	La muralla es habitada desde un época muy cercana a la de su construcción.  En sus paramentos se registran unidades estratigráficas desde el s. XII hasta el s. XX  El lienzo c es de contemporáneo	Necesidad de intervenciones puntuales  Falta de criterios compartido para instalaciones, cerrajería y carpintería  Uso principal: segunda vivienda	Mejora de accesos a la villa  Ordenación de aparcamiento  Mejor acondicionamiento y carácter sensitivo en los espacios públicos	Necesidad de armonizar prescripciones PERI con necesidades habitantes  Mayor coordinación entre autoridades competentes	Necesidad de mayor articulación de las medidas de protección  Armonización de las distintas normativas existentes	Ausencia de desempleo  Compatibilidad de trabajo en industria o servicios con agricultura  Escasa disponibilidad de "arriesgar" ante nuevas iniciativas

*Figura 3: Resumen de diagnósticos sectoriales.*

En la fase análisis del estado actual se realizó una revisión crítica de una documentación de base de gran interés, realizada con anterioridad a la redacción del plan por iniciativa de Arabarri: el levantamiento fotogramétrico de la cerca, un estudio detallado de su estado de conservación, un estudio histórico del conjunto, la lectura arqueológica de los paramentos y un estudio socio-antropológico de la muralla.

Dicha documentación se completó con otros estudios, desarrollados en el ámbito del propio Plan Director, orientados a profundizar en la lectura de la muralla como elemento estructurador del espacio urbano. En primer lugar se analizó la normativa urbanística vigente y se recopilaron los datos relativos a la propiedad del núcleo habitado; se procedió a estudiar los espacios públicos y a analizar la relación entre el entorno medioambiental y el interior del recinto amurallado. Los edificios adosados se catalogaron y estudiaron como si fueran parte de la muralla misma, analizando de forma pormenorizada la situación de las instalaciones de calefacción, saneamiento y evacuación de las aguas en su afección a la muralla. En la tabla 3 se resume el resultado de los estudios realizados.

A partir de los resultados de los estudios previos y de las reuniones con los ciudadanos y las instituciones implicadas se identificaron 5 líneas de actuación a desarrollar:

- 1) proteger la muralla habitada, mejorando su estado de conservación y asegurando el mantenimiento de las viviendas adosadas
- 2) mejorar la conexión intramuros-extramuros del conjunto y ordenar los aparcamientos y la viabilidad.
- 3) compatibilizar la conservación de la muralla habitada con la renovación de instalaciones necesarias para garantizar la habitabilidad de las viviendas
- 4) ampliar la difusión y el conocimiento del bien
- 5) reforzar la relación entre el paisaje natural y la muralla.



El primer punto abrió una serie de preguntas clave que se repiten en todos los conjuntos amurallados que conservan edificaciones adosadas:

- a) ¿Es oportuno permitir la modificación o nueva apertura de los huecos existentes? ¿Qué daño supone para la muralla? ¿Qué costes tiene no admitirlos?
- b) Si es admisible la apertura de nuevos huecos, ¿cuáles tendrían que ser las medidas restrictivas o de control? ¿Qué modelo tipológico habría que aplicar para el diseño de la muralla-fachada?
- c) Si finalmente se admite que la muralla es sobre todo fachada, ¿sobre quién recae la responsabilidad de mantenerla y conservarla? ¿Sobre los propietarios o sobre la administración?
- d) ¿Cómo definir la altura que la muralla tiene que conservar o alcanzar?

Responder a estas preguntas costó muchos debates internos y externos en el equipo de trabajo y merece la pena recordar las conclusiones, ya que podrían constituir una referencia para otros proyectos parecidos.

- 1) La muralla habitada es un bien de gran interés patrimonial en sí. El abandono de las edificaciones adosadas es actualmente la mayor amenaza para el bien, ya que provocaría su pérdida total o parcial. En consecuencia, las políticas de conservación del bien tienen que garantizar la habitabilidad de las edificaciones adosadas. Por este motivo, es necesario admitir modificaciones en los huecos existentes, cuando acompañen a reformas de las viviendas orientadas a mejorar sus condiciones de habitabilidad, no obstante esto se traduzca directamente en pérdida de la fábrica histórica y por lo tanto del valor documental de la muralla.
- 2) Las reformas de las viviendas tienen que hacerse conservando la estructura de la edificación adosada, ya que su sustitución con construcciones de nueva planta dañará inevitablemente a la muralla. La rehabilitación de las viviendas adosadas constituye al mismo tiempo la mejor ocasión para completar el conocimiento de la muralla en su cara interior; por este motivo, se ha definido un protocolo de intervención arqueológica en el interior de las viviendas al comienzo de las obras con el objeto de evaluar y analizar el encuentro entre la muralla y la edificación adosada.
- 3) Las dos conclusiones anteriores llevan a aceptar el papel de la muralla-fachada en toda su complejidad. Acorde con este principio, la responsabilidad del mantenimiento de la muralla recae en los propietarios de las viviendas. Por este motivo se definió un protocolo de actuación para las obras de mantenimiento y conservación de la muralla-fachada que, junto a los incentivos económicos oportunos, asegure la aplicación de materiales y técnicas constructivas compatibles con la fábrica histórica.
- 4) Así como se ha indicado en el punto 1, las modificaciones en los huecos conllevan el sacrificio de la pérdida de materia histórica de la muralla. Dicho sacrificio tendrá que ser reducido al mínimo indispensable. Para ello, se realizó un estudio detallado de cada edificio, caso por caso, definiendo dónde y cuándo se autorizaban estas operaciones, aplicando los siguientes criterios:
  - a. Se autorizan modificaciones y nuevas apertura de huecos allí donde los edificios adosados no ofrezcan las condiciones de habitabilidad requeridas por la normativa vigente
  - b. Si dichas modificaciones o apertura afectan a la fábrica medieval de la muralla, considerada la de mayor interés documental ya que se conserva en zonas reducidas, no serán admitidas





*Figura 6: el punto 23*

El primer caso corresponde a un conflicto abierto desde hace más de 10 años: una familia resultaba propietaria de dos inmuebles que el PERI vigente declaraba fuera de ordenación, uno por ser adosado extra muros a la muralla (punto 2 en el plano adjunto) y otro por disconformidad tipológica con el resto del centro histórico. Además, en una tercera propiedad se descubrió, durante la redacción del estudio arqueológico del pueblo, una puerta medieval abovedada de acceso a la muralla utilizado como gallinero, identificado como el antiguo “Portal de la Peña”. La solución del conflicto requirió una negociación compleja que se concretó en una propuesta detallada de nueva ordenación del entorno, más acorde con el mantenimiento de la residencia de la familia en el centro histórico, que preveía la apertura al uso público del Portal de la Peña.

El segundo punto corresponde a un garaje destinado al almacenaje de los objetos de labranza que ocupa el espacio de un antiguo torreón de esquina en el lado norte (3 en el plano). El PERI preveía una nueva edificación en altura, pero el propietario no quería hacerse cargo de la construcción. Se decidió entonces que el ayuntamiento, con financiación de Arabarri, adquiriera el solar y lo habilitara a centro de interpretación del conjunto amurallado. El cuarto punto corresponde a las ruinas de una edificación adosada a la muralla. La intervención de recuperación aparecía muy delicada por las necesidades de tutela del lienzo de muralla afectado. Por este motivo se optó por destinar el solar a una promoción pública de viviendas, garantizando así que el proyecto de rehabilitación se realizara con control público de la actuación.

Las cuestiones relacionadas con accesibilidad e instalaciones se afrontaron de forma conjunta. La necesidad de adecuación funcional de los espacios a los nuevos requisitos del habitar suele generar conflictos con la conservación del tejido histórico urbano y del patrimonio arquitectónico; de hecho, la adecuación de las viviendas a las normativas en materia de accesibilidad y habitabilidad suele ser muy problemática en los centros históricos. En el caso de Labraza, la fachada más accesible de las viviendas solía ser justamente la muralla: allí es donde se concentran los armarios eléctricos, los cuartos de calderas y los aparcamientos. La solución se construyó tratando el núcleo urbano como si se tratara de una comunidad de vecinos, que comparten instalaciones centralizadas. Se decidió reunir las instalaciones en un área extramuros de fácil acceso y que resultara más cómoda para todos. Allí se previó la instalación de una caldera centralizada y de los contadores de energía eléctrica. El área estaba ya destinada a aparcamiento; se propuso un aparcamiento cubierto con placas solares, dando respuesta de esta forma a la necesidad de energías renovables para ACS y al requerimiento de un espacio cubierto donde dejar el coche. La instalación del aparcamiento, junto a la creación del nuevo centro de interpretación y a la apertura del Portal de la Peña, solucionaban el problema de conexión entre la zona intra-muros y extramuros detectado en la fase de diagnóstico.

5

*LOS PLANES DIRECTORES PARA LA RECUPERACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO:  
APROXIMACIÓN METODOLÓGICA Y DESARROLLO EN LAS MURALLAS DE LABRAZA (ÁLAVA)*

Paralelamente a los planes de intervención en el bien y en su entorno se diseñó un plan de difusión que prevé la museización del recorrido de visita al pueblo y la puesta en marcha de actividades educativas en los colegios de la zona.

En la tabla siguiente se resumen los criterios y programas de actuación definidos en el Plan Director.

LÍNEAS DE ACTUACIÓN	CRITERIOS DE INTERVENCIÓN	PROGRAMAS DE ACTUACIÓN
<b>INTERVENCIONES CONSTRUCTIVAS EN LA MURALLA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura de la muralla</li> <li>• Tratamiento de huecos</li> <li>• Protocolo de actuación arqueológica</li> <li>• Protocolo de actuación en la muralla/fachada</li> <li>• Recuperación de solares abandonados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apertura del Portal de la Peña</li> <li>• Eliminación de la conejera de la Rampa Arrabal</li> <li>• Sustitución garaje C/ S. Miguel</li> <li>• Consolidación Portal Sur</li> <li>• Restauración alzados A y E</li> <li>• Promoción pública de viviendas en ed.rehabilitado</li> </ul>
<b>INTERVENCIONES EN EL ESPACIO URBANO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señalización de accesos</li> <li>• Circulación rodada</li> <li>• Circulación peatonal</li> <li>• Definición de pavimentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aparcamiento turístico para residentes</li> <li>• Acondicionamiento itinerario peatonal</li> <li>• Cubrición del frontón</li> <li>• Mejora espacios públicos</li> </ul>
<b>NORMALIZACIÓN DE INSTALACIONES, CARPINTERÍA, CERRAJERÍA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalización de carpintería</li> <li>• Normalización de bajantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminación tendido aéreo</li> <li>• Centralización de instalaciones de calefacción y ACS</li> <li>• Utilización energías renovables</li> <li>• Mejora de instalaciones</li> </ul>
<b>INTEGRACIÓN DEL CONJUNTO EN EL PAISAJE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protección de unidades paisajísticas</li> <li>• Ubicación nueva área de ampliación urbana</li> <li>• Delimitación de zonas de prohibición de edificación en laderas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acondicionamiento de miradores desde el paisaje</li> <li>• Acondicionamiento de miradores hacia el paisaje</li> </ul>
<b>ACCIONES DE DIFUSIÓN DEL CONOCIMIENTO</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difusión de contenidos del Plan Director</li> <li>• Centro de interpretación del conjunto amurallado</li> <li>• Recorrido museal de interpretación de la muralla</li> <li>• Instalación de un dispositivo di RA para difusión</li> <li>• Actividades pedagógicas y educativas</li> </ul>

Figura 7

## Bibliografía

- (1) Hugony C., Rodriguez-Maribona I., Revilla I., Urrutia N “New strategies and technologies for conservation and enhancement of historical sites: from method to practice”, Conference “Cultural Heritage”, Dubrovnik, 2006, Croatia
- (2) Hugony C., Revilla I, Plan Director de las murallas de Roa (Burgos): Monumento y Paisaje urbano, Actas AR&PA, Valladolid, 2006
- (3) Labein. Nuevas Estrategias y Tecnologías para la recuperación integral de Entornos Históricos Construidos (CONEN), Informe final, 2004 (sin publicar)
- (4) Azkarate, A., Cámara, L., Lasagabaster, J.I., Latorre, P. Catedral de Santa maría, Vitoria-Gasteiz, Plan Director de Restauración, Diputación foral de Álava, 2001
- (5) Labein. “Patrimonio Accesible: I+D+i para una cultura sin Barreras”, Seminario de armonización de conceptos y terminología, 2007

## **Two cases of sensitive structures subject to ground vibrations**

*C. Sagaseta<sup>1</sup> and J.M. Sánchez-Alciturri (†)<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *University of Cantabria. Santander, Spain*

**Keywords:** Vibrations, blasting, allowable limits, observational method

### **ABSTRACT**

The definition of allowable limits to the vibrations transmitted from construction works is not straightforward when sensitive structures are found. Two examples are discussed in which the observational method is used with this objective. In the first one, the construction of a tunnel in hard rock at shallow depth in urban environment, in which the particular conditions allowed reasonable criteria based on field measurements of transmitted vibrations. In the second case, the presence of a highly sensitive prehistoric cave with mural paintings posed a serious limitation to a nearby excavation, requiring a careful control of ground vibrations to a level of peak particle velocities of a few microns per second.

### **RÉSUMÉ**

L'adoption des limites admissibles pour les vibrations produites par la construction des ouvrages n'est pas facile si l'on trouve des structures sensibles. On présente deux cas réels où la méthode observationnelle a été employée avec ce but. Un tunnel dans roche dure, excavé à faible profondeur avec des explosifs dans un milieu urbain, où les conditions particulières ont permis d'établir des critères déduits des mesures sur le chantier. Dans le deuxième cas, la présence d'une cave préhistorique près d'une excavation a fait nécessaire le contrôle des vibrations jusqu'un niveau de vitesse de quelques microns par seconde.

### **1.- Introduction**

The noise associated to transportation facilities comes from two main sources: the normal traffic operation (circulation of trains and other vehicles), and construction of infrastructures. The second one is not restricted to the time of construction itself, but it extends to the whole life of the infrastructure, associated to maintenance or improvement operations, that usually imply undertaking new works.

The definition of allowable limits to the vibrations transmitted through the ground from construction works has two main uncertainties. First, the attenuation laws with distance are highly dependent on the particular conditions in each case. The existing theoretical and empirical laws have a wide scatter, and they are highly influenced by the ground anisotropy and non-homogeneity. On the other hand, the prediction of the behaviour of sensitive structures subjected to these vibrations is very difficult, because even at low vibration levels some damage can occur due to failure of some parts or details of the structure.

In some instances, field observations of the actual behaviour of these structures under trial operations are possible and then the allowable limits can be reasonably adjusted. In other cases, the limits must be fixed in the absence of real field data, and as a result, over conservative limits are usually imposed.

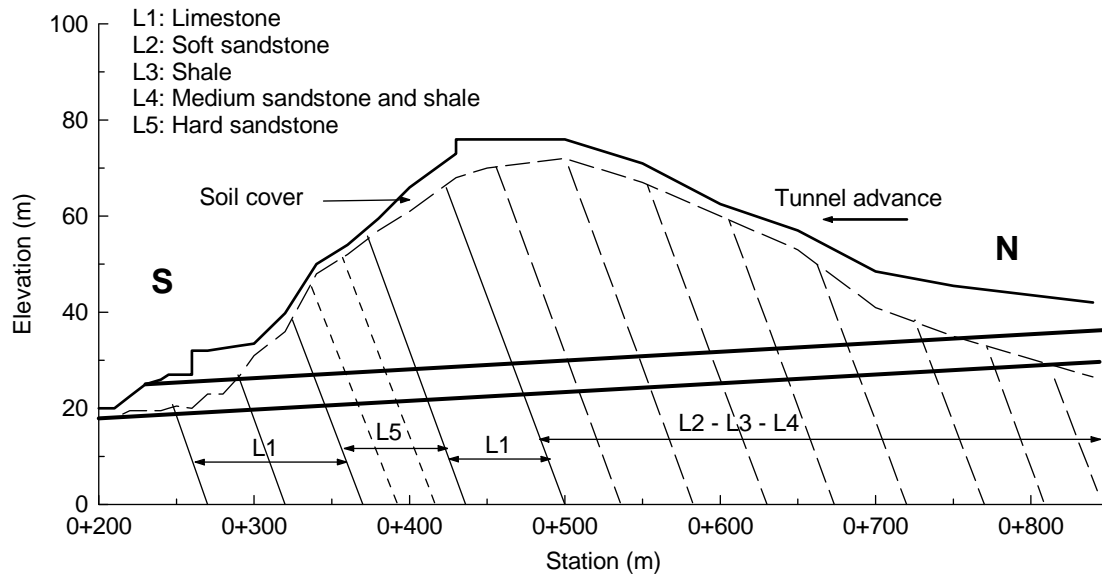


Figure 1: Case A. Tunnel in urban area. Longitudinal section

In this contribution, two extreme illustrative cases of these situations are presented. In both cases, the observational method (Peck, 1969) has been used for a progressive refinement of the allowable limits and to assess the influence of particular construction techniques.

## 2.- Case a. shallow tunnel in urban environment

### 2.1.- Problem description

A transportation tunnel was excavated in the city centre of Santander (Spain). The tunnel was 600 m long, with a horseshoe section, 12 m wide. The ground (Figure 1) consisted of Cretaceous rock, formed by an alternating series of soft to medium sandstone and shale in the first 400 m (sta 0+850 to 0+480), and hard limestone and sandstone in the last 230 m (sta 0+480 to 0+250). Due to the strict constraints in debris transport in the urban area (the South portal was situated in the city centre), it had to be excavated from North to South, against the dip of the strata, which meant a geotechnically unfavourable orientation.

The excavation was divided in heading and bench. It was performed with a road header in the sandstone and shale series (units L2, L3 and L4), but drilling and blasting was required for the section through limestone (L1) and hard sandstone (L5), as it had been anticipated in the design phase. Bernold system was used to support the excavation with a 40 cm concrete lining.

The entire zone in the section to be excavated by blasting was densely populated, with some old buildings in poor conditions located just above the tunnel. The minimum rock cover was 10 m.

The heading section was excavated in two stages: a central core (3.50 m × 3.75 m) and lateral enlargement. The total blast charge was 82.5 kg in the core and 134.5 kg in the enlargement. The initial design included micro delay blasting, with an explosive charge of 3.6 to 4.9 kg per delay.

### 2.2.- Damage criteria

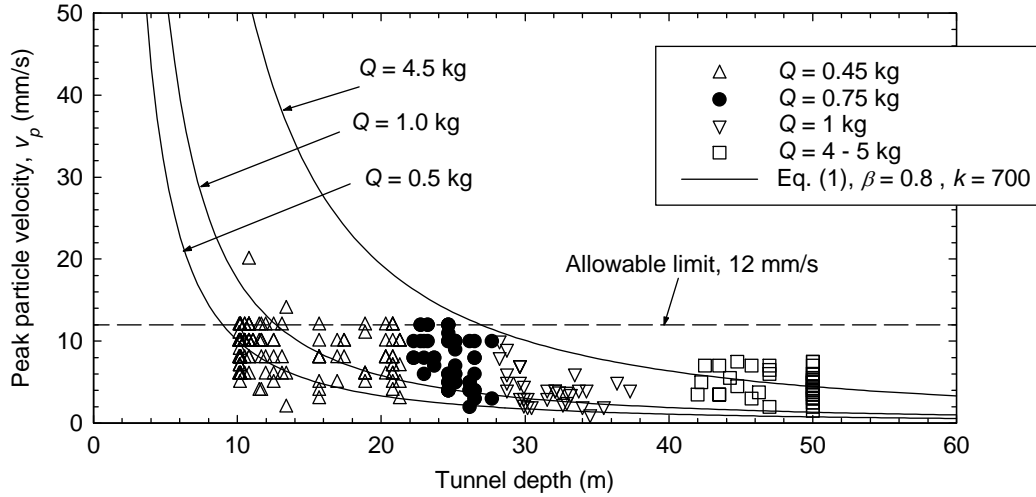


Figure 2: Measured and predicted peak particle velocities at the ground surface

Most of the existing criteria relate damage to the peak particle velocity. In the present case, the criteria given by Chae (1978) for structural damage and by Oriard (1970) for human response were used. They are shown in Figure 3. Given the presence of old buildings, an allowable value of 12 mm/s was adopted as a rule.

The attenuation laws used for blasting induced vibrations have the general expression:

$$v_p = k \cdot \left( \frac{Q}{D^\alpha} \right)^\beta \quad (1)$$

where  $v_p$  is the peak particle velocity,  $Q$  the charge (weight of explosive) per delay and  $D$  the distance. The exponent  $\alpha$  is taken as 1.5 ('Swedish rule'), 2 (quadratic law) or 3 (cubic law). In this case, the quadratic law ( $\alpha=2$ ) was used. The exponent  $\beta$  depends on the ground conditions. A value of 0.8 is usually considered. The factor  $k$  depends on the features of the shot. For  $\alpha=2$  and  $\beta=0.8$ , values of  $k$  between 200 and 3000 are found in the literature, when  $v_p$  is measured in mm/s,  $Q$  in kg and  $D$  in meters (obviously, a decrease in  $\beta$  implies a smaller value for  $k$ ).

### 2.3.- Analysis of performance

The rock cover decreased with tunnel advance, from 50 m at sta 0+480 to 10 m at sta 0+300 (Figure 1). This allowed using an observational method, with a gradual reduction in the explosive charge in order to meet the above requirement (Sagaseta, 1990). Ground vibrations were measured at the surface in all the shots using three geophones, directly above the tunnel face and 5 m ahead and behind it. As an additional measure, the most critical buildings were temporarily left empty.

The section between sta 0+480 and 0+400, where the tunnel depth was between 50 m and 42 m, was excavated using the initially adopted charge of explosive (4-5 kg per delay). The resulting particle velocities measured at the surface (50 measures) were in the range of 2 to 7 mm/s (Figure 2). Using Equation (1), with  $\alpha=2$  and  $\beta=0.8$ , the factor  $k$  ranged from 230 to 1200, with an average of 700 and a standard deviation of 230. This is in very good agreement with the existing experience.

The predictions for the rest of the tunnel using Equation (1) are shown in Figure 2. The limit of 12 mm/s would have been exceeded for a tunnel depth between 25 and 30 m. As a consequence, the charge for delay was gradually reduced, to 1.0 kg from sta 0+390, to 0.75 kg from sta 0+354 and to 0.45 kg from sta 0+332. These reductions were achieved shortening the advance (from 3.5 m to 1.0 m) and by multi-stage excavation (four stages for the heading section).

The measured velocities are also shown in Figure 2. All of them were below the limit, with an occasional exception (only one of the three geophones). The deduced value of  $k$  from Eq. (1) is presented in Table 1. It tends to be higher in the central section, but it is not possible to separate the influences of the charge, depth and lithology.

The tunnel excavation was completed with no significant damage due to the vibrations, and all the affected buildings were re-occupied after only minor repairs.

Section	0+480 - 0+400	0+390 - 0+354	0+354 - 0+332	0+332 - 0+300	All
Depth (m)	50 - 42	37 - 28	28 - 22	22 - 10	50 - 10
Charge, $Q$ (kg)	4 - 5	1.00	0.75	0.45	
$k^*$ (best fit)	667	1029	1518	782	824
(min)	235	289	467	241	235
(max)	1177	2094	2559	2923	2923
No. of observations	50	34	55	138	277

\* From equation (1), with  $Q$  in kg,  $D$  in m and  $v_p$  in mm/s,  $\alpha=2$ ,  $\beta=0.8$

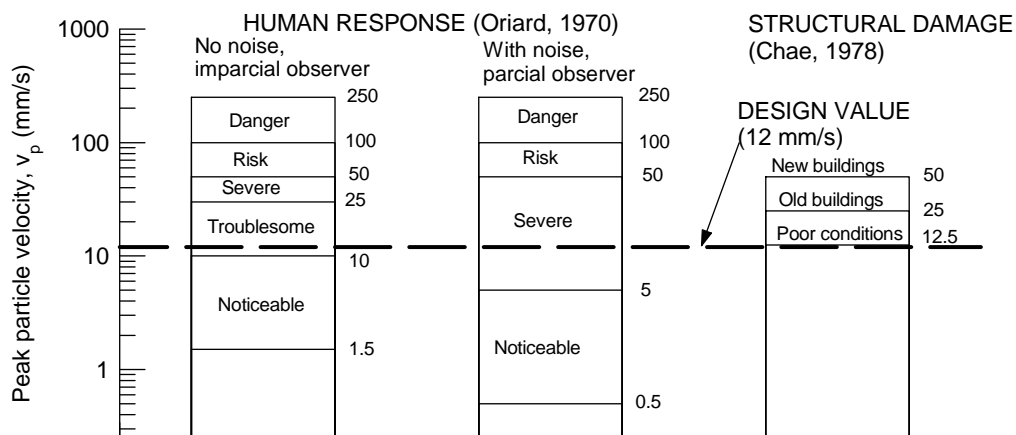


Figure 3: Damage criteria for structures and human response to ground vibrations



*Table 1: Analysis of measured peak particle velocity*

### **3.- Case b. excavation near a prehistoric cave**

#### **3.1.- Problem description**

The new Museum and National Research Centre of Altamira is being constructed in Cantabria (Spain), in the neighbourhood of the Altamira caves, famous by their Palaeolithic rock paintings and engravings from the Magdalenian period (14000-12000 BC). The owner is the Foundation for the Preservation of the Altamira Caves, and the Contractor, NECSO Entrecanales y Cubiertas S.A.

The main cave is 270 m long, and the paintings are concentrated in the ceiling of a lateral chamber near the entrance, 18 m × 9 m, with a height varying from 1.15 m to 2.65 m, at an elevation of +155 m. The cave is of secondary nature, formed by the progressive collapse of underlying karstic cavities, inducing openings between individual rock strata. The rock is calcarenite, with a marked stratification (orientation 110°/14°).

The cave is at present in one of the last stages of its evolutive process, characterised by a progressive decalcification, leading to the separation of the individual strata, which eventually can fracture and fall. The final collapse of the cave can take years or millennia, but there are many evidences of significant rock falls in some parts of the cave in historic times (in 1920 a roof support was placed in some parts). As a result, the cave is considered as highly sensitive to any kind of alteration of the equilibrium of the surrounding rock mass.

The visits to the cave are strictly limited, and only 20 persons are allowed to enter to the cave daily. The cave is closed on Mondays. Besides this paintings cave, there is another one at a lower level (el. +145), called the stalactites cave, with no known rock art, but also of tourist interest by its karstic formations.

The works for the new museum are located at a distance of 150 m from the paintings cave and 100 from the stalactites cave (Figure 4). They comprise an open excavation in rock, 10 m deep, and construction of the building and access roads.

#### **3.2.- Damage criteria. Design provisions**

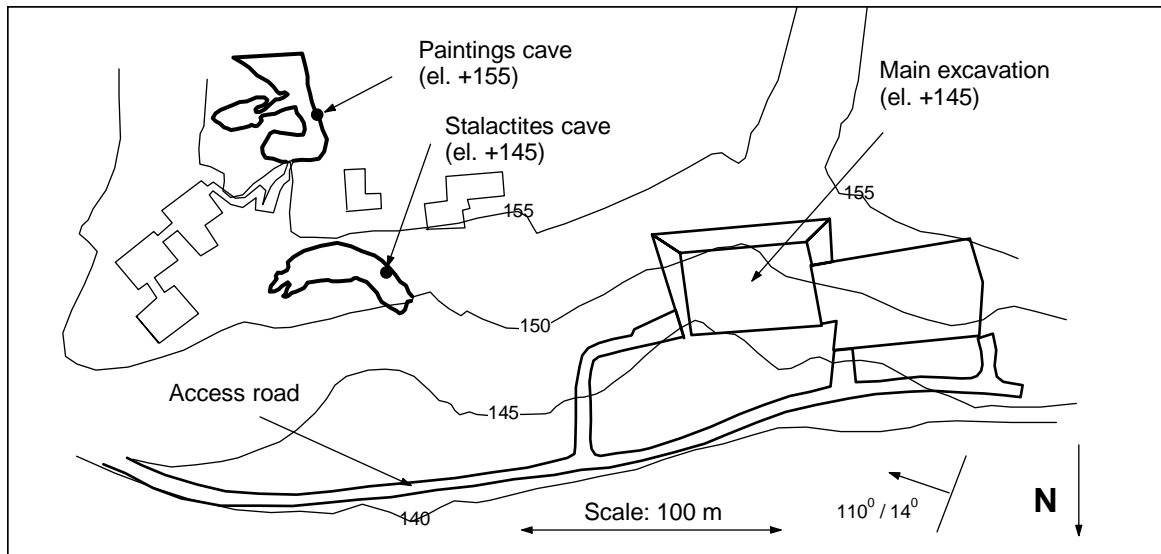


Figure 4: Case B. General plan showing the caves and construction works

There are few data on the tolerance of underground openings to vibrations. Lined tunnels behave relatively well during seismic motions, with reported damages only under very severe actions (Asakura and Sato, 1996). However, unlined natural cavities are more sensitive. Berta (1994) presents a case where a limit of 7.1 mm s<sup>-1</sup> was adopted for a cave with delicate karstic structures.

In the present case, the paintings form a thin layer of clay and other substances adhered to the rock surface, and any local loss of bond can lead to a severe deterioration. In any case, the uniqueness of the monument and its particular conditions described above implied that the consequences of a small local failure would be unacceptable. This led to the condition of "no perceptible vibration in the cave" due to the works. To meet this requirement, the design included the specification that the construction could not produce at the cave any vibrations higher than the pre-existing ground vibration levels.

During the design phase, a field campaign was carried out aimed to the determination of the existing vibration level. A portable system was used (Clapés, 1997), and natural vibrations were recorded with triaxial geophones under different conditions. Figure 5 shows the results of the measurements inside the cave. The maximum peak particle velocity was found to be only 3.5  $\mu\text{ms}^{-1}$  (microns per second). This was considered as an initial limit, for a range of frequencies 0.1 Hz to 100 Hz. This limit is three orders of magnitude lower than the usual ranges (Figure 3).

Some construction constraints were adopted in the design: Blasting, percussion drilling and use of impact hammer were forbidden. Traffic was not allowed in the path surrounding the cave, and limited to 10 km/h (5 km/h for heavy vehicles) in the rest of the area. Progressively, these restrictions were relaxed, depending on the location, after assessment that the imposed vibration limit was not exceeded. Blasting was forbidden under any circumstances.

In the main excavation, expansive mortar in pre-drilled holes was used to fragmentise the rock. For small excavations (footings), a small road header was also employed

### 3.3.- Vibration control

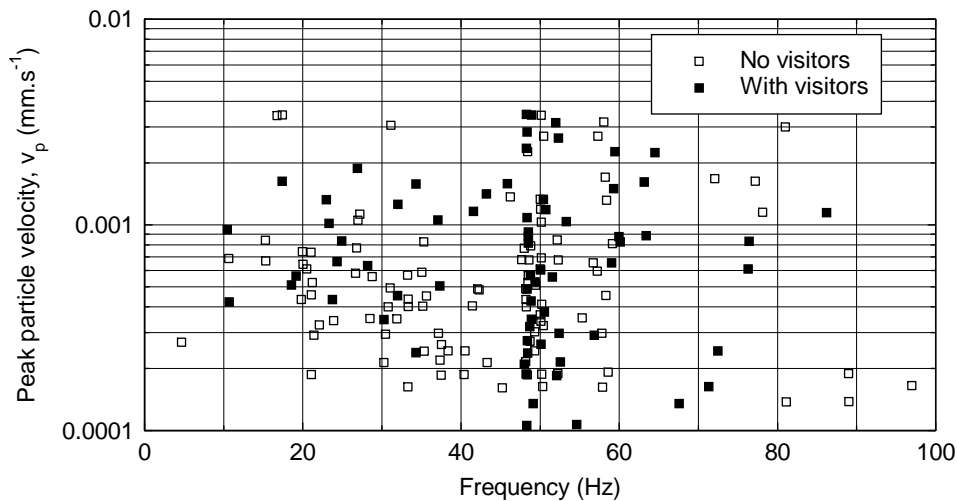


Figure 5: Measured ground vibrations during the design phase

Ground vibrations in the caves were continuously monitored during all the construction stage (Sánchez-Alciturri, 1998). A fixed control system was installed, to check that the adopted limit was not exceeded. The system would also serve to assess the level of natural ground vibrations in a longer time basis (the total recording time during the design phase had been only 100 seconds in runs of 5 seconds).

The sensitivity required excluded the use of standard geophones, and so the system was based on the measure of accelerations, that are then integrated in the time domain to obtain the velocities. The installed system consisted of:

- Three ground accelerometers, mounted in a triaxial (xyz) arrangement inside the paintings cave: measuring range 0.1-200 Hz,  $\pm 1\text{g}$ ; sensitivity  $\pm 1\mu\text{g}$ .
- Three ground accelerometers, mounted in a triaxial (xyz) arrangement inside the stalactites cave: measuring range 0.1-1000 Hz,  $\pm 0.5\text{g}$ ; sensitivity  $\pm 5\mu\text{g}$ .
- A central system, installed at the works office, composed of:
  - i. a data acquisition unit, with three AD acquisition boards, each of them with three conditioning module channels and a memory board, programmable triggering level and recording time;
  - ii. a computer (PC) with software for time integration, signal storage, discrimination of events (see next paragraph) and alarm control.

### 3.4.- Criteria for the analysis

A first campaign of trial measurements showed that the rock mass anisotropy was very important in the attenuation of vibrations with the distance. For the range of distances involved, the attenuation (in terms of peak particle velocity) was found to be five times greater in the direction normal to bedding than parallel to it, due to the loss of energy at the discontinuity planes. As the rock structure was very uniform, a system of virtual distances between any two points was easily defined, by assigning a weight factor of 5 to the component across the stratification.

Two cases of sensitive structures subject to ground vibrations

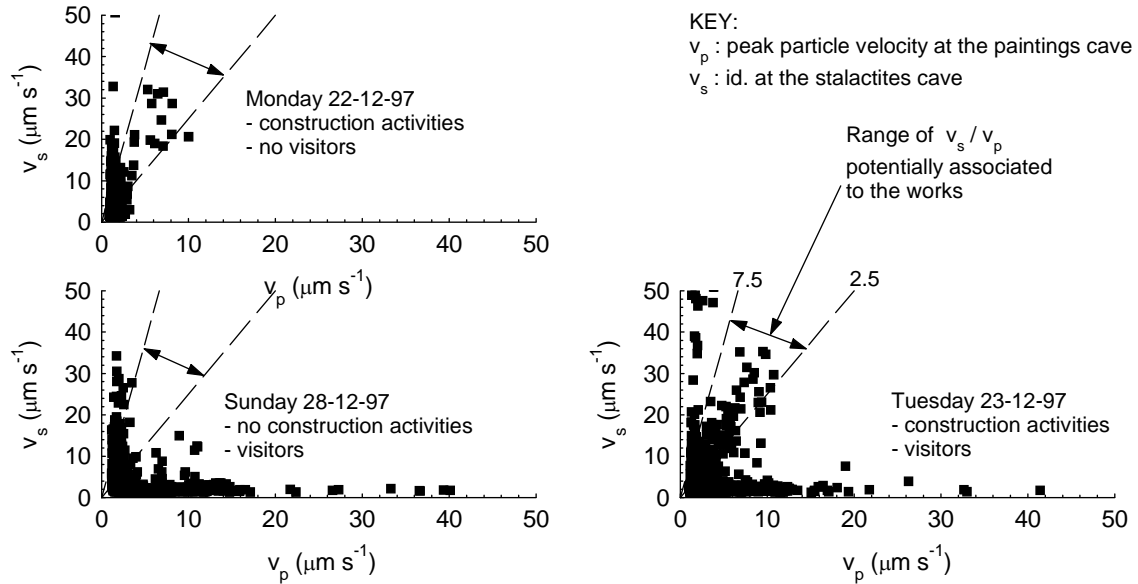


Figure 6: Events recorded at the two caves under typical conditions

For any given event, the ratio between the peak velocities recorded at the paintings cave,  $v_p$ , and at the stalactites cave,  $v_s$ , was used to discriminate its possible origin. The virtual distance from the works to the paintings cave was about twice as the distance to the stalactites cave. Hence, only when the recorded vibrations ratio  $v_p/v_s$  was in the range 2.5-7.5 were considered as potentially produced by the works. This range was wide enough so that any event outside it is clearly not caused by the construction activities.

### 3.5.- Interpretation of results

After some time, it became evident that the initial limit of  $3.5 \mu\text{ms}^{-1}$  was exceeded very often in the absence of construction activities. A continuous record for a Sunday (no construction activities) is shown in **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** There is a continuous vibration of the order of  $3.5 \mu\text{ms}^{-1}$ , in agreement with the design phase analysis. However, there are events of velocity of up to  $42 \mu\text{ms}^{-1}$  during the day and up to  $10\text{-}15 \mu\text{ms}^{-1}$  during the night. These events happen at an average pace of  $15\text{-}20$  per hour, with individual duration of about 0.2 seconds (this explains why these peaks were not detected in the design phase, with discontinuous measurements in runs of 5 seconds).

Figure 6 shows the records corresponding to three typical days:

- Sunday (28-12-97), with no construction activities, and with visits to the cave in the morning and afternoon.
- Tuesday (23-12-97), with construction and visits.
- Monday (22-12-97), with construction but with the cave closed to visitors.

In these plots, the above range for attenuation, separating the vibrations potentially associated or not to the works is also shown. There are many peaks of velocity exceeding by far the limit of  $3.5 \mu\text{ms}^{-1}$ , with very low ratios (well below 1.0), indicating that they are originated at the paintings cave itself or its surroundings. It is evident from these results that the level of vibrations in the absence of construction activities was well above the initial adopted value. The dominant frequencies were in the range  $30\text{--}40$  Hz.

After a whole month of continuous recording, it was accepted that the pre-existing vibrations were in fact of up to  $42 \mu\text{ms}^{-1}$ , most of them associated with the visits to the cave (the highest peaks)

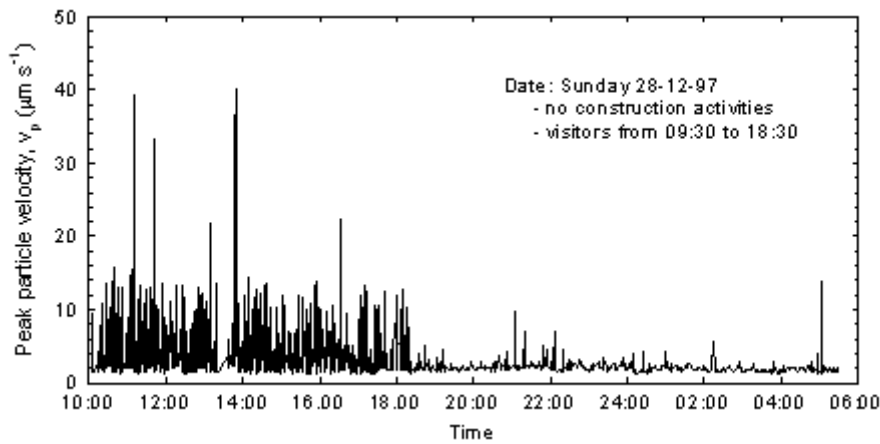


Figure 1: Record of events during a sunday

correspond to opening and closure of the entrance door). So it was decided to increase the initial estimate of the "natural" vibrations, with some additional safeguards.

The following scheme of alarms and warnings was finally adopted, based on the peak particle velocity at the paintings cave,  $v_p$ , and the duration, referred always to events potentially due to the works (ratio between the vibrations in the two caves in the range 2.5 - 7.5):

- Level 1: One or more events of  $v_p > 21 \mu\text{ms}^{-1}$  during more than 50 milliseconds. A visual and sound alarm is activated in all the working area. Any construction activity should be immediately stopped.
- Level 2:  $v_p > 10.5 \mu\text{ms}^{-1}$ : one event during more than 1 second, or six shorter ones per minute. A light and a bell are activated at the office. The source must be identified and corrected as soon as possible.
- Level 3:  $v_p > 3.5 \mu\text{ms}^{-1}$ : more than 10 events in 1 hour or more than 40 in one day. A light is activated at the office. It must be analysed and reported to the work director.
- Level 4: Any single event of  $v_p > 3.5 \mu\text{ms}^{-1}$  during more than 50 milliseconds, or any system malfunction is recorded and stored. A signal is activated at the computer.

### 3.6.- Performance

With the above criteria, the works were carried out satisfactorily, according to the scheduled program. The initial severe restrictions to construction methods were progressively relaxed (with the exception of blasting), as commented above. The system for vibration control performed well, with only minor occasional problems, mainly associated with the transmission cables (the distance from the instruments to the works office was of several hundred meters).

The average occurrence of events associated to the works was:

- level 1: none
- level 2: less than one per month
- level 3: less than three per week
- level 4: about ten per day.

#### **4.- Conclusions**

The above two cases constitute two extreme examples in the conditions of application of the observational method in geotechnical engineering, for the effects of vibrations on existing structures. They represent the 'ductile' and 'brittle' situations (Nicholson, 1994).

In the case A, the particular conditions allowed the progressive assessment of the risk, and the construction method could be adapted accordingly to meet the design requirements.

On the other hand, the case B the severity implied by any damage lead to the imposition of a highly conservative limit for the allowable limit. Even in this case, the observational method was used to refine the level of the pre-existing ground vibrations, and to control the effect of particular construction techniques.

#### **5.- Acknowledgements**

The authors want to thank all the persons and entities involved, for their help and permission to publish the pertinent data. For the Case A, the Municipal Chief Engineer of Santander, Mr. Juan J. Lastra, and the Contractor, Dragados y Construcciones, S.A. For the Case B, the Director of the Altamira Museum, Dr. J.A. de las Heras, the designer, Architect Mr. Juan Navarro Baldeweg, and the Contractor's (NECSO) job engineer, Mr. Santiago Ruiz Presmanes.

#### **REFERENCES**

- (1) Asakura, T. & Sato, Y. 1996. Damage to mountain tunnels in hazard area. Soils and Foundations. Special Issue. January, pp. 301-310.
- (2) Berta, G. 1994. Blasting-induced vibrations in tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology. 9:2,175-188.
- (3) Chae, Y.S. 1998. Design of excavation blast to prevent damage. Civil Engineering. ASCE. 48:4,77-79.
- (4) Clapés, J. 1997. Estudio sobre la transmisión de vibraciones sísmicas en el entorno de la cueva de Altamira para la implantación del nuevo edificio del museo y de la réplica. CIMNE. Universidad Politécnica de Cataluña. (Unpublished report).
- (5) Nicholson, D.P. 1994. The observational method in geotechnical engineering. Preface. Géotechnique 44:4,613-618.
- (6) Oriard, L.L 1970. Blasting operation in the urban environment. Ass. Eng. Geol. An. Meeting. Washington.
- (7) Peck, R.B. 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Géotechnique 19:2,171-187.

- (8) Sagaseta, C. 1990. Análisis de la transmisión de vibraciones producidas por las voladuras en el túnel Casimiro Sáinz-Avenida de Los Castros (Santander). (Unpublished report).
- (9) Sánchez-Alciturri, J.M. 1998. Sistema de medida de vibraciones en las cuevas de Altamira durante las obras de construcción del museo y la réplica. Fundación Leonardo Torres Quevedo. Universidad de Cantabria. (Unpublished report).

## **PLANEAMIENTO URBANÍSTICO Y REHABILITACIÓN URBANA. EL CASO DEL ÁREA DE REHABILITACIÓN INTEGRAL DE SANTANDER**

*Soledad Nogués Linares<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Profesora Titular de Urbanística y Ordenación del Territorio Universidad de Cantabria*

La rehabilitación de los tejidos urbanos tradicionales que conforman la ciudad histórica constituye uno de los principales temas de atención de la disciplina urbanística desde los años setenta. Desde entonces la cultura de la rehabilitación se ha ido transformando (Busquets et al., 2002), con propuestas de intervención cada vez más integrales y generalizadas, de forma que hoy la recualificación del espacio público y la recuperación de edificaciones ya no son exclusivas de los centros históricos monumentales, sino que afectan al conjunto de las preexistencias urbanas que ofrecen ambientes y tejidos singulares o interesantes.

Las experiencias y actuaciones llevadas a cabo en los últimos decenios en Europa y en España han demostrado la necesidad de integrar o enmarcar la política de rehabilitación en el planeamiento urbanístico. De ahí que sea fundamental conocer las posibilidades dialécticas existentes entre los diversos instrumentos de planeamiento y su articulación con los programas de rehabilitación, en aras a conseguir actuaciones coordinadas y coherentes.

### **1.- EL PLANEAMIENTO URBANÍSTICO COMO MARCO DE LA POLÍTICA DE REHABILITACIÓN URBANA**

Frente a la política inversora (Vivienda) de rehabilitación del patrimonio, que responde a unos intereses específicos de recuperación de las edificaciones y reurbanización del entorno, la política planificadora (Urbanismo) supone la ordenación de la ciudad con criterios globales y de interés general (MOPU-FEMP, 1986).

El debate sobre la intervención en el patrimonio edificado debe encuadrarse en una discusión más amplia sobre el modelo de ciudad a través del planeamiento general urbanístico, que es el instrumento que posibilita la coordinación de las políticas sectoriales a nivel municipal y da soporte legal a las actuaciones posteriores.

La metodología de trabajo del planeamiento es la mejor manera para establecer de forma previa estrategias de revitalización de tejidos urbanos, aunque por si solo presenta limitaciones para generar verdaderos procesos de rehabilitación urbana.

En el contexto de los procesos de rehabilitación, el papel de los Planes Generales de Ordenación Urbana se concreta principalmente en las siguientes funciones:

- Contemplan los problemas desde una perspectiva global e integrada con el resto de la estructura urbana
- Establecen el marco legal relativo a la protección de la edificación
- Delimitan los sectores o ámbitos de ordenación propios de los planes especiales
- Asignan usos y edificabilidades, y definen las pautas arquitectónicas



- Determinan las actuaciones complementarias a la edificación, en particular en lo referente a espacios libres, equipamientos e infraestructuras.

El contenido que la legislación urbanística prevé para los Planes Generales de Ordenación Urbana hace innecesaria, en principio, la existencia de otra figura de planeamiento que concrete sus previsiones de cara a emprender acciones rehabilitadoras. No obstante, cuando las determinaciones de los Planes Generales se muestran insuficientes, se recurre a planes especiales que las desarrollen. En esos casos, el plan especial es el instrumento de análisis, ordenación y gestión con el nivel de detalle adecuado para lograr la mejora del espacio interior de la ciudad.

### **1.1.- Los planes espaciales de reforma interior**

La finalidad del planeamiento especial de reforma interior es la de regular la urbanización y edificación de áreas en suelo urbano, desarrollando el Plan General mediante su ordenación detallada, por lo que se considera el instrumento de planeamiento específico para abordar la recuperación del tejido urbano en zonas degradadas.

La figura de los Planes Especiales de Reforma Interior (PERI) se definió en el Texto Refundido de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana promulgado en 1976. Los PERIs “tienen por objeto la realización en suelo urbano (...) de operaciones encaminadas a la descongestión, creación de dotaciones urbanísticas y equipamientos comunitarios, saneamiento de barrios insalubres, resolución de problemas de circulación o de estética y mejora del medio ambiente o de los servicios públicos u otros fines análogos” (art. 23).

Desde la aprobación de esta ley, y en el marco de las sucesivas reformas de la legislación urbanística, que mantienen preceptos similares, se han llevado a cabo planes especiales en muchas ciudades españolas, adaptados a cada problemática específica, con lo que gradualmente se han ido mejorando los mecanismos de actuación, desde la más elemental protección del patrimonio edificado a estrategias más complejas y depuradas orientadas a la recuperación de los barrios.

Del estudio realizado por el MOPU (1990) sobre planes especiales desarrollados en diversas ciudades españolas se desprenden una serie de características comunes en ellos: se trata de planes localizados en las áreas centrales de la ciudad, de dimensiones variables –si bien su ámbito idóneo no debe superar las 10 Ha.-, por lo general desarrollados en áreas física y socialmente degradadas, con una densidad de viviendas por hectárea elevada y alto porcentaje de viviendas desocupadas, en las que predomina una actividad fundamentalmente terciaria y una población envejecida y marginada.

En Santander también se han elaborado planes similares en barrios centrales deteriorados, así como en los conjuntos urbanos más emblemáticos de la ciudad, como son el Plan Especial de Protección del conjunto Histórico-Artístico del Sardinero y el Plan Especial de Reforma Interior, Protección y Rehabilitación del Paseo Pereda y Castelar.

Más recientemente, con la asunción de competencias legislativas en materia urbanística por las Comunidades Autónomas, la concreción del papel y funciones del planeamiento corresponde a la legislación autonómica. La Ley de Cantabria 2/2001, de 25 de junio, de Ordenación Territorial y Régimen Urbanístico del Suelo de Cantabria recoge en su art. 59

que en desarrollo de los Planes Generales de Ordenación Urbana los Ayuntamientos podrán formular, entre otros, Planes Especiales de Reforma Interior en suelo urbano. Su contenido concreto viene establecido en el art. 60 de esta ley, que señala que sus determinaciones “se inspirarán, en lo que sea pertinente, en las de los Planes Parciales y deberán contener las propias de su naturaleza y finalidad debidamente justificadas”, es decir, detallarán y ajustarán las determinaciones referidas a la delimitación de unidades y sistemas de actuación, asignación de usos, intensidades, tipologías y densidades máximas, previsión de dotaciones públicas, redes de comunicaciones y servicios... , determinaciones en suma relativas a elementos fundamentales en las intervenciones de rehabilitación.

Con todo, como se ha constatado, a pesar de que los planes especiales se configuran como instrumentos de planeamiento pormenorizados adecuados para encauzar el problema, no garantizan por sí solos procesos de rehabilitación urbana.

## **2.- LA POLÍTICA DE REHABILITACIÓN URBANA**

La rehabilitación urbana, como forma de intervención en la ciudad consolidada, está orientada a la conservación y recualificación de los valores histórico-culturales, ambientales, económicos y sociales de tejidos urbanos degradados y su integración con el conjunto de la estructura urbana. Su evolución está marcada por el paso de planteamientos de protección, tendentes a la conservación del patrimonio edificado, a otros de recuperación, dirigidos a la mejora del medio y la calidad de vida urbana en todos sus aspectos físicos, funcionales y sociales.

El desarrollo de la política de rehabilitación ha sido factible gracias a la configuración de los marcos estatales, autonómicos y locales que han establecido fórmulas de actuación y han hecho posible la financiación y gestión de la actividad rehabilitadora (García García,1999).

Tras las posturas reivindicativas iniciadas a mediados de los años 1970, dirigidas en un principio a proteger el patrimonio edificado a través de figuras como los Catálogos y los primeros Planes Espaciales de Reforma Interior, la evolución de la política de rehabilitación en España tiene un primer punto de inflexión con la aprobación del Real Decreto 2329/83 sobre Rehabilitación del Patrimonio Residencial y Urbano en el marco del Plan Cuatrienal de Vivienda 1984-1987, que introduce por primera vez políticas activas en apoyo a la rehabilitación de viviendas. A este Real Decreto le seguirían otros en un intento de regular, dentro del entramado institucional del Estado de las Autonomías, y en una situación económica con mejores expectativas, la participación de las distintas administraciones en materia de vivienda, incluidas las actuaciones de rehabilitación.

Actualmente está vigente el Real Decreto 801/2005, de 1 de julio, por el que se aprueba el Plan Estatal de Vivienda 2005-2008, para favorecer el acceso de los ciudadanos a la vivienda, por el que se regulan las intervenciones estatales en materia de vivienda. Como en anteriores legislaciones (González-Varas Ibáñez, 1998), en ésta se expresa la vinculación de la rehabilitación con el urbanismo: las actuaciones protegidas de rehabilitación han de realizarse en función de un Plan previo, puesto que “deberán ajustarse a la normativa del planeamiento urbanístico vigente que sea de aplicación (...), preservar el uso residencial de las viviendas y edificios (...) y asegurar la diversidad social y el realojamiento, en su caso, de la población residente (...)” (art. 55).

Legislación de la Administración Central que es complementada con las normativas de fomento a la rehabilitación de las Comunidades Autónomas y las medidas e iniciativas, asimismo, de apoyo de las Administraciones locales más preocupadas por este tema.

En el caso concreto de la Comunidad Autónoma de Cantabria, la normativa de referencia es el Decreto 12/2006, de 9 de febrero, del Gobierno de Cantabria, por el que se establecen medidas para favorecer el acceso de los ciudadanos a la vivienda en Cantabria, que recoge ayudas a la rehabilitación adicionales a las establecidas por el Ministerio de la Vivienda.

### **2.1.- Las actuaciones de rehabilitación integradas**

Las actuaciones protegidas en materia de rehabilitación, de conformidad con lo establecido en el artículo 49 del Real Decreto 801/2005, deben estar incluidas en alguno de los siguientes ámbitos: áreas de rehabilitación integral; áreas de rehabilitación de centros históricos; o actuaciones aisladas de rehabilitación de edificios y viviendas encaminadas a mejorar la accesibilidad, reducir el consumo energético, y garantizar la seguridad estructural y estanqueidad frente a lluvias.

Se entienden como áreas de rehabilitación integral “los tejidos urbanos, zonas de los mismos o barrios en proceso de degradación física, social o ambiental, así declarados por las Comunidades Autónomas (...)” (art. 50 RD 801/2005) en los que son necesarias figuras específicas de programación de actuaciones integradas para llevar a cabo una rehabilitación de forma profunda y conjunta.

El ámbito de las actuaciones protegidas en áreas de rehabilitación integral comprende la rehabilitación de edificios y viviendas, la ejecución de la urbanización o reurbanización y, en su caso, las obras de demolición (art. 58 RD 801/2005).

Se promueven a iniciativa local y requieren una inversión importante de todos los niveles de la Administración pública, además de la participación activa de la iniciativa privada. Estas áreas están acogidas a ayudas económicas mediante Acuerdo de la Comisión Bilateral de Seguimiento integrada por el Ministerio de Vivienda y la Consejería responsable de vivienda de la Comunidad Autónoma, con participación del Ayuntamiento correspondiente (art. 59 RD 801/2005). Las subvenciones, con cargo a los presupuestos del Ministerio de Vivienda, son las siguientes: una subvención por un importe máximo del 40% de la obra de rehabilitación, con una cuantía media por vivienda que no supere los 4.500 euros; y una subvención destinada a las obras de urbanización por un importe máximo del 20% del presupuesto de dichas obras, con un límite del veinte por ciento de la subvención anterior.

### **2.2.- El área de rehabilitación integral del Cabildo de Arriba (Santander)**

El Cabildo de Arriba, un barrio histórico hoy degradado perteneciente al municipio de Santander, constituye el primer área de rehabilitación integral que se desarrolla en Cantabria. Su declaración como Área de Rehabilitación Integral (ARI), largamente demandada por los vecinos -a pesar del escaso mantenimiento del patrimonio inmobiliario por parte de éstos-, se inscribe en el marco jurídico vigente que acaba de exponerse.

El proceso de declaración tiene su antecedente en el documento de propuesta de Área de Rehabilitación Integral preparado por los Servicios Técnicos Municipales en junio de 2005; documento que pronto quedó desfasado al entrar en vigor la actual legislación en materia de vivienda. En agosto de 2005, la Asociación de Vecinos del Cabildo de Arriba plantea una

*PLANEAMIENTO URBANÍSTICO Y REHABILITACIÓN URBANA. EL CASO DEL ÁREA DE  
REHABILITACIÓN INTEGRAL DE SANTANDER*

nueva propuesta con el objeto de reanudar la tramitación. Esta propuesta es tenida en cuenta en la realización de la memoria-programa final en mayo de 2006, que recoge la correspondiente delimitación geográfica, los elementos sociológicos, los aspectos técnicos de las actuaciones rehabilitadoras y la estimación de costes que justifican la viabilidad y conveniencia de la operación. La memoria-programa se presenta, por parte del Ayuntamiento de Santander, ante la Dirección General de Vivienda y Arquitectura, siguiendo la forma prevista en el art. 57 del Decreto 12/2006 del Gobierno de Cantabria. Posteriormente, la Consejería de Obras Públicas y Vivienda del Gobierno de Cantabria redacta la propuesta de declaración de Área de Rehabilitación Integral y eleva la memoria-programa del Ministerio de Vivienda para su aprobación con el objeto de tramitar las ayudas financieras.

Por fin, en diciembre de 2006 las Administraciones estatal, autonómica y municipal formalizan un convenio para desarrollar la primera fase de intervención, que posibilitará la rehabilitación del 20% de las 1.108 viviendas existentes, además del acondicionamiento de la urbanización. Esta primera fase, cuya ejecución concluirá en 2009, será financiada por el Ministerio de Vivienda, que aporta el 34% de los costes, los particulares (45%), el Ayuntamiento de Santander (18%) y el Gobierno Regional de Cantabria (3%).

Las bases y actuaciones necesarias para llevar a cabo el programa de rehabilitación están definidas en la Memoria-programa para la solicitud de declaración de “Área de Rehabilitación Integral” elaborada por Apia XX (2006) por encargo del Ayuntamiento de Santander. Este documento parte de la delimitación del ámbito geográfico objeto de rehabilitación, que tiene una superficie de 40.457 m<sup>2</sup> de suelo y comprende el área delimitada por las calles Jesús del Monasterio, Isabel II, calle Cádiz, abriéndose por el Oeste hasta la calle Cobo de la Torre, y cerrando su perímetro por la Plaza de Juan José Ruano y el Pasaje de Peña. Se trata de un céntrico barrio localizado frente al Ayuntamiento de Santander, compuesto en 2005 por 856 habitantes y 1.108 viviendas, en el que se conserva la trama medieval histórica. Fue Allí donde se ubicó el primer asentamiento urbano de Santander y es una de las pocas zonas de origen medieval que sobrevivieron al incendio de 1941.

El análisis socio-económico y urbanístico pone de manifiesto el proceso de degradación física, social y ambiental de esta zona, lo que justifica su declaración como área de rehabilitación integral, si bien existen diferencias entre el interior, más deteriorado, y la línea de cierre. En concreto, las principales debilidades del barrio son: el envejecimiento y marginación social de la población, la pérdida de actividades comerciales, el deterioro de las viviendas, la escasez de espacios públicos y equipamientos, y las dificultades de accesibilidad externa e interna.

Dado que constituyen los elementos objeto de rehabilitación, es necesario analizar de forma especial las características y el estado específico de la edificación y urbanización. Desde el punto de vista de la edificación, cabe destacar el alto nivel de saturación del parcelario, de uso predominantemente residencial, y el deterioro de las edificaciones, algunas de las cuales han llegado incluso a derrumbarse o han sido derribados por ser declarados en ruina, aumentando consiguientemente el número de solares. Las viviendas se distribuyen en edificios en manzana de distintas edades, materiales y tamaños, diferenciándose dos zonas, una situada en los frentes principales de la línea perimetral compuesta por construcciones



*PLANEAMIENTO URBANÍSTICO Y REHABILITACIÓN URBANA. EL CASO DEL ÁREA DE  
REHABILITACIÓN INTEGRAL DE SANTANDER*

barrio se concretan en la escasa ventilación e iluminación, el deficiente estado de sanitarios e instalaciones, la carencia de aislamiento acústico y térmico, el exceso de humedad, y los problemas de acceso a la vivienda (portales angostos, escaleras estrechos, inexistencia de ascensor...). Respecto a los aspectos de seguridad, la estructura en general está en buen estado o es recuperable, ya que el estado de las fábricas de piedra y muros exteriores es bueno, así como la estructura de vigas y pilares de madera, existiendo no obstante en algunas edificaciones problemas de estabilidad estructural y de estanqueidad en las cubiertas, además del riesgo de incendios. Los problemas de salubridad se derivan del abandono de solares, patios y locales, y la falta de iluminación y ventilación. Por último, en lo relativo al ornato público, la imagen exterior de las edificaciones refleja la falta de mantenimiento estético y la existencia de intervenciones inadecuadas, con materiales y elementos que rompen el valor arquitectónico de la tipología original.

Por lo que respecta a los elementos y estado de la urbanización, el análisis de la situación del área refleja las limitaciones de los espacios públicos, con viales estrechos, debido al mantenimiento de la trama histórica preexistente, y escasas áreas verdes. Los espacios públicos presentan un aceptable estado de urbanización, si bien se denota una falta de criterios comunes en sus acabados. En cuanto a los servicios, la red de abastecimiento de agua y saneamiento, que cubre toda la zona, presenta algunos problemas de canalizaciones, el suministro de gas tiene una implantación parcial y la red eléctrica es aérea.

A partir del diagnóstico de la situación actual se elabora el programa de actuaciones integrales, estableciéndose la programación u orden de prioridades y el estudio económico-financiero que justifica la viabilidad de la operación. Con el objetivo general de desarrollar el proceso de rehabilitación integral del barrio, el programa de actuaciones integrales abarca intervenciones en la urbanización y en la edificación.

Las actuaciones en la edificación, siguiendo lo establecido en el art. 53 del RD 801/2005, que determina las condiciones generales que deben cumplir los edificios para ser objeto de actuaciones de rehabilitación protegidas, van de la intervención mínima a la integral, según el estado de las distintas edificaciones. La intervención mínima está orientada a mejorar las condiciones de habitabilidad, ornato, salubridad y accesibilidad de los edificios, mediante reparaciones en el revestimiento de fachadas, sustitución de canalones, mejora de cubiertas, saneamiento de patios, reparación de escaleras y portales, y eliminación de barreras arquitectónicas. La intervención media consiste en la recuperación de edificios estructuralmente estables en los que se propone, además de la mejora de las condiciones anteriormente citadas, la reposición de elementos originales de la edificación. Y por último, la intervención integral, hace referencia a la recuperación de las condiciones de los edificios y su rehabilitación estructural,

PLANEAMIENTO URBANÍSTICO Y REHABILITACIÓN URBANA. EL CASO DEL ÁREA DE REHABILITACIÓN INTEGRAL DE SANTANDER



Figura 3: Fuente, APIA XXI (2006).

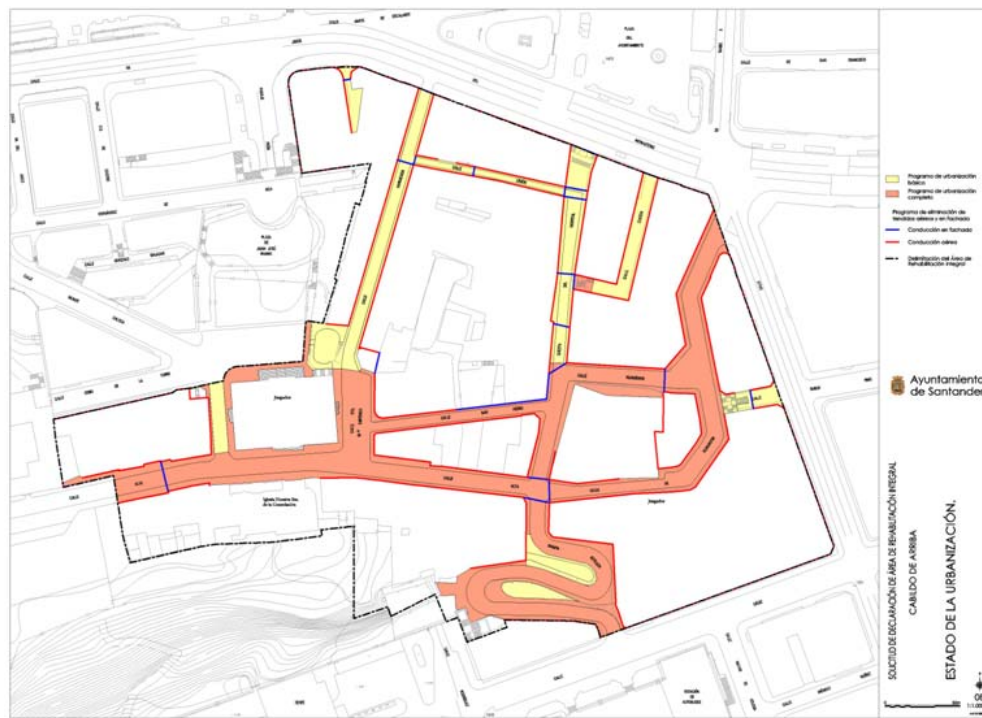


Figura 4: Fuente, APIA XXI (2006).

*PLANEAMIENTO URBANÍSTICO Y REHABILITACIÓN URBANA. EL CASO DEL ÁREA DE REHABILITACIÓN INTEGRAL DE SANTANDER*

mediante la reparación de cubiertas, consolidación de estructuras, eliminación de humedades, medidas de aislamiento térmico y eficiencia energética, reparación de las redes de desagüe, y mejora de las condiciones higiénico-sanitaria de las edificaciones.

Las actuaciones en la urbanización, a través de un programa básico o completo, según el grado de intervención necesaria, comprenden reparaciones de pavimentación, mejora de las condiciones de accesibilidad, iluminación de la vía pública, señalización, sustitución de canalizaciones, unificación de mobiliario urbano, y readecuación de espacios libres, además del soterramiento de cableado eléctrico y de telefonía.

Estas actuaciones de rehabilitación planteadas para el área tienen soporte en el planeamiento urbanístico vigente. El actual Plan General de Ordenación Urbana (1997) clasifica esta zona como Suelo Urbano, incluyéndola en la categoría de Área de conservación ambiental, categoría dirigida a la protección del patrimonio cultural mediante el establecimiento de medidas de conservación de las condiciones estéticas. Para el ámbito declarado ARI en concreto, el Plan plantea una operación de renovación, dejando varios edificios fuera de ordenación y proponiendo para el área central de la misma, la más degradada (Área Específica 95.2), la sustitución de la edificación existente y la apertura de una nueva calle.

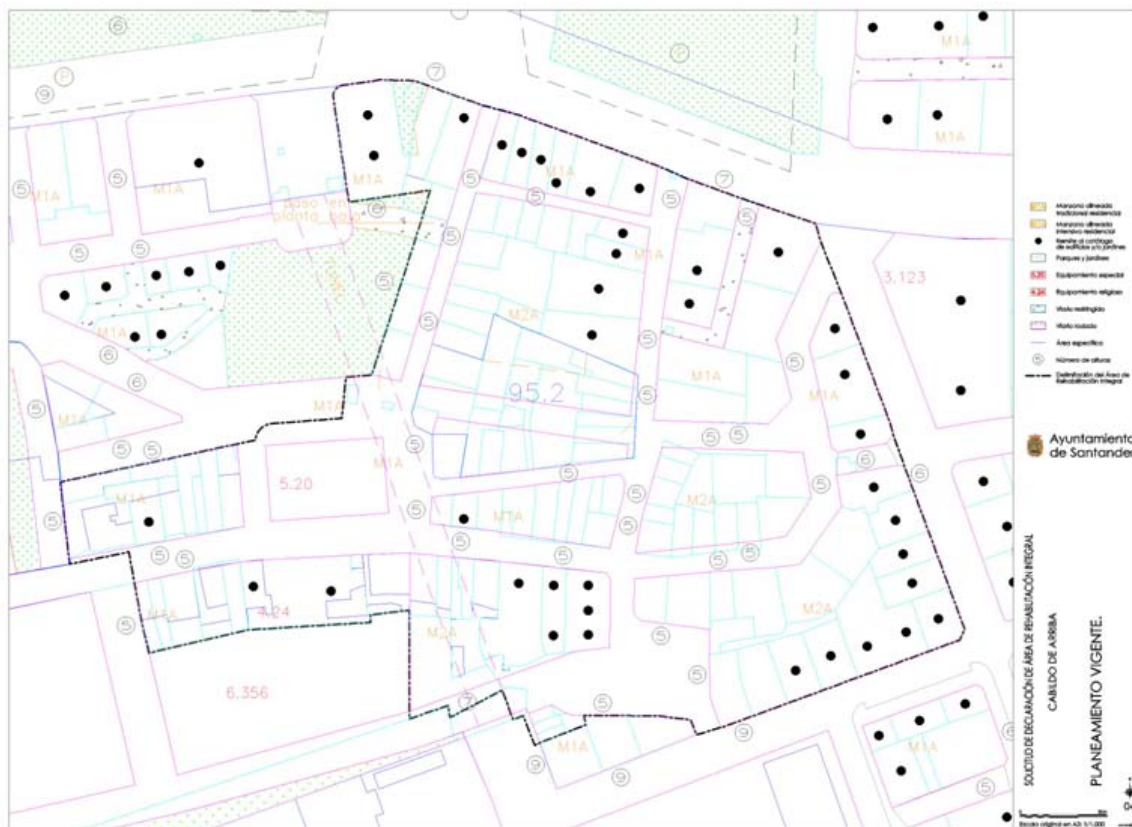


Figura 5: Fuente: APIA XXI (2006).

Por su parte, en la Revisión del Plan General de Ordenación Urbana, actualmente en proceso de tramitación, se contempla este ámbito como Plan Especial de Reforma Interior, proponiéndose la recuperación y revitalización de la zona en su conjunto. El Plan Especial



se justifica por la necesidad de resolver, además de la recuperación del patrimonio edificado y la reurbanización de las calles que constituyen el objeto de la rehabilitación, los problemas urbanos detectados en este área, relacionados con los conflictos de tráfico y falta de aparcamiento, la conformación del espacio público y su integración con el entorno, la carencia de equipamientos colectivos, y la oportunidad de reordenar determinados fragmentos urbanos vacíos o no suficientemente definidos y revitalizar el área mediante nuevos usos.

El desarrollo de todos estos instrumentos que determinan la política de la vivienda y la política urbanística, y su articulación y continuidad en los próximos años, serán claves en la recuperación integral del barrio y, por consiguiente, en la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- (1) APIA XXI (2006): Memoria-programa para la solicitud de declaración de “Área de Rehabilitación Integral” del Cabildo de Arriba. Ayuntamiento de Santander, Santander.
- (2) BUSQUETS, J. et al. (2002): La reconstrucción de los centros urbanos. La experiencia europea sobre la rehabilitación de la ciudad histórica. Colección EU especiales de urbanismo nº 2, Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas.
- (3) GARCÍA GARCÍA, M<sup>a</sup> J. (1999): El régimen jurídico de la rehabilitación urbana. Institució Alfons el Magnànim, Diputació de València. Valencia.
- (4) GONZÁLEZ-VARAS IBÁÑEZ, S. (1998): La rehabilitación urbanística. Editorial Aranzadi, Pamplona.
- (5) MOPU (1990): La política de rehabilitación urbana en España. Evolución, experiencias y efectos. Instituto del Territorio y Urbanismo, MOPU, Madrid.
- (6) MOPU-FEMP (1986): Planeamiento especial y rehabilitación urbana. Instituto del Territorio y Urbanismo (MOPU) y Federación Española de Municipios y Provincias, Madrid.
- (7) PORTO REY, E. (1988): “De la conservación individualizada del patrimonio inmobiliario a su rehabilitación integrada en el planeamiento urbano”, Revista de Derecho Urbanístico, nº 109, pp. 13-34.

## Metodología de los estudios histórico-artísticos en la restauración

Miguel Ángel Aramburu-Zabala<sup>1</sup> ([aramburm@unican.es](mailto:aramburm@unican.es))

<sup>1</sup> Universidad de Cantabria

### RESUMEN

Tradicionalmente los valores histórico-artísticos han tenido un papel relevante en la Restauración arquitectónica, frente a la Rehabilitación arquitectónica, centrada en el valor de uso. Pero en los últimos años, los valores histórico-artísticos han sido cuestionados por diversas disciplinas y teorías de la restauración. La crisis de la Historia del Arte ha producido sin embargo nuevas maneras de abordar la propia disciplina y en particular su papel en la restauración arquitectónica. Hoy la Historia del Arte propone no centrarse en las obras de arte sino en los valores artísticos, que emergen en confluencia con los valores procedentes de otras disciplinas, confluencia que crea valores culturales relevantes y que otorga nuevas perspectivas a la Restauración arquitectónica.

### 1.- Rehabilitación y restauración

Las palabras “rehabilitación” y “restauración” son con frecuencia confundidas y utilizadas indistintamente, aun cuando tienen significados diferentes. Mientras que “rehabilitación” alude en primer lugar a la intención de configurar el mantenimiento o el cambio de uso de un edificio o conjunto de edificios, o en general de un determinado espacio, “restauración” es un concepto en el que el fenómeno histórico-artístico adquiere un papel predominante. En la “rehabilitación” puede existir un valor histórico-artístico, pero éste se halla claramente subordinado al valor de uso. Compartimos las palabras de Ángel Luis Fernández Muñoz<sup>1</sup>, quien ha escrito que *“pese a sus azarosas vicisitudes y a sus discutidos contenidos, ‘restauración’ aparece aún como la mejor expresión de un modo de actuar sobre la arquitectura antigua que supera los frecuentes reduccionismos de la fraseología al uso en este tipo de intervenciones arquitectónicas. Términos como ‘rehabilitación’, ‘reestructuración’, ‘adaptación’, etc., tan sólo atienden a aspectos muy concretos de la arquitectura existente, lo ‘hábil’ o ‘útil’, la estructura formal o resistente, la incorporación de nuevas funciones, etc. Sin embargo, esta reducción, comúnmente aceptada por buena parte de quienes participan en intervenciones arquitectónicas sobre edificios antiguos, entra en contradicción con la esencia de la obra de arquitectura y del modo de abordar ésta a través del propio proyecto que, según la vieja afirmación vitruviana, nunca puede separar los aspectos más puramente técnicos o funcionales de los específicamente formales”*.

El concepto de “rehabilitación” se refiere fundamentalmente al uso del edificio. Y la teoría distingue dos acepciones distintas, siempre en relación al uso: La rehabilitación como recuperación o modificación de las condiciones que ha perdido o necesita incorporar un determinado espacio construido con el fin de mantener su uso; o bien la rehabilitación con el fin de modificar su uso<sup>2</sup>. La teoría y la práctica de la rehabilitación se han centrado en los aspectos sociales en relación con dicho uso, constituyendo la

---

<sup>1</sup> FERNÁNDEZ MUÑOZ, Ángel Luis: “El proyecto como condición de la restauración arquitectónica”, *Restauración arquitectónica*, (A.L. Fernández Muñoz, dir.), Valladolid, 1992, pp. 137-148.

<sup>2</sup> RUBIO DEL VAL, J. (coord.): *La política de rehabilitación urbana en España. Evolución, experiencias y efectos*. MOPU, Madrid, 1990.

intervención en el centro histórico de Bolonia en los años 60 y 70 del siglo XX el ejemplo paradigmático<sup>3</sup>, trasladado a las políticas de reforma urbana españolas a partir de decretos ministeriales de 1982 y 83. Pero el término “rehabilitación” ha resultado degradado por un uso abusivo por parte del sector político-administrativo y del sector privado de la construcción.

La distinción entre rehabilitación y restauración es importante para la intervención de la Historia del Arte, puesto que “*al final del proceso de reconocimiento se procederá a restaurar si el objeto es artístico o sólo se le aplicará una rehabilitación si, por el contrario, no lo es*”<sup>4</sup>.

## 2.- ¿Hay un papel para la Historia del Arte en la restauración arquitectónica?

En el momento actual la Historia del Arte se encuentra cuestionada como método válido para el análisis en las restauraciones arquitectónicas. En el contexto de estas Jornadas sobre restauración conviene señalar cómo desde la Historia del Arte se observa el proceso mediante el cual la Tecnología ha adquirido un papel predominante, que es juzgado como abusivo. A ello se añade la incorporación al análisis en la restauración de la “Arqueología de la Arquitectura”, que con su pretensión de objetividad se ha querido situar como un método más eficaz que el de la Historia del Arte. Todo ello confluye actualmente en el llamado método de la “conservación integral”, que desplaza completamente a la Historia del Arte, y frente a lo cual se alza el llamado método de la “restauración crítica”, que sí concede un papel destacado a esta disciplina.

### 2.1- “La Dictadura de la Tecnología”: Tecnología frente a crítica y criterio.

En la Antigüedad clásica, “ars” se identificaba con “techné”, ambos términos con el mismo significado de “creación”. ¿Cómo han podido llegar a oponerse? No es éste el lugar de explicar el largo camino de una divergencia, sólo el de constatar cómo los historiadores del arte observan la relación actualmente en el campo de la restauración arquitectónica. En este sentido, María José Martínez Justicia<sup>5</sup> escribe que “*la restauración, como profesión, no se puede entender hoy como una cuestión meramente técnica. Y a ello se tiende, por desgracia. Es tanta la confianza puesta en la tecnología y en la inapreciable aportación que las ciencias experimentales proporcionan a esta profesión, que a menudo se olvidan las cuestiones estéticas*”.

El historiador del arte Javier Rivera<sup>6</sup> ha señalado la “*tiranía del laboratorio*” y la “*dictadura de la tecnología*”. Este autor, catedrático de la Escuela de Arquitectura de Valladolid y hoy de Alcalá de Henares, especialista en la Historia de la Restauración, promotor y firmante de la “Carta de Cracovia”, ha escrito<sup>7</sup>: “*El avance de la ciencia en el ámbito de la investigación en el patrimonio... ..fueron introduciendo en España lo*

<sup>3</sup> CERVELLATI, Pier Luigi y SCANNAVINI, Roberto: *Bolonia. Política y metodología de la restauración de centros históricos*. Barcelona, 1976 (1ª ed. ital. 1973).

<sup>4</sup> JIMÉNEZ, Alfonso: “Enmiendas parciales a la teoría del *restauro* (II) Valor y valores”, *Loggia. Arquitectura & Restauración*, nº 5, primer cuatr. 1998, pp. 12-29.

<sup>5</sup> MARTÍNEZ JUSTICIA, María José: *Historia y teoría de la conservación y restauración artística*. Madrid, 2000. cit. 2ª ed., Madrid, 2002.

<sup>6</sup> RIVERA BLANCO, Javier: “La restauración monumental en España en el umbral del siglo XXI. Nuevas tendencias: de la Carta de Venecia a la Carta de Cracovia”, *I Bienal de la restauración monumental. L'Hospitalet de Llobregat (Barcelona), del 23 al 26 de junio del 2000. Quaderns científics i tècnics de restauració monumental*. Diputación de Barcelona, 2002, pp. 29-40.

<sup>7</sup> RIVERA BLANCO, Javier: “*De varia restauratione. Teoría e historia de la restauración arquitectónica*”. Valladolid, 2001.

que denominamos la dictadura de la tecnología sobre los criterios. En gran manera, tanto desde la administración central, como desde muchas regionales, se entendió en estos últimos años que era más importante conocer los estudios previos que concluir en la elaboración de unos criterios serios y rigurosos. La escasa formación de muchos de los arquitectos en todas estas áreas les hizo caer en manos de empresas especializadas o de laboratorios con tecnologías avanzadas, que eran quienes señalaban las teorías a aplicar, convirtiéndose no pocas veces los directivos facultativos en meros organizadores de la obra escapando de su competencia el diagnóstico y las soluciones a aplicar. Un problema gravísimo –a mi entender– actual en España, del que también peca la Comisión Europea en sus programas de investigación y apoyo económico a la ciencia, es el de haber sacralizado la Tecnología, en su ímpetu por hacer avanzar los programas científicos, de manera que hoy no se entiende una buena restauración si antes no se han gastado decenas de millares de pesetas en estudios de laboratorio y en la utilización de modernas máquinas de limpieza o análisis, de manera que el juicio, la elección crítica, hoy en España está determinada por la técnica y no por la reflexión, lo que augura grave futuro para nuestros edificios”. Así planteado, se trata de tecnología frente a crítica y criterio, los campos donde se mueven las disciplinas humanísticas. El enfrentamiento quizá no sea tan radical como se ha planteado, y la colaboración, en lugar de enfrentamiento, existe más de lo que pueda pensarse, pero son los términos del debate existente.

Es un debate que parece anacrónico, pues **Cesare Brandi**<sup>8</sup> ya había manifestado en 1963 que “la restauración constituye el momento metodológico del reconocimiento del monumento en su consistencia física y en su doble polaridad estética e histórica, con vistas a su transmisión al futuro” y recalca que “se restaura sólo la materia de la obra de arte”. La “**Carta del Restauo**” de 1972, redactada desde la teoría de la “**restauración crítica**”, insistía en que los proyectos de restauración arquitectónica incorporaran diversos puntos de vista ya en el estudio previo del edificio, incluyendo la recogida de datos históricos (mediante el análisis documental y bibliográfico, iconográfico, etc.), formales y perceptivos. **P. Sampaolesi** señalaba en 1977<sup>9</sup> la necesidad de estudios analíticos para la restauración, lo que incluía analizar los problemas históricos, artísticos, estructurales y de inserción en el entorno. Pero desde entonces la situación ha cambiado mucho, y el aspecto artístico y estético ha sido abiertamente cuestionado.

El predominio abusivo del factor científico-tecnológico prolonga la vigencia de la llamada “**restauración científica**”, la que defendían Camilo Boito y Gustavo Giovannoni, la que representaban los textos de las Cartas de Atenas (1931) y de Venecia (1964)<sup>10</sup>. La “**Carta de Venecia**”, de 1964, pedía la concurrencia de todas las ciencias y técnicas para la restauración de “*monumentos*”. Esto se ha trasladado en el momento actual a la llamada teoría de la “**conservación integral**”, que acusa a la Historia del Arte de establecer criterios subjetivos inaceptables. En palabras de Antón

---

<sup>8</sup> BRANDI, Cesare: *Teoría del Restauo*. Torino, 1963. Ed. esp. Madrid, 1988.

<sup>9</sup> SAMPAOLESI, P.: *Discorso sulla metodologia generale del restauro dei monumenti*. Firenze, 1977. Su teoría ha sido analizada por ESTEBAN CHAPAPRIA, Julián: “Estudios previos a la restauración de monumentos”, *Restauración arquitectónica*, Valladolid, 1992, pp. 159-176.

<sup>10</sup> Que se prolonga en la llamada teoría de la “*conservación integral*”, que reivindica sólo los valores materiales conservados a lo largo de la historia y rechaza los valores estéticos. Con ello se rechaza el subjetivismo del crítico (historiador del arte) y la presencia del “*canon estético*”. Forma parte en realidad de una tendencia a negar la existencia del Arte mismo, sustituyendo los conceptos a él aplicados por otros pretendidamente objetivos.

Capitel<sup>11</sup>, “frente al ‘restauo crítico’, la idea de conservación integral de la obra suspende todo juicio de valor que evite interpretaciones siempre discutibles, y propone considerar la historia de la arquitectura, no como ligada a los valores de la historia del arte, sino a los de la concreta especificidad y materialidad arquitectónica. El ‘restauo conservativo’, continuando la tradición italiana rigorista, vuelve a proponer los estudios científicos y de acción mínima como método único”.

En sintonía con el método de la “conservación integral”, la “Arqueología de la Arquitectura” ha querido suplantar a la Historia del Arte. La pretendida objetividad de los análisis arqueológicos (G. Ioppolo, 1971) ha contribuido en gran medida a relegar los aspectos crítico y estético de los criterios de restauración. Pero desde la Historia del Arte se llama la atención sobre excesos valorativos que se apoyan en una supuesta objetividad científica, de lo que es ejemplo la afirmación de Luis Caballero de que “la Arqueología de la Arquitectura, es exponencialmente más competente y riguroso que otros métodos utilizados antes para analizar la arquitectura histórica”<sup>12</sup>, lo que, naturalmente, es sólo una afirmación de parte. No se trata de trasladar a las humanidades al campo de la ciencias físico-químicas, donde siempre estará en inferioridad de condiciones, sino de que el papel de las humanidades sea relevante, en confluencia con dichas ciencias, para el fin común de la restauración.

La cuestión se refiere no sólo al análisis previo a la restauración, sino también al establecimiento de fines. La metodología aplicada a la restauración arquitectónica implica el establecimiento de objetivos, fines que se pretenden conseguir. Como lo ha expresado José Luis González Moreno-Navarro<sup>13</sup>, “para evitar la confusión entre fines y medios, el método ha de organizarse desde los objetivos a cumplir por el monumento restaurado y no desde los medios de los que ahora disponemos para desarrollar los análisis o ensayos”. Porque de la confusión entre fines y medios –en parte provocada por la llamada “dictadura” de la técnica- se deriva en muchas ocasiones que los edificios restaurados carecen de cualquier fin más allá de la restauración en sí misma. No se ha restaurado “para algo” (y los fines también pueden estar equivocados) sino que la restauración adquiere un valor propio que se agota en sí misma. Esto, llevado a cabo con un alarde técnico, satisface determinadas expectativas (políticas, económicas...) y recibe con frecuencia la alabanza del público, pero conduce a la restauración a un callejón sin salida que falsea la cultura. Pero si la restauración es “una operación cultural” (Maria Giuseppina Gimma), que pretende recuperar la historia y la estética, los medios no deben suplantar a los fines.

Sin embargo, nadie discute que la restauración es un trabajo interdisciplinar, donde confluyen las humanidades con las ciencias experimentales<sup>14</sup>. El problema está en la

---

<sup>11</sup> CAPITEL, Antón: *Metamorfosis de monumentos y teorías de la restauración*. Madrid, 1988. En esta propuesta se señala a Gianfranco SPAGNESI: *Storia e restauro dell'Architettura. Proposte di metodo*. Roma, 1984.

<sup>12</sup> CABALLERO, Luis: “Sobre historia y restauración del monumento (o de la diferencia entre San Juan de Baños y el Taj Mahall)”, *I Bienal de la restauración monumental. L'Hospitalet de Llobregat (Barcelona), del 23 al 26 de junio del 2000. Quaderns científics i tècnics de restauració monumental*. Diputación de Barcelona, 2002, pp. 41-51.

<sup>13</sup> GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, José Luis: “La comprensión de la realidad física del monumento. Una propuesta desde nuestra experiencia”, *IV Simposi sobre Restauració Monumental Restaurar o Conservar? Barcelona-Cardona, del 17 al 20 de novembre de 1993. Quaderns científics i tècnics 7*. Diputación de Barcelona, 1996, pp. 79-84.

<sup>14</sup> PHILIPPOT, Paul: “La restauration dans la perspective des sciences humaines”, *Pénétrer l'art. Restaurer l'oeuvre Une vision humaniste. Hommage en forme de florilège* (C. Périer, ed.), Bruselas, 1990, pp. 491-500.

dificultad de poner en términos adecuados las relaciones entre todas las disciplinas<sup>15</sup>. Y el problema está también en su asociación a unos fines. Es decir, hay que “*contar con equipos multidisciplinares integrados por técnicos competentes –arquitectos, historiadores, arqueólogos, restauradores, agrónomos, biólogos, paisajistas, químicos, etc.- y con un claro sentido crítico. Ellos serán los encargados de identificar el objeto, su contexto –histórico, cultural y físico- el sistema de valores que lleva asociado y que justifica su conservación. Por último asesorarán en la toma de decisiones que garanticen la conservación del bien con el mayor grado de integridad y autenticidad posible*”<sup>16</sup>.

Mientras las disciplinas científicas se ocupan sobre todo del análisis de materiales y de las técnicas antiguas y del modo en que han llegado hasta nosotros y podemos transmitirlo al futuro; el historiador del arte, ¿de qué se ocupa? Su papel, como hemos señalado, vendría negado incluso por algunas teorías, como la de la “conservación integral”; y disciplinas como la “arqueología de la arquitectura” se declaran superiores en sus resultados analíticos. Algunos sólo conceden la actuación en la historia de la restauración, es decir la documentación de las intervenciones históricas, y más allá, en la historiografía de la restauración. Se mantendría la “Historia” pero no el “Arte”.

Pero no todos los estudios de “Arte” aplicados a la restauración arquitectónica son escritos por historiadores del arte. La moderna Historia del Arte tiene muy en cuenta al autor que escribe dicha historia, como más adelante detallaremos. Por tanto estamos obligados a preguntarnos primero por una cuestión sociológica. ¿Quién escribe los textos de Historia del Arte aplicados a la restauración arquitectónica? Probablemente la mayoría se debe a arquitectos y esto obliga a plantear el papel de los arquitectos como historiadores de la arquitectura. Ha habido insignes arquitectos-historiadores, pero, como ha señalado Juan Luis Barón Cano<sup>17</sup>, “*tenemos que distinguir a los historiadores de los ‘arquitectores’ y los eruditos de la fotocopiadora, aficionados o no al tema, que pasan por este aparato las siete u ocho publicaciones típicas del ramo como única fuente documental de la obra*”. Los Informes Previos y Memorias para las restauraciones que guardan los archivos del Ministerio de Cultura son en su inmensa mayoría informes “*pasados por la fotocopiadora*”, tal y como pude comprobar cuando me correspondió específicamente examinarlos durante mi breve estancia laboral en dicho ministerio y como he podido comprobar después en otros ámbitos. Eduard Ripoll i Perelló<sup>18</sup> ha llegado a señalar que los “*arquitectos restauradores, como miembros del muy amplio gremio de los historiadores, piden la confianza de la sociedad y ésta se la concede porque presupone en ellos un buen conocimiento de los documentos, o sea de la historia*”. Lo que resulta, más que una confianza otorgada, una atribución autoconcedida. En todo ello hay ciertamente la defensa de intereses gremiales, pero esto

---

<sup>15</sup> IANNUCCI, Anna Maria: “Il laboratorio di restauro della Soprintendenza per i Beni ambientali e architettonici di Ravenna”, *Wiligelmo e Lanfranco nell’Europa romanica*, Módena, 1989, pp. 197-200.

<sup>16</sup> DÍEZ, Mercedes: “Renovación y adaptación de la arquitectura y su entorno”, *Desarrollo sostenible y patrimonio histórico y natural. Una nueva mirada hacia la renovación del pasado*, (C. Gutiérrez-Cortines, ed.), Santander, 2002, vol. II, pp. 199-258.

<sup>17</sup> BARÓN CANO, Juan Luis: “En busca de la ‘teoría’ perdida. Algunas reflexiones sobre el momento actual de la teoría del restauro”, *IV Simposi sobre Restauració Monumental Restaurar o Conservar? Barcelona-Cardona, del 17 al 20 de novembre de 1993. Quaderns científics i tècnics 7*. Diputación de Barcelona, 1996, pp. 171-175.

<sup>18</sup> RIPOLL Y PERELLÓ, Eduard: “En la perspectiva del tiempo: Una reflexión sobre la restauración y la conservación”, *IV Simposi sobre Restauració Monumental Restaurar o Conservar? Barcelona-Cardona, del 17 al 20 de novembre de 1993. Quaderns científics i tècnics 7*. Diputación de Barcelona, 1996, pp. 23-33.

no es necesariamente perjudicial si los intereses se equilibran y corrigen adaptándose a las necesidades de la restauración.

## 2.2- El punto de vista de la Historia del Arte.

- **Decadencia y crisis de la Historia del Arte.**

La pérdida del papel relativo experimentado por la Historia del Arte en el ámbito de la restauración arquitectónica en los últimos años está en consonancia con la pérdida de relevancia social de la propia Historia del Arte en el conjunto de las humanidades, por más que la apariencia muestre un brillo deslumbrador (nuevos museos, grandes exposiciones, etc.). La contribución de la Historia del Arte a la cultura actual ha sido considerada como “*ociosa*”, escasamente relevante.

En 1987 Donald B. Kuspit escribió: “*Art history is in crisis*”<sup>19</sup>. Se constataba así el final de un período para la Historia del Arte en el que la disciplina había perdido gran parte de la influencia cultural que había tenido tiempo atrás. Esta decadencia de la disciplina ya había sido constatada poco antes por **Norman Bryson**, Director de “English Studies” en el King’s College de la Universidad de Cambridge, quien publicó en 1983 *Vision and Painting: The Logic of the Gaze*. (New Haven, 1983). Allí achacaba a la propia sociología de la profesión de historiador del arte una inercia y un conservadurismo que habían conducido a la Historia del Arte a la cola de las disciplinas humanísticas, sin influencia real en el conjunto cultural. Más en concreto culpaba a los “conservadores” de los museos de arte, que habían centrado la disciplina en la administración y preparación de los catálogos para exposiciones, catálogos inevitablemente filológicos y analíticos, en definitiva con una metodología muy conservadora. Las instituciones dedicadas al estudio del arte han hecho una historia que ha tendido a aislarla de las otras disciplinas humanísticas, y es sabido que la Historia del Arte funciona desde hace tiempo de manera institucionalizada<sup>20</sup>. Son las instituciones encargadas del Arte y de la Historia del Arte las que marcan las directrices de la disciplina, y lo han hecho con la tendencia a aislarla de las demás disciplinas humanísticas y desde luego de las restantes disciplinas científico-técnicas, justamente lo contrario de lo que es preciso en la restauración arquitectónica.

- **Nuevos caminos para la Historia del Arte.**

A partir de la constatación de la crisis en Historia del Arte, ha comenzado a surgir una disciplina más variada y compleja y menos dogmática, en donde, como en otras materias, convive una “*corriente central*”, volcada al interior de la propia historia del arte y unas “*corrientes externas*” que se conectan con otras realidades. Estas “*corrientes externas*”<sup>21</sup> son más arriesgadas y menos reconocidas institucionalmente (cuando no abiertamente contestadas), pero enriquecen a la Historia del Arte con las aportaciones exteriores, a la vez que alimentan a otras disciplinas. El resultado es que estas corrientes externas ensanchan la Historia del Arte y hacen visible la materia para un más amplio público tanto en el mundo intelectual como entre el público en general.

---

<sup>19</sup> “Conflicting Logics: Twentieth Century Studies at the Crossroads”, *The Art Bulletin*, LXIX, nº 1, marzo 1987, pp. 117-132.

<sup>20</sup> JIMÉNEZ, José: *Teoría del arte*. Madrid, 2002.

<sup>21</sup> Sobre los historiadores del arte críticos véase Michael PORRO: *The Critical Historians of Art*. Yale University Press, 1984.

La nueva relación entre la Historia del Arte y otras disciplinas se ha visto facilitada por la inserción de teorías como la **semiótica** y el **deconstructivismo**, que llegan a considerar a la Historia del Arte como una actividad no científica en sentido riguroso, llegando a depender en grado extremo del punto de vista adoptado, es decir, del historiador del arte y del público y no tanto de la obra de arte, que queda “*desacralizada*”. La realidad tal cual de la obra de arte, en sus valores históricos y artísticos, carece de valor si se considera aisladamente, y sólo su inserción en un debate humanístico le otorga relevancia. El autor no escribe “*objetivamente*” historia del arte. Es necesario tener en cuenta al autor, al humanista, que está detrás de lo que se dice respecto a la obra de arte. El proceso es así un diálogo entre autores, y entre autores y público y no sólo un diálogo entre el autor y la obra de arte. Este proceso concede al **escrito de arte**, a lo que se dice sobre el arte, un valor que antes se negaba, pues se transfería todo el valor a la obra del arte y al artista.

Pero todavía hoy, debido a la inercia de las instituciones, la obra de arte y los artistas resultan “*sacralizados*”, “*trascendentalizados*”, “*fetichizados*”. A través de un lenguaje filosófico (o pseudofilosófico) se ha convertido a los artistas en filósofos y a las obras de arte en joyas preciosas y “*sagradas*”<sup>22</sup>.

Mientras la corriente principal de la investigación histórico-artística ha estado basada en la percepción de las cualidades estéticas y el análisis formal, se distinguía en el arte a lo largo de la historia unos centros creadores y una inmensa periferia artística. Tradicionalmente la calidad de los investigadores se vinculaba a la calidad del arte estudiado, de modo que los mejores historiadores del arte no estudiaban el arte periférico, reproduciéndose el error de la identificación entre el historiador y la materia de la que se ocupa. Como si para ser moderno hubiera que ocuparse necesariamente del arte contemporáneo o estudiar el arte clásico implicara ineludiblemente un punto de vista clásico o cuando menos una actitud clásica. Los estudios de algunas periferias artísticas (las del arte norteamericano o las de la arquitectura inglesa) por relevantes historiadores (Saxl, Wittkower, Pevsner, Oscar Hagen, William Sawitsky, etc.) vinieron a desmontar esta falacia. De este modo, la consideración de un menor nivel estético del arte periférico permitió interesarse por otras aproximaciones al fenómeno artístico que ya no se interesaban por juzgar las obras en función de un “*canon artístico*” elitista consagrado por las instituciones de la Historia del Arte<sup>23</sup> y abrió el camino a la incorporación del estructuralismo, la semiótica o la teoría marxista al tiempo que se diluían los límites entre las humanidades y las ciencias sociales. La Historia del Arte incorporó entonces crecientemente como objetos dignos de estudio a otras artes diferentes a las tradicionales “*Bellas Artes*” y de regiones geográficas o culturales distintas a las tradicionalmente marcadas como la élite o la vanguardia.

Este cambio se resume en el paso de la “*Art History*” a una “*History of Art*”<sup>24</sup>. En “*Art History*” el asunto es el arte y el estudio se refiere a los modelos (estilísticos, iconográficos, técnicos) que han formado su desarrollo. Su cometido fundamental ha

---

<sup>22</sup> Murray Krieger (“The Precious Object: Fetish as Aesthetic”, *Arts on Level, The Fall of the Elite Object*. Knoxville, 1981) describe la idea de la estética preciosista de la obra de arte que ha llevado a los museos a la “fetichización” o “sacralización” de la obra de arte, es decir, su “trascendentalización”.

<sup>23</sup> La Historia del Arte como consagradora de un canon artístico que asigna la importancia concedida a cada artista, obra y período, es analizada y criticada por Keith MOXEY: *Teoría, práctica y persuasión. Estudios sobre historia del arte*. Barcelona, 2004, especialmente el cap. VI. 1ª ed.: *The Practice of Theory*, Cornell University, 1994; y *The Practice of Persuasion*, Cornell University, 2001.

<sup>24</sup> Jules David Prown: “Editor’s Statement: Art History vs. the History of Art”, *Art Journal*, 1984, vol. 44, nº 4, pp. 313-314.



sido taxonómico para llegar a conclusiones de autoría, cronología, estilo nacional e individual, y autenticidad. Ahora, en “History of Art” el arte es concebido tanto como un medio como un fin. El objeto es la historia, especialmente la historia social y cultural. Las obras de arte son evidencias tangibles para la comprensión de los individuos y de las sociedades. Las obras de arte son acontecimientos históricos que han sobrevivido. En ellos el pasado existe en el presente; cada vez que su evidencia auténtica es reexaminada, la historia puede ser vuelta a experimentar. “History of Art” implica un cambio de enfoque respecto “Art History”. Pero esto no disminuye el valor del arte como tal arte, simplemente amplía su potencial.

**La moderna historia del arte ha fragmentado** su propio saber. Un historiador del arte como **Hubert Damisch**<sup>25</sup> escribe que sólo se puede escribir historia del arte con la condición de admitir que esta historia es plural y se deja aprehender mediante obras, textos, discursos y experiencias muy variadas, que no obedecen necesariamente a un análisis seguido, o a una narración continuada que cree una visión coherente de conjunto, sino que más bien estudian sectorialmente episodios relevantes o aspectos concretos del problema, con una diversidad de enfoques que superan la parcelización de los saberes. Un problema de la historia del arte puede recibir varias lecturas e interpretaciones radicalmente diversas según el punto de vista adoptado, según la pregunta que se haga al problema. El resultado será **no una “historia” sino un conjunto de “historias” que analicen el problema o la obra de arte objeto de estudio**, que no declaren simplemente lo que ocurrió históricamente sino que nos lo hagan comprender mejor.

No se trata de un eclecticismo, de adoptar cualquier teoría fragmentariamente en función de las necesidades del historiador del arte, sometiendo a la obra a diversos puntos de vista, pues la suma de todas las perspectivas histórico-artísticas nos darían un conjunto totalmente incoherente y contradictorio. No vale sumar acríticamente todos los puntos de vista o unos cuantos a la carta. Hay nuevos planteamientos que intentan encontrar la coherencia a partir de los análisis sectoriales, encontrando **categorías comunes** entre los diversos análisis sectoriales: Así ocurre con Baxandall en sus análisis de escultura del renacimiento nórdico; con Radding y Clark respecto a la relación entre arquitectura y enseñanza en la Edad Media; o con los recientes estudios de la relación entre Retórica y Arquitectura en el Renacimiento; o, con una visión más general, los estudios de Eugenio Garin sobre el Renacimiento, donde éste aparece como el entrecruzarse de historias muy diversas que forman una red nada lineal. Similar es el procedimiento de Michael Baxandall<sup>26</sup> en su estudio de la escultura del Renacimiento alemán, analizado en la edición italiana de 1989 por Enrico Castelnuovo, quien escribe que la tarea de Baxandall consiste en restituir los criterios de percepción, las atenciones, las demandas del público, de los comitentes, de los artistas... De reencontrar las categorías culturales de las cuales había hecho uso, de manifestar los modos con que se miraba a una estatua y a un altar, en una palabra, de restituir el ojo del espectador... una reflexión, atenta a cada indicio, de los testimonios de la época, pero de los más diversos testimonios, referentes a los más variados campos, escogidos por ser reveladores de ciertas preferencias, de ciertos procesos mentales, del uso, en aquel preciso momento, de ciertas categorías. Los conceptos de la geometría, de la música o de la caligrafía de una época señalan categorías que son válidas para la percepción de la escultura en la misma época. Una lectura que abraza y atraviesa una serie de **conocimientos sectoriales** (ciudad, grupos sociales, organizaciones corporativas,

<sup>25</sup> *L'origine de la perspective*, 1987. Trad.: *El origen de la perspectiva*. Madrid, 1987.

<sup>26</sup> Michael Baxandall: *The limewood Sculptors of Renaissance Germany*. Yale University, Londres, 1980.

gestión patrimonial del poder, escuelas comerciales, vestidos, adornos, tendencias y sentimientos religiosos, sensibilidad y experiencias ópticas, preferencias estéticas, materiales escultóricos, etc.), los cuales, sin subordinaciones, reaccionan y repercuten unos sobre otros. Esta ausencia de subordinación se manifiesta explícitamente y se huye del determinismo de una historia social del arte que poco tiempo antes (en 1953) era objeto de crítica por Ernst Gombrich. Sobre las relaciones entre el arte y la sociedad Gombrich (cuya deuda reconoce Baxandall) escribió *La historia del arte y las ciencias sociales*, donde manifiesta un cierto escepticismo: “Yo mismo daría gustoso enteros volúmenes de crítica de arte a cambio del siguiente fragmento de la hermosa conferencia de R.H. Tawney (1949), *Social History and Literature*: ‘La verdad es que, prescindiendo de algunos lugares comunes, actualmente no sabemos casi nada de las relaciones, admitido que existan, entre los resultados artísticos de una época y el carácter de su vida económica, y la única cosa honesta que se puede hacer es confesar nuestra ignorancia’. Me permito todavía añadir que es propiamente en este punto donde el historiador del arte puede descubrir dónde insertar su contribución. Tawney hubiera estado contento de ver alzarse un puente entre los hechos de la vida económica en una rivera del golfo y los hechos artísticos de una época en la otra. ¿Quién no querría unirse a él en esta empresa? Pero ciertamente un tal puente no podrá nunca llegar a ser una realidad antes de que uno u otro de nosotros haya decidido en qué punto de la orilla se pueden colocar los cimientos con mayor ventaja”. No se trata de adjuntar hechos socioeconómicos a hechos histórico-artísticos, sino de introducirse en el modo de razonar propio de cada disciplina. El arte refleja las condiciones mismas de su producción. Y el significado se encuentra tanto en el modo en que las circunstancias le han planteado el problema como en el modo en que el artista lo ha resuelto.

No todas las áreas de estudio de la Historia del Arte han aceptado al mismo tiempo los cambios teóricos introducidos, y así, por ejemplo, el estudio de la escultura se ha revelado (Baxandall aparte) como un campo sorprendentemente conservador, como ha puesto de manifiesto Tom Flynn<sup>27</sup>: “*Así como las historias de la pintura y la fotografía han presenciado la afortunada introducción de teorías y metodologías nuevas y radicales que suscitan cuestiones de raza, sexo y realidades económicas de las relaciones sociales, la historia de la escultura ha ido más despacio a la hora de plantear estas tendencias y, como consecuencia de ello, se la ha considerado como una forma artística esencialmente conservadora, lo que resulta aún más sorprendente si consideramos que la principal preocupación de la escultura ha sido siempre la representación del cuerpo humano, campo de batalla de cuestiones relacionadas con la religión, la raza, el sexo y las clases sociales a lo largo de la historia. Sin embargo, últimamente, y gracias a las investigaciones renovadoras llevadas a cabo en el campo de la historia del arte y las ciencias sociales, el cuerpo ha sido objeto de un planteamiento más definido como instrumento teórico de cuestionamiento de las estructuras de poder, la ideología y las identidades*”. En las esculturas quedan reflejadas categorías históricas y culturales cambiantes, con tensiones sociales, políticas y económicas. La historia de las representaciones tridimensionales forman parte, por tanto, de historias más amplias de la existencia humana.

### **El debate en la Historia de la Arquitectura.**

---

<sup>27</sup> Tom FLYNN: *The Body in sculpture*. 1998. Ed. Española: *El cuerpo en la escultura*. Madrid, 2002.

En cuanto a la arquitectura, ha sido necesario liberarse de la “dictadura” interpretativa fraguada en el seno del Movimiento Moderno<sup>28</sup>. Los historiadores que sentaron las bases de interpretación coherente de la historia de la arquitectura hasta tiempos muy recientes (y que con demasiada frecuencia pervive) fueron en gran parte arquitectos que no hacían sino justificar su propia arquitectura. El precedente más claro de este modo de proceder es, claro está, Giorgio Vasari, que estableció un “*canon artístico*” que en el fondo justificaba su propio arte. Con el Movimiento Moderno, la teoría se convirtió en propaganda y la historia de la arquitectura en una selección de hechos históricos que cuadraban con sus conveniencias contemporáneas. De ahí surgieron los textos de Walter Gropius, Adolf Behne, Gustav Adolf Platz, Bruno Taut, Walter Curt Behrendt, Jürgen Joedicke, Vicent Scully, Pierre Francastel. Leonardo Benévolo, Peter Collins, Sigfried Giedion, E. Kaufmann, Manfredo Tafuri o Bruno Zevi. Baste pensar en la enorme influencia de este último y su concepción espacial de la arquitectura. La ruptura se produjo con autores como Pevsner, Richards, Tournikiotis, Bryson, y los historiadores del postmodernismo como Brian Wallis, Charles Newman, Jean-François Lyotard, Frederic Jameson y Harvey West .

La tradición historiográfica de los siglos XIX y XX (basada en métodos biográficos, estilísticos, formalistas, de la historia social -incluyendo el marxismo-, de la psicología de la percepción, de la Historia del Espíritu y de la Cultura, etc.), dio paso, tras las rupturas de los años 70 y 80 del siglo XX a la Historia radical, al Estructuralismo, la Semiótica, y los análisis postmodernos. Los nuevos caminos en investigación de arquitectura apuestan por la mezcla de diversas líneas de investigación y su mestizaje; por la ruptura de los bordes histórico-artísticos (por ejemplo, la Historia de la Ciencia y de la Técnica y la Historia de la Construcción); por la convivencia fecunda con otros métodos (por ejemplo “La arqueología del monumento”, la “Historia de las mentalidades”, etc.); por la relación con otras disciplinas humanísticas (como la inserción de la arquitectura en el marco legal, en convivencia con la Historia del Derecho); por sacar la arquitectura del campo de los creadores y vincularla al uso y experiencia de la arquitectura, analizando por ejemplo el Espacio público (v. gr. la liturgia en las arquitecturas religiosas; el funcionamiento de las vías públicas...) y el Espacio privado (la vida individual y familiar a través de la distribución de las viviendas); por integrar las otras artes en la arquitectura (pintura, escultura, etc.) y estudiar su relación dialéctica (por ejemplo, la polémica entre las artes); por la relación entre teoría y práctica (con el estudio de los Tratados de arquitectura, Bibliotecas de arquitectos, etc., y su relación con la práctica de la construcción); por la arquitectura y la organización del territorio y la ecología; por su inserción en la categoría más amplia de lo construido (Arquitectura, ingeniería y otras ocupaciones del espacio); por la valoración de las antes consideradas centro y periferias (la arquitectura popular; las arquitecturas regionales y nacionales. La globalización frente al nacionalismo); etc. De muchas de estas variantes, surge la inserción de la Historia del Arte en la Cultura y en otras manifestaciones de la realidad contemporánea (como la crítica ecológica o social, la defensa de las culturas amenazadas, etc.). Y precisamente, la Restauración arquitectónica es para la Historia del Arte un campo privilegiado de inserción en la realidad contemporánea.

---

<sup>28</sup> Panayotis TOURNIKIOTIS: *La historiografía de la arquitectura moderna*. Madrid, 2001. 1ª ed.: *The historiography of modern architecture*. M.I.T., 1999. Véase el Prólogo de Emilia Hernández Pezzi a la edición española.

### **3.- Nuevas perspectivas para la Historia del Arte en la Restauración arquitectónica.**

La restauración arquitectónica lejos de ser “objetiva” es siempre de autor (o autores), como demuestra la historia de la restauración, y eso incluye a la ciencia y técnica aplicadas a la restauración a lo largo de la historia. Del mismo modo, el trabajo del historiador del arte en la restauración es también de autor. Un historiador del arte formalista contribuirá (o empujará hacia) a una restauración formalista; o un historiador del arte marxista contribuirá a una restauración de alto contenido social. No es lo mismo un tipo u otro de historiador del arte, y, por su formación, incluso puede ser irrelevante para la restauración. La restauración por otra parte retroalimenta al análisis historiográfico. En palabras de Eduard Ripoll i Perelló<sup>29</sup>, “*el concepto de conservar y restaurar es en sí mismo y en sus resultados una operación historiográfica más entre las que se usan al servicio de la restitución del pasado... Lo que se hace al restaurar y conservar el patrimonio arquitectónico es manipular un testimonio material para transformarlo en historia*”. Según este autor, la restauración se convierte en un trabajo historiográfico, como si el edificio fuera un texto leído en el momento de la restauración.

A la subjetividad del historiador no sólo se le debe exigir que utilice un método con rigor, y honestidad en su aplicación, sino que el método sea adecuado a la finalidad perseguida. En definitiva, la Restauración es un momento del debate cultural humanístico, científico y tecnológico, y es también un debate social.

Un papel tradicionalmente otorgado al historiador del arte es de la evaluación de la relevancia o irrelevancia artística, en la medida que la función de designar a un objeto como obra de arte ha sido concedida a esta profesión. En definitiva es el historiador del arte el que “designa” a un objeto como artístico. Un objeto puede ser designado como artístico por cualquier persona, pero para que esa designación alcance un reconocimiento social, más o menos universal, se delega dicha designación en personas e instituciones que, se supone, tienen conocimientos en la materia, de ahí que en la práctica sea el historiador del arte –generalmente vinculado a alguna institución- quien designa que se trata de un objeto artístico, con la carga cultural que ello conlleva. En este sentido, la restauración es un momento significativo en el proceso llamado de “*canonización artística*”, es decir de reevaluación de lo que es artísticamente relevante y lo que no lo es, o lo es en menor medida, de reevaluación de lo que es arte y lo que no. Este momento es importante porque de la evaluación que se haga dependerá el tipo de restauración que se efectúe, valorando determinados aspectos o relegándoles al olvido, lo que puede ocasionar incluso su destrucción material o su cambio de ubicación. Por ejemplo, si no se considera muy relevante el barroco, porque el canon artístico de ese momento así lo valora, se tenderá a eliminar los añadidos barrocos en edificios góticos, tal y como se hacía en restauraciones del siglo XIX y todavía hoy –increíblemente- en algunos casos. Si en lugar de proceder a este tipo de “*canonización*”, lo que hacía la tradicional Historia del Arte, se procede a establecer la relación entre, por ejemplo, la iglesia y los cambios litúrgicos; o entre los grupos sociales y su ubicación en la iglesia, eso nos obliga a valorar todos los elementos al margen de la tradicional “*canonización*” artística, que discrimina algunos elementos como más relevantes y margina a otros.

---

<sup>29</sup> RIPOLL Y PERELLÓ, Eduard: “En la perspectiva del tiempo: Una reflexión sobre la restauración y la conservación”, *IV Simposi sobre Restauració Monumental Restaurar o Conservar? Barcelona-Cardona, del 17 al 20 de novembre de 1993. Quaderns científics i tècnics 7*. Diputación de Barcelona, 1996, pp. 23-33.

Pero la nueva Historia del Arte no se centra en las obras de arte, en los objetos artísticos, sino que extrae de ellos “*valores artísticos*” que confronta con los valores procedentes de otras realidades (valores funcionales, tecnológicos, económicos, sociales, etc.). **No importa tanto los objetos artísticos como los valores artísticos; y no hay valores artísticos aislados de los valores de otras disciplinas.** La conexión entre “valores” de distintas disciplinas resulta decisiva para su relevancia cultural.

Los valores artísticos “designados” no pueden comprenderse aislados, sino indisolublemente unidos a los demás valores presentes en la arquitectura. Por ejemplo, si se opera manteniendo los viejos esquemas de la consideración espacial de la arquitectura al modo de Bruno Zevi, considerando los edificios en el vacío –sin su relación con la época o con la sociedad- esto puede llevar a “limpiar” los espacios interiores, a crear espacios diáfanos, “puros”, en edificios que a lo largo de su historia se han mostrado compartimentados, laberínticos, “defectuosos”, quizá inacabados, parcheados..., mostrando la pátina de la historia a veces con un enorme espesor. Los valores formales del espacio arquitectónico sólo pueden comprenderse en su contexto histórico o en sus valores funcionales, tecnológicos, etc. De lo que se trata es de reunir **en una red no lineal diversos saberes sobre la arquitectura para explicar un problema.**

Por ejemplo, la **Historia de la Construcción** reúne “*la comprensión de la realidad física del monumento*”<sup>30</sup>, y el proceso social, mental y físico que ha conducido a dicha realidad, teniendo en cuenta que “*la cultura constructiva actual difícilmente es útil para la comprensión de los monumentos que habitualmente restauramos*”, por lo que hay que recuperar la historia, es decir, los sistemas constructivos del pasado, incluyendo modos de organización del trabajo, pautas de razonamiento constructivo, técnicas artesanales, etc., en definitiva una cultura, todo lo cual hace relevante el papel del historiador, como ha señalado **José Luis González Moreno-Navarro**. Otros historiadores, como **Giorgio Croci**, han señalado que el análisis estructural no se debe basar sólo en observaciones científico-matemáticas, sino que las observaciones históricas proporcionan abundante material sobre la estructura real de los edificios, porque éstos han sido observados históricamente en el pasado con diversos criterios, incluyendo los criterios con los que fueron construidos. El historiador del arte también debe poner de manifiesto la “unicidad” de cada obra de arte (el carácter de “unicidad” es esencial para los objetos artísticos) y por tanto contribuir a que la restauración se adapte a cada edificio, con su singularidad, sin pretender que sistemas generales de restauración se apliquen sin más a las obras de arte, sin previamente haber comprendido su especificidad (pues una Catedral por ejemplo, es diferente a la idea de Catedral, y hoy se prefiere hablar de “*las catedrales góticas*” antes que de “*la catedral gótica*” en sentido genérico).

En resumen, lo que importa a la moderna Historia del Arte como disciplina son los valores artísticos, y éstos se hallan indisolublemente unidos a los demás valores presentes en la arquitectura (históricos, tecnológicos, de uso, etc.) y el historiador del arte sólo puede explicar aquéllos en relación con éstos. No hay valores artísticos construidos en el vacío.

---

<sup>30</sup> GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, José Luis: “La comprensión de la realidad física del monumento. Una propuesta desde nuestra experiencia”, *IV Simposi sobre Restauració Monumental Restaurar o Conservar? Barcelona-Cardona, del 17 al 20 de novembre de 1993. Quaderns científics i tècnics* 7. Diputació de Barcelona, 1996, pp. 79-84.

Un historiador del arte que incorpora las nuevas maneras de entender su disciplina está preparado para enfrentarse a la llamada “*restauración crítica*”, aquella que es capaz de incrementar el valor estético de las obras de arte a la vez que de repensar la historia. María José Martínez Justicia (ob. cit., p. 19) ha señalado que hoy “*la restauración no es sólo y exclusivamente una cuestión técnica, sino también (y en un grado muy importante) una acción crítica para la que únicamente capacita una formación mucho más amplia de carácter cultural en sentido amplio y, en concreto, histórico-artística*”.

## LA PLATAFORMA UVACAD EN TAREAS DE DOCUMENTACION Y VISUALIZACION DEL PATRIMONIO

*Jesús I. San José Alonso\**, *Juan José Fernández Martín\**, *José Martínez\**,  
*Juan Diego Pérez-Moneo\** y *Javier Finat\*\**

*\*Lab. Fotogrametría Arquitectónica, ETS Arquitectura, Univ. Valladolid, 47014 Valladolid,*

*\*\*Grupo MoBiVA, Lab 2.2, Univ. de Valladolid, 47011 Valladolid, España*

*juanjo@ega.uva.es, lfa@ega.uva.es, jmrubio@ega.uva.es, juandi@ega.uva.es,*  
*jfinat@agt.uva.es*

### Resumen

La Rehabilitación y Gestión Integral del Patrimonio Construido requiere integrar herramientas de Documentación, Análisis y Visualización centradas en el objeto. Las diferentes estrategias existentes para cada una de estas disciplinas dificulta la fusión y la gestión unificada de las diferentes herramientas disponibles. La consecución de estos objetivos requiere una aproximación multidisciplinar capaz de integrar las herramientas en una plataforma software que pueda satisfacer los requerimientos relativos a la información, la consulta, la evaluación y la simulación de las intervenciones propuestas. La plataforma software Utilidad de Visualización Avanzada Con Asistencia al Diseño (UVACAD) proporciona un marco para la fusión de información 2D y 3D procedente de sensores de imagen y de rango sobre un soporte común 3D. Esta plataforma tiene un carácter modular y una arquitectura abierta, es escalable y es reutilizable en relación con diferentes sistemas de Información que han sido adaptados para intervenciones de Rehabilitación. En este trabajo, se muestran los fundamentos, la metodología y algunas de las aplicaciones recientes más relevantes en las que se ha aplicado la plataforma UVACAD.

### 1. Introducción

En esta sección se plantean algunas de las cuestiones fundamentales en relación con las estrategias adoptadas por el Grupo LFA-DAVAP de la Universidad de Valladolid para la Documentación del Patrimonio en relación con diferentes herramientas de Expresión Gráfica y para su Visualización orientada hacia la navegación y consulta interactiva en dominios con soporte 2D y 3D.

#### Fusión de Información de Imagen y Rango

El creciente volumen de información a gestionar en Arquitectura e Ingeniería y los requerimientos crecientes de precisión, captura de detalles, foto-realismo y bajo coste han ido acompañados de un desarrollo paralelo de herramientas de Tecnologías de la Sociedad de la Información (IST). Así, la incorporación de la fotografía digital, del software tipo CAD y de las herramientas de visualización asociadas proporcionaron a principios de los noventa una renovación de la metodología métrica tradicional, al tiempo que planteaban la necesidad de mejoras sustanciales en la capacidad de visualización de las herramientas iniciales de CAD. En los últimos diez años la integración de herramientas procedentes de otros métodos más flexibles procedentes de Estructuras de Datos, Informática Gráfica y Visión Computacional han permitido

simplificar y abaratar los costes asociados a procesos de captura, inserción y gestión de datos (incluyendo metadatos) en Sistemas de Información del Patrimonio, agrupamiento semi-automático, simplificación y renderización de la información 3D obtenida. La visualización científica proporciona herramientas flexibles para navegación, consulta y simulación de soluciones relativas a la información volumétrica y la evaluación métrica de objetos tridimensionales. La fusión de herramientas con soporte 2D y 3D se ha aplicado a la documentación y visualización de posibles intervenciones a realizar en Áreas de Rehabilitación Integral (Fig.1) y Planes Directores (Fig.2).

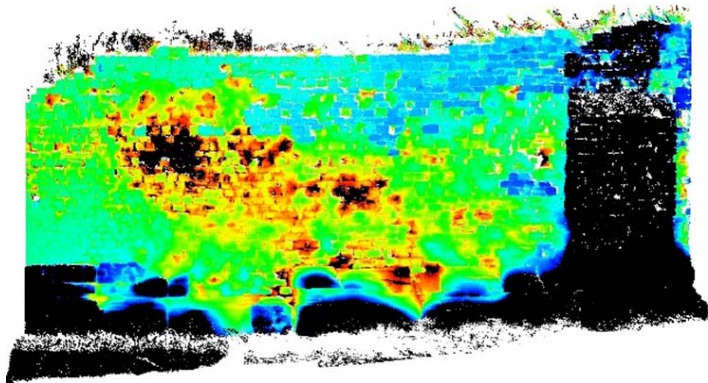
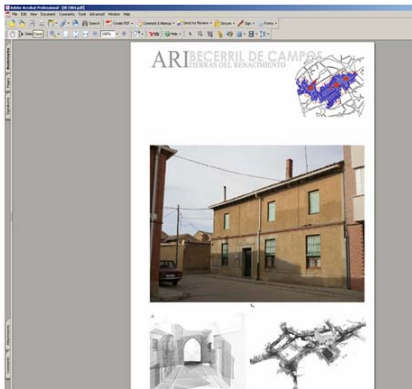


Fig.1: Plan ARI Villas del Renacimiento. Fig.2: Plan Director: Murallas de Rioja

### Fotogrametría y Láser 3D

La Fotogrametría terrestre es una combinación eficiente de sistemas de sistemas de topografía, técnicas de topografía y herramientas de Informática para la documentación y visualización espacial de la información relativa a objetos 3D de interés incluyendo los que son objeto de estudio por parte de Arquitectura, Urbanismo, Ingeniería Civil y Arqueología, entre otros. La Fotogrametría terrestre tradicional obtiene una representación de la profundidad utilizando procedimientos estereoscópicos. La fusión de información de pares estéreo se basa en el ajuste de haces de líneas de perspectiva asociadas a la orientación del observador, imitando el comportamiento retinal. En el caso de una sola vista, la rectificación fotográfica y una eficiente extracción de bordes permite sustituir el dibujo.

Un dispositivo láser utiliza la recepción de un pequeño porcentaje de los rayos emitidos para generar una representación discreta de objetos 3D mediante Ingeniería Inversa. Un láser 3D puede utilizar triangulación, tiempo de vuelo ó diferencia de fase para evaluar la distancia de los puntos al dispositivo para cada tome. El registro de los datos densos obtenidos tras el pegado proporciona una representación densa basada en el objeto.



Fig.3: Una sola toma de un entorno urbano

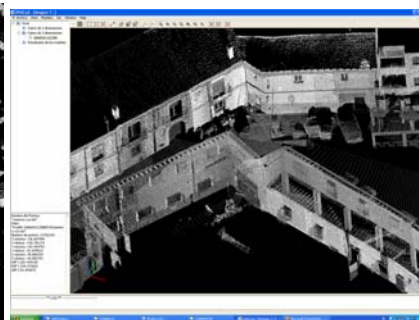


Fig.4: Registro de un entorno urbano 3D



La incorporación del láser proporciona asimismo una visualización interactiva segura y precisa de escenarios desde localizaciones virtuales que serían imposibles de obtener mediante métodos convencionales (ver Fig.5). El software comercial permite transformar y exportar ficheros de nubes de puntos a formatos típicos de CAD (Fig.6). Sin embargo, frecuentemente los archivos obtenidos de los sólidos 3D no satisfacen los requerimientos ó no permiten insertar la información procedente de otras fuentes 2D (vistas de alta resolución, p.e.).

Una dificultad importante procede del hecho siguiente: A diferencia de los métodos basados en primitivas continuas propios de la Expresión Gráfica, la información proporcionada por los dispositivos láser 3D es discreta. Por ello, es preciso desarrollar herramientas software que proporcionen el nexo con la gestión de la información basada en primitivas continuas 3D.

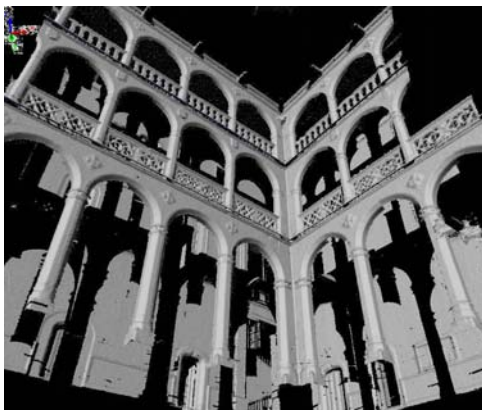


Fig.5: Visualización axonométrica del Interior del Palacio Sta Cruz (Valladolid)

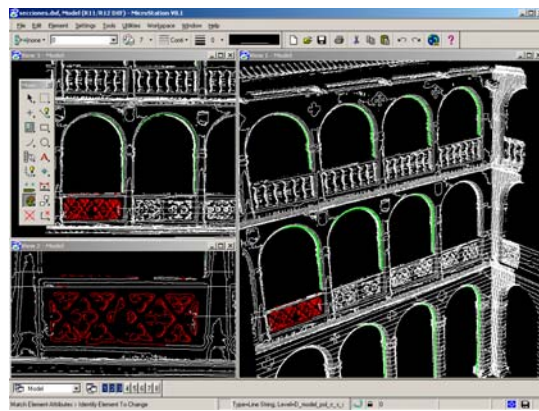


Fig.6: Exportación a DXF de ficheros procedentes del escaneo del patio interior del Palacio Sta.Cruz

La plataforma software UVACAD proporciona herramientas software para integrar información discreta y continua relativa a objetos 3D. El marco para el desarrollo de UVACAD es la Programación Orientada a Objetos (OOP). En este entorno se dispone de a) listas de objetos elementales descritos por clases que constituyen el *Modelo de Objetos*, con sus correspondientes variables ó parámetros asociados a estos objetos elementales; b) las relaciones asociadas a dependencias funcionales u operadores que es preciso evaluar entre objetos y que dan lugar al *Modelo Dinámico*; y c) los flujos entre los diferentes procesos con sus dependencias que constituyen el *Modelo Funcional*. Para cada uno de estos modelos se dispone en UVACAD de bibliotecas de funciones y métodos que proporcionan diferentes salidas relevantes para las tareas de Procesamiento, Análisis y Visualización.

### Visualización avanzada

La integración de herramientas para visualización 3D se orientó en una primera etapa de la Fotogrametría hacia la rectificación automática de fachadas para una cámara calibrada; una vez realizada la rectificación, la existencia de una red topográfica y el conocimiento de la escala permiten obtener información métrica sobre los objetos 3D documentados. Esta metodología se extiende asimismo a la fotogrametría basada en Láser 3D cuando el objeto a documentar presenta planos dominantes sobre los cuales es posible realizar una lectura de paramentos. De este modo, el escaneo láser 3D de alta densidad deja de ser un medio para la rectificación fotográfica y el dibujo, y reemplaza

el dibujo por (secciones y proyecciones de) una nube densa de puntos como forma de representación del objeto 3D, facilitando lecturas de paramentos (materiales desagregados) y análisis de patologías estructurales en edificios (Figuras 7 y 8)

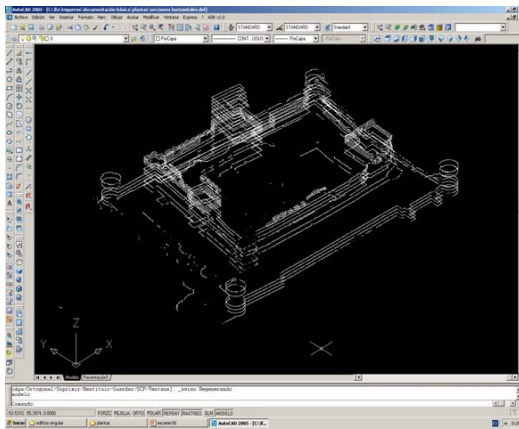


Fig.7: Secciones transversales paralelas a la Planta del Castillo de Trigueros del Valle

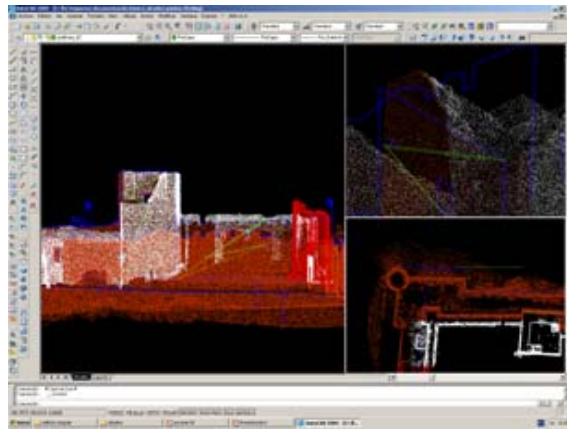


Fig.8: Soporte 3D para la lectura de paramentos y evaluación de desplazamientos en

En la segunda mitad de los noventa se incorporan herramientas que facilitan una visualización dinámica y su exportación a formatos de video convencionales como \*.avi y \*.mpeg, al tiempo que se desarrollaban herramientas de bajo coste (Photo-Modeler, 3D-Builder) para las aplicaciones con un alcance limitado en fotorealismo y precisión. Una tercera etapa, actualmente en desarrollo, concierne a la integración de información 2D de gran precisión (fotomosaicos de vistas rectificadas) sobre archivos 3D mediante proyección inversa. La extracción semi-automática de bordes sencillos de objetos a partir de vistas y su re-proyección inversa sobre modelos densos basados en nubes de puntos 3D proporciona contornos 3D del modelo sólido con un soporte asociado a un número muy elevado de puntos 3D. Algunas de las herramientas más importantes de la Visualización avanzada conciernen a las representaciones basadas en mapas de secciones (isosuperficies; Figura 7), el tratamiento de información vectorial centrada en el objeto (para evaluar características asociadas a la métrica) y la gestión de cantidades invariantes (tensores) para los modelos Dinámico y Funcional mencionado más arriba. El diseño e implementación de estas herramientas es compatible con la exportación a formatos reutilizables desde CAD (Fig. 9) y VR (Fig.10), facilitando la comprensión del edificio en su entorno más próximo (Figura 11). Estos aspectos se ilustran a continuación con representaciones CAD y VRML procedentes del modelo sólido basado en nubes de puntos densas correspondientes al Castillo de Mombeltrán (Avila).

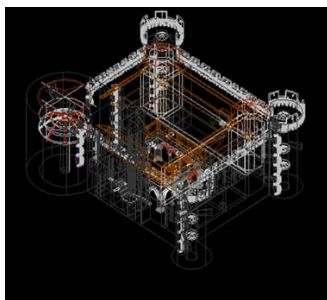


Fig.10: Representación CAD



Fig.11: Representación VRML



Fig.12: Visualización del modelo global del Castillo en su entorno

## El futuro inmediato

Las reuniones de CIPA de los últimos años han puesto de manifiesto la necesidad de integrar aproximaciones llevadas a cabo por diferentes expertos sobre un soporte común centrado en la geometría del objeto y compatible con diferentes escalas y resoluciones (Fig.14). El desarrollo de UVACAD es una respuesta a esta necesidad (Fig.13).



Fig.13: Página Web de UVACAD

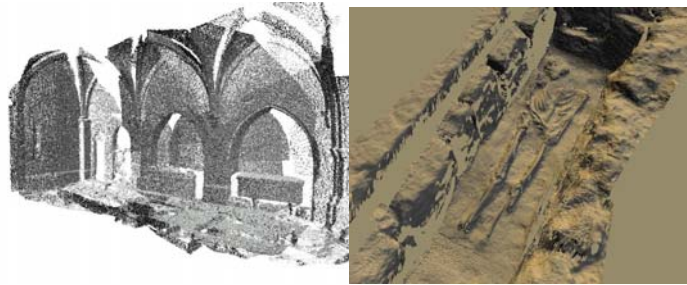


Fig.14: Fusión de información 2D/3D multiresolución

Dos importantes líneas actuales de trabajo conciernen a la integración de sistemas de representación y consulta con Sistemas de Información y Gestión (similares a SIG) por un lado, y Análisis y Diseño basado en VR/AR, por otra. Las necesidades de mejora en consulta y simulación sobre la plataforma de visualización requieren una elevada precisión métrica e interfaces apropiados para facilitar la interoperabilidad con otras herramientas software. De este modo se pretende incrementar la productividad y la calidad que requieren aplicaciones profesionales asociadas al análisis estructural y de materiales, así como al diseño y la simulación de las soluciones propuestas.

El carácter modular de los diferentes bloques y modelos de la Plataforma Software facilita la integración de diferentes herramientas y la interoperabilidad con programas de uso común en Expresión Gráfica. Así, se mejoran las prestaciones de las herramientas de Documentación, Análisis y Visualización Avanzada del Patrimonio construido.

## 2. Metodología

Los sistemas de representación adoptados en Arquitectura e Ingeniería están basados en modelos geométricos asociados a algún tipo de perspectiva. Los modelos geométricos están relacionados entre sí mediante transformaciones proyectivas y proporcionan el soporte para la metodología top-down, es decir, basada en modelos; la metodología top-down es la que facilita el soporte para las cuestiones de visualización mostradas más arriba, incluyendo navegación y consulta. La evaluación del estado actual de la estructura ó de los materiales presentes en la fábrica requiere integrar información procedente de diferentes sensores activos ó pasivos. Esta fase de documentación, previa al análisis aparece referenciada a modelos 2D ó 3D procedentes de Técnicas de Expresión Gráfica ligadas al Diseño Asistido (CAD, VR/AR), la Fotogrametría ó tecnologías con soporte láser 3D.

La captura e inserción de la información asociada a hechos significativos (materiales, detalles) sigue una metodología de tipo bottom-up, incluyendo registro, procesamiento y análisis a bajo nivel. La metodología adoptada por el grupo LFA-DAVAP es de tipo

híbrido, pues combina aproximaciones top-down para el marco de referencia y bottom-up para la inserción de hechos significativos en las fases de documentación y visualización de los edificios sobre los que se planea intervenir.

### Operaciones básicas de Geometría Projectiva en entornos discretos.

En este apartado, una *imagen 2D* es la *proyección central de una escena* desde un punto (eventualmente, en el infinito). Todas las proyecciones están relacionadas entre sí por transformaciones proyectivas. Las operaciones básicas de la Geometría Projectiva que conservan los invariantes fundamentales son secciones y proyecciones. La plataforma UVACAD dispone de herramientas software para gestionar secciones y proyecciones sobre planos. El objetivo de estas operaciones consiste en proporcionar elementos para la planimetría de objetos 3D sobre planos dominantes del objeto, incluyendo en particular la planta, alzado y vistas laterales correspondientes a proyecciones paralelas (foco en el infinito) sobre planos coordenados para una apropiada orientación del objeto. Así, el levantamiento basado en láser 3D y el pegado de vistas se entiende aún de forma restringida como un apoyo para la rectificación fotográfica y el dibujo (Figs.15 y 16)

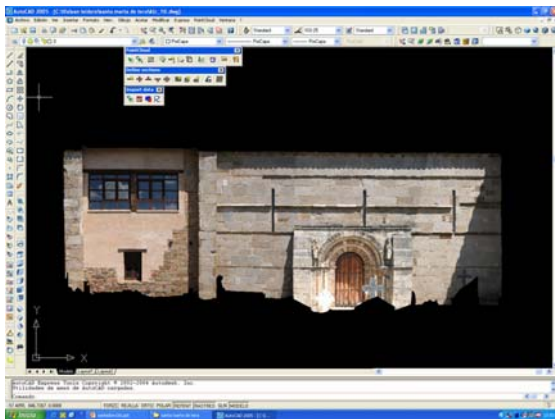


Fig.15: Sta. Marta de Tera (Zamora)

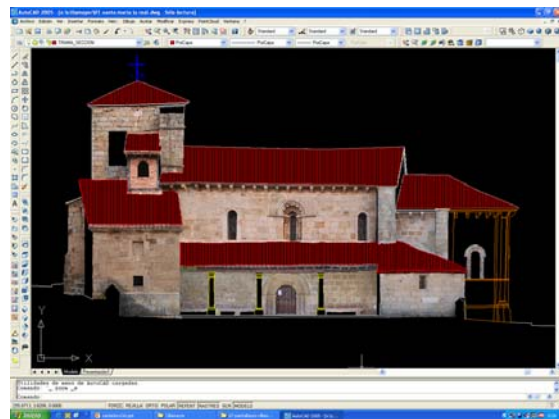


Fig.16: Sta. María la Real, Cillamayor (Palencia)

El carácter discreto y la distribución irregular de las nubes de puntos hace muy difícil obtener una representación continua 3D para la elevación de los bordes 2D contenidos en cualquiera de las ortoproyecciones citadas; la estrategia consiste en seleccionar una «rodaja» de puntos comprendida entre pares próximos de planos paralelos y proyectar sobre un plano intermedio. A cada rodaja proyectada se le asocia una poligonal gruesa que conecta los puntos próximos, poligonal que puede ser refinada, manteniendo la continuidad de los perfiles. La implementación de algoritmos para esta idea concierne al Procesamiento de Imagen y al Reconocimiento semi-automático de primitivas 2D/3D.

### Procesamiento de Imagen

En este apartado, una *imagen 2D* es un *mapa de bits* en el que cada píxel está dotado de coordenadas 2D de posición y 3D de color con respecto a una representación tridimensional (RGB, HSV, CIE u otros). El procesamiento de imagen consiste en el cálculo de una nueva imagen a partir de una inicial, realizando ciertas propiedades relativas a puntos salientes, bordes ó regiones y suprimiendo errores debidos a captura. La metodología seguida para el procesamiento es de tipo bottom-up e incluye el filtrado, la extracción y agrupamiento de hechos, el reconocimiento a bajo nivel de primitivas geométricas básicas y el refinamiento de información. En las aplicaciones a

Rehabilitación de Edificios los aspectos más importantes de la fase de Documentación conciernen a la obtención de bordes relativos a estructuras portantes (perfiles de muros, vigas, arcos, etc) incluyendo patologías (fisuras ó grietas, falta de alineamiento, p.e.) y la caracterización de regiones (tipología de materiales) que puedan presentar patologías en paramentos (desagregaciones, humedades, etc) en términos de mapas de texturas. Es importante destacar que esta información procede de la nube de puntos coloreada proyectada sobre un plano dominante, tal y como se ilustra en la Fig.18 correspondiente al modelo 3D del exterior de la Colegiata de San Isidoro (León)

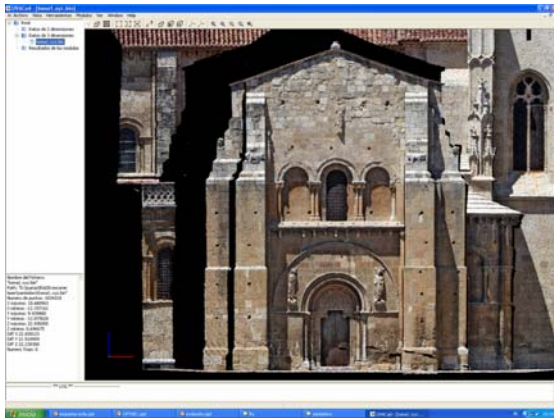


Fig.17: Modelado 3D basado en escaneo láser 3D.

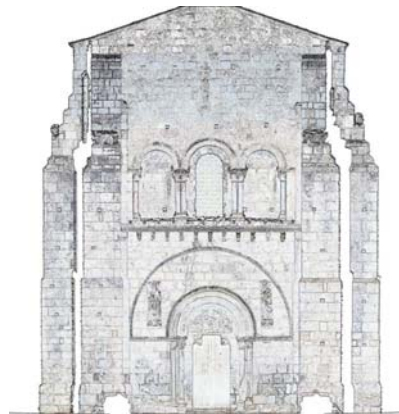


Fig.18: Extracción de bordes

La obtención del mapa de bordes en Procesamiento de Imagen se lleva a cabo a partir de la función de intensidad realzando propiedades de discontinuidad del color (extracción y agrupamiento de minisegmentos donde se producen los «saltos») ó por el contrario de continuidad (suavizado ó realzado de las regiones en las que las variaciones del color están por debajo ó por encima de un umbral). Para las propiedades relativas a bordes (respectivamente, regiones) se utilizan filtros de baja (respectivamente, alta) frecuencia. A menudo es conveniente aplicar de forma secuencial una combinación de ambos tipos de filtros. Asimismo, existen filtros adaptados a una banda de frecuencias que son apropiados para análisis de texturas; una *textura* es un patrón que combina propiedades geométricas y radiométricas asociadas a una superficie.

Como *conclusión*, las herramientas de Visión Computacional asociadas a una vista son de gran utilidad para documentación y visualización. Permiten obtener mapas 2D de bordes y regiones contenidos en las vistas originales ó en las rectificadas. Estas herramientas facilitan el trabajo en la fase de registro y de análisis con soporte planar.

### **Fusión de información 2D y 3D**

La fusión de información 2D y 3D combina las dos interpretaciones de una vista como mapa de bits y como la imagen de una proyección central desde el foco de la cámara. Una vez calculada la matriz de proyección, se eleva la información radiométrica (grises, color, texturas) contenida en una vista al entorno 3D mediante proyección inversa. La puesta en correspondencia se realiza de forma interactiva, seleccionando pares de puntos homólogos para la vista y la nube de puntos convenientemente orientada. Para facilitar la puesta en correspondencia es conveniente que la vista y la nube de puntos tengan una orientación tan próxima como sea posible. Cuanto más próximas sean las orientaciones, menor es el número de pares de puntos que deben ser puestos en

correspondencia (el número máximo requerido como pares de puntos homólogos es ocho). La diversidad en la resolución de la vista con respecto al escaneo se resuelve mediante remuestreo ó bien simplificación inteligente (muestreo consensuado ó bien muestreo condicionado a funciones de importancia). Una vez obtenida una nube de puntos coloreada, se han desarrollado herramientas software de gran eficiencia para generar superficies que se superponen a la nube de puntos utilizando una estructura lineal (triangulación) ó lisa (superficies suavizadas) a trozos.

### Conclusiones parciales

La metodología desarrollada por el grupo LFA-DAVAP para las tareas de documentación y visualización del Patrimonio construido es de tipo híbrido en diferentes aspectos: a) utiliza diferentes tipos de sensores pasivos (cámaras métricas ó no) y activos (láser 3D), b) combina las aproximaciones top-down (de utilidad para la estructura portante y su comportamiento mecánico) y bottom-up (útil para materiales), c) facilita estructuras continuas superpuestas a modelos discretos y d) genera modelos mixtos (geométricos y radiométricos) a diferentes resoluciones (alta para detalles, media para la integridad del edificio) en las fases de documentación y visualización. Se dispone ya de herramientas software para reconocimiento semi-automático de planos y cuádras sencillas. Sin embargo, en presencia de información incompleta procedente del láser, la elevación de complicados bordes 2D a verdaderos contornos 3D aún requiere mayor desarrollo de herramientas software que permitan garantizar la compatibilidad con los resultados asociados a diferentes proyecciones. La resolución de estos problemas requiere articular las soluciones procedentes de la Reconstrucción 3D a partir de múltiples vistas con el modelo basado en láser 3D.

## 3. Casos prácticos

### Villamorón (Burgos)

El propósito de este caso es ilustrar el estudio de deformaciones estructurales a partir de una visualización de plantas y alzados resultantes de seccionar (Fig.19) el modelo sólido de la Iglesia de Villamorón (Burgos) y proyectar sobre un plano ideal común (Fig.20).

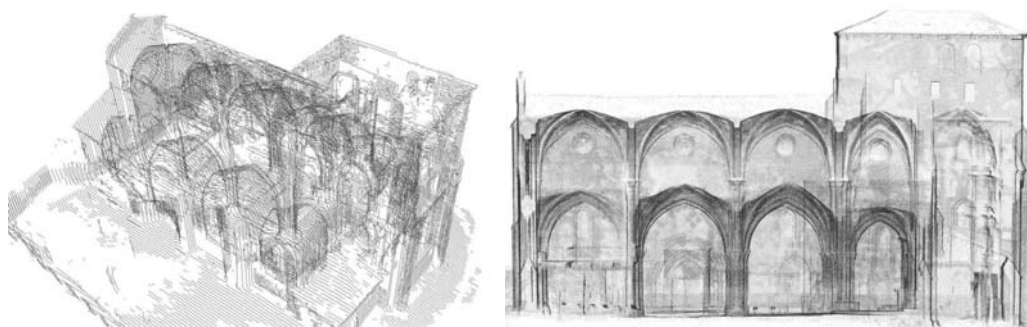


Fig.19: Mapas de secciones planas paralelas Fig.20: Proyección de secciones sobre plano común

La comparación entre los mapas de secciones perpendiculares al eje de la nave principal y el análisis de la planta proporcionan resultados muy significativos relativos a la falta de alineamiento para pilares de la nave central (Figs.21 y 22).

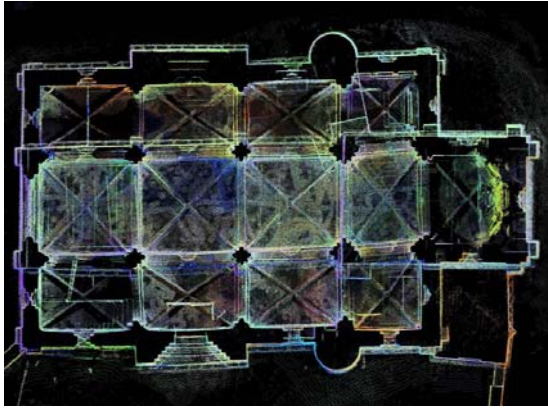


Fig.21: Visualización de la planta de la Iglesia de Santiago en Villamorón (Burgos)

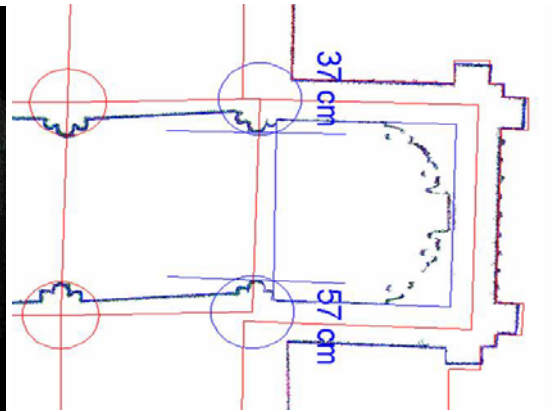


Fig.22: Identificación y Evaluación métrica de falta de alineamiento en planta

Esta identificación de patologías permite avanzar en el diagnóstico y asistir la toma de decisiones para la rehabilitación del edificio, actualmente en curso de rehabilitación.

### Colegiata de Santa María de Arbás del Puerto (León)

La Iglesia de Santa María de Arbás del Puerto presenta una complicada volumetría que es difícil visualizar por métodos convencionales. La documentación requirió un elevado número de escaneos debido a la cantidad de auto-occlusiones que presenta el interior y las dificultades para escanear algunas zonas del exterior.

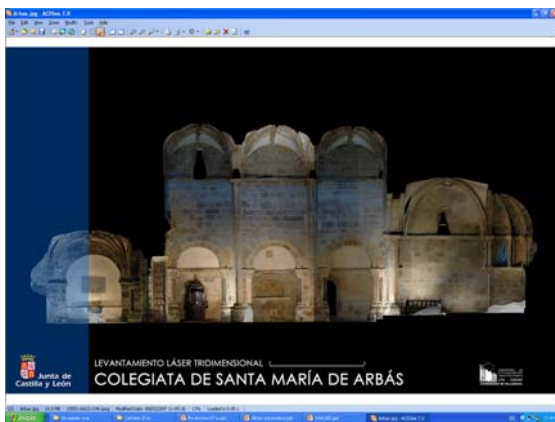


Fig.23: Sección longitudinal del modelo 3D

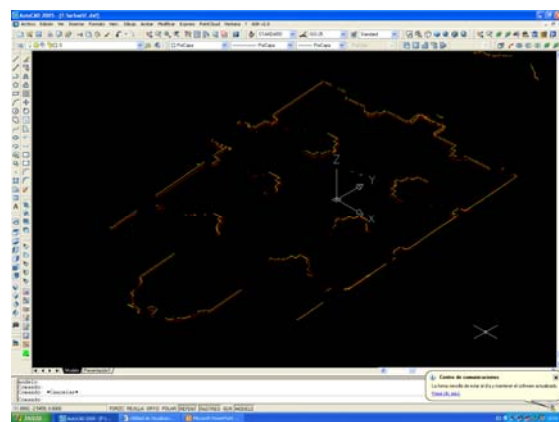


Fig.24: Exportación del fichero de planta a CAD

En las Figuras 23 y 24 se muestran una sección longitudinal y una vista en perspectiva de la planta correspondientes al modelo 3D basado en láser correspondiente a la nave central de la Iglesia de Santa María de Arbás.

### Puente de Segovia sobre la M30 (Madrid)

El desarrollo de intervenciones en la M30 de Madrid ha motivado la documentación y visualización de un modelo 3D para diferentes tipos de intervenciones encaminadas a evaluar y situar de la forma más fiel posible posibles daños estructurales ó relativos a la fábrica. La imposibilidad de mantener restos de antiguos puentes que han aparecido al realizar la excavación y la necesidad de una documentación precisa para su posible reconstrucción en otro entorno, han requerido la inserción del modelo métrico obtenido en una red topográfica superpuesta al entorno urbano. En Las Figs.25 y 26 se muestra

una panorámica general y la exportación a CAD de un detalle correspondiente a una pila del puente de Segovia de la M30 (Madrid).



Fig.25: Vista general del modelo 3D del puente de Segovia.

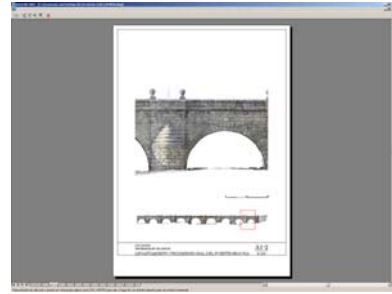


Fig.26: Detalle de una pila

### **Puerta Castillo de la Muralla de León**

La remodelación de áreas parcialmente degradadas y el cambio de uso de algunos edificios plantean problemas de gran interés que trascienden la documentación y visualización, afectando al diseño y la posibilidad de interacción sobre modelos 3D de gran precisión (Figs. 27, 28 y 29)

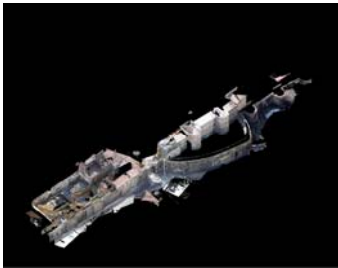


Fig.27: Vista general de la Puerta Castillo



Fig.28: Solar para intervención

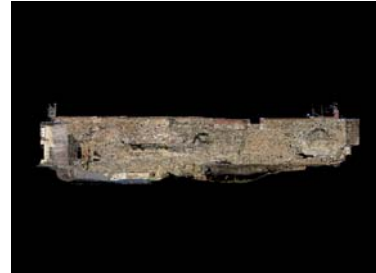


Fig.29: Visualización de materiales desagregados

### **Peña Horadada de Santander**

La destrucción parcial de la Peña Horadada ha motivado el desarrollo de documentación y visualización de los restos, incluyendo el modelado y ensamblaje virtual para el cálculo de estructuras. Este trabajo está actualmente en curso de realización.

## **4. Conclusiones**

El grupo LFA-DAVAP ha desarrollado la plataforma software UVACAD. El carácter modular de esta plataforma permite adaptarla a diferentes propósitos de Documentación y Visualización Avanzada, y sus aplicaciones en tareas de Rehabilitación del Patrimonio Construido. Algunas de las prolongaciones de esta adaptación actualmente en curso conciernen a Sistemas de Información capaces de integrar información con soporte 2D y 3D para intervenciones de Rehabilitación. Para incrementar la utilidad de la plataforma se requiere desarrollar módulos de Cálculo (incluyendo métodos de Análisis Numérico) y Sistemas Expertos (para Reconocimiento de primitivas geométricas simples y toma óptima de decisiones) que faciliten el diagnóstico, mejoren la gestión de los recursos y proporcionen un soporte para la simulación de las intervenciones planeadas. Actualmente, se está trabajando en todas estas líneas en un marco abierto. Para más información, ver <http://www3.uva.es/davap>; publicaciones en <http://mobivap.uva.es>.



## REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA

Javier Díez de Güemes<sup>1,2</sup> ([diez\\_de\\_guemes.javier@es.sika.com](mailto:diez_de_guemes.javier@es.sika.com))

<sup>1</sup> Ingeniero Técnico de Obras Públicas

<sup>2</sup> SIKA

### Generalidades

Los “composites” o materiales compuestos deben su nombre a que están formados por dos componentes, una matriz y unas fibras, que actúan de una manera conjunta y solidaria. Se consiguen, de esta manera, unas prestaciones óptimas, en cuanto a comportamiento mecánico, principalmente.

Los materiales compuestos se han venido utilizando, desde hace más de 50 años, principalmente en la industria aeronáutica.

A mediados de los 80, en el EMPA (Laboratorio Suizo de Materiales) en Zürich, de la mano del profesor Urs Maier, se empezaron a hacer pruebas para la utilización de los materiales compuestos como refuerzo exterior dentro del campo de la construcción.

Entre los distintos tipos de fibras (carbono, vidrio, aramida) que podían servir para este uso, se decidió utilizar las de carbono. Son las que tienen un módulo de elasticidad más alto, compatible con la deformación del hormigón armado.

En cuanto a las matrices, la más compatible con las fibras de carbono ha demostrado ser la resina epoxi. Es la que mejor moja las fibras y la que más adherencia tiene a ellas. Además tiene un curado sin retracción, lo cual es importante para el uso al que va destinado.

En el EMPA, hasta 1.991, se realizaron ensayos para ver la factibilidad de la utilización de los laminados CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono). En 1.991 se ejecutó la primera obra real. Se reforzó el puente Ibach en Lucerna (Suiza). A lo largo de los siguientes años se siguieron realizando algunos refuerzos en diferentes estructuras, de una manera todavía experimental.

La primera obra en España con este tipo de sistemas fue en el Puente del Dragó en Barcelona.

Consistió en el refuerzo de una serie de vigas del puente que habían sido dañadas. La obra se ejecutó en 1.996. Esta obra recibió el Premio Construmat al sistema más innovador durante la Feria Construmat de 1997.

A partir de entonces este tipo de sistemas de refuerzo se ha ido popularizando y haciendo práctica común en España, donde hay multitud de ejemplos de obras realizadas.

### Descripción general del sistema

Los sistemas de refuerzo a base de “composites”, consisten, en esencia, en el pegado externo, sobre la superficie del elemento constructivo sobre el que se va a actuar, de unos materiales con unas prestaciones mecánicas, sobresalientes.

Los principales sistemas de refuerzo con materiales compuestos son:

Refuerzo con bandas prefabricadas a base de fibra de carbono: normalmente tienen un espesor de entre 1,2 y 1,4 mm. y una anchura entre 5 y 20 mm.

Para adherir las bandas prefabricadas al soporte se utilizará una resina epoxi, de dos componentes con una consistencia pastosa y tixotrópica.

Las características que debe tener el adhesivo que se utilice para este fin son:

Buenas resistencias, principalmente a tracción y cizallamiento

Temperatura de transición vítrea elevada.

Buena adherencia a los elementos sobre los que se va a colocar (hormigón, ladrillo, madera, etc.) y a los laminados

Refuerzo con tejidos de fibras de carbono: en este caso el composite se realizará “in situ” ;los tejidos a base de fibra de carbono son materiales en los que no se ha colocado todavía la matriz de resina. Los tejidos suelen tener un espesor de entre 0,13 y 0,30 mm., con gramaje de entre 200 y 800 g/m<sup>3</sup> . Para adherir los tejidos al soporte a utilizar se utilizan resinas epoxi fluidas.

Refuerzo con bandas prefabricadas dobladas en ángulo: esta forma es adecuada para hacer refuerzos a esfuerzo cortante. La resina que se utiliza para este sistema es la misma que la descrita en el sistema de laminados rectos.

### Refuerzo de estructuras mediante fibra de carbono



*Figura 1: Refuerzo a flexión*



*Figura 2: Refuerzo por confinamiento*



*Figura 3: Refuerzo a cortante*



*Figura 4: Refuerzo a cortante*



Figura 5: Refuerzo de muros



Figura 6: Refuerzo en pretensados

## Requerimientos generales para la ejecución del refuerzo

### Requerimientos exigibles al soporte

Las condiciones que debe cumplir el soporte son las siguientes:

La resistencia al arrancamiento realizada mediante ensayo SATEC debe ser mayor de 1,0 Mpa (10 Kg./cm<sup>2</sup>).

La planeidad de las superficies debe ser tal que las irregularidades sean menores de 0,5 mm.

La porosidad superficial cumplirá:

Superficie del poro:  $\leq 3 \text{ cm}^2$

Profundidad:  $\leq 5 \text{ mm}$ .

Extensión:  $\leq 10 \%$  de la superficie total

Para el estado de la superficie se comprobarán los siguientes aspectos:

Alcalinidad: grado de carbonatación

Humedad:  $< 4 \%$

Manchas:

aceites, grasas, productos de curado para obra reciente.

moho, vegetación, etc. en obras viejas.

Defectos: humedad, fisuras, cavidades, desconchados, etc.

### Condiciones atmosféricas

La velocidad de polimerización de las resinas epoxi está relacionada con la temperatura de aplicación. Cuando las temperaturas sean superiores a las recomendadas, la vida de mezcla se acorta, sucediendo lo contrario cuando son inferiores.

A veces las necesidades de trabajo obligan a utilizar varios lotes uno detrás de otro. Se recomienda no mezclar el siguiente lote hasta no terminar el anterior para no reducir el tiempo de manejabilidad.

## **Trabajos previos a la ejecución**

### **Preparación del soporte**

#### **Saneado**

Las superficies a tratar se presentarán de tal manera que en el momento de ejecutar los trabajos de refuerzo, estén en perfectas condiciones, para lo cual se eliminarán las lechadas superficiales, manchas, suciedad, partes mal adheridas, restos de otros oficios, etc., mediante repicado, cincelado, escarificado, abujardado o cualquier otro procedimiento manual o preferiblemente mecánico, hasta conseguir un soporte que reúna las condiciones idóneas, en cuanto a cohesión y rugosidad, que garanticen la buena adherencia físico-química del producto de pegado.

#### **Limpieza**

Realizadas las operaciones de saneado y con el fin de obtener superficies totalmente limpias, éstas se someterán a cualquiera de los sistemas que a continuación se indican:

##### **Chorro de arena**

Es la más indicada para este tipo de trabajos. Consiste en proyectar sobre el soporte un chorro de arena de sílice mediante un compresor de caudal variable en función de la distancia al soporte, con una presión de 7 atms. aproximadamente. La granulometría de la arena estará comprendida entre 1 y 2 mm. y el operario que realice el trabajo actuará provisto de una escafandra protectora ventilada con aire fresco.

##### **Maquinaria recomendable:**

- Clemco Modelo 1028
- Clemco Modelo 2452
- Graco
- Atlas Copco

##### **Agua a alta presión**

Consiste en proyectar sobre el soporte agua con una presión mínima de 150 atms mediante un equipo especial, a través de una lanzadera provista de una boquilla adecuada y con una presión en bomba controlada con un manómetro.

##### **Maquinaria recomendable:**

- Kelly F-200
- Dima 2400/2800 Senior
- Woma 1502
- Nilfish

##### **Chorro de agua-arena**

Sistema combinación de los otros mencionados, en el que se utiliza básicamente el equipo de chorro de agua a alta presión y una lanza de proyección con un dispositivo que permite incorporar la arena de sílice en la boquilla. (Efecto Venturi).

Maquinaria recomendable:

- Urvapor PX 200

Otros tipos

- Pistola de aire comprimido, con agujas
- Limpieza con chorro de vapor
- Limpieza con llana
- Tratamiento con ácidos

Si se emplea cualquiera de los dos últimos tipos indicados, se comprobará posteriormente que la cohesión del soporte, (interna y en superficie) no ha sido afectada por el tratamiento (choque térmico o ataque químico).

### **Pasivación de armaduras**

Esta unidad de obra será aplicable en el caso de que, al sanear y chorrear el soporte, aparecieran armaduras al aire.

Sobre las zonas con armaduras al descubierto se realizará una limpieza con chorro de arena, grado Sa 2 1/2 según Norma SIS 05 59 00.

Una vez chorreadas se soplarán con aire a presión limpio y seco, para eliminar la arena y el polvo depositados.

A continuación se procederá a la protección de los mismos frente a la corrosión mediante la aplicación de dos capas de Epoxi base Fosfato, imprimación anticorrosiva de dos componentes, a base de resinas epoxi curadas con poliamidas y fosfato de zinc, con un consumo aproximado de 250-300 g/ m<sup>2</sup> para un espesor de película seca de 80-100 micras.

Sobre la segunda capa, aún fresca, se puede espolvorear arena de cuarzo de granulometría 0,4 a 0,7 mm. con objeto de garantizar la adherencia del mortero de regeneración.

### **Regeneración**

Sobre las superficies que hayan perdido espesor de recubrimiento se realizará una regeneración cuyas funciones son, por un lado, restituir el perfil original al elemento, y por otro, regularizar las superficies con el fin de que el espesor de resina epoxi sea mínimo.

Asimismo, se prestará especial atención a las superficies que vayan a recibir los laminados del refuerzo debe ser tal que las irregularidades sean menores de 0,5 mm.

Sobre las zonas en las que se haya perdido espesor de recubrimiento será preciso regenerarlas a base de resinas epoxi. Previamente se realizará la imprimación del soporte con el fin de garantizar la adherencia.

La elección del producto a utilizar viene condicionada por el espesor a aplicar.

### **Puesta en obra**

#### **Aplicación del adhesivo sobre el soporte**

Para su aplicación, mezclar los dos componentes con una batidora eléctrica de baja velocidad (máx. 600 r.p.m.) al menos durante dos minutos, hasta conseguir una pasta totalmente homogénea y de color gris claro.

Una vez limpiadas las superficies mediante chorro de arena u otro procedimiento y regularizadas, se procederá a la aplicación sobre el soporte, usando una paleta o brocha la resina epoxi especificada en una cantidad aproximada de 0,7 a 1,2 Kg./m<sup>2</sup>, dependiendo de la rugosidad del soporte.

### **Colocación del Tejido de fibra de carbono sobre el soporte**

Colocar el tejido sobre la resina en la dirección adecuada, embebiendo el tejido en la misma, presionando hasta que la resina salga por los huecos del tejido. Es importante conseguir que las fibras queden lo más rectas posibles, para lo cual hay que estirar con fuerza los tejidos.

### **Eliminación de los huecos o burbujas de aire**

Una vez colocado el tejido sobre la superficie, se procede a repartir la resina con un rodillo hasta lograr una superficie homogénea y la completa eliminación de los huecos y burbujas de aire. Al final debe quedar una superficie continua de pegado, sin burbujas de aire entre el tejido y el soporte.

Debido al poco peso del tejido, no es necesario que sean apeados y se sostienen en el soporte desde el principio.

### **Recubrimiento del Tejido**

Como recubrimiento final, se aplicará una capa adicional de resina con un consumo aproximado de 0,5 Kg./m<sup>2</sup>. La forma de aplicación más adecuada es con rodillo.

Si se quiere se puede espolvorear sobre aquella arena de cuarzo que actuará de capa de agarre para posteriores recubrimientos cementosos.

### **Recubrimiento por cuestiones estéticas**

Si se necesitara por razones estéticas, se puede recubrir el refuerzo con pinturas acrílicas.

### **Puesta en servicio**

El adhesivo va adquiriendo sus resistencias desde el momento en que es colocado hasta conseguir el endurecimiento total a los 7 días. Por lo tanto es necesario esperar 7 días hasta sobrecargar el elemento estructural a su carga máxima, pudiendo cargarse previamente con sobrecargas inferiores que no hagan superar el límite de resistencia del adhesivo en cada momento.

### **Control de Calidad**

#### **Previo a la ejecución de los trabajos**

Se deberán hacer controles tales como:

Ensayos de resistencias mecánicas del hormigón.

Ensayos de estabilidad y polimerización correcta del adhesivo:

Relación resina – endurecedor correcta

Temperatura de aplicación (como regla general se puede admitir que una elevación de temperatura de 10 ° C duplica aproximadamente la velocidad de reacción).

#### **Finalizados los trabajos de ejecución**

Se pueden hacer controles tales como:

Ensayos de adherencia por tracción directa.

Pruebas de carga.

## EJEMPLO DE APLICACIÓN

Javier Díez

### Chimenea en Muttentz Industrial



*Figura 7: Vista general*

La chimenea de Muttentz Industrial pertenece a CTW Chemical y se enclava en la planta de Muttentz-Basel (Suiza). Se construyó en el año 1902 y mide 40 metros de altura. Su diámetro interno es de 1.60 metros mientras que el exterior es de 3.20.



*Figura 8: Andamiaje y protección*



*Figura 9: Preparación del soporte/Ensayo Sattec*

*REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA*



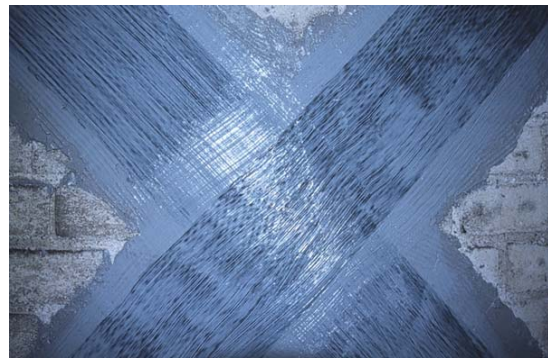
*Figura 10*



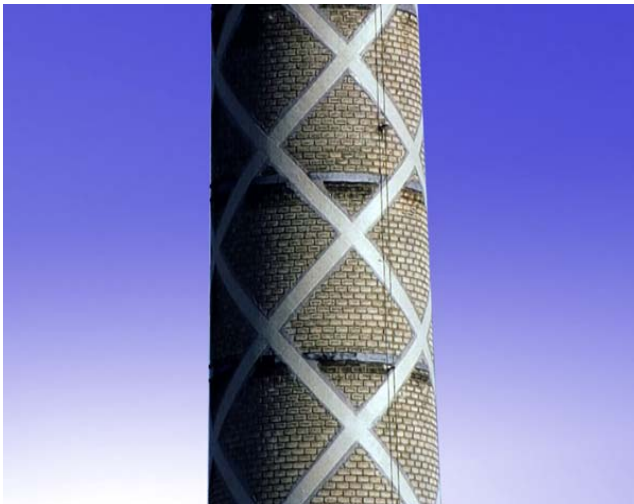
*Figura 11*



*Figura 12*



*Figura 13: Impregnación del SikaWrap®-230 C (Sikadur 330)*



*Figura14: Sikagard 670 W Elastocolor para protección frente a rayos UV*



*Figura 15: Chimenea de ladrillo reforzada con SikaWrap-230 C*



## **PUENTES DE AYER Y PUENTES DE HOY**

*José Antonio Martínez Martínez<sup>1</sup> ([jamartinez@ubu.es](mailto:jamartinez@ubu.es)).*

<sup>1</sup> *Catedrático de Escuela Universitaria. Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.  
Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Burgos*

### **Resumen**

En este trabajo se analizan los principales problemas a los que un técnico actual se enfrenta al tratar de adaptar un puente construido en otra época, con otros materiales y con otros condicionantes diferentes, a los planteamientos actuales. Se estudian las principales variables que rigen el problema y se presentan diversos casos prácticos.

### **1.- Introducción.**

La construcción de puentes presenta un camino paralelo al propio desarrollo de la evolución humana. Desde los primeros tiempos el ser humano ha tenido necesidad de desplazarse por la superficie de la tierra. Incluso las civilizaciones que se han denominado sedentarias han tenido que desplazarse para conseguir alimentos aunque sus movimientos fueran radiales desde sus puntos fijos de emplazamiento. Es un hecho aceptado que la especie humana tuvo su origen en el continente africano y que generación a generación fue expandiéndose a través de lo que hoy es la zona de Oriente Medio, Asia y más tarde Europa, incluyendo la zona de los asentamientos de la Sierra de Atapuerca. Toda esa migración tuvo que realizarse con una anatomía, muy pequeña en relación con la orografía sobre la que tenía que desplazarse, pues el cuerpo humano es muy pequeño en relación con la morfología del terreno. La pequeña dimensión de las piernas, de poco más de un metro en la mayoría de los casos, conlleva a que la más leve modificación de la orografía suponga un reto insalvable y sea necesario dar un gran rodeo. El hecho de la dependencia de tener que estar permanentemente en contacto con el suelo, al contrario de otras especies, como las aves, ha hecho que la labor de desplazarse haya sido siempre dificultosa, y probablemente por ello, las personas, haciendo gala de su mayor ventaja frente a otras especies animales, ha empleado el razonamiento, además del instinto, para suplir sus propias carencias, modificando la orografía y adaptándola a sus necesidades. De esa forma surgieron los primeros puentes, probablemente troncos sobre el lecho de un río, que cumplían en esos momentos perfectamente el uso que se les demandaba.

Con el paso del tiempo, a esos pasos sobre vaguadas, se les fueron demandando mayores prestaciones. Probablemente esas primeras prestaciones fueron poder pasar con las manos libres, poder pasar con carga, poder transitar en grupo, etc. Tras el invento de la rueda, las necesidades volvieron a incrementarse, al ser mayor la capacidad de carga, y así se mantuvieron casi durante gran cantidad de siglos, hasta la aparición de los vehículos a motor. Ocurría hasta entonces que los puentes se diseñaban, que no calculaban, con respecto a la mayor de sus acciones, que no era otra que las avenidas de agua. Con los avances tecnológicos del siglo XIX aumentó la superficie de paso de agua y simultáneamente aumentaron las cargas a transportar, y la variable de diseño se modificó, pasando la acción del agua a un segundo término y las cargas a transportar a ser la acción prioritaria. Desde ese instante, gran número de puentes existentes tuvieron que cumplir prestaciones para las que no habían sido concebidos, y fue preciso averiguar si eran capaces de satisfacerlas. Durante gran número de años, ante el

desconocimiento real de cómo averiguar si esos puentes eran válidos para las nuevas necesidades se optó por el tradicional sistema de prueba y error. Directamente se le sometía a las cargas reales y transitaban por él todo tipo de vehículos y todo tipo de cargas. Si resistía es que el puente cumplía, y si fallaba, se reparaba o se hacía nuevo. Esto es lo que se ha venido haciendo, de forma mayoritaria, durante los dos últimos siglos, y se sigue haciendo, incluso hoy en día, en gran cantidad de puentes de sillería..

El patrimonio de cualquier país europeo, de puentes arcos de fábrica sigue siendo muy numeroso. Muchos de esos puentes siguen en vías principales de comunicación y sobre su rasante transitan, muchas veces sin saberlo, ocultos por una capa de aglomerado asfáltico de primera calidad, grandes vehículos pesados. La suerte, es que aquellos puentes, que se diseñaban, pero no se calculaban, tenían una capacidad de carga muy superior a la necesaria en esos momentos. Pero esa capacidad de carga no era, ni es, infinita, por lo que en estos momentos, cada vez con más frecuencia, es necesario evaluar cual es el margen de confianza, que en términos de análisis probabilístico, presentan frente a las acciones exteriores.

## **2.- Causas que motivan una renovación funcional.**

Nos vamos a centrar en puentes antiguos que por algún motivo demandan un intervención sobre su estado presente. Los motivos pueden ser muy diversos y los podemos clasificar según la siguiente jerarquía:

- causas patológicas
- causas de funcionalidad hidráulica
- causas de capacidad resistente
- causas de funcionalidad geométrica

Las causas patológicas más frecuentes vienen motivadas por asentamientos en la cimentación. Ese punto ha sido el verdadero talón de Aquiles de los puentes de fábrica. De su estabilidad dependía la propia estabilidad de toda la estructura. A este respecto, es importante mencionar la disparidad del ancho de pilas en función de la luz libre que ha existido a lo largo de todas las épocas. En aquellos puentes antiguos, de época romana, en los que las pilas venía a ocupar hasta un tercio de la luz libre, el colapso de una pila no venía a suponer más que la caída de las bóvedas adyacentes. Sin embargo en los puentes más modernos, donde las pilas recibían los empujes equilibrados de los vanos contiguos, el colapso de una pila llevaba frecuentemente el colapso de todo el puente.

- Otras causas de fallos asociados a patologías pueden ser las siguientes:
- desplazamiento de la última rosca de la bóveda por empujes horizontales de tímpanos.
- degradación del material por erosión y otros agentes atmosféricos.
- degradación del material por agotamiento tensional.

Respecto a las causas de intervención por problemas de desagüe hidráulico la cuestión tiene peor solución pues generalmente casi la única posible es la sustitución del puente por otro con mayor capacidad de desagüe. Existen, a pesar de todo, otras técnicas de ayuda como pueden ser intervenir sobre el cauce para disminuir su coeficiente de rugosidad, aumentar la pendiente del mismo, y en cualquier caso intervenir sobre alguna de las variables hidráulicas que rigen la capacidad de desagüe de una sección en lámina libre.

Si el motivo de la intervención es el aumento de la capacidad resistente sobre la que posee en el estado inicial lo más probable es que necesitemos la colaboración de otro material (acero, hormigón, etc. ) que trabaje, bien por separado, o de forma conjunta con la fábrica original. El refuerzo estructural llevará con frecuencia asociado la intervención sobre la cimentación para aumentar su capacidad resistente.

La última de las causas, la intervención por causas de funcionalidad geométrica, suele ser la más frecuente de cara a motivar una actuación sobre un puente antiguo. Generalmente, no hay problemas hidráulicos, no existen mayoritariamente problemas resistentes, pero el ancho de la sección transversal no es capaz de admitir los nuevos requerimientos. Esa anchura libre de la sección transversal ha cambiado, también, y mucho, a lo largo de los siglos, y no siempre en el mismo sentido. Es aceptado que los puentes romanos eran más anchos que los puentes medievales, pues tenían que cumplir distintos objetivos. Las soluciones para proporcionar un mayor anchura a un puente de fábrica existente son diversas y se comentarán más adelante.



*Figura 1: Pte. de Cerezo de Río Tirón Estado primitivo*



*Figura 2: Pte. de Cerezo de Río Tirón Estado reformado*

### **3.- Criterios de refuerzo de puentes antiguos.**

Cuando un puente antiguo necesita ser concebido para soportar unas cargas de acuerdo con nuestras vigentes instrucciones de acciones. Es necesario verificar, en primer lugar su estado actual. Un resumen de los aspectos más importantes sobre los que fijarse, sin que en cada caso sea necesario evaluarlos todos, pasan a ser los siguientes.

- inspección visual exterior: realizada con la mayor exhaustividad posible, acercándose física, o virtualmente con la ayuda de teleobjetivos, o incluso de embarcaciones a las principales partes del puente.
- Verificación del estado de las bóvedas: fisuras, espesores, etc.
- Verificación del estado de los tímpanos: estabilidad, fisuras, calidad de la sillería, etc.
- Observación e inspección si se considera necesario del estado de la cimentación.
- Ensayos de la capacidad resistente de los sillares, obteniendo muestras de partes secundarias desde el punto de vista resistente, como aletas de acompañamiento o partes superiores de tímpanos.
- Determinación de la geometría principal del puente.
- Evaluaciones de la geotecnia del terreno de apoyo de la cimentación existente.

Con todos estos datos se puede realizar un primer análisis resistente con las nuevas acciones, y la geometría actual. Las teorías enunciadas por Heyman sobre la aplicación de los principios del cálculo plástico a la sillería son los procedimientos más

frecuentemente empleados. Si no es posible encontrar ninguna línea de presiones con menos de cuatro puntos de contacto con las líneas de intradós y trasdós, en equilibrio con las acciones exteriores entonces se puede aceptar que la bóveda no puede resistir esas nuevas acciones. En este análisis, el terreno de relleno del trasdós se considera únicamente como carga, y también como medio de uniformización de cargas puntuales aplicadas en la rasante. Otros métodos empleados, basados también en estados de equilibrio suponen empujes activos y pasivos del terreno.



*Figura. 3: Pte. de Cerezo  
de Río Tirón  
Vaciado de bóvedas*

Sobre la cimentación, frecuentemente es difícil de obtener información, por lo que una buena herramienta es la observación cuidada de la situación actual, y el contraste con la geotecnia del terreno. La ausencia de patologías y una geotecnia uniforme nos dirigirá hacia la no intervención, aunque ante la más mínima duda se reforzará la cimentación existente. Diversas soluciones de refuerzo son la mejora del terreno, con inyecciones en profundidad, micropilotes, soleras para evitar las erosiones, etc.

Si las bóvedas actuales no son capaces de dar respuesta a las cargas solicitantes no existe otra solución más que introducir una mejora del material estructural. En el refuerzo de puentes antiguos suelen realizarse dos tipos de estrategias.

1. conducir las tensiones a través del propio material de relleno del trasdós y hacia las pilas.
2. colocar un nuevo material, que no existía anteriormente, que realice ese mismo trabajo.

Para aprovechar el material existente en el trasdós de las bóvedas, y que no sea exclusivamente un material pasivo de relleno, se puede acudir a técnicas de mejora mediante inyección con lechadas de cemento. Para conocer previamente la efectividad de esta solución será necesario realizar estudios de las características de ese relleno.

La solución de aportar o introducir un nuevo material resistente suele dirigirse a materiales de origen pétreo, especialmente el hormigón. La forma en cómo se conducen esos esfuerzos hacia la cimentación proporcionará la versatilidad de las posibles

soluciones. Entre las más empleadas podemos citar la de bóvedas de hormigón adosadas al intradós de la bóveda de sillería, vigas embebidas en el material de relleno o losas por encima de la clave de las bóvedas primitivas.

#### **4.- Criterios de ampliación de puentes antiguos.**

Cuando se necesita un ancho de plataforma superior al que dispone el puente, existen dos primeras alternativas:

1. Modificar los paramentos para adaptarlos a la nueva anchura
2. Realizar un nuevo tablero sobre la superficie que vuela sobre los paramentos antiguos.

La opción primera a su vez posee diversas alternativas. Una de ellas es realizar una ampliación asimétrica y otra realizar una ampliación simétrica. En todas ellas es preciso conjugar las ampliaciones con una adecuada sensibilidad estética, equilibrada con las disponibilidades económicas y el posible grado de importancia patrimonial del puente. La opción más frecuente es la ampliación simétrica por motivos de continuidad del eje de la vía que existe a uno y otro lado. Independientemente del sentido de la ampliación es necesario decidir el material con el que se realizará. La opción más económica y que en ocasiones se ha empleado es la ampliación con bóvedas de hormigón adaptando el encofrado a las formas de las bóvedas originales (puente de Salas de los Infantes, sobre el río Arlanza). Esta opción sin embargo, a pesar haberse empleado con frecuencia, y aunque se realice con cuidado en las superficies vistas no puede competir en armonía con los alzados de sillería. En ocasiones se ha intentado sobre el hormigón imitar las juntas de los sillares (puente de Sto. Domingo sobre el río Oja), pero es difícil conseguir un buen acabado.



*Fig. 4. Pte. de Puentedura (río Arlanza)  
Bóvedas paralelas*



*Fig. 5. Pte. de Las Viudas (Burgos) Bóvedas  
paralelas*

En otras ocasiones se ha ampliado adosando literalmente otro puente de sillería junto al primero (puente de Puentedura, sobre el río Arlanza). En ese caso se suele intentar conseguir la misma traza del intradós de las bóvedas (puente de Las Viudas sobre el río Vena, en la ciudad de Burgos), pero en otras ocasiones cada bóveda sigue una traza diferente (puente de Puentedura, sobre el río Arlanza).



*Figuras 6 y 7: Puente en Medina de Pomar (río. Nela)*

Una tercera opción consiste en desmontar uno o los dos paramentos, sillar a sillar, y reconstruirlos separados una cierta distancia (puente sobre el río Nela en Medina de Pomar), con nueva cimentación. La bóveda ampliada entre la nueva posición de los paramentos, y la bóveda antigua suele reconstruirse con hormigón (puente de San Pablo sobre el río Arlanzón, en la ciudad de Burgos). Esta solución requiere también reconstruir tajamares y espolones. Obviamente, si el trazado de la vía en superficie permite desplazar el eje, la ampliación se hace de forma asimétrica, y el coste desciende de forma considerable. En el proceso de desmontaje se suelen numerar y catalogar todos los sillares para reubicarlos en la misma posición relativa entre ellos. Esta tercera solución suele ser más cara que las anteriores pero obtiene mejores resultados estéticos. Es necesario considerar también el posible aumento de retención hidráulica por el mayor efecto tubo al aumentar la longitud de las bóvedas.



*Figura 8: Pte. en Medina de Pomar (río Nela)*

La segunda de las opciones, la de ampliación volando el tablero sobre los paramentos, de forma simétrica o no simétrica, es la que requiere una mayor atención sobre su comportamiento estructural, ya que las nuevas cargas, tanto las permanentes de peso propio, como las sobrecargas de las vigentes instrucciones de acciones a considerar, se deben de transmitir a través del cuerpo de la fábrica antigua. Es necesario evaluar el estado de la cimentación existente, y el estado de la fábrica de la bóveda, y ver si son capaces de soportar las nuevas cargas. Si esto no es así, bien porque no se puede comprobar, o bien porque una vez verificado no se cumple, es necesario diseñar

mecanismos que transmitan la carga directamente a una cimentación nueva. La opción de micropilotes sobre pilas, o tajamares suele ser la más empleada. A su vez la estructura soporte de las nuevas cargas puede recurrir a diferentes mecanismos resistentes: arco, viga, losa, etc.. Las soluciones coinciden en cierta medida con las expuestas en el apartado anterior de refuerzo de puente existente, pero en este caso las necesidades se ven fuertemente ampliadas al ser mucho mayor el nivel que cargas que se movilizan, y se tramiten a la cimentación como consecuencia de esa mayor anchura. Es rara la vez que se pueda dar respuesta exclusivamente con las bóvedas de sillería, y lo más frecuentemente es que sea necesario acudir a soluciones de refuerzo de bóvedas y cimentación con nuevos materiales.



*Figura 9: Pte. de Castrillo de la Reina  
(río Arlanza)*

La solución de ampliación con tableros volados admite a su vez variantes muy diversas. Una empleada con frecuencia es la de volar vigas que se apoyan entre tajamar y tajamar. Generalmente esta solución se ha realizado en épocas con menor sensibilidad sobre el acabado estético de la obra, priorizando conceptos de economía y soluciones de menor plazo. Esta solución puede ser ejecutable tanto con hormigón armado, pretensado o vigas de acero.

## **5.- Conclusiones.**

La intervención en puentes antiguos para dar respuesta a nuevas necesidades de geometría y de nivel de cargas es cada vez más frecuente. En este tipo de intervenciones es necesario contrapesar una serie de decisiones sobre soluciones técnicas avanzadas, con sus diferentes implicaciones de costes y plazos, y una adecuada sensibilidad sobre las morfologías clásicas fuertemente arraigadas en el entorno de ubicación de estos puentes. Los costes de intervención para la adaptación de estos puentes a las nuevas situaciones suelen ser competitivos frente a soluciones de renovación completa.

## **6.- Bibliografía.**

- (1) ARCH BRIDGES. Proceedings of the First International Conference on Arch Bridges Editorial Tomas Telford (1995)
- (2) ALZOLA MINONDO, P. Historia de las obras públicas en España. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (1979)
- (3) AÑORBE URMENETA, MÓNICA. VALORACION DEL DETERIORO Y CONSERVACION DE LA PIEDRA MONUMENTAL. CEDEX (1997)
- (4) ARENAS DE PABLO, J. J. Caminos en el aire. Los puentes. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2002)
- (5) COOK, M. Medieval bridges. Shire publications, ltd., (1988)
- (6) HENDRY, ARNOL W. STRUCTURAL MASONRY (1998)

- (7) HEYMAN, JACQUES. EL ESQUELETO DE PIEDRA. CEHOPU (1999)
- (8) HEYMAN JACQUES, TEORIA, HISTORIA Y RESTAURACION DE ESTRUCTURAS DE FABRICA.. CEHOPU (1999)
- (9) HUERTA, S. Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Madrid: Instituto Juan de Herrera (2004)
- (10) RUIZ DE ARCAUTE, A. Juan de Herrera. Madrid: Instituto Juan de Herrera, (1997)
- (11) STRUCTURAL ANALYSIS OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS (I). Centro Internacional de Métodos Numéricos (1997)



## **Strengthening solutions applied to stone masonry walls: TRM technology**

José T. San-José<sup>1</sup> ([tomas@labein.es](mailto:tomas@labein.es)); Jesús Díez<sup>1</sup> ([diez@labein.es](mailto:diez@labein.es))

Ignacio Marcos<sup>1</sup> ([marcos@labein.es](mailto:marcos@labein.es)); Tareq El Hadid<sup>2</sup>

Rosa San Mateos<sup>1</sup> ([rosas@labein.es](mailto:rosas@labein.es)); David García<sup>1</sup> ([dgarcia@labein.es](mailto:dgarcia@labein.es))

<sup>1</sup> *Labein-tecnalia*

<sup>2</sup> *Building Research Center/Royal Scientific Society, Jordan*

### **ABSTRACT**

Strengthening of concrete structures with externally bonded Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites has become increasingly popular (1) in the construction industry, and impressive applications are documented in the literature.

Based on the several R&D programs running in EU (6th Framework), FRP composites seem to be a promising solution for strengthening heritage structures made from different materials (masonry, adobe bricks, timber, etc.) as they are reversible systems (2), requiring minimum intervention in the monument, flexible to be applied in a wide range of structural elements and shapes, providing clean, safe and cost effective restoration solutions. However, these systems that are currently designed and used for civil works, required further development and research as per the following aspects have not been solved until now:

- The available FRP laminates do not fit cultural heritage requirements. Organic resins used as matrix to encapsulate and bind the fibers to produce the laminates, and to bond the FRP laminates to the heritage substrate are incompatible with the existing heritage materials, also they are vulnerable to high temperatures and humidity. Moreover, the linear profiles of the available FRP laminates are not enough adaptable to specific shapes of the monumental geometries, such as curves in arches, domes, vaults and other structural components.
- The fixing and anchorage systems are of a very limited efficacy, as they are designed basically for concrete substrates, thus compromising the reliability of these systems applied to ancient decayed substrates of heritage structures. The actual anchorage systems in civil works imply high visual impacts by using bolted metallic plates, steel profiles around the edges, high anchorage lengths affecting annexed elements, etc.

Consequently, new solutions have to be established for the heritage structures by combining these rethought multidirectional FRP and light additional fixing systems to the substrates, such as simple bolting, FRP mats, inorganic mortars, etc.

The main objective of this paper is to shed light on the actual status of the performance of the FRP systems used for strengthening decayed heritage structures, with particular concentration on the performance of the anchorage systems needed to enhance the strength of the bond between the externally applied FRP composites and the masonry substrate. In ancient structures, the anchorage problems are a key aspect because of the situation of the decayed substrates. To achieve the main objective of this paper, the following aspects are discussed hereunder:

- FRP opportunities in strengthening heritage buildings, focusing on the Spanish Romanesque constructions.
- New FRP materials and shapes, looking for a better accommodation to the different geometries and existent substrates.
- New anchorage systems for decayed masonry substrates.
- New strengthening strategies (3): Near Surface Mounted (NSM) and Textile Reinforced Mortar (TRM).

### **1.- FRP opportunities in stone masonry**

FRP composites (4) have demonstrated their applicability in the strengthening of concrete structures. They have been proven to notably increase the structural capacity against under different mechanical responses, such as bending, shear, compression (confinement), static and dynamic loading. The success of FRP composites has been possible due to their advantages versus metallic ones (5-8): lightness (minimum scaffolds, cranes, etc), easiness to transport and handle, highly durability, flexibility and availability in different formats.

On the other hand, out of the concrete structures refurbishment, FRP composites are not commonly used in strengthening historical buildings that consisted of decayed and sensitive substrates (poor mortars, light stones, adobe bricks, etc.). The available FRP composites that are designed and used for civil works do not fit cultural heritage requirements. This is due to the extensive use of epoxy materials either in the production of the composites or in bonding them to the substrates.

Epoxies are incompatible with the existing heritage materials, and vulnerable to severe environments, such as high temperatures and humidity. Moreover, the linear profiles of the available FRP composites (9), as shown in Figure 1, are not enough adaptable to specific shapes of the monumental geometries, such as curves in arches, domes, vaults and other structural components.



*GFRP formats*

*GFRP in porous substrates*

*Figure 1: Different formats of available composites*

However, there are some opportunities for introducing FRP technology in cultural heritage restoration. FRP composites usually designed for civil works require further R&D for being adjusted its involvement to heritage structures (lack of full-compatibility). The involvement of engineering aspects is not enough. Cultural and socio-economical issues should be undertaken such as key aspects in order to obtain the best integral solution for restoring works.

## **2.- Concept of the proposed solution**

Related to the FRP application to masonry structures, nowadays, there are in course multi-year development efforts regarding the ability of FRP composites to seismically retrofit lightly or un-reinforced masonry (URM) walls. The concept for strengthening is outlined in Figure 2.

---

<b><i>SUBSTRATE: Stone, adobe, bricks, etc.</i></b>
<b><i>FIXING: Adhesives &amp; Anchorage devices</i></b>
<b><i>FRP: Strengthening core (fibres)</i></b>
<b><i>MORTARS: Conditioning</i></b>

*Figure 2: Strengthening masonry concept with FRP*

The objective is to establish the adaptability of the FRP structural strengthening system of historical building by the design of an “open” and “fully compatible” solution. This shall consist of a reversible strengthening system specifically focused on historical buildings structures and based on singular components (strips, sheets, fabrics, bars, anchorages, adhesives, mortars), including:

1. The strengthening core: an open FRP laminates solution, related or not with commercial products, adaptable to strengthen different structural elements (vaults, aches, walls) and substrates (masonry, adobe bricks and timber).
2. Fixing system: based on modified mortars or/and in anchorage devices, in case of need.
3. Conditioning mortars: based on modified mortars, such as a compatible interface between the substrate and the FRP improving, besides, its aesthetic integration.

Therefore, R&D activities are needed in the sense of strongly improve the anchorage of the FRP to these ancient substrate materials. In terms of doing this, the authors are applying the above described strengthening system over a Romanesque masonry wall, as presented in Figure 3. It should be noted that the proposed solution could be applied by itself or jointly with other techniques of reinforcement, like sewing or injections, to guarantee the integrity of the wall.

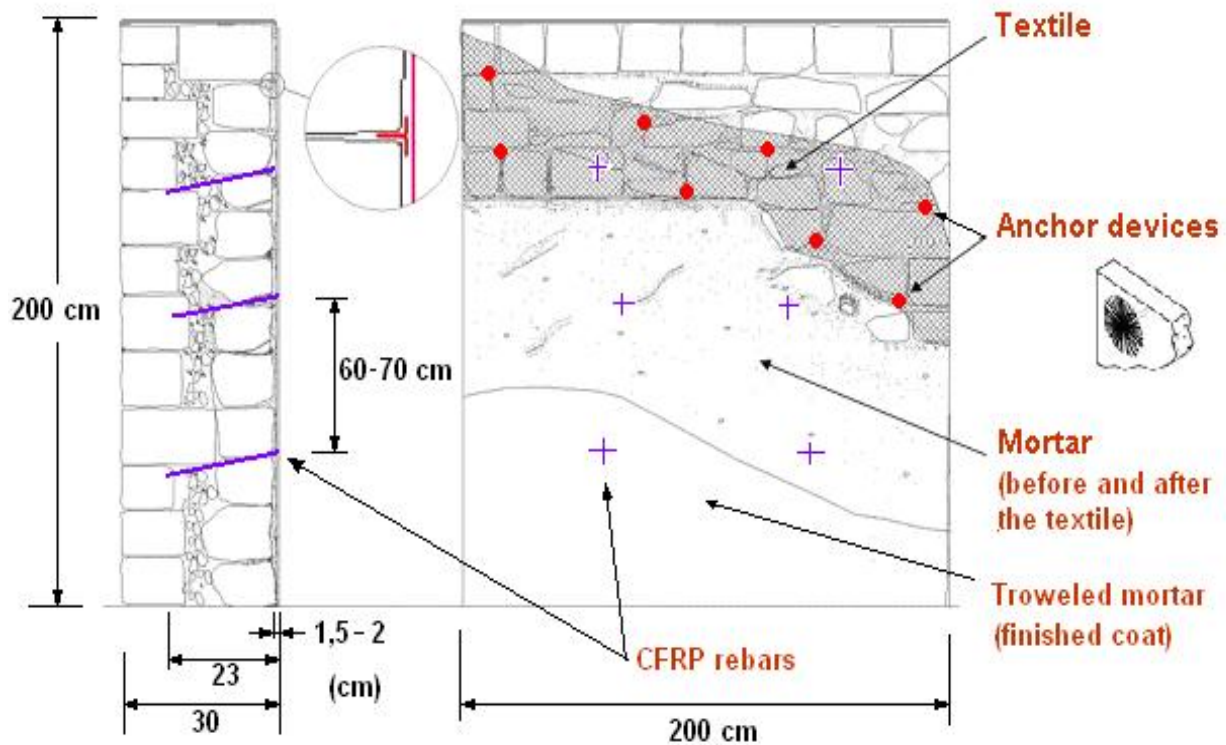


Figure 3: Masonry stone wall strengthened with FRP grid plus mortar

### 3.- Experimental program

The validation of the strengthening system is by carrying out a lab test campaign, by means of characterization of the materials (stone, mortar and FRP), the design of the better anchorage system and the construction, strengthening and testing (under static loads) of nine stone walls made at 1/3 scale.

#### 3.1.- Design of the strengthening core

One possible solution could be the substitution of organic binders with inorganic binders, leading to the replacement of traditional FRP solutions with a new structural material, namely textile reinforced mortar (TRM). From the results obtained in preliminary studies, it seems that TRM-based strengthening system is a promising solution for strengthening masonry structures. On the contrary to the reinforced concrete structures, in masonry application the TRM should be of lower strength. Hence, the use of fibres with lower properties than carbon or aramid (glass fibres, p.e.) could be adopted, as long as durability problems with alkaline environment will be solved.

There are many thousands of heritage buildings around the world and many of them in countries where the cost is of major importance for the governments to finance a heritage monuments restoring project. In a TRM system, mortar's cost is low compared to textile cost. For this reason, the carbon and aramid high cost fibres are not adequate.

#### 3.2.- Design of the anchorage

Two different types of anchor systems are being tested to assure the transmission of stress and deformation from the structure substrate to the reinforcement layer. For the first type, unidirectional glass and basalt fibres, as shown in Figure 4, were used as

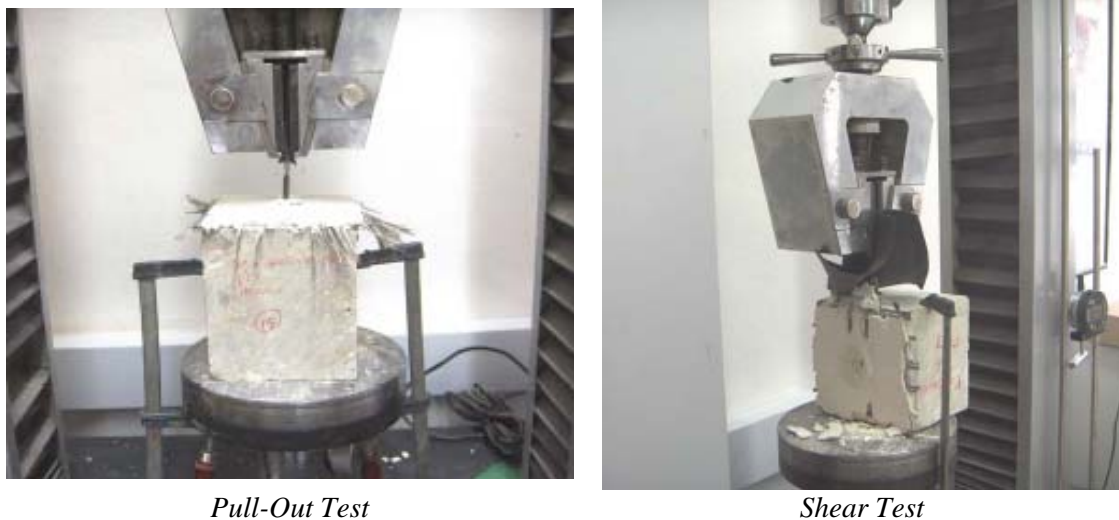
embedded anchors. Whereas, expansion insulation fastener, entirely made of plastic with a plastic expansion pin was used as mechanical anchor.



*Figure 4: Different types of anchors*

At a first stage, these anchorage systems were tested jointly with the TRM for the evaluation of bond strength by two different tests, pull-off test and shear test, using concrete cube specimens, such as reference material.

Before the pull-off testing, the free external fibres were combined together in a yarn form, which was saturated with an epoxy resin to form a plate as illustrated in Figure 4. Whereas, for the shear test, the free ends of the textile were enfolded with a piece of rubber, and then enclosed into the grips of the testing machine, as shown in Figure 5. Test results are presented in Tables 2 and 3.



*Figure 5: Testing the anchorage systems*

Generally, all pull-out tested specimens failed by rupture of the FRP anchors, the fibres of the anchors were severed, while the textile and the adhesive joints still intact with the concrete substrate. Concerning shear test, specimens failed by fracture of the adhesive joint at different load levels, or rupture of the FRP textiles. On the contrary, no failure was observed in any of the anchorage systems employed, FRP anchors or the mechanical anchors.

The following step will be the validation and adaptation of these proposed anchorage systems with decayed substrates, usually low strength mortars.

Adhesive	Average Failure Load (N)		
	Glass FRP Anchor	Basalt FRP Anchor	Hilti anchor (in course)
2C-A	*1050	1130	n.a
3C-D	1137.5	1310	n.a.
PL1	1200	1400	n.a
PL2	1375	1578.5	n.a

Table I: Failure loads in Pull-off test

Adhesive	Average Failure Load (N)		
	Glass FRP Anchor	Basalt FRP Anchor	Hilti anchor
2C-A	1121	1175	1182.2
3C-D	1318	1330	1575
PL1	1791	1920	2265
PL2	1995	2110	2325.3
Tyfo RC Matrix 1.1	2340	2315	2450

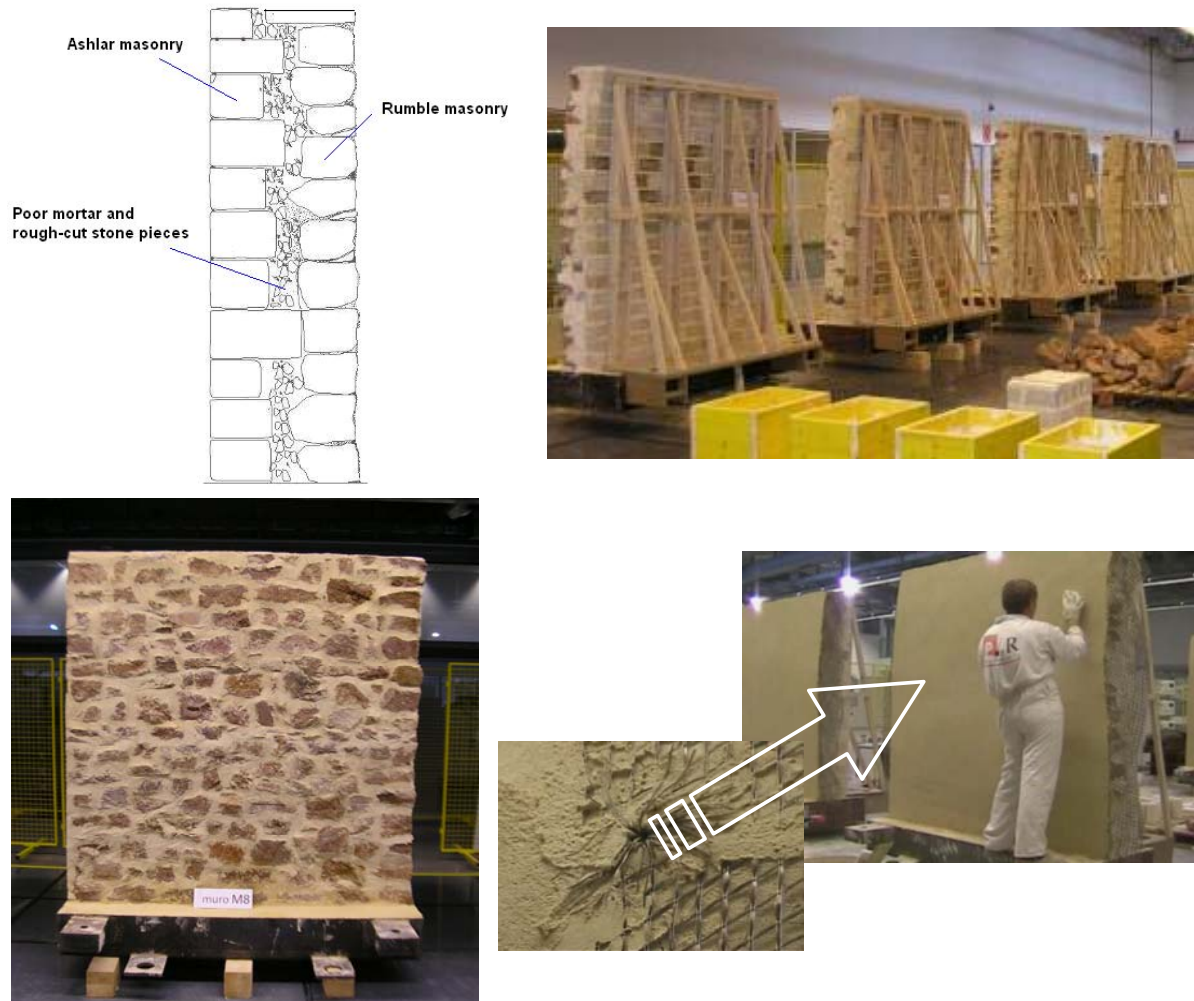
Table II: Average failure loads in shear test

### 3.3.- Selection of the mortar(s)

In the specific Spanish scenario, a mortar layer with a GFRP mesh is being used in some interventions in Romanesque churches and other historical buildings. The original task of the GFRP mesh was to prevent the cracking in the applied mortar. A validation of the compatibility between mortar and FRP textile will be done, under the requirements of tensile and flexural loading and accelerated weathering (wetting-drying and freeze-thaw cycles).

### 3.4.- Construction and TRM strengthening of the wall lab structures

Wall specimens of (200 x 200 x 30) cm dimensions as shown in Figure 6 were erected with the same configuration of the Spanish Romanesque original ones. They are intentionally deflected, a common structural damage in these elements, and they are three-leaf masonry walls with an inner core made of low quality mortar and rough-cut sandstone pieces (remains from rough-shaping of the stones), poured between the two external layers.



*Fig. 6. Wall structures under erection and TRM strengthening*

#### **4.- CONCLUSIONS**

The following conclusions are stated from the described works:

1. The FRP, in its different formats (strips, rods, sheets, textiles or grids), may be a reasonable solution for the reinforcement of masonry structures. However, actual trends are focused in a more compatible technique named such as Textile Reinforced Mortar (TRM).
2. In order to design the anchorage solution, it is necessary to consider the substrate material nature, its conservation status, the load history and the aesthetic requirements.
3. By the application of TRM solution, Reinforced elements can be obtained without increasing significantly the original weight, and even without modifying their external appearance.
4. The strengthening intervention could be done while the structure is in service.

#### **5.- ACKNOWLEDGEMENTS**

This R&D programme is being financed by EU Commission through the Operha 517765 contract and the Basque Government through the SISMU contract.

## **6.- REFERENCES**

- (1) Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, et al, “Fiber-Reinforced Polymer Composites For Construction – State-Of-The-Art Review”. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 2–73. (2002).
- (2) CEB-FIP “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures”. July 2001.
- (3) CAN/CSA-S806-02. “Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers”. A National Standard of Canada. May 2004.
- (4) ACI Committee 440. “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”. ACI 440.2R-02. 2002.
- (5) Micelli, F., Annaiah, R.H. and Nanni, A., “Strengthening of Short Shear Span Reinforced Concrete T Joists with Fiber-Reinforced Plastic Composites” *Journal of Composites for Construction*. Vol 6, N° 4, pp. 264-271. November 2002.
- (6) Monti, G. and Santini, S., “Reliability-Based Calibration of Partial Safety Coefficients for Fiber-Reinforced Plastic” *Journal of Composites for Construction* Vol 6, N° 3. Page 162-167. August 2002.
- (7) Pellegrino, C. and Modena, C., “Fiber Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Transverse Steel Reinforcement” *Journal of Composites for Construction* Vol 6 N° 2 Page 104-111 May 2002.
- (8) Triantafillou, T.C. “Seismic Retrofitting of Structures Using FRPs”. *Progress in structural Engineering and Materials*, 3 (1), 57-65. 2001.
- (9) San-José, J.T., Roca, P., Prendes, P., Mieres, J.M. y Garay, A., “Anchorage study of FRP strengthening systems applied to different substrates”. *Structural Faults & Repair – 2006*. 10th International Conference and Exhibition. ECS Publications. University of Edinburgh. London 2006



# **HISTORY, SCIENCE AND TECHNIQUE IN THE METHODOLOGICAL APPROACH TO THE RESTORATION PROJECT**

Giambattista De Tommasi<sup>1</sup> ([g.detommasi@poliba.it](mailto:g.detommasi@poliba.it)); Mariella De Fino<sup>2</sup> ([m.defino@poliba.it](mailto:m.defino@poliba.it))

<sup>1</sup> Full Professor, Department of Architecture and Town Planning, Polytechnic of Bari, Italy.

<sup>2</sup> PhD student, Department of Architecture and Town Planning, Polytechnic of Bari, Italy.

## **Abstract**

Restoration process of the historical heritage is based on a systematic scientific method that first concerns the knowledge as the basic issue to deal with in order to start up the project properly. Knowledge not only refers to the geometry and the dimension, but to all the historical, architectural, material, constructional and technical features of the monument, as well as to their evolution over the time. As a result, it involves methodological principles, scientific methods and technological tools, with a multidisciplinary integration of different skills and experiences.

An interesting case study, the Ducal Palace in Andria, Italy, is described, where all the issues concerning the knowledge, in terms of historical research, critical survey and diagnostic methods, have been involved.

## **1. Principles, methods and tools of knowledge**

Since the early theories on the restoration of the monumental heritage were elaborated, the importance of knowledge has been focused as the basic issue to deal with in order to start up the project according to a systematic method.

Viollet Le Duc, in the “Dictionnaire raisonné de l’architecture française du XIe au XVIe siècle”, term “Restoration”, underlined that when an architect works on a monument “...he has to behave like a skilled and wise surgeon, who operates on an organ only after acquiring a comprehensive knowledge of its function and after predicting all the present and future consequences from the operation. It’s better to abstain rather than to operate randomly. It’s better to let the patient die rather than to kill him”. Nevertheless, after few decades, Gustavo Giovannoni considered that “*Restoration phases are different. Each of them has to be carried out patiently: a very accurate survey and an analytic research with any sort of samples allow knowing exactly all the visible and hidden elements*”.

Although during the XIX century knowledge was basically focused on architectural and stylistic issues, afterwards it was clearly stated that it is a comprehensive process that aims at studying also all the material, constructional, technical and technological characteristics of the monument. According to our philosophy and method in this field, it should refer to a system of information and data concerning:

- History, related to the original project and realization, as well as to all the transformations, constructions and demolitions, replacement of materials and components, past damages and restorations.
- Architectural elements as artistic and testimonial values.
- Materials, in terms of actual properties and decay processes.
- Techniques, referred to constructional solutions, connections of different elements, defects and anomalies produced over the time.
- Functional destinations and utilizations over the centuries.

This complex knowledge definitely comes from the historical documents, namely parchments, charts, drawings, pictures, sketches gathered in archives and libraries.

But it also comes from the monument, as it generally preserves some traces of previous events, where past and present features interface. The monument, with every single stone that it is made out of, may provide with clear information and answers whoever is able to investigate and detect relevant signs in its structure.

Nevertheless, this analysis of the building involves the integration of different skills and experiences that is one of the most fascinating and challenging characteristic of the knowledge. The traditional study method, referred to the survey of all the architectural, constructional and technical characteristics, as well as to the understating of their evolution process over the time, is enhanced by all the diagnosis and monitoring systems. Their development, due to relatively recent studies and experimentations, offers suitable and effective tools to achieve an in depth knowledge of the whole system. Nevertheless, their improvement and implementation are still challenging issues that the scientific community is dealing with, in terms of research of application areas, normalization of operational procedures and interpretation of results.

As it is widely known, with reference to the diagnostic methods, the restoration planner can apply to masonry structures several technologies, that can be destructive (drilling systems to gather information on properties of materials, as well as on configuration and state of conservation of constructional elements), semi-destructive (flat jack devices to measure in situ working and failure strains), non destructive (endoscopy for the visual inspection of inaccessible areas, thermography to detect architectural and constructional discontinuities, as well as damage and dampness patterns, sonic tests to detect unhomogeneities, cracks, voids and decay). Particularly, non destructive diagnostics is still an open research area for the qualification of masonries, that provides with comprehensive qualitative information on materials and constructional systems, state of conservation and transformations over the time, without any interference with the static conditions.

As far as the monitoring systems are concerned, both traditional and modern techniques are available and effective. Nevertheless, particularly in this case, development of new materials and technologies has completely changed the concept of structural monitoring. From the application on the structure of electrical and mechanical devices for a small area to monitor, scientific research and experimentation are going toward the integration into the structure of complex sensor network systems that are able to detect and record data continuously for multiple measurement points.

Particularly, fibre optic systems are one of the most attractive technologies in this field. They can detect strains, stresses, temperatures, vibrations, humidity and chemicals, by measuring how the properties of a light carried through the material change. They are small, light, immune to electric and magnetic fields and durable in harsh environmental conditions. For these reasons, they have been already used to monitor civil infrastructures, for instance bridges, motorways and platforms, but they have some experimental applications to historical buildings, as well. Specifically, for historical buildings, fibres should be bonded on the surface of the traditional materials, as well as embedded in reinforced concrete and fibre reinforced elements during consolidation works. Some studies in progress in our research group are focused on the experimentation of bragg grating fibres, in order to asses their reliability when applied on existing materials. Some laboratory tests on a model brick wall under increasing loads have demonstrated that the strains measured by optic fibres are consistent with the results coming from traditional devices, namely strain gauges. The consistency between the data shows that this technology can be applied on the structures over their life cycle

under ordinary working conditions. Nevertheless, within the same researches, methodological guidelines and technical solutions are studied in order to integrate FOSs into masonry structures during repair and maintenance works, with particular attention to the conservation of the architectural, constructional and functional features of the buildings. In fact, as a wide range of strategies to improve and upgrade the mechanical behaviour of masonry elements is based on reinforced cement injections, reinforced concrete slabs and carbon/glass fibre composites, the transfer of experimental results achieved in other fields for reinforced concrete and composite structures, as well as for steel elements, could be transferred to restoration and conservation technical solutions.

Regardless of the specific characteristics of the diagnostic and monitoring techniques, they all have to be planned as elements of a network system in order to get the expected results with the most suitable combination of resources, time and money.

Moreover, they all have to be planned with a constant correlation with all the information coming from the historical research and the architectural, constructional and technical analysis of the monument in order to get effective and useful results for a comprehensive and critical knowledge. In that sense, they are tools to support and validate hypothesis that have previously formulated.

## **2. A case study: the Ducal Palace in Andria, Italy.**

All the issues concerning the knowledge of a monument, namely historical research, critical survey and diagnostic testing, have been involved in a preliminary study for the restoration of the Ducal Palace in Andria, Italy (Fig.1).



Fig.1

The whole project was carried out by the students and the teaching staff of the PhD Programme in Building Engineering, in the Department of Architecture and Town Planning at the Polytechnic of Bari.

The Ducal Palace in Andria was built about in 1308 by Bertrando Del Balzo, for his wedding with Beatrice d'Angiò, daughter of Charles 2<sup>nd</sup> d'Angio'. Somebody supposes that the palace was built on a former fortified structure. Nevertheless, until now, despite

some romantic reconstructions, no scientific documents or traces were found to support that hypothesis.

As far as the history is concerned, the first interesting and relevant document is the canvas of “Redentore Benedicente” (fig.2) that is kept in the Cathedral of Andria, built close to the Palace. Even if it is deeply damaged, it allows understanding that the original military building was already modified in the 16<sup>th</sup> century, when the dukedom of Andria went to the Carafa Family, who used it until the beginning of the 19<sup>th</sup> century.

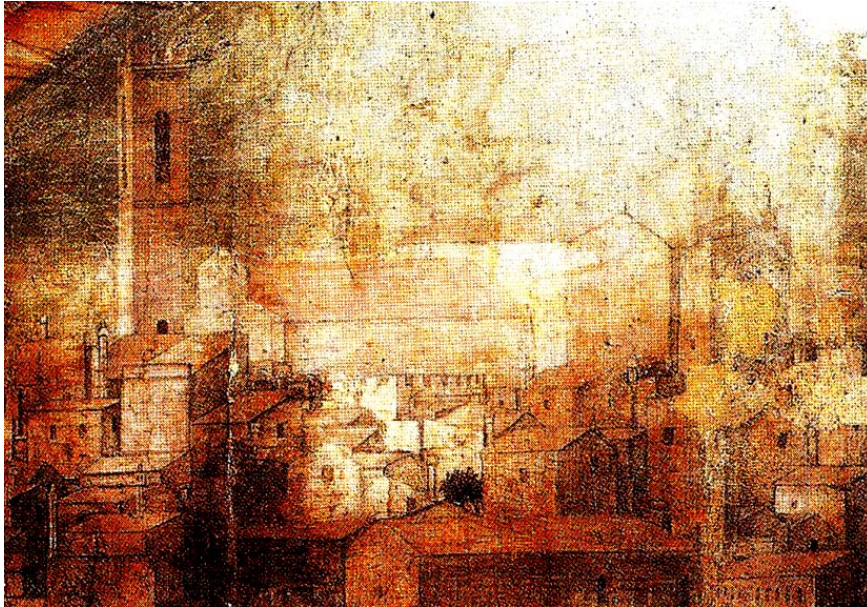


Fig.2

Clearer is the picture by Pacichelli of the 18<sup>th</sup> century (Fig.3), where the palace has already lost any military appearance.

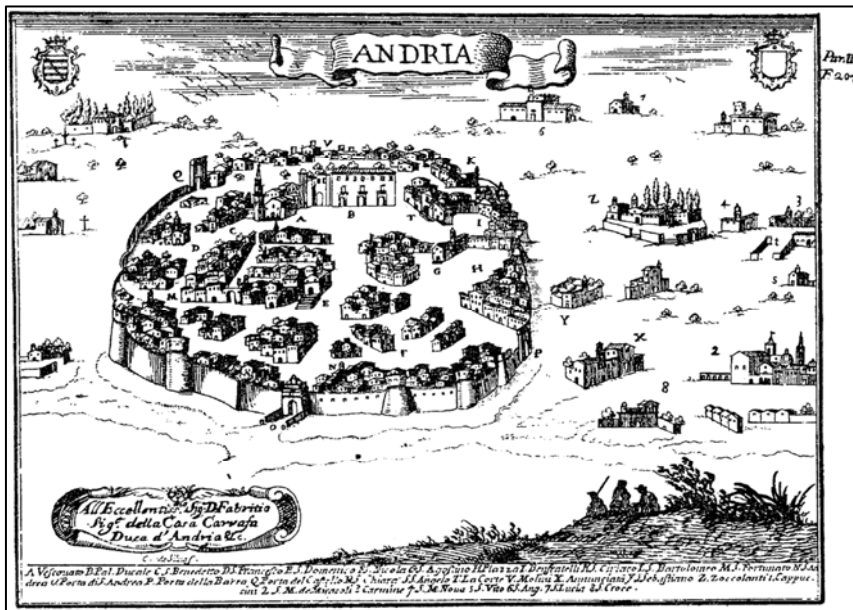


Fig.3

A significant historical document has been found in the National Archive in Naples. It is a report by the architect Mastropasqua who estimated the building in 1847. The report describes in detail the palace at the beginning of the 19<sup>th</sup> century. According to the document, the building had a great hall at the first floor from the original construction. The hall was 11 x 25 metres square and it showed serious static problems because the main façade was rotating. Obsolescence and missed maintenance probably made worse the problems connected to the constructional characters. In fact, the very long hall showed no transversal connections and very weak connections on the top, because the wooden truss beams were just leant on.

The problem was correctly solved by the Spagnoletti-Zeuli family who bought the palace in 1860. During some reconstruction works, realized to make the building more comfortable and suitable for a modern lifestyle, a balcony was built on the main façade, as a buttress to avoid the rotation. In plan, the hall was divided into different smaller state halls with a long corridor (Fig.4), according to the modern functional schemes in the 19<sup>th</sup> century.



Fig.4

The height was reduced, as well. Two floors were built, instead of the previous single one (Fig.5). These works probably took place in different stages, from 1860, when the palace went to Spagnoletti-Zeuli family, until 1901. Particularly, the date when the works were concluded is reported on an epigraph on the entrance door at the noble floor.

These works definitely enhanced the structural continuity of the building. Nevertheless, the construction of the vaults increased the drifts on the façade that at the moment, after two centuries, is still interested by a primary rotation, as the actual survey clearly shows.

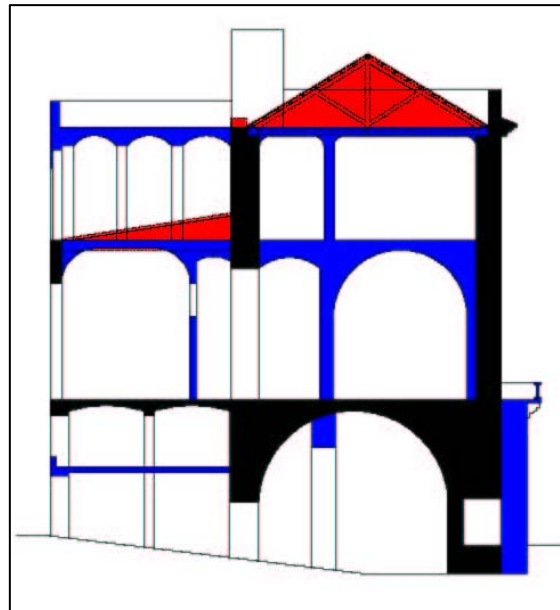


Fig.5

Further information about the static problems of the palace comes from the critical analysis of the monument that was carried out in correlation with the historical research, by the survey, room by room, of the architectural and constructional features, as well as of the pathologies and the state of conservation of materials and elements (Fig.6).

SCHEDA DI SOPRALLUOGO				29	
SCHEDA n.		DATA		P	
29		30/06/06		7	
PIANO		VANO			
P		7			
FOTO 1:		FOTO 2:		NOTE:	
				P25 PESSAGGI/CHIEVI UNO/UNA CARTELLA UNO/UNA INTONACO UNO/UNA... RASCHIATURA	
LATO N	LATO E	CALPESTIO			
LATO S	LATO W	COPERTURA			
MURATURE		MURATURE			
CORPO UNICO		CORPO UNICO		<input checked="" type="checkbox"/> non presenta un rischio trasversale <input checked="" type="checkbox"/> per ambiente a rischio trasversale <input checked="" type="checkbox"/> con rischio trasversale	
CORPO MULTIPLO		CORPO MULTIPLO		<input checked="" type="checkbox"/> con decorazioni <input checked="" type="checkbox"/> intagliate <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
INTONACO		INTONACO		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> da ripulire <input checked="" type="checkbox"/> degradato <input checked="" type="checkbox"/> affessato <input checked="" type="checkbox"/> superficie scolorite <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
CARTA DIPINTA		CARTA DIPINTA		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> presenza di fuochi <input checked="" type="checkbox"/> deteriorata da acqua o altro <input checked="" type="checkbox"/> presenza di macchie <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
INTONACO DIPINTO A OLIO		INTONACO DIPINTO A OLIO		<input checked="" type="checkbox"/> presenza di scoloriture <input checked="" type="checkbox"/> degradato: F.E. SOLLICITATO <input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione	
A VISTA		A VISTA		<input checked="" type="checkbox"/> in parte o non leggibile <input checked="" type="checkbox"/> in parte	
A RUSTICO		A RUSTICO		<input checked="" type="checkbox"/> presenza di parti <input checked="" type="checkbox"/> in parte	
CONSOLIDATA		CONSOLIDATA		<input checked="" type="checkbox"/> non consolidata <input checked="" type="checkbox"/> con consolidazione	
NON CONSOLIDATA		NON CONSOLIDATA		<input checked="" type="checkbox"/> non consolidata <input checked="" type="checkbox"/> con consolidazione	
VOLTA		VOLTA		<input checked="" type="checkbox"/> a tutto <input checked="" type="checkbox"/> a tutto con testate e diagonali <input checked="" type="checkbox"/> a tutto <input checked="" type="checkbox"/> a tutto <input checked="" type="checkbox"/> a tutto <input checked="" type="checkbox"/> a tutto	
PIANA		PIANA		<input checked="" type="checkbox"/> in parte <input checked="" type="checkbox"/> in parte <input checked="" type="checkbox"/> in parte <input checked="" type="checkbox"/> in parte <input checked="" type="checkbox"/> in parte	
BASOLE CALCEE		BASOLE CALCEE		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> presenza di fuochi <input checked="" type="checkbox"/> presenza di spaccature <input checked="" type="checkbox"/> presenza di macchie <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
COTTO DIPINTO		COTTO DIPINTO		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> presenza di fuochi <input checked="" type="checkbox"/> presenza di spaccature <input checked="" type="checkbox"/> presenza di macchie <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
CERAMICA		CERAMICA		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> presenza di fuochi <input checked="" type="checkbox"/> presenza di spaccature <input checked="" type="checkbox"/> presenza di macchie <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
PARQUET		PARQUET		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> presenza di fuochi <input checked="" type="checkbox"/> presenza di spaccature <input checked="" type="checkbox"/> presenza di macchie <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
BATTUTO DI CEMENTO		BATTUTO DI CEMENTO		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> presenza di fuochi <input checked="" type="checkbox"/> presenza di spaccature <input checked="" type="checkbox"/> presenza di macchie <input checked="" type="checkbox"/> altri...	
RUSTICO		RUSTICO		<input checked="" type="checkbox"/> in buono stato di conservazione <input checked="" type="checkbox"/> presenza di fuochi <input checked="" type="checkbox"/> presenza di spaccature <input checked="" type="checkbox"/> presenza di macchie <input checked="" type="checkbox"/> altri...	

Fig.6

From the comprehensive survey, new remarks were possible. For instance, some anomalous structures were noticed at the ground floor. The rectangular central construction actually shows too thick walls (Fig.7), so that some destructive tests to get some samples have been planned in order to investigate in depth this aspect. Beyond some information on the materials and the techniques, the drilling tests should show the presence of different layers, just placed side by side, rather than a single wall.

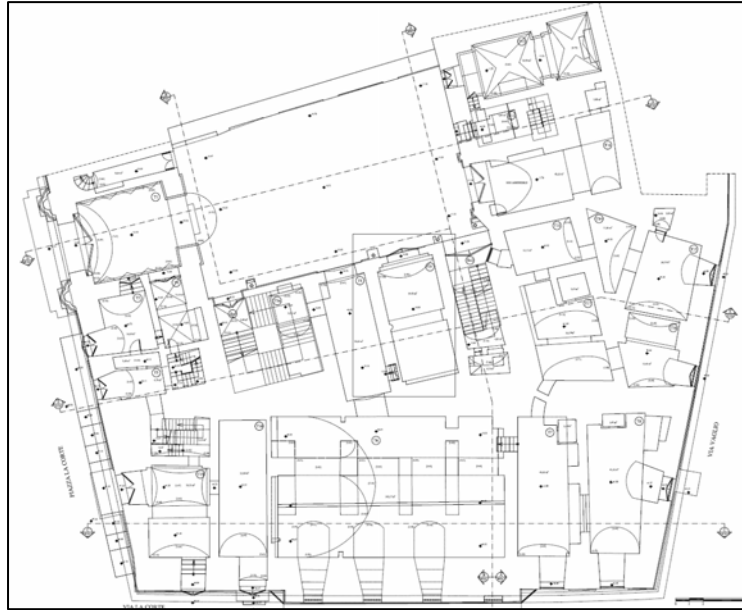


Fig.7

As far as non destructive tests are concerned, endoscopy was successfully carried out in order to locate all the pipes for the rainwater collection, carriage and storage, as well as to detect, to access and to survey some cisterns, still working (Fig.8).

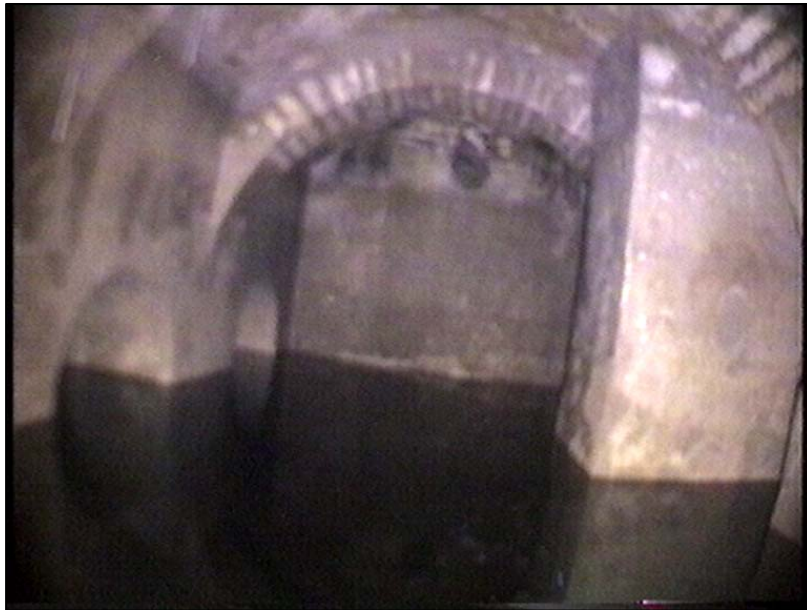


Fig.8

Particularly, the discover of a big underground room, about 12 metres deep, at the bottom of a well, covered by a trapdoor, was particularly interesting (Fig.9). The room is about 3.8 metres high. It has an L shape. It is completely excavated in the rock. The walls are covered by render for 1.5 metres from the bottom. Probably, it was used as a storage room. It is connected with the ground floor by a staircase that was unknown before the inspection. The entrance of the staircase, with a first ramp of 41

stairs and a perpendicular one, with 18 stairs, was found under a false floor in a room next to the one where the trapdoor is.



Fig.9

A prominent issue concerning this palace is referred to the decorations, also realized in 1901, during the described works. The valuable temperas in the building are one of the earliest and widest examples of liberty style on the territory. All the first floor and some halls at the mezzanine are decorated by temperas on paper (Fig.10).



Fig.10

The decoration is realized with white paper sheets, 50 x 50 centimetres, glued to the finished plaster. On these sheets, the artist created the floral decoration, also by



very sophisticated and complex method to protect the fragile temperas from the contact with the plaster that is generally vulnerable to dangerous dust and humidity.

These decorations have been investigated in depth by non destructive tests, in order to assess the characteristics of the masonry, the homogeneity of materials and constructional features, as well as the presence of hidden elements.

Thermograph techniques have been widely employed, even if the results are uncertain (fig.11). As the temperas are on the internal walls, an artificial heating was produced by infrared lamps to increase the emissive power of the wall. Nevertheless, since no specific information about the paper and the glue were available when the tests were carried out, the temperature range was limited in order to avoid any damage on the decorations. As a consequence, the sensitivity and the effectiveness of the tests were affected. Basically, the tests have just showed that there aren't macroscopic anomalies. By the way, further tests will be necessary.

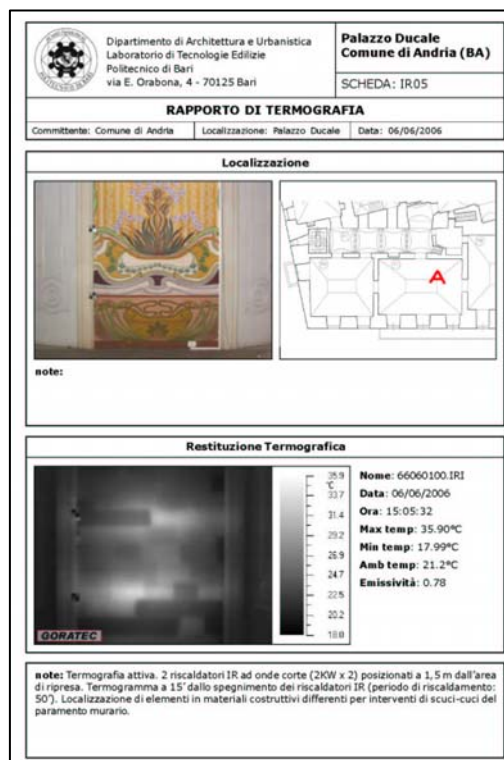


Fig.11

Then, further tests were referred to the characteristics and the state of conservation of paper and glue by some specialists. The “Centro di Fotoriproduzione, Legatoria e Restauro degli Archivi di Stato” in Rome has analysed some samples in order to assess the properties of the fibre mixture and the adhesive employed to bond the paper on the wall. Specifically, the microscope analysis on the paper has shown that the support is mainly made up of conifer mechanical pulp, with some traces of conifer chemical pulp, hemp and/or flax. Chemical and infrared spectrophotometer tests on the adhesive have detected the presence of starch.

The state of conservation was assessed by some restorers specialized in temperas and wall paintings. The studies have confirmed that, regardless the building has not been used for a long time, the decorations show a relatively good state of conservation. Paper detachment and adhesive impoverishment in some areas have been caused by seepage. Support biodeterioration and laceration are also quite common. Nevertheless, all the

decorations can be completely recovered by specific restoration works. Particularly, some analysis have showed that in all the decorated halls there is a one metre high base band, realized with oil colours applied on the wall. The wainscot is now covered by some varnishes that are easily removable (Fig.12).



Fig.12

These investigations have also demonstrated that it is possible to detach the paper sheets from the wall, in order to carry on the restoration works, and then to re-bond them. This information is prominent for the restoration project, as reinforcement works on the wall will be more suitable and less intrusive just where the damaged paper will be detached, before bonding the restored one. Nevertheless, these reinforcement works will be necessary to avoid the rotation of the main façades and to improve the seismic resistance of the building.

A similar issue concerns the floors. They are tiled floors with hand made decorations made by oil paintings. Only the tiles on the perimeter are not decorated. There is border band, 60 centimetres thick, without decorations all around the floor (Fig.13).



Fig.13

There, the tiles can be removed, and replaced afterwards, in order to place some steel ties that will connect the rotating facades from one side to the other one, as well as to place all the pipes of the plant system.

As far as the plant systems are concerned, the subject is quite wide and complex. Nevertheless, a strong collaboration between different people involved in this study was necessary in order to find technological solutions that were consistent with the architectural system. From the general point of view, any slot on the masonry walls will be avoided. All the plant systems will be placed along horizontal planes. They will be just arranged into suitable vertical carriers that will run between the floors and will be not connected with the masonry structures. The vertical carriers could be technological totems. Nevertheless, further investigations have been already planned to assess the energetic and thermal performances, as well as the actual requirements of the building, also considering the future functional destination as offices and state halls for the prefecture of the new province Andria, Barletta, Trani in Puglia.

These investigations, with the results from some drilling tests and the information from the active thermography on the temperatures that was limited by safety reasons, will provide with all the missing information to carry out the definitive project.

### **3. References.**

- (1) Archivio di Stato di Bari, Sezione Archivi Privati, Archivio privato della famiglia Caracciolo-Carafa.
- (2) Archivio di Stato di Bari, Descrizione dei Beni Burgensatici del Barone, Catasto Onciario, fasc. 11.
- (3) Archivio di Stato di Bari, Sezione di Trani, Tribunale Civile e Penale di Trani, sezione espropri, fasc. 73345.
- (4) Archivio di Stato di Bari, Archivio della Soprintendenza: fascicoli 170/171 di Andria.
- (5) Archivio di Stato di Bari, Sezione di Barletta, Catasto storico di Andria, 1870
- (6) Archivio di Stato di Bari, Sezione di Trani, Tribunale Civile e Penale di Trani, Perizie: vol. 26/1844, vol. 60/1846, vol.63/1847 (perizia n.17).
- (7) Archivio di Stato di Napoli, Sezione Tribunale Civile di Napoli, Esproprio n. 921 bis del 18 febbraio 1820
- (8) Archivio di Stato di Napoli, Sezione archivio privato dei Carafa d'Andria. Lettera del Duca di Andria Francesco Carafa di Napoli alla Sua Real Maestà del 20 gennaio 1822.
- (9) Archivio Notarile di Napoli, Atto di vendita del Ducato di Andria, prot. Del Not. G.N. Iuglietti 1552-53 F. 182-183.
- (10) Archivio Comunale di Andria, deliberazione consiliare, fascicoli patrimoni e redditi patrimoniali n° 27.
- (11) Affatato, E. , Ricostruzione verosimile del Castello Medievale in Andria, studio inedito dell'artista Ernesto Affatato, Cartelle del Ceci, Biblioteca Comunale di Andria, 1909.
- (12) R. D'Urso, Storia della città di Andria, dalla sua origine al corrente anno 1841, Atesa editrice della tipografia urbana, Napoli, 1842.
- (13) G. M. Roberto, Palazzo Ducale di Andria, CRSEI – Centro Regionale Servizi Educativi e Culturali, Andria, 2001.
- (14) G. Pacichelli, Il regno di Napoli in prospettiva (parti I-II-III), Stamperia di Michele Luigi Mutio, Napoli, 1702.
- (15) P. Petrarolo, Andria dalle origini ai tempi nostri, Ed. Sveva, Andria 1992.
- (16) R.O. Spagnoletti, Opuscoli andriesi, fasc. 1-7, Andria 1915

- (17) R.O. Spagnoletti, *Studi di storia Andriese: 1552-1799*, Martina Franca 1913.
- (18) R..O. Spagnoletti, *Gli andriese illustri*, Ed. Vecchi, Trani 1891.
- (19) AA.VV. “Manuale del Restauro architettonico”, Roma, Mancosu Editore, 2001
- (20) AA.VV. “Trattato sul consolidamento”, Roma, Mancosu Editore, 2003
- (21) Carbonara G., “Trattato di restauro architettonico”, Torino, ed. U.T.E.T., 1996
- (22) Cigni G., “Il consolidamento murario”, Roma, ed. KAPPA, 1978
- (23) Rocchi G., “Istituzioni di restauro dei beni architettonici e ambientali”, Milano, Hoepli, 1990
- (24) Tinè S., “La pratica del restauro”, Milano, ed.BE.MA., 1988

## LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE DEL INFANTADO DE POTES

Javier de la Rosa<sup>1,2</sup> ([a1.arquitectos@coacan.es](mailto:a1.arquitectos@coacan.es))

<sup>1</sup> Arquitecto.

<sup>2</sup> Estudio de Arquitectura AI.

### Antecedentes

En Octubre de 1999, el Ayuntamiento de Potes saca a concurso de ideas la Rehabilitación del edificio que lo alberga, la conocida como Torre del Infantado, por ser el Duque del mismo nombre, también conocido como Marqués de Santillana el que ordenó construirla, allá por el año 1432.

Desde entonces, el inmueble ha sufrido distintos usos e intervenciones, la más dramática de todas como consecuencia de la posguerra, cuando REGIONES DEVASTADAS, se encarga de “transformar” el edificio para adecuarlo al uso como Ayuntamiento, dotándolo de elementos acordes a la imagen preestablecida de consistorio, como son el balcón corrido, el reloj en fachada principal, la campana en lo alto, y los escudos así como otros retoques necesarios como son apertura de nuevas ventanas, la escalera señorial ó el patio de luces al que se vuelcan las distintas estancias.

A tal fin, no dudaron en rasgar grandes paños en el muro de piedra original, condenar troneras y mechinales ó descarnar la hoja interior del muro para meter a presión una escalera de acceso a todas las plantas.



Se añadió un zócalo de piedra en su entorno y una escalinata delantera para acceder a la renovada puerta principal, eliminando la antigua rampa de acceso.

Se renovó la estructura interior, originalmente de madera con otra de hormigón armado, de escasa calidad, dadas las circunstancias.

Como consecuencia de todas estas modificaciones y de las nuevas necesidades, el edificio se encontraba obsoleto, infrautilizado y afectado por un número importante de patologías que aconsejaban una intervención inmediata.

El concurso perseguía los objetivos de:

1. REESTRUCTURAR LA DISTRIBUCIÓN INTERIOR PARA DOTARLO DE ESPACIOS FLEXIBLES DE EXPOSICIÓN
2. MEJORAR LA ACCESIBILIDAD DEL EDIFICIO PÚBLICO
3. DOTARLO DE INSTALACIONES ADECUADAS AL USO
4. ADECUAR LA CUBIERTA PARA SU USO COMO MIRADOR

El proyecto trata de recuperar la actividad dentro y en el entorno del edificio, garantizando así su mantenimiento y conservación, devolviendo a la Torre el protagonismo que tuvo al albergar el nuevo foco cultural y de visita obligada en la Villa de Potes y Liébana en general.

### **El concurso**

La intervención propuesta por el equipo ganador considera la posibilidad de excavar un sótano por debajo de la actual planta baja, con el fin de posibilitar el acceso desde la



calle sin necesidad de subir la escalinata delantera. Se accederá a través de un vestíbulo de entrada, ubicado a los pies del muro Oeste, para después atravesarlo por una estrecha bóveda de cañón, que dará paso al primer espacio de exposición, cenitalmente iluminado por un lucernario abierto en el suelo del patio.

Desde aquí, se eleva una nueva crujía de servicios, pegada al muro norte, que alberga el ascensor panorámico, la escalera y los servicios y almacenes.

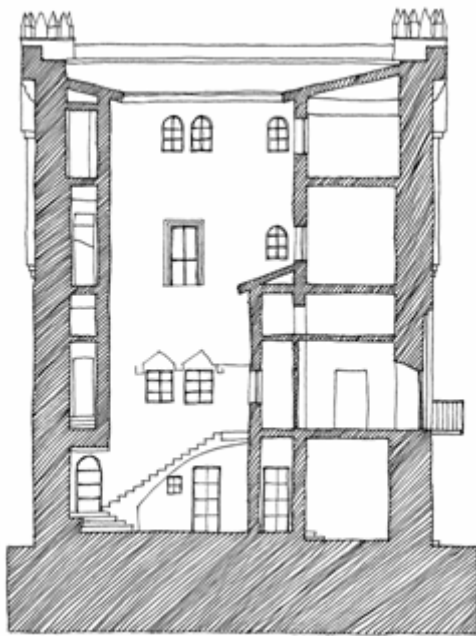
Desde este núcleo de servicio, volcado hacia el ampliado patio interior, se accede a las distintas salas desde pasarelas de vidrio que invaden el espacio del patio sin restarle luz y permitiendo una distribución distinta en cada planta.

El muro interior, que conforma el patio, es un muro técnico, compuesto por una piel de madera laminada y termoendurecida, con un despiece desconcertado que hace referencia al aparejo de los muros de mampostería. Su hueco interior permite la distribución de las complejas instalaciones necesarias para su uso actual y futuro, ya que

la piel interior, que conforma las paredes de las salas, es un panel de cartón yeso, fácilmente desmontable y renovable en caso de necesidad de nuevas redes.

Por último se propone convertir la cubierta existente de teja curva a cuatro aguas por una terraza transitable, que devuelva, a modo de cadalso medieval, la posibilidad al visitante de “vigilar” desde esa situación dominante y de privilegio feudal, la hermosa vista a los tejados del conjunto histórico de Potes, con los Picos de Europa como telón de fondo.

Para conseguirlo, se llevan hasta la cubierta el ascensor y la escalera, envueltos por un volumen de vidrio averdado que emerge del rotundo volumen de piedra, como único vestigio de la intervención.



SECCIÓN ESTADO INICIAL



SECCIÓN ESTADO REFORMADO

### La obra.

Para lograr los objetivos planteados, y una vez comprobada la escasa resistencia del hormigón de la estructura, se decide vaciar casi totalmente el interior de la Torre, y así poder acometer las obras de excavación del sótano con mayor seguridad. Durante la deconstrucción se desmonta, previa numeración, la piedra del patio interior, se desmontan de arriba hacia abajo vigas y pilares de hormigón y se refuerza la parte de

## LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE DEL INFANTADO DE POTES



estructura que se prevé conservar y que ayudará a atar los muros de piedra hasta que se ejecute la nueva estructura.

Durante estos trabajos ya se hacen patentes las distintas patologías que presenta el muro original, como son rozas de gran profundidad, lienzos descarnados, recompuestos con ladrillo hueco, etc. que nos obligan a acometer una labor de recomposición con material procedente de la propia obra.





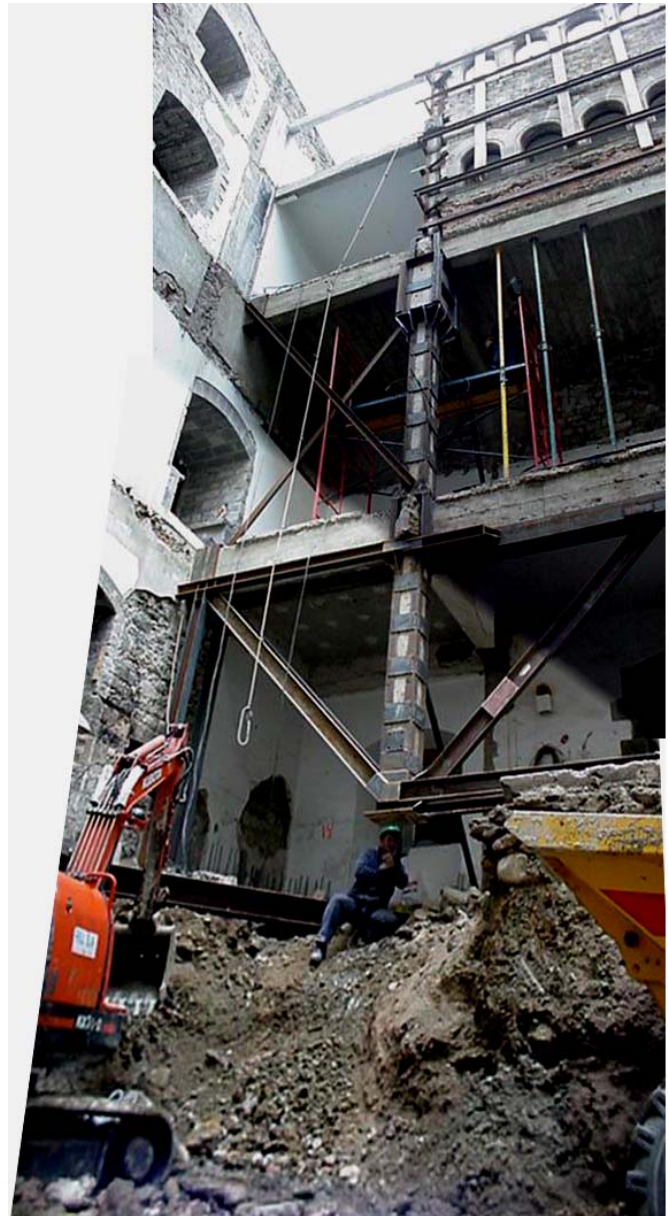
## LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE DEL INFANTADO DE POTES

Finalizado el refuerzo y atado de la estructura, se acometió la decisiva labor de excavación del sótano.

En primer lugar se excavó exteriormente, siempre por bataches, en la base de la fachada Oeste hasta encontrar el plomo del muro. Se ejecutaron los muros del vestíbulo de acceso.

Se picó el muro, en el punto escogido, donde se formó un arco de descarga, por debajo del cual se encofró y hormigonó la bóveda que servirá de acceso por debajo del grueso muro.

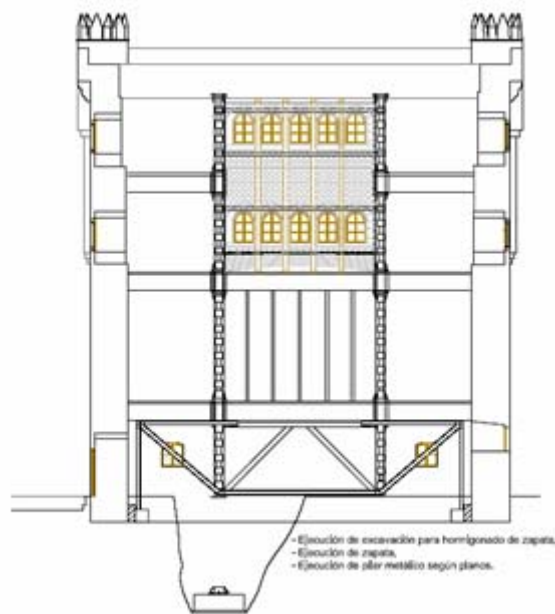
Una vez afianzado el apoyo, se introdujo una pala que poco a poco, arañando el castro, consigue entrar en el interior del edificio.



Una vez dentro, se fue ejecutando por bataches el muro del nuevo sótano, hasta completar todo el perímetro de la planta. El momento mas delicado se produce durante los trabajos por debajo de la estructura que se mantiene, para lo cual fue necesario su apeo provisional sobre una cercha metálica que permitió dejar los pilares en el aire en

## LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE DEL INFANTADO DE POTES

tiempo necesario para excavar por debajo de estos hasta alcanzar la nueva cota de cimentación, cimentar y levantar los pilares de sótano a planta baja.



Una vez logrado el apeo, se procedió a la elevación de la nueva estructura metálica, y sus correspondientes forjados que atan definitivamente los muros de piedra en cada planta, impidiendo que se abran.

Como dato curioso cabe mencionar que el sistema estructural se concibe como si fuera de madera, trabajando todos sus elementos simplemente apoyados unos sobre otros, de forma que nunca se transmitan momentos al muro centenario.

Siguiendo con el mismo criterio, los forjados son losas macizas vertidas sobre bandejas de acero corten que funcionan a modo de chapa colaborante y conforman el acabado definitivo de los techos de las salas.





En cuanto a los criterios estéticos de la intervención, se da especial importancia a la puesta en valor de los elementos originales del muro, por lo que se ha picado todo el revoco que los cubría para descubrir las historias que la piedra nos ha ido revelando.

Se han abierto escondidos mecinales por donde al parecer se arrojaban las aguas sucias, saeteras de marcado carácter defensivo, ó despieces de antiguos huecos injustamente condenados.

La piedra se ha limpiado mediante proyección de hielo seco de CO<sub>2</sub>, con el fin de eliminar la suciedad superficial sin deteriorarla, y se ha rejunteado para trabar las piezas y consolidar los paños.

Las zonas descarnadas, que dejaban el relleno de arcilla desprotegido, se han trasdosado con bloque de hormigón y rellenado los intersticios, con el fin de evitar que el lienzo se descalzara y acabara cayendo.

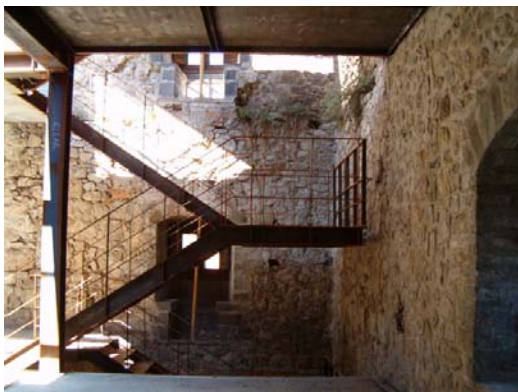
Las zonas descarnadas, que dejaban el relleno de arcilla desprotegido, se han trasdosado



con bloque de hormigón y rellenado los intersticios, con el fin de evitar que el lienzo se descalzara y acabara cayendo. En definitiva, cuando el estado del muro posibilita su recuperación, se deja visto, mientras que cuando se encuentra parcheado en exceso, mezclado con ladrillo ó descarnado, se interviene en su afianzamiento y se trasdosa con un revestimiento que se pinta en blanco y refuerza el contraste con la piedra.

El respeto al muro nos lleva al punto de evitar que la escalera, también fabricada en acero corten, toque las paredes, creando un interesante efecto de ingravidez.

## *LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE DEL INFANTADO DE POTES*



Madera y acero corten (oxidado) dominan en sus distintas combinaciones, como materiales atemporales, que dotan a la obra de carácter sobrio, no impuesto por las modas, que sin embargo contrasta con la manera de utilizar estos materiales.

El vidrio aporta levedad, luz, limpieza de formas, que tratan de conferir el aspecto más contemporáneo de la intervención.

## **Reparación de Una Fachada**

*Antonio Bolado Saturio<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Arquitecto Técnico*

<sup>2</sup> *Grupo Triguero*

### **1.- MEMORIA ARQUITECTÓNICA**

#### **1.1.- Obra que nos compete**

Reparación de fachada de la zona oeste que se une con la zona sur de 21 m de longitud, a la altura de cantos de forjado y otras zonas específicas, más adelante, de esta fachada.

#### **1.2.- Naturaleza de la obra**

El presente informe surge tras el inicio de la reforma de fachada por parte de la empresa Viviendas y Solares del Norte, S.L. en la cual detecta al picar las plaquetas de cantos de forjado que se habían picado con anterioridad sobre dichos cantos, por lo cual paran la actividad en dicha zona y la propiedad me solicita el informe que nos compete en este momento.

#### **1.3.- Propiedad, clase de promotor, situación.**

Propiedad: Comunidad de Propietarios de:XXX

Es un promotor particular colectivo.

El edificio se encuentra en la C/. XXX

#### **1.4.- Autor del informe**

El autor de este informe es D. Antonio Bolado Saturio adscrito al Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Cantabria con el número.

#### **1.5- Descripción de la fachada**

La fachada se encuentra al viento oeste del edificio afectando este informe únicamente a la parte de fachada que limita con la fachada sur, con un frente de 21 m de longitud por 5 plantas de altura en una zona y 7 en otra más una planta que queda por debajo de la rasante.



*Figura 1*



*Figura 2*

Es de medio pie de ladrillo caravista, sin aislamiento térmico visible y con una hoja interior de ladrillo hueco sencillo. Los cantos de forjado están enchapadas a sardinel en

el forjado inferior e imitación de medio pie con un enchapado en el resto de forjados. Existen partes de la fachada que se han desprendido por si solas.

### **1.6.- Patologías detectadas**

Según mi observación visual desde los andamios montados actualmente y desde el suelo, se ven fisuras en el ladrillo, provocadas a mi entender por dilataciones y por simple agrietamiento del material. Sin ver mayor riesgo que la entrada de posibles humedades (a la fecha ningún vecino se queja de ello) y el problema estético.



*Figuras 3 y 4: Grietas en ladrillo cara vista reparándose en estos momentos por la empresa constructora.*

También se detectan bastantes enchapados de cantos de forjado sueltos, posiblemente también por el movimiento de los forjados con la dilatación o por un mal recibido en su ejecución en algunas zonas. En otras veo también añadido el apoyo del peso de la fachada que provoca una carga vertical sobre la chapa en forma de “L” que hace reventar a estas últimas que en algunos sitios se han desprendido solas y en otras zonas se las ve abombadas y al golpearlas con el mango de una paleta suenan a huecas.



*Figuras 5 y 6: Enchapado en forma de “L” cortado por los albañiles donde se ve claramente que apoya el ladrillo caravista, también cortado, sobre ellas.*



Figura 7: Fisura longitudinal en la fachada aparentemente por mal apoyo de la hoja ayudada por las dilataciones



Figura 8: Parte baja de la foto anterior. Separación de las plaquetas del canto de forjado con desplazamiento vertical de la hoja superior.

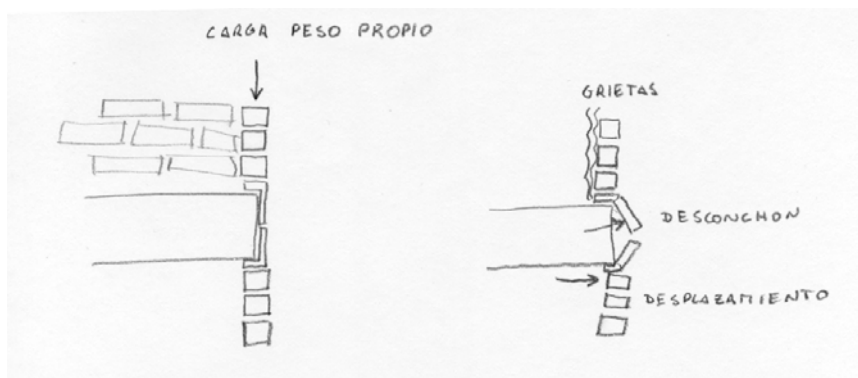


Figura 9: Dibujo explicativo de las posibles causas de la patología detectada.

La gravedad se acentúa en otro tipo de apoyos detectados del ladrillo caravista sobre el forjado sustentante, ya que como primera hilada colocaron un ladrillo hueco doble. Con la disminución de resistencia que esto supone, en la hilada que más carga recibe. Se han producido roturas de este ladrillo y desplazamiento de la hoja de caravista hacia abajo.

*Reparación de Una Fachada*



*Figura 10: Apoyo sobre ladrillo hueco doble*



*Figura 11: Ampliación de la foto anterior donde se ve el canto del forjado y el ladrillo hueco doble armado a tabicón.*



*Figuras 12 y 13: Vistas de la primera hilada armada con ladrillo hueco doble.*

Se ha detectado una hoja de 1,50x5,00 m que ya está totalmente desplazada con riesgo de caída en su totalidad. Se ha desplazado tanto en sentido vertical como en sentido horizontal.



*Figura 14: Pared desplazada.*

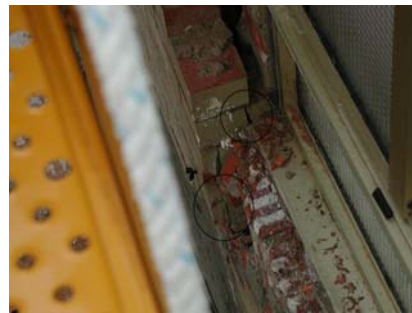


*Figura 15: Pared desplazada vista desde otro ángulo*





*Figura 16:  
Desplazamiento en  
horizontal peligroso*



*Figura 17: Cortes en los ladrillos  
provocados por el zizallamiento de  
la hoja en vertical.*

El problema mayor y por el cual la empresa constructora a detenido su trabajo en esta zona a sido al detectar el asiento de la fachada sobre una primera hilada de ladrillo hueco sencillo armado a medio pie. A su vez veo como después de fraguado el hormigón la constructora del edificio detecto que el forjado volaba demasiado y no se podía aplacar el canto de forjado para dar continuidad a la fachada de ladrillo caravista, adoptando la medida en ese momento de picar el forjado con un martillo compresor. Ahora se ve como afloran las armaduras que con el óxido estaban reventando todos los cantos de forjado que en su día se picaron. También se ve, con cierta dificultad por su altura, como el forjado hace ciertas ondas en su sentido horizontal no teniendo perfecta planeidad. Entiendo que para corregir esta falta de planeidad y para asentar mejor el ladrillo caravista, colocaron esta primera hilada de ladrillo hueco sencillo. Pues bien, esta primera hilada se está rompiendo por aplastamiento del resto de la fachada.



*Figura 18: Ladrillo hueco sencillo  
reventado, hierros del canto de forjado  
asomando, grietas en fachada y forjado  
claramente picado con martillo.*



*Figura 19: Hierros asomando en la  
misma zona que la foto anterior, se ve  
como buscaron conseguir mayor espesor  
picando el forjado para colocar con  
mortero el aplacado.*

### **1.7.- Programa de necesidades**

En el planteamiento del proyecto se ha pretendido llegar a una solución que conjugue los siguientes condicionantes:

La mayor adecuación posible al programa de necesidades planteado por la Propiedad, tanto en reparación de los problemas existentes de riesgo de desprendimientos, como en buscar la solución más económica.

Para ello estimo las medidas a seguir a mi entender para una solución a estas patologías:

1.- Para la patología descrita en las fotos 10 a 19 en las cuales se apoya la fachada sobre ladrillos huecos , tanto doble como sencillo y asoman las armaduras:

- Proteger y reforzar el canto de forjado y sus armaduras con un mortero cementoso monocomponente modificado con polímeros y fibras especial para reparaciones estructurales de hormigón tipo Renderoc SF o similar.
- Picar con sumo cuidado el ladrillo hueco de la primera hilada, (nunca el ladrillo caravista) y armar con 2 barras de 1 m de longitud y de 10 mm de diámetro roscadas y cincadas, en sentido longitudinal de fachada y atar a ellas perpendicularmente, con alambre galvanizado, 1 barra de características similares cada 20 cm y rellenar el hueco producido con Renderoc SF o similar. Todo ello en tramos de 90 cm de longitud dejando 5 cm por cada lado sin recubrir para el futuro solape con las barras de al lado. El tramo contiguo de 90 cm se dejará sin actuar y se actuará en el siguiente y así en toda la zona donde se ha detectado la patología (similar a la actuación de bataches en un movimiento de tierras). No se podrá incidir en los huecos que se han dejado sin picar hasta pasar un mínimo de 4 días. Las barras deberán separarse con separadores de plástico del canto de forjado 1,5 cm. para quedar recubiertas en su totalidad.
- Aplacar con cemento cola elástico especial para exteriores, el canto de forjado saneado; con plaquetas de ladrillo caravista similares a las existentes.

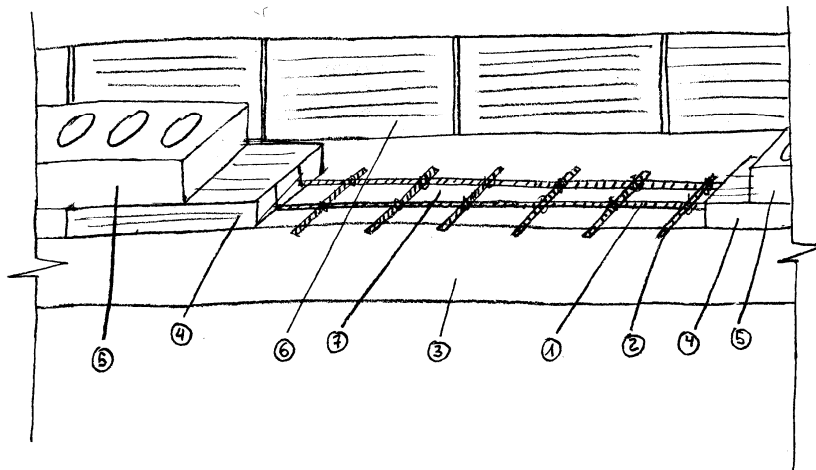


Figura 20:

- 1- Barras de 1 m de longitud y de 10 mm de diámetro roscadas y cincadas, en sentido longitudinal de fachada.
- 2- Barras de características similares cada 20 cm atadas perpendicularmente con alambre galvanizado.
- 3- Canto de forjado existente a proteger con mortero Renderog SF o similar.
- 4- Ladrillo hueco sencillo a medio pie. Se picará y se sustituirá por el

*armado con barras y el mortero Renderog SF o similar.*

5- *Segunda hilada de ladrillo caravista a medio pie, que no debe picarse.*

6- *Tabique de ladrillo hueco sencillo en interior de viviendas.*

7- *Zona que debe rellenarse con mortero Renderog SF o similar.*

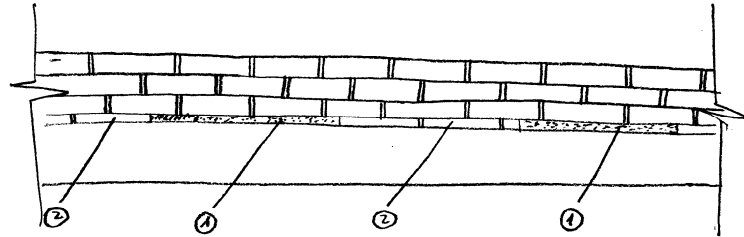


Figura 21

1- *Zona picada y reparada.*

2- *Zona sin picar en espera de fraguado de las zonas reparadas anteriormente.*

2.- Para la patología descrita en las fotos 14 a 17 en las cuales se apoya la fachada sobre ladrillos huecos dobles y se ha desplazado la fachada en varias direcciones:

- Demoler la totalidad de la hoja de ladrillo caravista y la primera fila de ladrillo hueco doble.
- Proteger y reforzar el canto de forjado con renderog SF o similar.
- Volver a armar la hoja de ladrillo caravista similar al existente, apoyando directamente sobre el forjado ya reparado.
- Aplacar el canto de forjado.

3.- Para la patología descrita en las fotos 5 y 6 en las cuales se apoya la fachada sobre las propias plaquetas:

- Demoler la totalidad de las plaquetas.
- Proteger el canto de forjado.
- Reponer la zona con plaquetas similares.

4.- Para la patología descrita en las fotos 7 y 8 en las cuales se ven reventadas las plaquetas y una grieta vertical en el encuentro de las dos fachadas:

- Demoler la totalidad de las plaquetas.
- Proteger el canto de forjado.
- Reponer la zona con plaquetas similares.
- Picar los ladrillos que se han agrietado, “coser” la grieta con armadura de hierro y reponer la zona con ladrillos similares.

## 1.8.- Otras consideraciones

*Reparación de Una Fachada*

Se advierte que no existe formación de medias cañas en la cámara de aire y al rellenar la parte baja de la cámara de aire que se crea entre las 2 hojas, el posible agua que se filtre por el ladrillo caravista, puede formar pequeñas bolsas y aparecer algún pequeño brote de humedad en la parte baja de los tabiques de las viviendas.

La intervención en los cantos de forjado siempre será desde el forjado de la planta superior al forjado de la planta inferior.

Si durante las obras se detectase cualquier grieta que no existiese anteriormente, se pararán todas las obras y se dará aviso urgente a la Dirección Técnica.

Es todo cuanto tengo a bien informar en Santander a 15 de Diciembre de 2003.

El arquitecto Técnico

## **ENSAYO HASTA ROTURA Y AUTOPSIA DEL PUENTE DE FÁBRICA DE URNIETA (GUIPÚZCOA)**

Javier León<sup>1</sup> ([jl@fhecor.es](mailto:jl@fhecor.es)); Sergio R. Espejo<sup>2</sup> ([sre@he-upm.com](mailto:sre@he-upm.com)).

<sup>1</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. Profesor Titular E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Universidad Politécnica de Madrid. Director Técnico del Departamento de Ingeniería de Mantenimiento de Estructuras de FHECOR Ingenieros consultores

<sup>2</sup> Ingeniero Civil. Doctorando Grupo Hormigón Estructural ([www.he-upm.com](http://www.he-upm.com)), Ingeniero de proyecto FHECOR Ingenieros Consultores

### **Resumen**

Este documento describe las actividades previas, el desarrollo y los resultados de un ensayo hasta rotura realizado el 16 de mayo del 2006 sobre un puente de fábrica localizado en cercanías de la población de de Urnieta. Además, presenta los resultados de las tareas de reconocimiento de geometría interna de la estructura y la extracción de muestras para caracterización de materiales, tareas de carácter innovador ejecutadas durante la demolición del puente.

### **1.- Introducción**

El diseño y construcción de la nueva *Autovía del Urumea* —una ruta alternativa a la N-1 para el acceso a San Sebastián— forzó la inevitable demolición de un puente de fábrica que coincidía en su trazado con parte del tramo de la variante hacia Urnieta. Este puente pertenecía al antiguo Ferrocarril del Plazaola, fuera de servicio desde hace más de 50 años.

La Diputación Foral de Gipuzcoa, propuso un proyecto de investigación I+D+i asociado a las tareas de demolición, con el fin de aprender y entender el comportamiento de estructuras de esta tipología —puentes de bóvedas de fábrica— gracias a la realización de la prueba hasta rotura y trabajos posteriores de reconocimiento y caracterización.

Baste decir, para justificar la importancia de la investigación, que entre el 30 y el 40% de los puentes de ferrocarril y carretera existentes en Europa son aún de fábrica (sillería, ladrillo u hormigón en masa) y que, sin embargo, es muy escaso el conocimiento que se tiene acerca de su comportamiento estructural y de sus mecanismos de deterioro, a lo que se une el indudable marchamo histórico y enraizado mimetismo con el paisaje de este tipo de puentes, sin duda alguna los que mejor encajan en el concepto de sostenibilidad tan de moda hoy.

Para subrayar el carácter innovador y original del trabajo, añádase que el grupo redactor de este documento sólo tiene conocimiento de una serie de experiencias similares realizadas en el Reino Unido a comienzos de las décadas de 1950 y 1980<sup>1</sup>, a la que hay que añadir un único ensayo español en febrero de 2005<sup>2</sup> en el que los autores de este trabajo, junto a otros investigadores, tomaron parte especialmente activa.

---

<sup>1</sup> El hoy llamado TRL, organizó y financió una campaña experimental en estructuras a escala real para poner a punto la metodología de evaluación de puentes de bóvedas usada en el Reino Unido (MEXE) inicialmente en 1953 y luego entre 1985 y 1989 [5].

<sup>2</sup> En febrero de 2005, ADIF promovió una prueba a rotura en un puente de fábrica de ladrillo sobre la Riera de Rubí en cercanías de Barcelona. Las conclusiones de este trabajo están pendientes de ser publicadas.



### 3.- Descripción de la estructura

El puente estaba situado entre los kilómetros 79,134 y 79,211 de la traza del antiguo ferrocarril del Plazaola, en cercanías del caserío de Lecun, dentro del término municipal de Urnieta —Guipúzcoa— (Figura 1).

La estructura, de trazado recto y sin pendiente, salvaba una depresión topográfica muy variable con cuatro vanos en bóvedas de sillería de arenisca de directriz circular de medio punto ( $f=L/2$ ) y de canto constante de 0,70 m con luces libres iguales de 10,0 m. Los tímpanos, pilas y estribo estaban confeccionados con sillería de caliza. La altura máxima de la estructura era de 19,40 m y los terraplenes de acceso tenían una longitud aproximada de 15,50 m. La figura 2 muestra un alzado y una sección trasversal “idealizados”<sup>3</sup> de la estructura.

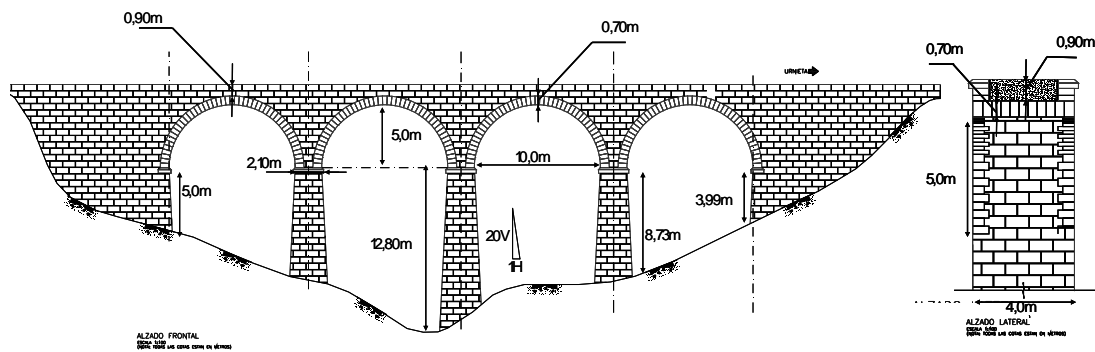


Figura 2: Configuración geométrica del puente.

### 4.- Metodología

El estudio se dividió en varias etapas: estimación inicial de la carga de rotura; auscultación profunda de la geometría “real” y configuración del puente —en particular la determinación de la altura de los rellenos rígidos—; análisis de la capacidad portante para definir la carga última a partir de los datos de la auscultación; diseño y cálculo del sistema de aplicación de la carga, definición de la instrumentación, preparación y desarrollo del ensayo a rotura; finalmente, demolición controlada del puente.

#### 4.1.- Estimación de la carga de rotura

Se realizó un estudio paramétrico con dos modelos —uno con la bóveda exenta, y otro con el puente completo—, haciendo variar la posición de la carga, la altura de rellenos rígidos, y considerando un reparto de cargas a través del relleno granular según la distribución de Boussinesq. Para ello se usó el programa RING 1.5, desarrollado por la Universidad de Sheffield en el Reino Unido [1][2]. Esta herramienta de comprobación para puentes de bóvedas permite hacer un modelo plano de la estructura, teniendo en cuenta la geometría, las características de los materiales, y el efecto de los rellenos rígidos o granulares. La carga de colapso se calcula disponiendo un eje en la posición más desfavorable —con un valor de 1kN— y el programa evalúa el valor del factor de seguridad de la estructura, es decir, el número de veces que se puede aplicar esa carga antes de producirse el colapso.

La figura 3 muestra los resultados de carga de colapso para la bóveda exenta en función de la altura del relleno rígido (abscisas), para diferentes posiciones de la carga. Las

<sup>3</sup> Se pudo comprobar con topografía que el puente no tenía variaciones geométricas significativas con respecto a la geometría disponible.

posiciones críticas para el colapso se corresponden con la carga dispuesta a los cuartos y a los tercios, siendo esta última la de menor energía en el caso de rellenos bajos ( $\leq 3,00$  m).

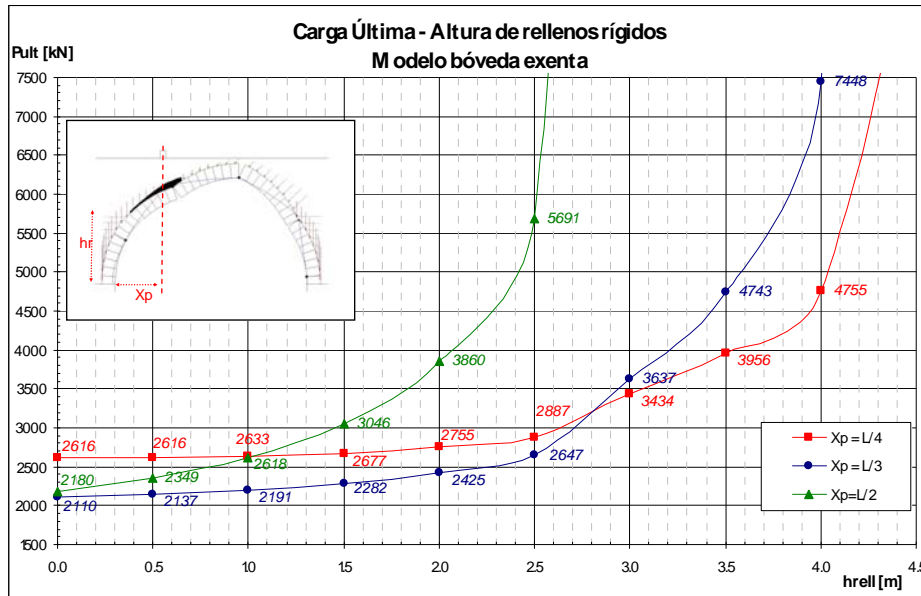


Figura 3: Resultados de las estimaciones de carga de rotura para una bóveda.

La figura 4 muestra los resultados del modelo del puente completo. El fallo multiarco se produce en todos los casos cuando la carga se dispone en la clave de la bóveda. En las otras dos posiciones —L/3 y L/4— se presentan dos tipos de fallo, el primero para una altura inferior a 2,00 m produciéndose un mecanismo monoarco independiente en la bóveda cargada, y el segundo el fallo es por generación de 8 rótulas sin giro de pila, cuando la altura de rellenos cementados supera el valor anterior.

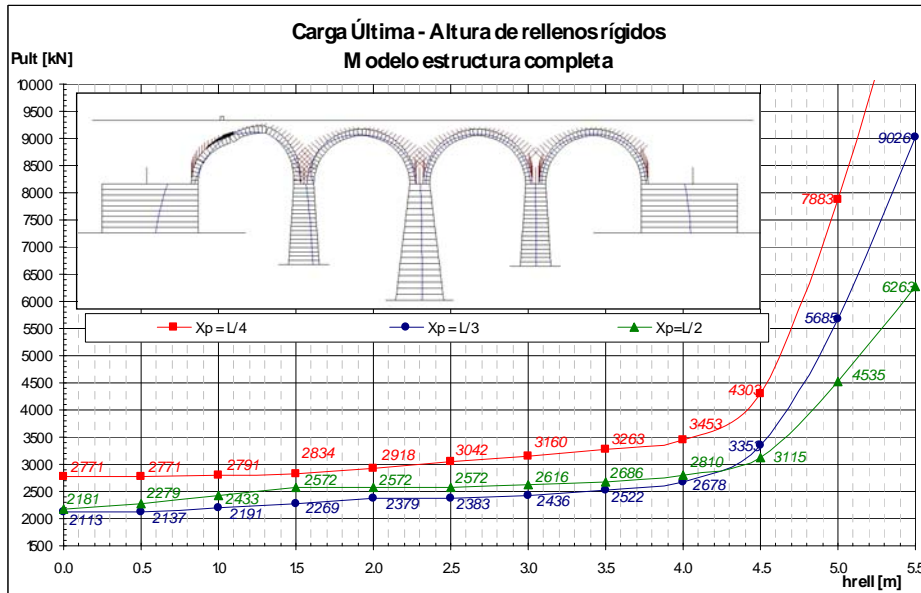


Figura 4: Resultados de las estimaciones para el modelo multiarco.

De los análisis anteriores, y partiendo de la hipótesis que la altura del relleno rígido está alrededor de la mitad de la flecha más un canto ( $h_1=f/2+c$ ), se fijan los límites inferior y



superior de la carga de rotura: entre 3.500 kN y 7.000 kN. A partir de este resultado se dimensionan los equipos hidráulicos y el sistema de aplicación de carga.

Adicionalmente, y aunque es sabido que las estructuras abovedadas trabajan a tensiones bajas, se contempló la posibilidad del fallo por agotamiento. Esta comprobación seccional se realizó gracias a la modelación con el programa VLASTA, desarrollado por el grupo de Hormigón Estructural de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid [3].

La figura 5 muestra los valores de tensiones de trabajo para la bóveda solicitada a diferentes niveles de carga dispuesta a tercios de la luz, con una altura de relleno de 3,50 m. La comprobación se basa en comparar los valores de tensiones de trabajo con los de resistencia a compresión de la fábrica, que pueden calcularse con la fórmula de Ohler para fábricas históricas [3] o luego de la realización de ensayos de caracterización mecánica de materiales.

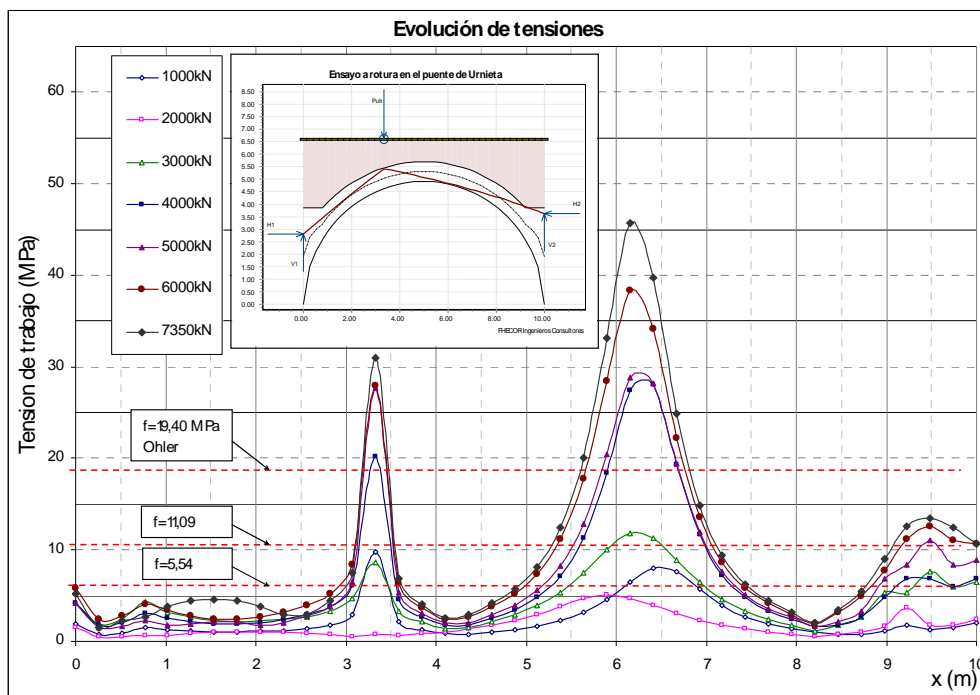


Figura 5: Tensiones de trabajo para los diferentes niveles de carga.

#### 4.2.- Inspección especial y refinamiento de la predicción de capacidad

Debido a razones operacionales, y además a que el fallo multiarco requiere de una mayor aplicación de energía, se decidió ensayar la bóveda 1 adyacente al estribo más cercano a Urnieta —el primero a la derecha en el alzado de la figura 2—.

Las estimaciones previas demostraban el papel fundamental que juegan los rellenos cementados en la capacidad de la estructura, por lo que se decidió practicar catas de reconocimiento en dos bóvedas opuestas a la del ensayo, con el fin de determinar la altura de éstos. Adicionalmente, se realizaron ensayos geotécnicos con el fin de determinar la resistencia a la penetración del relleno granular, y establecer los diferentes niveles de compactación (Figura 6).



*Figura 6: Remoción del relleno granular y desarrollo de pruebas geotécnicas.*

De la auscultación se pudo concluir que los rellenos granulares estaban compuestos por una capa vegetal superficial de 0,05 m, seguidos de otra con 0,95 m de espesor compuesta por un limo o arcilla de baja plasticidad. Bajo las capas anteriores, se encontró un conjunto de bolos calizos, del tamaño de mampuestos, y sin ningún tipo de argamasa o ligante entre ellas. La peculiaridad de la mayoría de las piezas era que tenían una dimensión claramente mayor que las otras dos.

La remoción de esta capa presentaba cierta dificultad debido a que las piezas estaban trabadas —aunque no existía un aparejo claro, estaban colocadas de manera ordenada, lo que generaba que con los medios mecánicos disponibles no se consiguiese separar las piezas—. Por otro lado, por motivos de seguridad estructural, se consideró oportuno no profundizar más en la excavación, ya que ante el desconocimiento de la existencia de otra capa inferior —relleno rígido cementado— podría presentarse el colapso si por la capa de mampuestos calizos pasaba la línea de presiones.

#### *4.3.- Sistema de aplicación de carga*

El patrón elegido para el ensayo fue un “cuchillo” recto de ancho igual al de la plataforma, y dispuesto a tercios de la luz.

Para eliminar las incertidumbres debidas a la distribución de la carga en el relleno, se decidió reemplazar el material granular bajo el punto de aplicación de la carga, por un elemento prismático de hormigón de altura comprendida entre nivel de la plataforma y el trasdós de la bóveda. El ancho de dicho elemento de hormigón era el mismo que el resultante de un reparto a 30°. Para asegurar que la carga se aplicaba directamente a la bóveda, se tuvo la precaución de aislar —con láminas de poliuretano expandido— el tímpano del ya mencionado elemento de hormigón (Figuras 7 y 8).

El diseño y la construcción del dispositivo para la aplicación de la carga del ensayo estaban sujetos a limitantes económicos propios de una actividad tan singular como ésta, pues el elemento se utilizaría una sola vez, por estar “fabricado a medida” y por que la ocurrencia de oportunidades de hacer pruebas sobre una estructura real, por desgracia, son muy limitadas.

Se plantearon 5 alternativas diferentes de sistema de aplicación de cargas —recogidas en el informe final [4]—, de las cuales se tomó finalmente, una combinación entre los ensayos Británicos y el del puente de la Riera de Rubí [5] [6].

La solución final fue un sistema “autoequilibrado”. Para esto se debía disponer un elemento de reparto sobre el tablero del puente, sobre el cual actuaban gatos convencionales de émbolo. La reacción debería ser soportada por un elemento para cada cilindro hidráulico, dispuesto paralelamente al eje de la vía y que entregaba dicha acción a otro dispuesto transversalmente.

En los extremos de este elemento transversal se dispondrían tirantes con barras rígidas, que irían sujetos a una viga anclada al terreno.

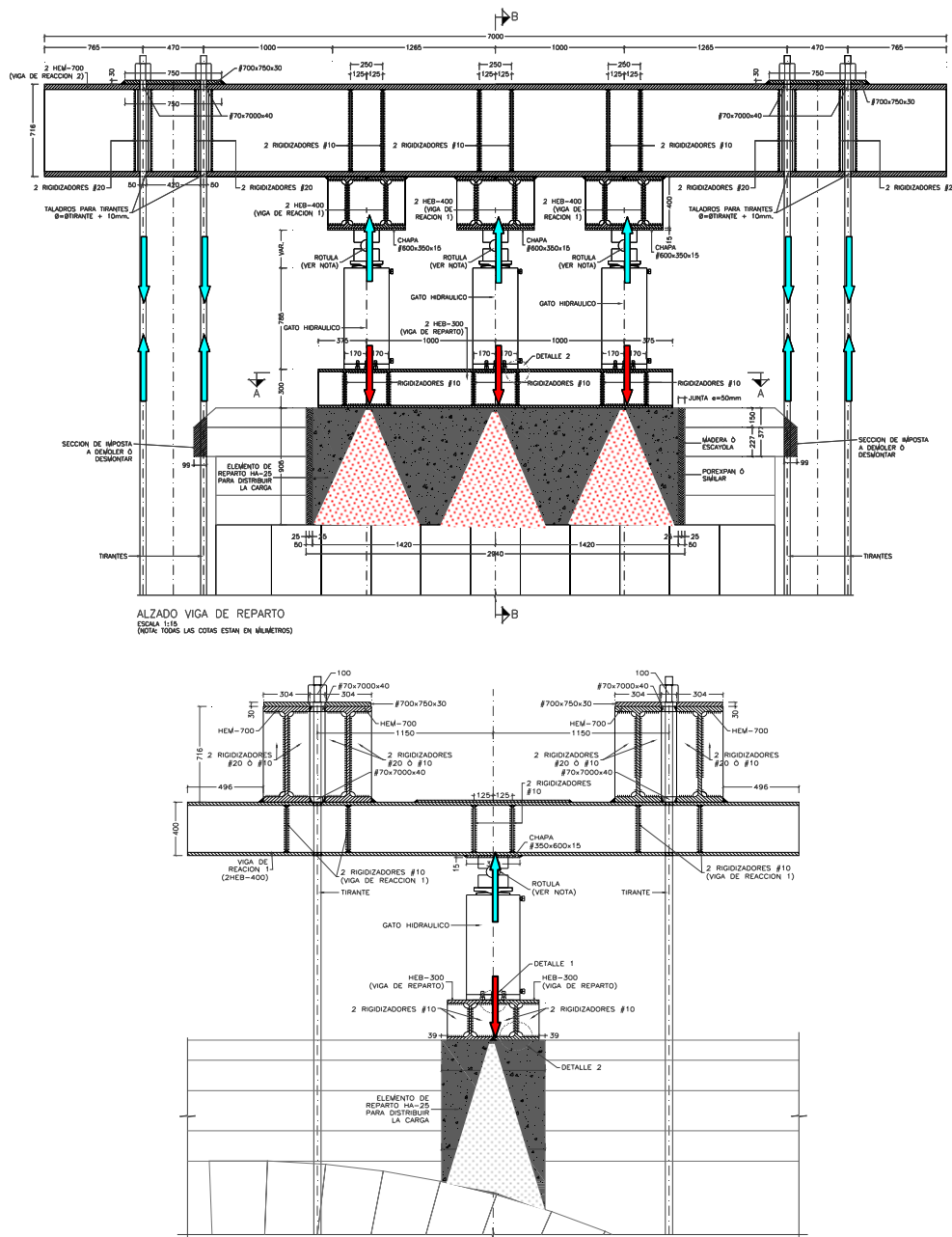


Figura 7: Secciones longitudinal y transversal de la bóveda de ensayo y vista del dispositivo de aplicación de la carga. Se representa el reparto de la carga con un ángulo de 30°, materializado con un elemento de hormigón aislado de los tímpanos.

Se utilizó para la construcción una serie de perfiles comerciales con acero de construcción S255JR con límite elástico 275 MPa, y para los tirantes barras Macalloy de diámetro nominal 50 mm con límite elástico 950 MPa y tensión de rotura 1050 MPa.

Los anclajes se construyeron con barras de similares características a las de los tirantes y se dimensionaron para una carga de 1200 kN cada uno. Se probaron previamente a la realización del ensayo a una carga de 1000 kN.

La carga se suministró con tres cilindros hidráulicos con capacidad de 33370,8 kN cada uno. Éstos estaban alineados con respecto a una perpendicular al eje de la vía trazada en el primer tercio de la luz del primer vano, y la separación en sentido transversal era de 1,00 m entre sí.

La figura 12 muestra una vista general del sistema de aplicación de carga terminado.

#### *4.4.- Instrumentación y control*

Para el control de los cilindros hidráulicos se optó por un sistema de elevación, adaptado a las necesidades de la prueba, consistente en una bomba electro-hidráulica de doble efecto. Con este equipo es posible controlar presión y desplazamiento de cada uno de los cilindros de forma independiente o sincronizada. Los escalones de carga se pueden fijar reprogramándolos o, realizando los incrementos de forma manual, dependiendo los requerimientos del ensayo.

El equipo incluye además un sistema de adquisición de datos con el que se puede conocer, en cada momento, la presión de los gatos y el desplazamiento de los émbolos.

Como medida adicional, y con el fin de tener controlado durante el ensayo la tensión de trabajo de los tirantes, se decidió adherir en cada uno de ellos una banda extensométrica. Se dispuso entonces de ocho bandas con las cuales se leía la deformación de las barras en cada incremento de carga (ver Figura 8). Ya que se conocen las características mecánicas del acero —módulo de deformación longitudinal—, el área de los tirantes y la deformación, era posible conocer la carga para cada tirante. La suma de los ocho deberá ser igual a la carga aplicada por los gatos.



*Figura 8: Izquierda, localización de las bandas extensométricas en los tirantes del lado monte. Derecha, detalle del mando de control de la bomba electro-hidráulica.*

Las medidas de deformación se realizaron en cinco puntos para dos alineaciones —boquilla del lado monte, y eje del tablero— disponiendo 10 LVDTs de hilo en cada

uno. Como medida adicional se fijaron bases de topografía sobre una de las boquillas (Figura 9).



*Figura 9: Izquierda, disposición de los puntos para toma de deformaciones de la bóveda durante la prueba. Derecha, detalle de disposición de los potenciómetros lineales.*

## **5.- Ensayo**

El ensayo tuvo lugar el 16 de mayo de 2006, Comenzó con una toma inicial de lecturas de la instrumentación, más el ajuste del sistema de aplicación de la carga a punto cero.

Se habían definido previamente escalones de carga de 500 kN, que se irían incrementando hasta alcanzar el valor estimado de la carga de rotura o, como máximo, el 90% de la carga con las que se había dimensionado el sistema de aplicación de la carga. Con el fin de facilitar la observación de fisuras, se había dado una capa de escayola sobre la boquilla derecha —lado monte—. Además, de la ocurrencia de cualquier novedad se tomaba nota durante la prueba.

Una vez alcanzado el valor del escalón de carga definido, se esperaba unos minutos para, que se estabilizasen los instrumentos de medida, y luego observar el comportamiento de la bóveda cargada. La velocidad de carga durante el ensayo fue de 0,81 kN/s.

Se tomaban lecturas de deformación en cada escalón —con los dos instrumentos de medida instalados—y se continuaba el incremento de la carga hasta la ocurrencia del colapso. La figura 10 muestra gráficamente los escalones de carga utilizados en la prueba. En el eje de las abscisas se representa el tiempo desde el momento en que se comienza a cargar la estructura debido a la reacción del entramado metálico. En el eje de las ordenadas, a la izquierda, se representa la carga aplicada. La curva con escalones muestra los incrementos, y la línea de trazos que la intersecta es la representación en continuo para los instantes en los que se realizó medida de deformaciones con potenciómetros lineales, que además muestra los instantes posteriores al fallo—. En el eje de las ordenadas a la derecha se muestra el desplazamiento de los émbolos de los gatos durante la prueba. Se debe tener en cuenta que este valor no representa movimientos en la bóveda.

La duración del ensayo fue aproximada de 3 horas. El valor máximo de la carga aplicada de 7466,64 kN, la rotura se produjo por agotamiento de los sillares de la bóveda —simultáneamente en boquillas y cuerpo central de ésta— justo bajo el área cargada.

Los movimientos en la bóveda fueron imperceptibles al ojo humano, y no se evidenció la formación de rótulas antes del fallo por agotamiento. La separación de tímpanos y la

fisuración de las piezas o juntas sólo se produjo en valores muy cercanos a la carga última.

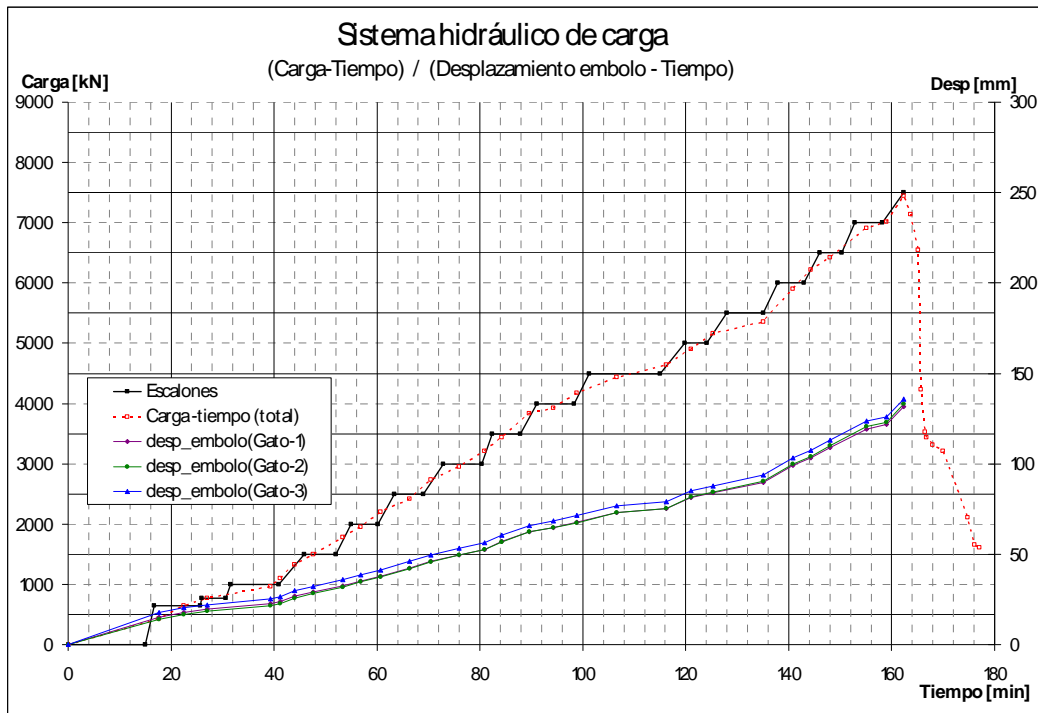


Figura 10: Curvas carga –tiempo y desplazamiento de embolo-tiempo, resultantes del sistema de adquisición de datos del equipo electró-hidráulico.



Figura 11: Izquierda, vista de la bóveda cargada con 6500 kN, evidencia de formación de fisura de separación entre tímpano y bóveda. Derecha, vista de la bóveda después del colapso (7466,64 kN). Se traza sobre ella el lugar de aparición y la extensión de la fisura de separación entre tímpano y boquilla, así como el área dañada resultante después del colapso.

El colapso fue súbito, un fallo local por agotamiento del material. No se observó la formación de rótulas, ni la formación de grietas entre sillares de la bóveda. El área de extensión es aproximadamente la tercera parte de la superficie total de la bóveda, comprendida entre el punto de aplicación de la carga y su simétrico



Figura 12: Vista general durante la prueba, y detalle del fallo a compresión en los sillares.

## 6.- Análisis de resultados

### 6.1.- Modo de fallo

El fallo se produjo de manera local, en un área que comprende por lo menos un tercio central.

La carga con la que se produjo el fallo está dentro del rango estimado, aunque no se presentó la coincidencia con el modo de fallo para el que se determinó dicha magnitud.

Este comportamiento genera ya de por sí una singularidad, pues hasta ahora se ha creído que en una estructura abovedada de fábrica ocurre primero el colapso por formación de mecanismo que por agotamiento del material, ya que las tensiones de trabajo son muy bajas en este tipo de estructuras.

### 6.2.- Deformabilidad de la bóveda - Rellenos

Los movimientos fueron despreciables en relación con las dimensiones de la estructura y el valor de la carga aplicada, el máximo de 8,5 mm en el punto de aplicación de la carga y medido para el mayor nivel alcanzado 7466.64 kN.

Inicialmente, se puede intuir que la rigidez de la bóveda es la responsable del modo de fallo ocurrido, y que está influenciada por las posibles restricciones al movimiento horizontal que generan los rellenos rígidos y los rellenos granulares de gran tamaño encontrados bajo la capa de limo arcilloso situados a nivel de la plataforma.

La no ocurrencia de los daños, formaciones de fisuras o grietas —sinónimo de los efectos que las acciones externas producen sobre la estructura— da pie a pensar que la bóveda durante el ensayo estuvo en todo momento comprimida.

Así la magnitud de la fuerza axial variaba con cada escalón, y la línea de presiones se extendía cada vez más hasta hacerse prácticamente recta. La bóveda entonces se convertía en dos bielas comprimidas, y el fallo se producía cuando las tensiones igualaran a la resistencia última del material (Figura 13).

**Ensayo a rotura en el puente de Urnieta**

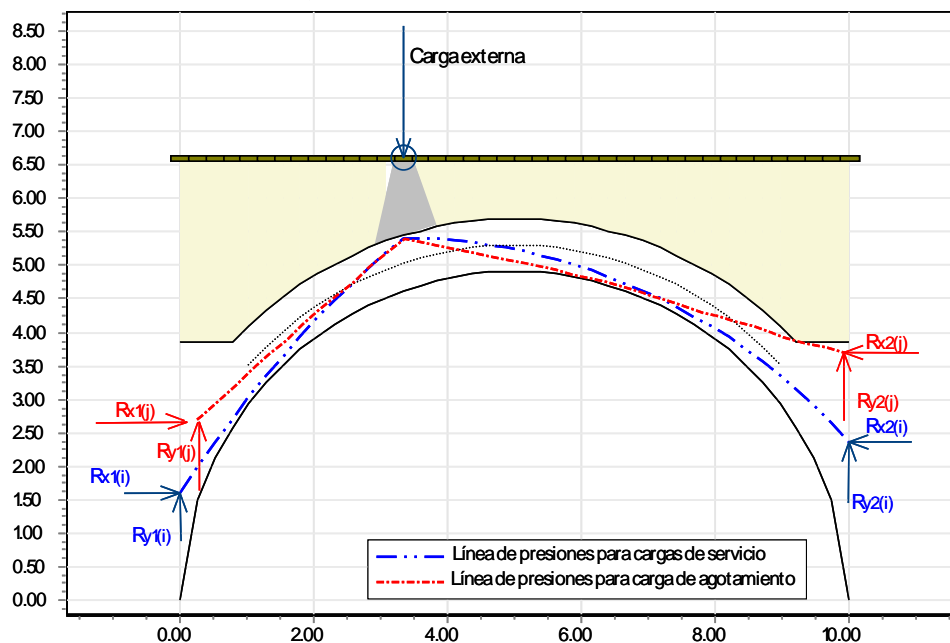


Figura 13: Esquema de la posición de la línea de presiones para las cargas de servicio y agotamiento.

### 6.3.- Posible trabajo de los tímpanos

Los tímpanos pueden aportar rigidez al sistema. Por un lado, por su peso propio, actúan sobre la bóveda “pretensando” todas las dovelas y, por otro, que pueden tratarse como vigas de canto variable sobre el trasdós de la bóveda. Los tímpanos se encargan de resistir además de los empujes laterales del terreno, las acciones resultantes de la bóveda —ya que por ejemplo, cuando el extremo opuesto al punto cargado en la bóveda se quiere levantar, se encontrará con un elemento que le impide ese movimiento—. Adicionalmente, si existe enjarje entre bóveda y tímpanos, se puede plantear que las cargas pueden “colgarse”. Esto no queda del todo claro después de la prueba, pero es evidente la presencia de las grietas longitudinales en escalera que se abren hacia los laterales del puente (ver parte superior derecha de la figura 12)—.

### 6.4.- Seguridad de la estructura

Es evidente que el puente tenía un elevado margen de seguridad. La carga máxima resistida fue más de siete veces la carga recomendada en la Instrucción española —IAPF—, aunque hay que tener en cuenta que distribución de carga utilizada en el ensayo es diferente a la cargas de dicha instrucción.

## 7.- Reconocimiento durante la demolición

Durante la demolición de la estructura fue posible reconocer y medir la morfología interna de la estructura. La figura 14, tomada durante las tareas de demolición, muestra una sección transversal “real” del puente.



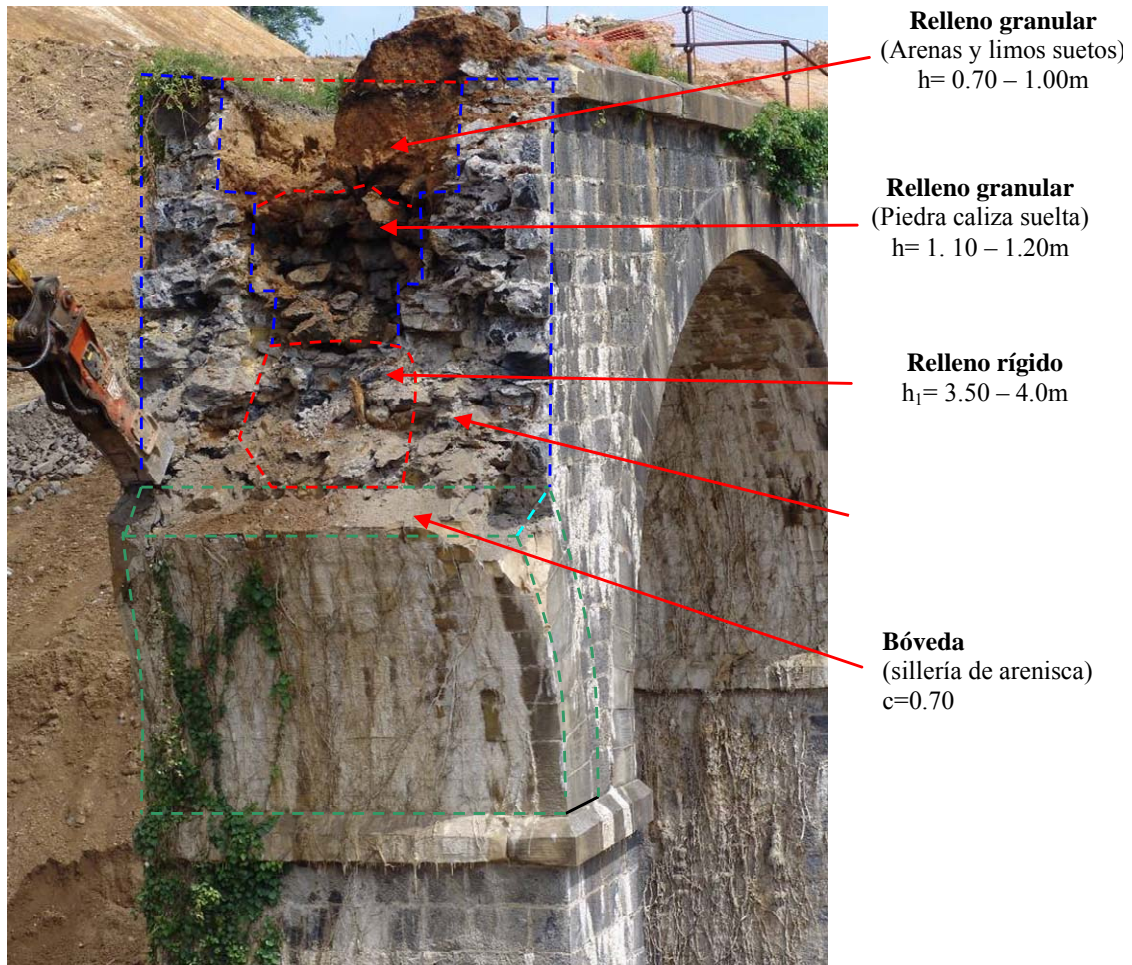


Figura 14: Sección transversal “real” del puente de Urnieta.

### 7.1.- Bóvedas y rellenos

Se verifica que el puente estaba compuesto por una bóveda de canto constante de 0,70 m y que, el relleno estaba conformado por un calicanto cementado hecho con áridos de tamaño inferior a 50 mm en una matriz de cemento pórtland. La altura de ese relleno era aproximadamente el 80% de la flecha.

Las otras dos capas granulares y sin material ligante estaban formadas por roca caliza sin labra, ni aparejo —dispuesta sobre la capa anterior— y luego una capa de limo arcilloso que no superaba el metro de altura. Estas dos últimas capas se habían descrito cuando se realizó la auscultación previa de la estructura (catas).

### 7.2.- Tímpanos y muros

Tanto los tímpanos como los muros de acompañamiento estaban fabricados en caliza, tenían una cara exterior bien labrada, y la interior variaba con una pendiente de 1H:5V. El valor del espesor en coronación era de 0,80m (Figura 15)

### 7.3.- Pilas y cimentación

Las pilas estaban compuestas por una capa exterior de caliza, de espesor promedio de 0,60 m. El relleno era de hormigón a base de cemento pórtland de buenas características con tamaños de árido inferiores a 50 mm. Las alturas eran variables entre 8,30 m y

12,00 m. El canto era de 2,10 m y el ancho igual al de la bóveda 4,00 m. Tenían una pendiente de 1H:20V.

El nivel fijado para la demolición no permitió observar ninguna característica de la cimentación de las pilas, pero la presencia del plinto o zócalo hace suponer que la cimentación de las pilas era directa. Éste era un recurso usado por los antiguos constructores cuando se contaba con terrenos “flojos” y consistía en el ensanche de la base de la pila hasta que el área fuese tan grande que la tensión transmitida al terreno fuese inferior a la aceptable por el terreno [7].



*Figura 15: Típanos sobre la bóveda 3 y muros de acompañamiento del estribo 2.*



*Figura 16: Alzado y sección de las pilas de la estructura*

#### *7.4.-Estribos*

Los estribos eran cerrados, ejecutados sillería caliza de piedra similar a la empleada en el resto de la estructura. La altura de los muros frontales era de 3,99 m para el estribo 1 —lado Urnieta— y 5,00 m para el estribo 2. El ancho es el mismo que el de la bóveda, es decir, 4,00m.

Los muros laterales de acompañamiento eran de altura variable —decreciente según se sale de la estructura—. En el estribo del lado Andoain la altura máxima era de 12,00m, mientras que el del lado Urnieta tenía 11,00 m. Sus longitudes eran 15,25 y 15,86 m respectivamente.

El relleno dentro del estribo estaba compuesto por dos capas, una inferior de rocas calizas sin labra ni traba, de tamaños superiores a 0,50 m y una capa superior de zadorra —o arcilla— de espesor 0,80 m.

## **8.- Campaña de ensayos a probetas extraídas del puente**

Para ensayos mecánicos se seccionaron tres muestras —fabrica si aparejar— que se resguardaron del tráfico de la obra para su posterior transporte desde Urnieta hasta Bilbao. La figura 16 muestra las 2 unidades compuestas por dos sillares y una junta extraídas de la bóveda 4, y otra compuesta por tres sillares y dos juntas extraída de la bóveda 3.



*Figura 17. Vista de muestras seleccionadas para ensayos mecánicos.*

Se proponen con el fin de conocer de los valores que definen la ecuación constitutiva de este material en particular — que posteriormente será utilizada como dato que alimente los modelos de análisis— añadiendo la posibilidad de estudiar la influencia de la saturación en las muestras, realizando en ensayos a muestras en estado seco y saturado, y la comprobación de la disminución de la resistencia de las rocas dispuestas a contralecho, para verificar si así estaban dispuestas correctamente en el puente.

Se deducirán experimentalmente:

- Valores de resistencia a compresión ( $f_c$ ,  $f_{cb}$ ) en estado seco y saturado para piezas sueltas y fábrica aparejada
- Resistencia a flexotracción en piezas ( $f_{xtb}$ )
- Resistencia a tracción en piezas ( $f_{tb}$ )
- Módulo de deformación longitudinal ( $E$ ,  $E_b$ ) en estado seco y saturado
- Relación de Poisson ( $\nu$ )
- Curva tensión-deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

Se ha redactado un protocolo para el tratamiento de las muestras y para los ensayos mecánicos, disponible en [4]. La campaña actualmente esta en desarrollo.

## **9.- Conclusiones**

El comportamiento de un puente de bóvedas de fábrica está influenciado fundamentalmente por la geometría y composición de la bóveda, por la distribución de los rellenos granulares y cementados — especialmente la altura de éstos últimos—, la configuración de los tímpanos y el patrón de carga elegido.

Los datos de partida para los cálculos de la estimación de la carga de rotura fueron los suficientes para desarrollar modelos de primer y segundo nivel. La principal causa para que no se produjera el fallo a los niveles de carga estimados fue el deficiente conocimiento de la altura real de los rellenos rígidos. Para que el modelo reproduzca el comportamiento real de la estructura, por lo menos se debe tener certeza en conocer esta dimensión ( $h_1$ ).

Se deduce del ensayo las inspecciones de puentes de fábrica, deben de prestar atención preferentemente a la geometría —lo visible—, y al relleno cementado, su composición y la altura.

Si se puede determinar que el relleno rígido existe y que tiene unas propiedades mecánicas semejantes a la bóveda, pila o estribo, se podrá considerar como un elemento portante rígido. En caso que se decida utilizar el relleno cementado en el análisis, se podrán considerar las siguientes hipótesis: La pila o estribo con un voladizo — correspondiente a la zona de relleno rígido—, bajo la actuación de las reacciones de la bóveda y las acciones a que estén solicitadas de forma directa. Así la luz de cálculo de la bóveda es la resultante después de descontar la parte tenida en cuenta en el elemento anterior (Figura 16). Los parámetros fundamentales se modifican, así como las relaciones geométricas —ratios—.

Proponer como una estrategia para reparar puentes de bóvedas la mejora de la capa de relleno del trasdós a una altura inferior de la mitad de la flecha más un canto. Esta mejora puede hacerse mediante inyecciones desde el intradós o desde el trasdós.

Se considera adecuado el uso de herramientas de primero y segundo nivel, ya que la comprobación de la estructura debe pasar primero por este “filtro” antes de abordar modelos más complejos.

## **10.- Agradecimientos**

Este trabajo fue desarrollado dentro de un proyecto I+D+i coordinado y financiado por la Diputación Foral de Guipúzcoa, desarrollado por FHECOR Ingenieros Consultores. Colaboraron para el desarrollo de la prueba CONSTRUCCIONES AMENABAR, PAYER Ingeniería S.L., LABEIN, y el Grupo de investigación de HORMIGÓN ESTRUCTURAL de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de la UPM.

## **11.- Bibliografía.**

- (1) GILBERT M., “Limit analysis applied to masonry arch bridges: state-of-the-art and recent developments”. [5th International Conference on Arch Bridges, Madeira, Portugal, 2007, pp. 13-28].
- (2) LIMITSTATE Ltd, Ring2.0 Program Reference, 2006.
- (3) MARTÍNEZ J.L., “Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas”. [Tesis doctoral, Departamento de Mecánica de

Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Politecnica de Madrid, 2003.]

- (4) FHECOR Ingenieros Consultores, “Estudio teórico y experimental del comportamiento hasta rotura del puente de fábrica del antiguo ferrocarril del Plazaola en Urnieta”. [Documento no publicado, preparado como informe final para la Diputación Foral de Gipuzkoa. Madrid, julio de 2007.]
- (5) ESPEJO S., “Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados hasta rotura. Puente ferroviario de la Riera de Rubí y Puente sobre el ferrocarril del Plazaola en Urnieta”. [Trabajo de investigación tutelado para obtener el Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Unidad docente de Hormigón Estructural, Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras, E.T.S. de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Octubre 26 de 2007.
- (6) ADIF et. Al, “Ensayos en el puente ferroviario de la Riera de Rubí (Barcelona)”, [Documento no publicado, preparado por ADIF, GRUPO HE de la E.T.S. de ING. de CAMINOS, C Y P. DE MADRID, FHECOR Ingenieros Consultores, INES Ingenieros Consultores, GEOCIOSA Y TIFSA. Madrid, 2007.]
- (7) LEÓN J., ESPEJO S., “Load test to collapse on the masonry arch bridge at Urnieta”, [Proceedings of the 5th International Conference on Arch Bridges, Madeira, Portugal, September 12-14 of 2007. Pag. 969- 976]
- (8) ATC-PIARC, “Cimentaciones en puentes de fábrica”. [Monografía preparada por el Grupo de Trabajo de Puentes de Fábrica de la Asociación Técnica de la Carretera. Documento no publicado., Madrid, 2007.]

## **Consolidation of Cathedral of Porto**

Paulo B. Lourenço<sup>1</sup> ([pbl@civil.uminho.pt](mailto:pbl@civil.uminho.pt))

<sup>1</sup> *ISISE, University do Minho, Department of Civil Engineering*

### **Abstract**

The present paper presents the works recently carried out at the Cathedral of Porto as a case study of a difficult intervention that challenges current recommendations for the architectural heritage. The aspects regarding structural consolidation are addressed, including strengthening and monitoring of the towers and diagnostics of a chapel.

### **Introduction**

A constellation of professions has been mobilized and the dialogue has been applied as a methodology to carry out the works in the works recently carried out at the Cathedral of Porto, which are only superficially from an author and much more from the collection of professionals.

Preliminary diagnosis was very brief and, therefore, the design project was not conceived in detail. On the contrary, the project was a directive kept open and continuously adapting to the unforeseen, which is often the case in historical buildings, where the anatomy is processed by successive approximations and under the lens of different disciplines. Of course, dissection as a knowledge tool cannot be a part of a modern intervention.

In this case, the lack of adequate preliminary diagnosis, which is in opposition with modern methodologies, was compensated with an intense multidisciplinary activity during the execution period (2002-2006), supported by research, consultancy and expertises in various fields. In the contingency of works that had started already, the reunion of efforts resulted in a process of effective cooperation, with the advantage of permanent in situ approaches and discussions.

The restoration carried out in the first half of the 20th century used traditional construction techniques. Some of the structural deficiencies encountered were then solved with the dismantling and rebuilding of unstable parts, and with the replacement of deteriorated or damaged granite, with poor mechanical performance. The sole concession to the industrial technology is the use of Portland cement, used as a common binder for repointing masonry joints, rendering walls and several reparations that during and after the restoration works, aimed at solving the following issues, without success: waterproofing of surfaces, glue and reconstitute volumes, stabilize cracks and stop movements. It is precisely with respect to the above-cited issues that deeper interventions have currently been carried out, some without visible effects and other with the addition of parts, as in the strengthening of the towers. Therefore, the architects in charge of the works tend to joke about the fact that the only intervention carried out was the strengthening of the towers. Next, the structural parts of the intervention are addressed. Other aspects of the intervention are addressed in [1].

## **Intervention of the towers**

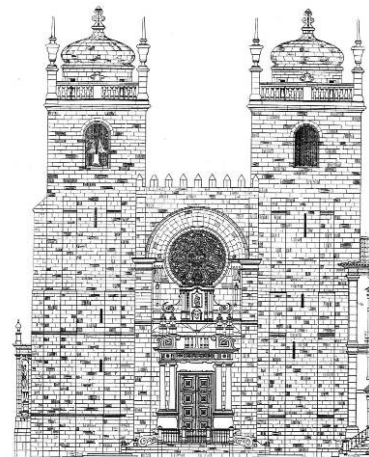
### **Introduction**

A key aspect in the behaviour of ancient towers is that the collapse process usually excludes the possibility of ductile behaviour. In fact, there are hardly any possibilities of internal force redistributions between different critical sections, and failure of a single section is usually sufficient to provoke the entire collapse of the structure. This intrinsic feature leads to a high structural risk in tall masonry towers, because increasing height means large vertical loads and high compressive stresses at the base. Therefore, it seems easy to accept that masonry towers should possess a higher safety margin than the values normally found for other historical structures. But this is not often the case [2].

A tower is usually a result of the need to create a symbol or the need to challenge structural stability (and nature itself). The interpretation of this desire to build higher, and simultaneously to reduce the safety of structures, was left to ancient builders in the context of almost no scientific basis. It is striking that the majority of the ancient high towers in Italy, e.g. in Pavia and Bologna, are no longer present [3]. The reality is that only a few of these structures survived until today, due to collapses, destruction due to lightning and even demolitions (often by precaution and concern of eminent collapse).

### **Description**

The main façade was built between 1176-1200 (central part) and 1229-1325 (towers), see Figure 1. The towers evolved into a Bell-tower (North) and a Clock-tower (South). In 1552, damage due to lightning is reported in the South tower. Between 1665-1669 the South tower was demolished up to mid-height and rebuilt. In 1717, it is recorded that the South tower was in the verge of collapse and, in 1727, buttresses were added, similarly to the ones that already existed in the North tower. Pinnacles were added in 1732. The construction of the Chapter House, contiguous to the South tower, also aimed at consolidating the tower. Also in this period, the two small windows in the main façade (South tower) were replaced by a single large window, similar to the one that existed in the North tower. Before 1841, a new lightning stroke the South tower.



*North Tower      South Tower*

*Figure 1: Main façade after the restoration works in the first half of the 20th century.*

The cross section of the towers is approximately square with a side of 10.0 m and exhibits a variable thickness, with a minimum of 1.7 m at the base. The height of the towers is approximately 35 m, which means that the average stress at the base is around 1.0 N/mm<sup>2</sup>. This value is rather low for regular granite masonry but it is rather high for rubble masonry (with or without mortar joints). In the main façade, two buttresses are apparent in each tower, see Figure 1. As addressed above, the structure suffered several major modifications through time, which resulted in a very complex internal structure with different load bearing internal elements at each level. The structure of the towers cannot be understood from structural reasons and several openings are closed, facing staircases or vaults. The entrance for both towers is located at mid-height, with a connection between both towers from the top of the main vault. But the two towers have a rather different structure. The South tower possesses an internal core with a staircase shaped helicoidally, see Figure 2a,c. The North tower (presently with the bells and clock) features a horizontal mid-level with stone slabs and architraves apparently supported in columns and stone struts, see Figure 2b.

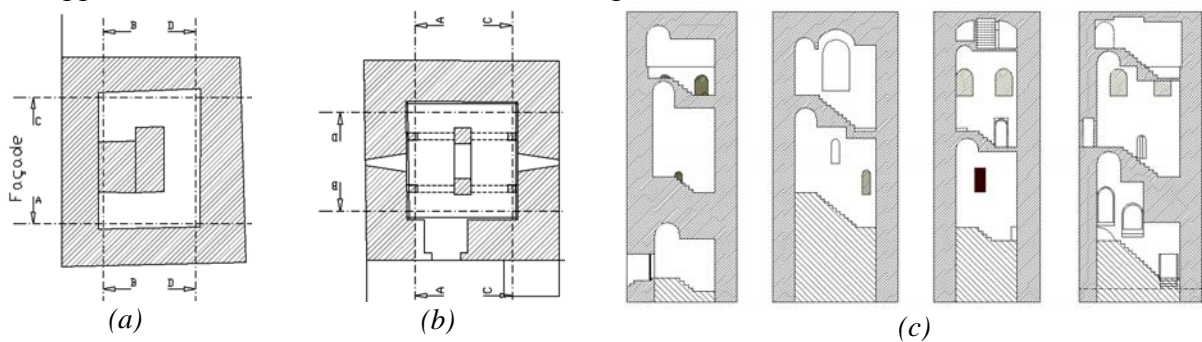


Figure 2: Partial sections of the towers: (a) horizontal section of the South tower, (b) horizontal section of the North tower and (c) sections A-D for the South tower.

### Constitution of masonry walls

The constitution of the masonry walls from the towers was characterized using visual inspection, both by removing smaller stones of the outer leaves and by using a boroscopic camera inserted in cracks or in holes drilled in joints, see Figure 3a. From the inspection, it was possible to conclude that the three-leaf walls have external leaves of granite ashlars with a thickness ranging from 0.30 to 0.70 m, while the middle leaf is made from loose smaller stones and / or silty soil, see Figure 3b and Figure 4. The combination of heavy rain in Porto, strong winds in the top of the hill where the Cathedral is located, and the open joints in the external masonry face, results in a wet infill even in the summer and the continuous washing out of the infill, see Figure 3c.

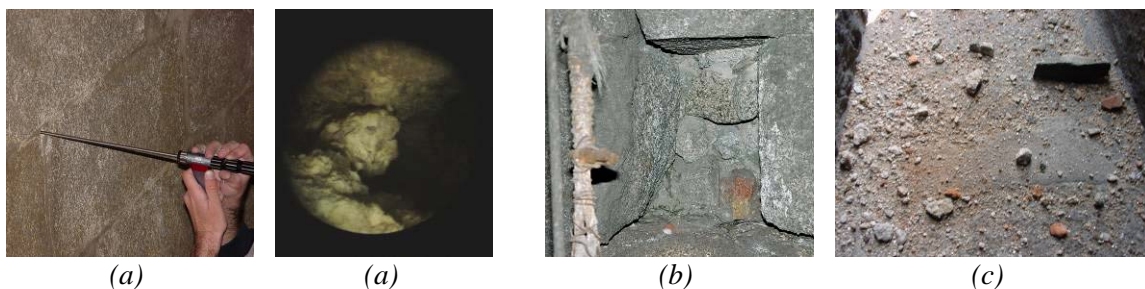


Figure 3: Visual inspection to define the constitution of masonry walls: (a) boroscopic camera, (b) opening up the structure (c) loss of material through central cracks in the openings.



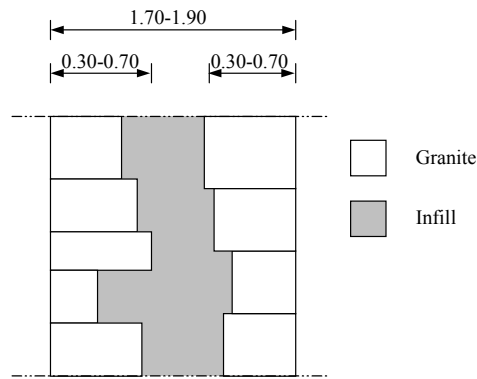


Figure 4: Typical cross section of the masonry walls.

### Existing damage

The towers exhibit distributed cracking and significant out-of-plane movements. The existing damage resulted in the past addition of three iron ties (date unknown), see Figure 5a. Tie T1 presents a severely deformed anchorage, see Figure 5b, and tie T3 is corroded and broken, see Figure 5c. It is stressed that the separation between the East and West façades of the South tower continued after tie T3 was broken. It is also noted that the masonry walls in the vicinity of the anchorages are also deformed, as expected due to the application of a large point load.

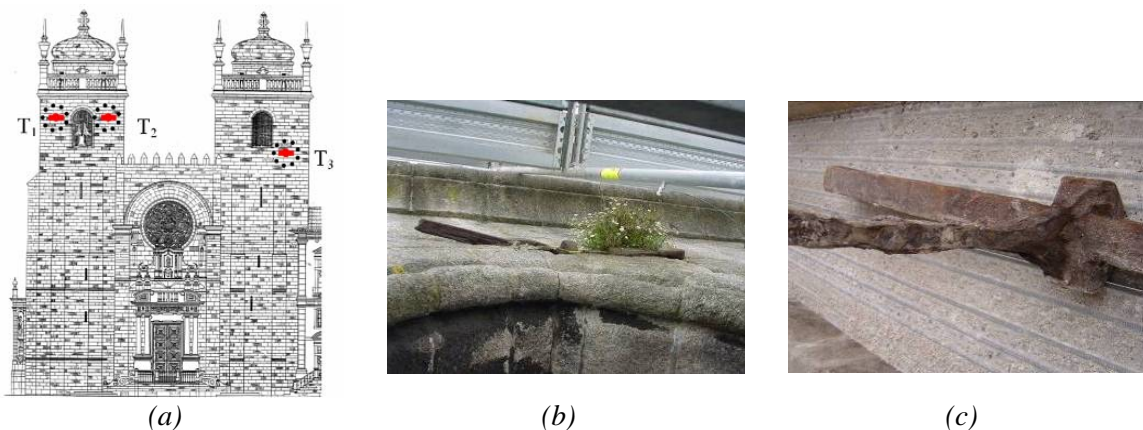


Figure 5: Ancient tower ties: (a) Deformed anchorage of tie T1 and (b) details of broken tie T3.

The South tower is more damaged than the North tower. Figure 6 exhibits the location of severe cracks and out-of-plumb walls in the South tower. Also the East façade of the South tower presents out-of-plane movements to the exterior. It is noted that the internal walls of this tower are straight, indicating crumbling or desegregation of the walls, with major cracks and voids in the interior, see Figure 7a. The separation between the internal and external leaves of the walls is further confirmed by the longitudinal cracking observed in most of the openings. Figure 7b illustrates such cracking, with a maximum width of some centimetres. Finally, it is noted that the North tower presents severe distributed vertical cracking at the base, see Figure 7c.

This cracking is only visible in the internal (medieval) face, while the external face seems undamaged. Moreover, the very large thickness of the walls is not replicated in the South tower. For these reasons, it is believed that the damage is not recent and the helicoidal staircase with vertical cracking belongs to the structure of an older tower.

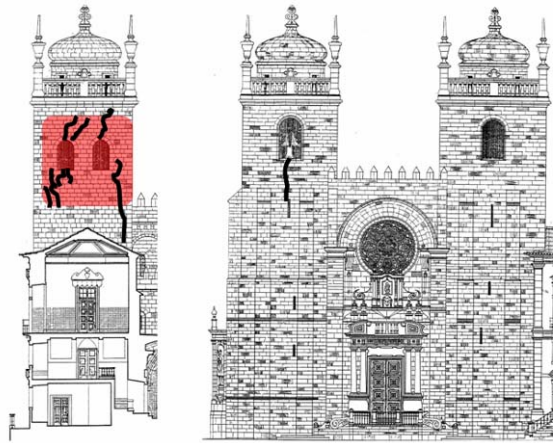


Figure 6: Location of most severe cracks and out-of-plumb walls, in the South view and main façade.

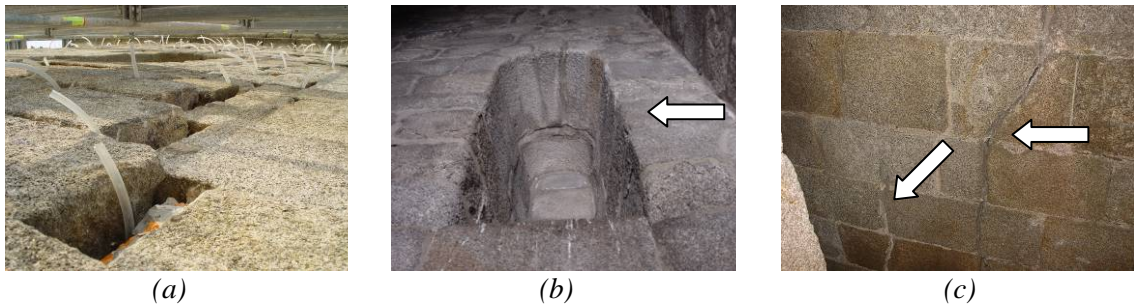


Figure 7: Details of the cracks in the towers: (a) cracks up to 0.20 m width in the South façade / South tower; (b) typical active cracks parallel to the walls at the openings; (c) vertical cracks at the base of the North tower.

Additionally, also the following damage is noted: (a) Steel structure in the cupolas of the towers with advanced corrosion; (b) Balustrades and pinnacles under deficient stability conditions and with significant movements due to corrosion of dowels and ties; (c) Misconception of the structure supporting the bells and clock in the North tower, see Figure 8.



Figure 8: Deficient structural system to support the bell stone level floor.

### Existing damage

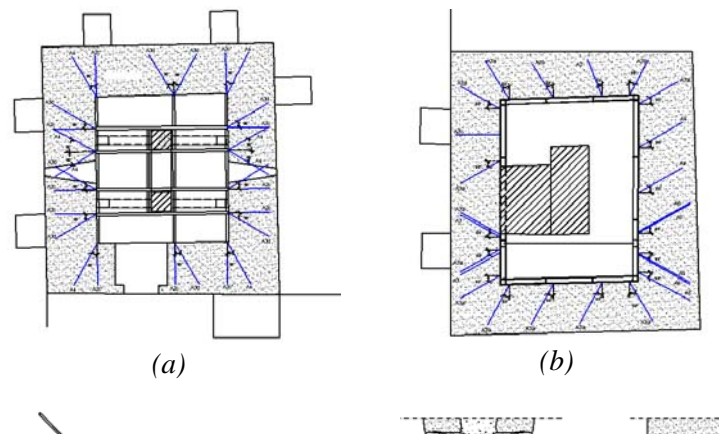
As it arises from the history and survey, the towers seem to have been damaged in the past and rebuilt (particularly the South tower). The (re)construction seems to have been carried out under deficient execution conditions, no particular well defined structure and using improvised construction details. In addition, different remedial techniques were already used in the past aiming at correcting and strengthening the towers.

The walls of the towers seem not to possess adequate connection between the external leaves and severe water infiltration in the walls contributed to the existing damage and to the loss of material in the rubble infill. Here it is again stressed that the Cathedral is located at the top of a hill, the masonry joints have lost all mortar and it was found that the rubble infill was wet by the end of the summer. Besides other damage, the most relevant feature is that the North tower is divided in two similar U-shaped parts, from mid-height to the top, with full cracks along the West-East direction (in the other direction, the existing ties kept the tower together), and the South tower is bulging outwards both to South and to East (the existing West-East tie is broken).

The solution adopted for strengthening consists mostly of a steel ring in both towers, aiming at confining the structure along the two orthogonal directions, in the sole location possible, see Figure 9a,b. The rings are made with welded stainless steel plates (class AISI 316L), connected to the towers using long, inclined stainless steel anchorages inside of a cloth duct to prevent generalized injection, see Figure 9c-e. The length of the steel profiles is defined so that the elements can be transported to the location through the existing doors and can be easily assembled in situ, without any further welding.

In the North tower, the ring also aims at providing a support for the stone pavement for the bells. The reason being that the stone columns are very deteriorated and possess presently no structural function and the stone struts have very deficient conception, see Figure 9c. Here it is noted that it was decided not to recuperate the structural function of the columns (e.g. using injection) because the lower level seems to indicate insufficient strength of the inner core, see Figure 9c and Figure 8. The steel ring is made of U profiles (240  $\square$  120 mm and 200  $\square$  100 mm height).

In the South tower, a set of two ties was provided to the ring, because it was possible for aesthetic reasons and they are a witness of the ancient broken tie. The ring must cross the staircase at a selected location because the complex internal structure of the tower does not allow otherwise. Due to the lack of internal stiffening elements, a much more stiff steel frame is needed and the steel ring is made of I profiles (180  $\square$  180 mm). Due to the bulging outwards of the East and South façades, and the severe cracks in the corners, several short ties have been added to the structure to stitch the East and South façades, and two long ties through the core of the South façade have been added to connect the West and East façades, see Figure 9f. Figure 9g presents details of the two types of anchorage plates adopted (circular plates and specially designed crosses).



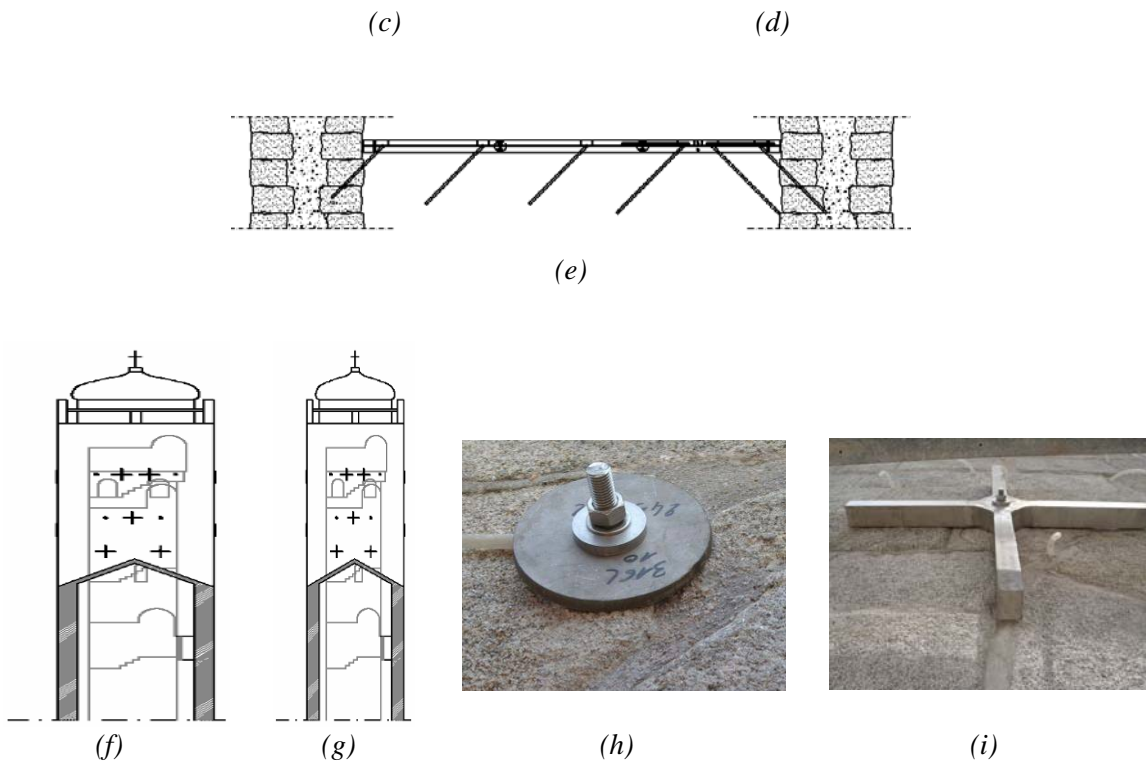


Figure 9: Aspect of the strengthening of the towers using stainless steel rings and long inclined anchorages: (a) plan of the ring for the North tower; (b) plan of the ring for the South tower; (c) North-South section for North tower; (d) West-East section for North tower; (e) typical section for South tower; (f) additional ties placed in the West and South façades of the South tower; (g) details of the anchorage plates.

The replacement of iron dowels and ties by stainless steel was made in pinnacles and balustrades. The large pinnacle in the top of the North tower cupola was totally loose at the time of the works and was jacketed with steel plates at the top and bottom necks. Other works carried out include injection of the main cracks with lime based mortar grout, repointing all joints with selected lime mortars (a traditional mortar for the filling and a more durable lime mortar for the finishing), protect against corrosion (the two ties in the North tower were kept in place) or replacing all existing iron.

### Monitoring Plan

Given the cultural importance of the building and the significant damage in the South tower, a monitoring system was planned and installed. The system includes four waterproof crackmeters in the largest cracks, two strain gages for the new ties, two biaxial clinometers to measure the tilting of the tower, as well as temperature, humidity and wind sensors, see Figure 10 and Figure 11. The system includes a datalogger and a GSM interface for remote monitoring, see Figure 12. An example of the measured values, for the crackmeters and temperature sensors, indicate minor variations and the typical seasonal effects, thus confirming the adequacy of the intervention measures.

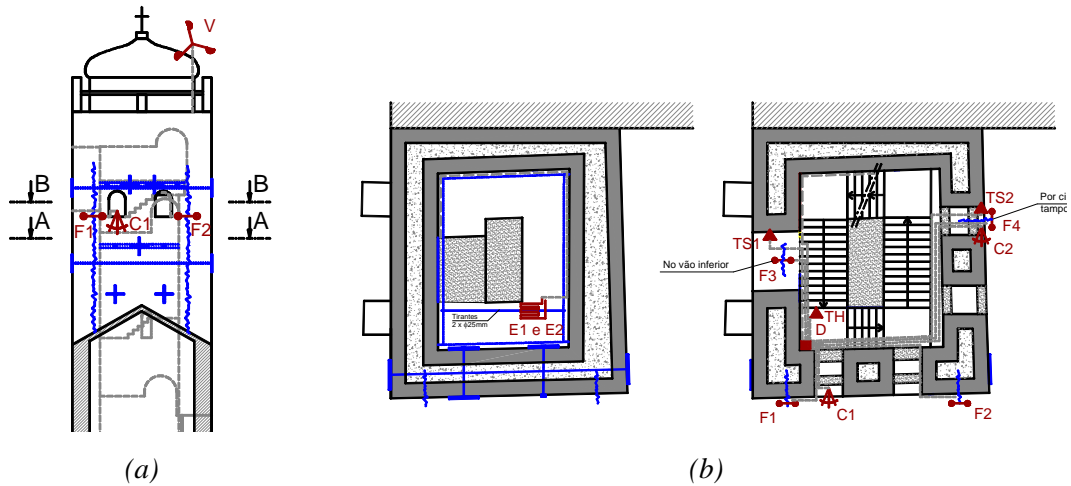


Figure 10. Monitoring system in the South tower: (a) South view; (b) plan. Here, F1 to F4 indicate crackmeters, E1 and E2 are vibrating wire extensometers, TS1 and TS2 are temperature sensors, TH is a combined temperature and relative humidity sensor, C1 and C2 are tiltmeters and V is anemometer capable of measuring wind direction and velocity.

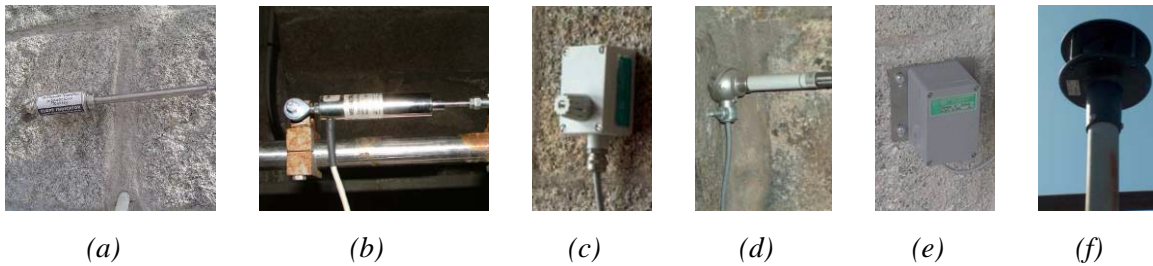


Figure 11. Examples of sensors placed: (a) crackmeter; (b) extensometer; (c) temperature sensor; (d) combined temperature and relative humidity sensor; (e) tiltmeter; (f) anemometer.

### Analysis of Saint Vincent Chapel

The Saint Vincent Chapel is located next to the South wing of the Cathedral cloister. During the restoration works of the roof, it was found that the extrados of the chapel vault was filled with rubble resulting from old demolitions see Figure 14. Also, and as usual in several historical constructions, the timber roof was partly supported by the vault, using later added struts. The issue addressed here is the stability of the vault and the convenience of the removal of the infill.

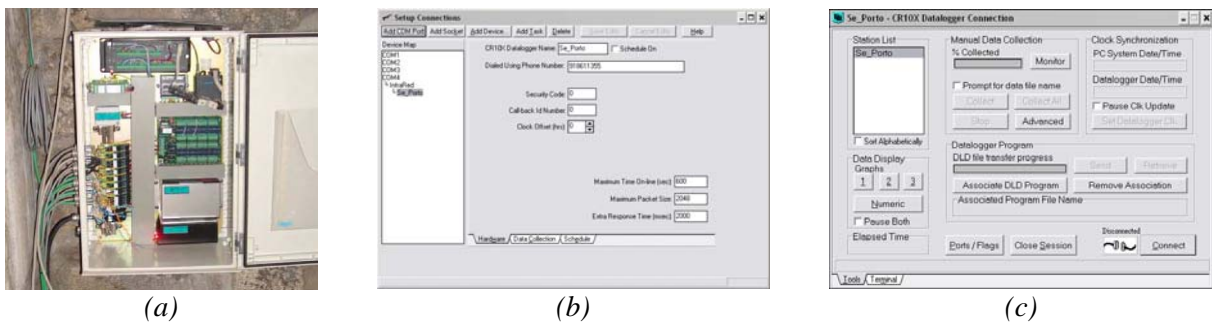


Figure 12. Data acquisition system and software: (a) datalogger; (b) GSM download; (c) manual data collection.

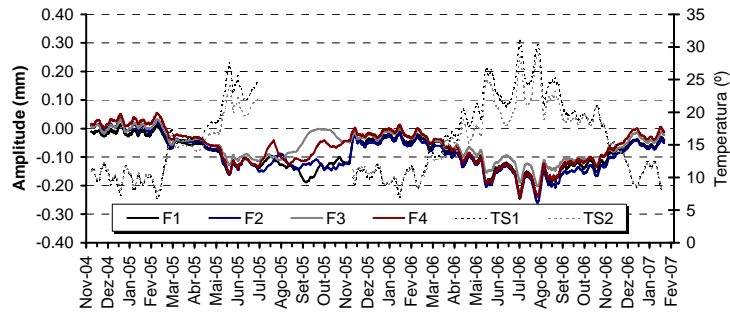


Figure 13. Example of results from crackmeters and temperature.



Figure 14. Roof of Saint Vincent Chapel: (a) aspect of restoration works; (b) aspect of vault infill with rubble.

## Survey

The structure consists of a barrel vault with an approximate thickness of 0.25 m and a span of 6.8 m. On the North side, the cloister acts as a buttress but on the South side no buttresses are present. Even if the South wall (1.70 m) is thicker than the North wall (1.30 m), out-of-plumb movements outwards are clearly visible in the former, up to 1.5% (or 0.10 m at the springer of the vault), see Figure 15a. Nevertheless, as the vault presents only minor cracking, see Figure 15b, it was believed that the vault has been built after the wall deformation. As it will be confirmed next, the vault replaces a previous timber roof at the same level. From inspection pits, see Figure 15c, the geometry of the vault could be determined.

## Structural Analysis

A plane model was adopted for the structural analysis of the barrel vault. The analysis was carried out using limit analysis, discretizing the walls and vault as a set of rigid blocks [4]. More complex approaches are available, e.g. [5-7], if necessary for more detailed studies. The assumed material properties include a tensile strength equal to zero, a tangent of the stiffness angle equal to 0.7, zero dilatancy and a compressive strength equal to 6 N/mm<sup>2</sup>. The actions included consist only of the self-weight of the structure.

As the objective of the analysis is to evaluate the influence of the infill, a sophisticated representation of the structure is not particularly relevant. Therefore, the influence of the cloister, openings of the walls and ribs of the vault were neglected in order to avoid the need of a three-dimensional model. The numerical results are given in Figure 16, in terms of thrust-lines and collapse mechanisms, both for the model with and without

infill. The ultimate load factor increases 45% if the infill is removed, which seems also natural because it was not originally planned for this construction.

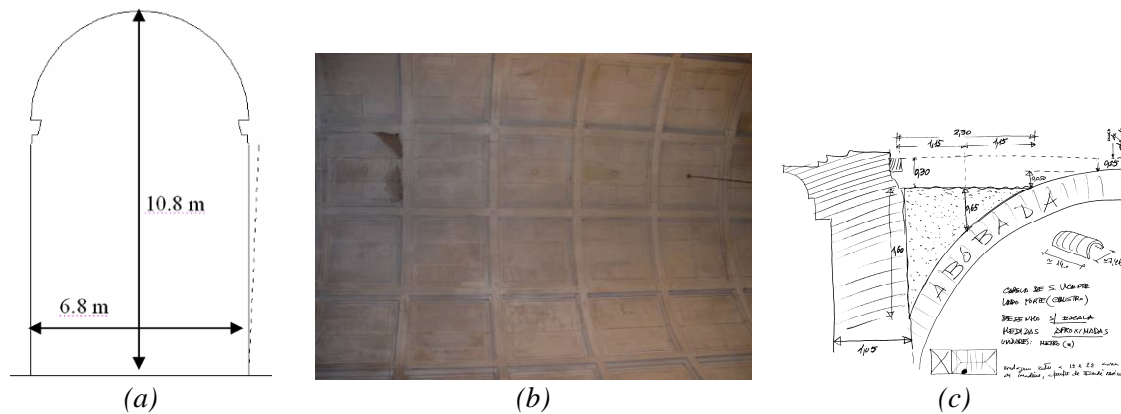


Figure 15: Saint Vincent Chapel: (a) cross-section with 1.5% out-of-plumbness on external (right) wall; (b) aspect of vault intrados; (c) aspect of survey from inspection pit.

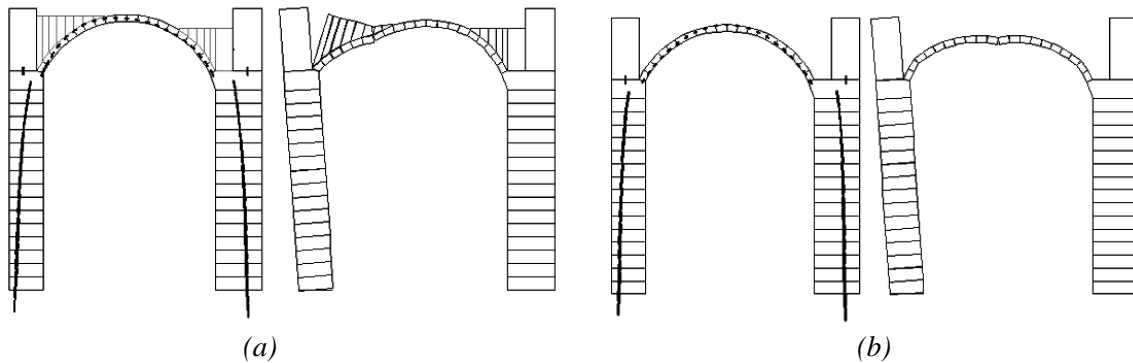


Figure 16. Results of the numerical analysis, in terms of thrust-lines and failure mechanisms: (a) with infill, for a ultimate load factor equal to 6.5; (b) without infill, for a ultimate load factor equal to 9.4.

## Remedial measures

The infill was removed but, for safety reasons, it was recommended to accompany this task with topographic measurements, see Figure 17a. The targets were read always at early morning to reduce temperature effects, daily during the process of infill removal (one week) and weekly during one month after load removal. Approximately 35 m<sup>3</sup> (7000 kg) of rubble were removed from the vault and no movements were recorded in the targets. Figure 17b demonstrates that (a) the vault was never conceived to accommodate infill and (b) a timber roof existed at the level of the vault, before the construction of the vault and the new roof at a higher level.

## Conclusions

The present paper addresses the works recently carried out at the Cathedral of Porto as a case study. The methodology that governed the complete set of works is addressed and the conservation and repair works are briefly addressed. Three aspects are treated in detail, namely the towers, the Saint Vincent Chapel and the skylight.



*Figure 17. Infill removal: (a) location of topographic targets for monitoring; (b) aspect of the cleaned vault.*

The towers exhibit severe global damage including cracking, crushing and separation between leaves and also local damage in the cupolas, pinnacles and balustrades. The global damage seems mostly due to water infiltration, deficient conception of the structure, ancient damage due to lightning and changes in the structures of the towers. For the purpose of increasing the structural performance, a rigid frame of stainless steel profiles and a set of long, inclined anchors have been designed to provide a confining ring. In addition, new ties and stitching of the external leaves were also included when necessary. The local damage is mostly due to corrosion of iron elements, which have been replaced by stainless steel elements or have been protected. The monitoring system confirms the adequacy of the remedial measures.

The chapel exhibits a significant overload due to a rubble infill resulting from previous demolitions and the external wall presents moderate out-of-plane displacements. From the diagnostics, it was possible to safely prescribe the removal of the infill (approximately seven tons). This operation allowed to confirm that the present vault is not contemporary to the walls and the external wall deformation is stabilized.

## **References**

- (1) Lourenço, P.B., Melo, A., Carneiro, M. 2004. Remedial measures for Cathedral of Porto: A post-modern conservation approach. In: C. Modena et al. (ed.), *Structural analysis of historical constructions IV*; Proc. intern. conf., Padova, November 2004, p. 51-62, Leiden: A.A. Balkema Publishers
- (2) Binda, L., Anzani, A. 1997. The safety of ancient masonry towers: A survey on the effect of heavy dead loads. In G. Arun, N. Seçkin (ed.), *Studies in ancient structures*; Proc. intern. conf., Istanbul. Istanbul: Yıldız Technical University.
- (3) Macchi, G. 1998. Seismic risk and dynamic identification in towers. In *Monument 98 – Seismic performance of monuments*; Proc. intern. workshop, Lisbon, 12-14 November 1998, p. K.3-K.17, Lisbon: DGEMN, LNEC and JRC.
- (4) Orduña, A., Lourenço, P.B. 2003. Non-linear cap model for limit analysis of masonry structures, *J. Struct. Engrg.*, ASCE 129(10): 1287-1430.
- (5) Lourenço, P.B. 2001. Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations. In: P.B. Lourenço, P. Roca. (ed) *Historical constructions 2001*, p. 91-116, Guimarães: University of Minho.



- (6) Lourenço, P.B. 2002. Computations of historical masonry constructions, *Progress in Structural Engineering and Materials* 4(3): 301-319.
- (7) Lourenço, P.B., Zucchini, A., Milani, G., Tralli, A. 2006. Homogenisation approaches for structural analysis of masonry buildings. In: P.B. Lourenço et al. (ed) *Structural analysis of historical constructions*, p. 59-75, New Delhi: McMillan.

## **Últimas actuaciones en la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. (2002-07)**

*Juan Ignacio Lasagabaster<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Director Técnico de la “Fundación Catedral Santa María”.*

El objetivo de esta comunicación es exponer los trabajos realizados en los últimos cinco años en la Catedral de Vitoria desde que se realizó -al amparo de la Fundación Catedral Santa María y con el auspicio de la Academia del Patal- la última Bienal de Restauración. Los trabajos promovidos desde entonces por la Fundación Catedral Santa María y el modelo que originó su creación son un hecho.

Como primer logro, tenemos que apuntar la consolidación de un modelo de restauración e intervención en el Patrimonio que tiene como su imagen más visible la consecución de una auténtica restauración abierta. De hecho, esta apuesta es uno de los mayores éxitos obtenidos por la Fundación desde su creación que ha conseguido mantener su vigencia e interés a lo largo de los años. El eslogan creado al amparo de esta idea “abierto por obras” esta generalizándose y convirtiéndose en una exigencia social asociada al desarrollo de las propias obras de restauración, tal y como lo demuestran otras actuaciones recientes que no hacen más que repetir esta idea.

La posibilidad de contemplar los monumentos, los yacimientos o las obras de arte asociados a los mismos, desde unas perspectivas imposibles de conseguir en el monumento restaurado o de contemplarlos durante su “descubrimiento” o durante su restauración, convierten el proceso de la propia obra en un momento irreplicable, con un alto valor social, cultural y turístico. Evidentemente, para conseguir este objetivo es necesario prever en el proyecto los medios auxiliares de circulación seguridad y protección que permitan simultanear ambas actividades y los canales de difusión e información que permitan su conocimiento. Se ha demostrado que el sobre coste que suponen estos medios se ven ampliamente superados por el rendimiento social y cultural obtenido.

En segundo lugar, en este periodo se han consolidado también los diferentes equipos de trabajo estructurados en torno a una dirección técnica y otra de tipo administrativo y de gestión que actúan coordinadamente. Los equipos de restauración de arquitectura, arqueología, restauración artística, geológico y de materiales pétreos, informático, difusión y visita guiada, maquetas, etc. son ya una realidad. La creación de comisiones de trabajo interdisciplinares ha permitido que las soluciones de restauración propuestas sean consensuadas por todos los equipos que intervienen en el proceso concreto y ha servido para que podamos hablar de una auténtica restauración “democrática”. Este modelo de trabajo fue creándose durante la redacción y desarrollo del Plan Director de Restauración que fue premiado con el máximo galardón del premio Europa Nostra en la categoría de estudios sobresalientes del año 2002.

La comunicación se centra sobre las últimas actuaciones llevadas a cabo en la Catedral relacionándolas en lo posible con el tema de esta III Bienal, la “des-restauración”. Partiremos de la base de que, cualquier intervención material sobre un edificio construido origina siempre una transformación del mismo, produciendo a su vez la alteración de otras transformaciones (actuaciones) que, por la razón que sea, han quedado subordinadas a la última.

Este es uno de los motivos por los que en la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz se ha dado tanta importancia a los métodos de documentación y análisis apuntados en el Plan Director y que se desarrollan en régimen de continuidad y simultaneidad con las mismas labores de intervención que se están llevando a cabo. El Plan Director plasmado en el documento que seguramente ustedes ya conocen es, por lo tanto, “una foto fija” de un proceso de conocimiento que prosigue hoy día y que pretende llegar a ser, a medida que se vayan incorporando a él las diversas actuaciones realizadas, una herramienta útil para el seguimiento, control y mantenimiento del monumento.

## **0.- Un marco recién restaurado.**

La intervención llevada a cabo entre los años 1960 y 1967 produjo una alteración muy profunda del interior del templo en varios aspectos no sólo formales o estilísticos sino también estructurales y constructivos. En aras de recuperar el “estilo gótico original” fueron suprimidos todos los arcos codales de refuerzo renacentistas de su nave principal, modificadas las embocaduras de algunas capillas, abiertos nuevos vitrales en los paramentos superiores de las naves y reducida la sección de un importante contrafuerte en el ala sur del crucero, esto último para poner en valor una valiosa portada gótica parcialmente oculta por aquél.

Así mismo, se propició la eliminación de prácticamente todos los vestigios de pinceladuras existentes en bóvedas y paramentos, procediéndose de manera sistemática tras su limpieza, a la aplicación de una capa de lechada de cemento blanco sobre la que se imitó el despiece de sillería de piedra existente, “regularizándolo”, incluso, en algunas zonas por encima de su morfología real.

En el exterior se procedió al sistemático rejuntado de las fábricas con mortero de cemento Pórtland gris, con el rehundido de las juntas de la mampostería.

Nada que no fuera lo habitual en ese momento que, por fortuna, ya es historia. Pero aquí debo hacer una reflexión: La catedral recuperó un cierto esplendor en una etapa un tanto sórdida de nuestra historia y la sociedad del momento asumió el cambio con naturalidad y olvidó viejas imágenes. Una manera de entender la restauración, posiblemente de las más cualificadas de su tiempo, quedó incorporada también al bagaje cultural del monumento.

No obstante esta actuación nos legó algunos problemas a los que venimos detrás:

- Se reactivaron movimientos en fábricas y bóvedas en las naves del crucero que posiblemente se hallaban estabilizados o al menos ralentizados.
- Se incrementaron notablemente las humedades en el subsuelo y en la base de las fábricas (capilaridad) por efecto de la nueva solera de hormigón colocada en el interior.
- Las sales del mortero de cemento de la capa superficial aplicada en el interior, han producido eflorescencias de difícil eliminación.
- El rejuntado exterior, al quedar dificultada con el mortero de cemento la transpiración de las juntas, ha favorecido la degradación de la piedra caliza de la mampostería.

- El encamisado de las bóvedas con mortero de cemento Pórtland provocó, asimismo, la aparición de sales en las nervaduras de piedra de las mismas y la degradación del material.

Pero también, y todo hay que decirlo, tuvo sus efectos positivos:

- Supuso un “punto cero” para la lectura de las patologías y su inevitable evolución a lo largo del tiempo transcurrido, señalando los lugares “activos” de la estructura de la catedral, lo cual ayudó en la monitorización y seguimiento de las mismas.
- Permitió entender con mayor claridad el comportamiento estructural de algunas zonas “calientes” del edificio y así han podido ser adoptadas decisiones que influirán positivamente en la manera de realizar las consolidaciones.
- Por último, el rejuntado de las mamposterías con el rehundido de las juntas, posibilitó la lectura estratigráfica de paramentos con mayor facilidad.

Algunas des-restauraciones sobre esta etapa de la catedral ya emprendidas:

- Eliminación de los solados del interior de las naves.
- Eliminación del encamisado de mortero de cemento Pórtland de las bóvedas.
- Supresión puntual de los morteros de relleno de cemento en fisuras y grietas.
- Eliminación sistemática de los morteros de cemento Pórtland en las fábricas exteriores.

### **1.- La rehabilitación del acceso al “Itinerario del Conocimiento”. Las claves de la intervención.**

Esta zona del conjunto catedralicio, corresponde al espacio existente bajo la sacristía de siglo XVIII que se adosa al templo en su lado oeste tras la girola. Nuevamente nos encontramos con un espacio intervenido anteriormente para su destino último como almacén-trastero y donde se ubicaba la sala de calderas del último sistema de calefacción por aire caliente instalado en la catedral sobre los años 70 del siglo XX.

Con acceso desde la calle Cuchillería, en una cota que se encuentra siete metros por debajo del nivel del suelo de la sacristía, que es el mismo que el actual de la catedral, pronto se pusieron de relieve las posibilidades de este espacio para cumplir las funciones de acceso a un itinerario didáctico, independizable de los espacios de uso religioso. La existencia de una perforación de grandes dimensiones que atravesaba el grueso muro de una de las capillas de la girola tres metros por debajo de la cota del suelo de la catedral, abierta en su día para el paso de la conducción de aire caliente del sistema de calefacción antes mencionado, posibilitaba la comunicación sin grandes esfuerzos entre este ámbito el interior del templo.

Para la puesta en práctica de esta idea, anticipo del programa “abierto por obras”, se decidió comenzar a rehabilitar esta sala aplicando los criterios teóricos del Plan Director para el desarrollo de los futuros proyectos de ejecución:

- Análisis del estado actual con identificación de elementos perturbadores en base a las patologías por ellos inducidas.
- Limpieza controlada y desmontaje selectivo de los elementos perturbadores.
- Exhaustiva documentación gráfica.

- -Investigación arqueológica del subsuelo.
- Pormenorizado análisis estratigráfico del conjunto.
- Identificación y ponderación de sus valores.
- Análisis de las patologías materiales y estructurales detectadas, su alcance y posible remedio.
- Identificación de las funciones asignadas por los nuevos usos y su viabilidad.

El proyecto redactado por los arquitectos Pablo Latorre y Leandro Cámara, se apoyó en los siguientes principios que sustentan desde entonces todos los proyectos que desarrollan el Plan Director:

- Supresión de las agresiones externas causantes de las patologías: Canalización de filtraciones de agua, tratamiento antixilófagos de las estructuras lógicas, saneado del patio y locales colindantes, etc.
- Eliminación de elementos incompatibles, degradados o dañinos: Desmontaje de las entreplantas provisionales de almacenaje de despojos y rehechos, desmontaje del sistema de calefacción por aire caliente (caldera, conductos y depósito de gasóleo incluidos), eliminación de las redes de agua y electricidad obsoletas, etc.
- Restauración científica de los elementos arquitectónicos supervivientes: Limpieza y tratamiento de las estructuras lógicas, limpieza y saneado de las fábricas.
- Apoyo y refuerzo de los elementos arquitectónicos sujetos a nuevas funciones mediante la adición de prótesis y/o elementos nuevos reversibles contruidos con materiales y técnicas compatibles con las antiguas: Recomposición de las zonas degradadas de los pies de los pilares mediante prótesis encoladas sobre nuevas bases de sillería, refuerzo de las vigas mayores con puntales de madera laminada,
- Adición de las nuevas arquitecturas planteadas mediante la actualización y recuperación de las técnicas constructivas tradicionales y su adaptación a las tecnologías actuales de producción y a las formas del lenguaje contemporáneo: Pavimentación protectora del subsuelo rocoso mediante enlosado de piedra caliza de gran espesor colocada a hueso sin mortero, Instalación de escalinata realizada en madera doblemente laminada, reconstrucción con sillería de piedra caliza del túnel abovedado de acceso al interior de la catedral, etc.
- Adecuación no forzada de las instalaciones efímeras necesarias para los nuevos usos: Instalación superpuesta y reversible de los sistemas de electricidad, iluminación, multimedia, previsión de la colocación de una futura plataforma hidráulica para la eliminación de barreras arquitectónicas, etc.

La intervención realizada, pretende dar respuesta al reto que plantea la incorporación de la arquitectura de nuestro tiempo al hecho monumental y ha tratado de hacerlo utilizando los códigos con los que se ha producido la sucesión histórica de las arquitecturas que lo han ido configurando.

### **3.- La des-restauración en el Pórtico.**

El Pórtico de la Catedral de Santa María se comenzó a construir en el 2º tercio del siglo XIV y se finalizó en el siglo XVIII, con el cerramiento de los tres muros de su lado Oeste. Las tres portadas que dan acceso al interior de la catedral, se construyen entre 1330–1360 y, a finales del siglo XV, se erigen los muros fronteros que servirán de apoyo a las bóvedas que se ejecutan a continuación. A mediados del siglo XVI, por encargo de Paternina, se cierra el lado norte construyéndose en el pórtico la capilla de la Piedad y, ya a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, se ciegan con mampostería los vanos de su lado occidental, llegando así hasta nuestros días.

A lo largo del tiempo, el aspecto de su superficie ha sido sistemáticamente modificado, bien mediante cinceladuras y policromías al comienzo, o con lechadas de un solo tono con o sin despiece más tarde, hasta llegar, incluso, al rascado para su eliminación.

La situación que se apreciaba era complicada. Por un lado estaba la degradación propia de un monumento con claros indicios de falta de mantenimiento:

- Filtraciones de humedad en las bóvedas, con las correspondientes eflorescencias salinas y manchas
- Suciedad en todo el basamento por acumulación de polvo y contaminación, etc...;
- Agrietamientos y fisuras en nervaduras y elementos de las bóvedas indicativos de la existencia de movimientos.

Por otro, al acercarnos, se observaban por toda la superficie pequeños restos de color, lechadas de diferentes tonos, juntas de cemento, últimas capas-lechadas de composición “dudosa” (cemento), rascados procedentes de algún intento de “limpieza”, etc..., todo bastante confuso y entremezclado, lo cual hacía pensar en la existencia de numerosas intervenciones.

En coherencia con el método de trabajo aplicado por el Plan Director, se emprendió la ejecución de un detallado estudio que fue analizando, elemento por elemento su estado de conservación, historia material y evolución policroma, estableciendo, además, la correspondencia de las policromías de cada elemento con el resto, de modo que fuera posible comprender la evolución policroma y material del Conjunto desde los comienzos de su realización hasta ahora.

Simultáneamente, y en base a los resultados de estos estudios, se fueron realizando diversas pruebas de intervención, necesarias para definir las soluciones a cada uno de los problemas detectados en el pórtico. Investigación e intervención, fueron realizadas por un completo equipo bajo la dirección de la restauradora Diana Pardo, miembro de la Dirección Técnica de la Fundación Catedral Santa María.

Los resultados del estudio dieron a conocer, que se había intervenido en su superficie en 15 ocasiones, 6 de ellas en toda su extensión y 9 parcialmente, en zonas concretas; Por ejemplo, en la Virgen, que siempre ha sido tratada de modo independiente al resto, se comprobó que había sido policromada en 10 ocasiones.

Además, también quedaron definidas con detalle las causas que habían producido su deterioro y se evidenció la dificultad para encontrar una solución para restaurarlo de forma satisfactoria.

Tras barajar varias posibilidades, al final se decidió realizar un tratamiento conservativo que eliminara las diferentes alteraciones y sus causas:

- Limpieza de la suciedad y costra negra.
- Eliminación de eflorescencias salinas y exceso de sales solubles.
- Eliminación del mortero de cemento Pórtland de juntas y reposiciones.
- Colocación de nuevos morteros que cierran la falta de cohesión de algunos muros, etc.

Pero también se pretendía devolverle, en la medida de lo posible, su riqueza y esplendor pasados: ya que la recuperación de la policromía de todo el pórtico no era posible debido a los poquísimos restos que quedaban y su estado de conservación tan frágil, se trataba, al menos, de poner en valor el minucioso y exquisito trabajo de labra de los canteros medievales y del renacimiento.

Durante la intervención de los años sesenta, con el fin de homogeneizar el aspecto desigual que entonces ofrecía el pórtico con los restos desordenados de todas las intervenciones anteriores, se intentó, al parecer, la eliminación de éstas mediante ácidos y rasquetas. Al no poder conseguirse, fue aplicada a casi toda la superficie, una gruesa lechada de cemento Pórtland, cal y pigmentos que le dio al Pórtico ese acabado uniformizado que se buscaba, pero a la vez dejó todos sus elementos y tallas con todas las formas redondeadas, sin detalle y, en resumen, con toda la calidad de la labra perdida. Eliminar esta capa implicó un duro, lento, largo y minucioso trabajo de microabrasión, quedando completada la des-restauración de la misma recientemente.

Otro trabajo muy minucioso y lento emprendido ha sido la consolidación generalizada de las fábricas, tomándose la decisión de evitar en lo posible el empleo de productos consolidantes, empleándolos únicamente en las zonas donde era estrictamente necesario. Por esta razón se colocaron morteros tradicionales no sólo en juntas y grietas, sino también en todas las pequeñas fisuras, huecos, zonas erosionadas, etc. No han sido los dos únicos trabajos de restauración realizados pero sí los más importantes, tanto por su magnitud como por los resultados obtenidos.

Finalmente un imprevisto: Al eliminar las reposiciones que estaban en mal estado se encontró un nervio (varias dovelas y la clave) de la bóveda central con un antiguo problema sin solucionar. Bajo una gran reposición antigua de yeso se encontró un segmento del nervio cuya cohesión interna era prácticamente inexistente. Con toda probabilidad las filtraciones de humedad continuadas con aporte de sales, habían ido rompiendo el poro interno de la piedra, debilitándola hasta el punto de que ya no podía asegurarse su función estructural. Con posterioridad se comprobó que el deterioro afectaba a buena parte del nervio de la bóveda alcanzando a una de las claves con medallón provisto de bajo-relieves.

Urgentemente se construyó, con el auxilio de la plataforma utilizada en la restauración, una prótesis metálica diseñada para descargar el trabajo de todo el sector de la nervadura afectado (incluida una de las claves) y posibilitar así la sustitución controlada del mismo. En estos momentos se hallan a pie de obra los segmentos nuevos y la clave tallados en piedra caliza y está previsto que se proceda a efectuar esta delicada labor el próximo día 29 de noviembre.

El Pórtico que podemos apreciar tras la restauración quizás no cumpla las expectativas de muchos, de encontrar un resultado espectacular, pero en cambio ahora conocemos mucho más del mismo y su evolución y, al menos, está sano y respira con dignidad.

Esta actuación fue la primera que se implantó el programa de visitas guiadas a las obras de la catedral que más tarde se vino a denominar “Abierto por Obras”, construyéndose un andamiaje específico que posibilitaba la circulación del público sin interferencias con el trabajo de los especialistas.

En relación con la divulgación del conocimiento adquirido sobre esta parte del templo, además de los modelos informáticos virtuales, serán los avances tecnológicos los que puedan, probablemente, ayudar a reconstruir “in situ”, de manera virtual, toda la información que hemos recopilado en los estudios y que se ya encuentra incorporada a la cartografía del Sistema de Información de la Catedral:

Así por ejemplo, mediante la proyección de luces se podrá devolver al pórtico el aspecto que tuvo y hacernos revivir las policromías que ya se han perdido. Con una ventaja fundamental: nos podrán permitir proyectar reconstrucciones lumínicas diferentes para las distintas épocas policromas del pórtico de manera interactiva, algo que con una intervención directa sería imposible.

Otras des-restauraciones que se llevan a cabo en el pórtico durante la ejecución de la primera fase del Proyecto de Restauración de la Torre y el Pórtico de la catedral:

- Apertura de los arcos cegados del pórtico.
- Eliminación de rejuntados de cemento Pórtland en las fábricas de mampostería.

#### **4.- ¿Una catedral sobre la roca?**

Los estudios geotécnicos realizados en el interior y exterior de la catedral antes de la redacción del Plan Director, indicaban que ésta se hallaba erigida sobre un terreno estratificado con rellenos más o menos consistentes de material arcilloso sobre un sustrato resistente de roca caliza margosa compuesto a su vez de otros dos estratos. El primero de ellos, sobre el que presumiblemente se apoyan la mayor parte de las cimentaciones, corresponde a un nivel muy meteorizado de espesor variable, siempre superior a un metro, de la roca madre inferior, que es una margocaliza de sedimentación de material marino y microcrustáceos. Las resistencias evaluadas oscilaban en un rango de entre 2,5 Kg. /cm<sup>2</sup> en el caso más desfavorable, hasta un máximo menos probable de 19 Kg. /cm<sup>2</sup>.

Por otra parte el estudio comparativo de las deformaciones y asentamientos en los pilares de la nave principal, posibilitado por la cartografía tridimensional realizada, indicaba con claridad la existencia de asientos diferenciales entre ellos, con toda seguridad producidos durante las primeras etapas de la construcción del 2º período gótico a finales del siglo XIV.

Con el único objetivo de realizar una evaluación sobre el estado real del sustrato rocoso y de las cimentaciones, se tomó la decisión en el año 2002 de efectuar una excavación en extensión bajo el coro de la catedral por ser una de las zonas de ésta sin indicio de asentamientos. Tras la excavación pudo comprobarse que las cimentaciones de los cuatro pilares afloradas presentaban en cada uno de ellas una situación diferente: De los cuatro, tan sólo uno se hallaba apoyado directamente en la roca, mientras que los demás se sustentaban sobre restos de construcciones anteriores y todos ellos de diferente



forma. Además, uno de ellos presentaba indicios de oquedades y degradación en su fábrica.

Esa fue la primera de las razones que llevaron a adoptar la decisión de excavar toda la catedral y acometer de manera radical la consolidación de todo el sistema de cimentaciones de la misma. Para ello, se construyó una estructura de acodalamiento, a media altura de la nave principal, que servía también para la sustentación de un carril muy útil para la realización de la fotogrametría de la excavación y para el transporte de materiales para las intervenciones. También sirvió para soportar la plataforma elevada que, desde entonces, permite la realización de visitas guiadas a las obras sin que se produzcan interferencias con éstas.

Previamente a la excavación arqueológica, se eliminó todo el solado de placas de caliza de Escobedo y la solera de hormigón colocados en la anterior restauración, apreciándose muy rápidamente el descenso de las humedades de capilaridad en los paramentos de las naves laterales.

Además de una valiosísima información sobre la evolución de los asentamientos urbanos en la colina de Gasteiz, la excavación confirmó los temores sobre el estado de las cimentaciones y la necesidad de actuar en ellos cuanto antes. En dos casos resultaba especialmente evidente la descomposición de sus fábricas, presentando ambos claras muestras de fisuración vertical.

Se tomaron por entonces varias decisiones:

- Redactar un proyecto que permitiese iniciar el refuerzo de las cimentaciones de la nave principal mediante el encorsetado y acodalado de las cimentaciones de los pilares y su consolidación con inyecciones de lechada de cal en su interior una vez confinadas aquellas.
- Iniciar en paralelo un proceso de investigación en colaboración con el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava para determinar las características de la cal a inyectar utilizando como zona de experimentación las dos pilastras exteriores del pórtico sobre los que no se apoya la torre del templo.

El proyecto redactado por los arquitectos Pablo Latorre y Leandro Cámara, propuso, como medida preventiva, la construcción de dos estructuras de apeo de los dos pilares en cuyas cimentaciones se había detectado un mayor deterioro de sus fábricas. Se justificaba esta precaución ante la posibilidad de que se produjesen asentamientos al inicio del proceso de inyección, debidos a la modificación del coeficiente de rozamiento de los morteros existentes en el interior a causa de la humedad introducida con la lechada.

Como medida complementaria, muy útil para la evaluación del riesgo existente, se adoptó la decisión de instalar en ambos apeos, durante la fase de inyecciones, un sistema de medición de los movimientos que se pudieran producir en ambos pilares y que tratará de dimensionar los posibles asentamientos que se produzcan.

En estos momentos se halla finalizada la construcción de los anillos de refuerzo de las cimentaciones de todos los pilares mediante su encorsetado con fábrica de mampostería realizada con mortero de cal hidráulica. En uno de ellos, no obstante hubo que recurrir a la utilización de hormigón armado, realizado con hormigón blanco de bajo contenido en sales y armaduras de acero inoxidable, debido a que en él se detectó un ligero asentamiento obligando a una ejecución más rápida.

También se han construido ya las dos estructuras metálicas de apeo preventivas proyectadas y se ha adjudicado la contratación del sistema de medición en las mismas, siendo inminente la contratación del proceso de inyecciones.

Los resultados del completo estudio realizado en el Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava sobre las cales existentes en el mercado, han llevado a determinar que la lechada a inyectar finalmente sea una lechada de cal hidráulica natural aditivada con un fluidificante. Está prevista la publicación de toda la investigación realizada, a comienzos del próximo año, en un libro de la colección de libros técnicos que la Fundación Catedral Santa María de Vitoria - Santa Maria Katedrala Fundazioa tiene previsto iniciar. Simultáneamente se colgará de la página web de la Fundación ([www.catedralvitoria.com](http://www.catedralvitoria.com)) toda la documentación.

### **5.- Los obispos esperan. Una cripta para la eternidad.**

En el suelo del presbiterio del crucero, al pie del altar mayor, fueron ubicadas, también durante la restauración de 1964, en el centenario de la primera diócesis vascongada, las tumbas de los tres obispos que escogieron ser enterrados en la catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz.

En un futuro cercano está previsto continuar con la excavación arqueológica de todo el transepto, efectuando el vaciado de los rellenos existentes necesario para continuar con la consolidación de los pilares y muros de esta zona de la catedral. Ello hará además posible la rehabilitación de los espacios obtenidos para su incorporación al “Itinerario del Conocimiento” propuesto en el Plan Director.

Esta actuación requerirá que, previamente, se realice el traslado definitivo de los restos mortales de los obispos allí enterrados a otro lugar de la catedral. Tras consultar a la Diócesis y al Cabildo, el lugar escogido para este fin ha sido la cripta situado bajo la capilla del Sto. Cristo o del Baptisterio, siendo encomendada la redacción del correspondiente proyecto específico a los arquitectos Pablo Latorre y Leandro Cámara.

La capilla del Sto. Cristo, utilizada como baptisterio de la Catedral, es una edificación de planta octogonal que se adosa exteriormente a la fábrica de la catedral y que se construye con una magnífica piedra de sillería arenisca en el siglo XVII. La cripta, debido al desnivel existente entre la cota exterior y la del interior de la catedral, se encuentra a nivel de la primera. Se cubre con una cúpula rebajada y en su planta se refleja también, la planta octogonal de la capilla.

Siguiendo con el discurso ya visto en las dependencias del acceso bajo la sacristía, ha sido construido un mausoleo formado por un vaso de planta casi cuadrada realizado con una piedra caliza marmórea negra, sobre el que se aloja un gran cofre – sarcófago de forma prismática con cantos redondeados y superficies cóncavas, construido en chapa de bronce y con dos de sus caras practicables. En su interior hay sitio para alojar hasta nueve obispos. El acabado de los paramentos y bóveda de la cripta son en estuco planchado a la cal. En el futuro se accederá a ella desde la nave de la catedral por una escalinata y un túnel abovedado.

### **6.- Herramientas para un futuro inmediato:**

Por último, con respecto al proceso de restauración abierto, se ha terminado la redacción del Anteproyecto General de Restauración que desarrolla las propuestas recogidas en el Plan Director y presenta una respuesta arquitectónica global y concreta de la restauración del monumento con soluciones probadas en algunas de las obras ya

ejecutadas. Con anterioridad fue redactado el Proyecto de Ejecución de la Restauración de Torre y Pórtico que por razones de financiación independizada, hubo que desgajar y anticipar del anteproyecto que se estaba por entonces perfilando. En ambos documentos aparecen desarrollados los criterios de intervención compatible expresados en el segundo apartado de esta comunicación y que han sido objeto de otra en esta Bienal por parte de los arquitectos autores de aquellos, Pablo Latorre y Leandro Cámara.



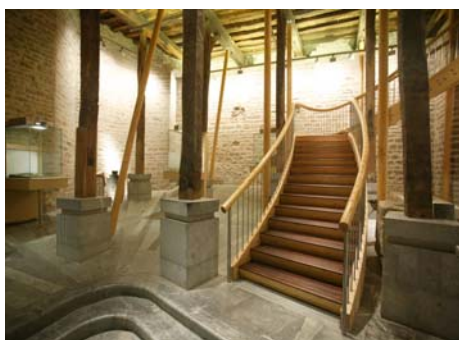
*Foto 1: Programa de visitas Abierto por Obras (Quintas Fotografos)*



*Foto 2: Restauración de 1960-67 (Archivo Provincial de Álava. Fondo Schommer-Koch)*



*Foto 3: La sala de acceso antes de la reforma (LyC arquitectos)*



*Foto 4: La sala de acceso tras la reforma (Quintas Fotografos)*



*Foto 5: Estado de las portadas del pórtico antes de la intervención. (Quintas Fotografos)*



Figura 6: Estudio de correspondencia de policromías. (Quintas Fotógrafos)



Figura 7: Imagen antes y después de la intervención. (Petra S.L.)



Figura 8: Estado de las cimentaciones de la nave principal (Fundación Catedral Santa María)



Figura 9: Apeo preventivo en un pilar (Quintas Fotógrafos)



Figura 10: Vaso de la cripta funeraria de los obispos. (Quintas Fotógrafos)



Figura 11: Planta de la Catedral

## 7.- Bibliografía:

- (1) AZCARATE GARAI-OLAUN, A., CÁMARA MUÑOZ, L., LASAGABASTER GÓMEZ, J.I., LATORRE GONZÁLEZ-MORO, P. 2002:

Plan Director para la Restauración Integral de la Catedral de Santa María de Vitoria, Diputación Foral de Álava, Vitoria.

- (2) CÁMARA, L., LATORRE, P. 1997: Los problemas estructurales de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. Cuadernos Temáticos del Patrimonio, nº1, Las catedrales en España. Instituto Español de Arquitectura de la Universidad de Alcalá y Junta de Castilla y León, Alcalá de Henares, pp. 271-279.
- (3) Id., LATORRE, P. 1998.: Saint Mary's Cathedral in Vitoria. Study of its structure and restoration proposals. Structural Analysis of Historical Constructions II. Possibilities of Numerical and Experimental Techniques. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Barcelona, Spain, pp. 319-337.
- (4) GONZÁLEZ, A. 1999: La restauración objetiva (Método SCCM de restauración monumental). Servei del Patrimoni Arquitectònic Local, Memoria 1993-1998. Barcelona.
- (5) LATORRE, P., CÁMARA, L., CABALLERO, L., CABRERA, J.M., ROIBÁS, G. 1991. Proyecto de Restauración de la Torre de Hércules y su entorno. Catálogo de la exposición "Ciudad y Torre. Roma y la Ilustración en La Coruña". Ayto. de La Coruña. La Coruña. pp. 129-142.
- (6) VV.AA. 2002: Actas del Primer Congreso Internacional sobre la Restauración de las Catedrales Góticas. Diputación Foral de Álava, Vitoria.

## REHABILITACIÓN DEL TEATRO CAMPOS ELISEOS DE BILBAO

Maidier Alzola Robles<sup>1,4</sup>, ([malzola@labein.es](mailto:malzola@labein.es)); Ignacio Marcos Rodríguez<sup>2,4</sup>, ([marcos@labein.es](mailto:marcos@labein.es)); Luis Miranda Casado<sup>3,4</sup>, ([miranda@labein.es](mailto:miranda@labein.es))

<sup>1</sup> Arquitecta.

<sup>2</sup> Ingeniero Industrial.

<sup>3</sup> Ingeniero Técnico de Minas

<sup>4</sup> Labein-Tecnalia

### RESUMEN

El Teatro Campos Elíseos de Bilbao constituye el ejemplo más relevante de la arquitectura modernista en la Villa. Construido en 1902, ha sufrido diversos avatares hasta afrontar la fase actual de rehabilitación y ampliación, en la que se pretende conservar su carácter monumental a la vez que se dota al Teatro de los equipamientos escénicos y técnicos que permitan incorporarlo a la vida cultural de Bilbao como un centro de vanguardia.

### 1.- INTRODUCCIÓN

La Bombonera, como es conocida la sala de espectáculo en la Villa, cuenta con una fachada modernista de rica ornamentación que la caracteriza. Se trata de una piel formada por figuras vegetales y animales entorno a una gran herradura la cual se superpone a un segundo plano calado de vanos que iluminan el vestíbulo previo a la sala como si de una pieza de encaje se tratara. La profusa decoración de la fachada, así como los diferentes planos de la misma crean un misterioso juego de luces y sombras propio del movimiento modernista.



Figura 1: Fachada principal del Teatro Campos Elíseos

La segunda pieza que caracteriza el Teatro, es la propia sala en forma de herradura con una rica ornamentación de antepechos y elementos estructurales en sintonía con la decoración del exterior. Algunos de los elementos se repiten tanto en el exterior como en el interior del Teatro. Cabe destacar la rica decoración de yeserías y pinturas murales de techos oculta desde los años 30, pudiendo ser uno de los pocos ejemplos que perduran de un movimiento con tan poco recorrido como el Art Nouveau que se da entre finales del S XIX y principios del S XX.

El Teatro, de promoción privada, compitió desde sus orígenes con el Teatro municipal, el Teatro Arriaga. Pasado el periodo de esplendor de la Bombonera, tras la guerra civil

pierde una de las piezas más importantes, el foyer, obligando a la modificación del acceso a los diferentes niveles de anfiteatro con la pérdida de la hermosa escalera imperial. Fue a partir de este momento cuando el edificio fue sufriendo una serie de modificaciones, recortando su volumetría y por tanto sus posibilidades como lugar de representaciones teatrales entre otras. De esta manera a finales de los años 80 el edificio, relegado casi a su funcionamiento como cine, es clausurado y pasa a manos municipales con objeto de recuperar el esplendor de antaño.

En los 90 se comienza una importante intervención de rehabilitación del Teatro, la cual queda paralizada tras la fase de adecuación estructural. En esta situación, en el año 2003 se firma un convenio de colaboración entre el Excmo Ayto de Bilbao y SGAE, con objeto de recuperar el edificio con toda su belleza como centro de vanguardia de referencia de las artes escénicas para la Villa de Bilbao siendo la explotación por cuenta de SGAE.

Durante los años 2003 y 2004 Labein redacta el proyecto de ampliación y rehabilitación del Teatro Campos Elíseos bajo la Dirección Técnica del Excmo Ayto de Bilbao, en calidad de propietario, y de SGAE en calidad de copromotor de la obra y futuro explotador del edificio. Este proyecto tiene como objeto principal la recuperación y puesta en valor del edificio y principalmente de sus elementos más representativos, como son la sala y la fachada modernista así como dotar al edificio de todos aquellos elementos necesarios para convertirlo en un centro de referencia en el ámbito de las artes escénicas.

## 2.- INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

El Teatro Campos Elíseos es uno de los ejemplos a destacar del Art Nouveau en el País Vasco. Se debe indicar que su interés no es sólo local sino que se extiende a nivel internacional, dado que se realiza en paralelo con la eclosión del mismo movimiento en Francia.

El Teatro se proyectó en un solar que anteriormente se utilizó como lugar de diversiones (bailes, romerías, fiestas, etc.) denominado como los Campos Elíseos.



*Figura 2: Jardines de los Campos Elíseos*

El proyecto realizado entre 1901 y 1902 es el resultado de la colaboración de dos arquitectos, Alfredo Acebal y Jean Batiste Darroquy, este último vasco-francés; fue finalizado en 1902 e inaugurado el 7 de agosto del mismo año.

La participación del arquitecto vasco-francés se debió probablemente a que la propiedad, no quedando satisfecha con la solución adoptada por A. Acebal para la

fachada principal, le encargará a J.B. Darroquy un nuevo diseño de la misma que estuviese en sintonía con el carácter propio de un edificio de espectáculos.

Darroquy realizó un delicado trabajo de ornamentación caracterizado por un gran arco de herradura de resonancias orientalizantes cuyo entorno se ve ornamentado por abundante vegetación y animales fantásticos. Se observan a su vez aplicaciones cerámicas de Daniel Zuloaga y forja de formas curvilíneas características de este movimiento arquitectónico.



*Figura3: Jardines de los Campos Elíseos*

Desde el proyecto inicial, el edificio ha ido sufriendo una serie de transformaciones en su construcción como consecuencia de las dificultades económicas que ha atravesado el negocio del espectáculo. Se enumeran de forma cronológica las diversas intervenciones a las que ha sido sometido el Teatro:

- 1901, Proyecto de un Teatro en los Campos Elíseos (Alfredo Acebal y Jean Batiste Darroquy)
- 1901, Modificación del proyecto inicial (Alfredo Acebal)
- 1920, Construcción escalera (Felix Agüero)
- 1943, Demolición escalera imperial, construcción nueva escalera y reforma de los accesos a la sala (Manuel Cabanyes)
- 1948, Reforma y ampliación del edificio comercial sito en la calle Bertendona (Javier Barroso Sánchez)
- 1980, Conservación y restauración del Teatro (Rufino Basáñez)
- 1994, Proyecto de Restauración y Rehabilitación (Jesús Aldama)
- 2004, Proyecto de Ampliación y Rehabilitación del Teatro Campos Elíseos de Bilbao (Ayto Bilbao, SGAE y LABEIN)

### **3.- DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EDIFICIO**

El edificio previo el desarrollo del proyecto de ejecución de 2004 se organiza a partir de un cuerpo principal que alberga la gran sala en forma de herradura y el escenario, y un cuerpo lateral que recoge el foyer y los núcleos de comunicaciones.

Al lado derecho de la fachada principal se localiza la gran sala con planta en forma de herradura, con fachada hacia el callejón formado con el edificio de Correos.



La sala en altura se divide en platea, anfiteatro de primera planta, anfiteatro de segunda planta y paraíso. En la actualidad y como consecuencia de la intervención de los 90 sobre la sala existe una nueva planta, sobre el nivel de la cubierta original.



*Figura 4: Vista general del interior del edificio en su estado previo comienzo de obra en 2006.*

En cuanto al cuerpo en el que se encuentra el foyer en planta baja, previo el comienzo de la obra del SXXI, se localizaban los dos núcleos de comunicaciones y una sala sobre el propio foyer de doble altura. La primera escalera con acceso hasta el paraíso y la segunda con acceso hasta el anfiteatro de segunda planta.

Al lado derecho de la fachada principal se localizaba un tercer núcleo de comunicaciones con sentido de evacuación, con arranque en la misma calle Bertendona.

#### **4.- AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN DEL TEATRO**

Atendiendo la dificultad de inscribir en la volumetría existente las dotaciones para atender adecuadamente a las necesidades del público, artistas y técnicos, así como para albergar las áreas necesarias para las instalaciones y administración del Teatro, se considera necesaria la ampliación del edificio.

- Existen tres áreas de crecimiento que tratarán de paliar la problemática existente en referencia a la falta de espacio:
- La anexión de un cuerpo de planta baja, contiguo al hombro derecho, que se extenderá hasta Particular de Euskalduna y que, con superficie aproximada de 535m<sup>2</sup>, permitirá disponer tanto el acceso de artistas y técnicos como la dotación de servicios ligados al escenario.
- El crecimiento vertical del volumen edificado sobre la sala y el contiguo apéndice por su lateral derecho, permitirá obtener la superficie necesaria para el área administrativa, así como una gran sala de ensayo, pieza de extraordinaria importancia en la funcionalidad del conjunto.
- La excavación de un sótano bajo la proyección de la sala aportará un espacio destinado a instalaciones, almacenes de diverso material y salas de apoyo al funcionamiento del Teatro.

Para la realización de estas ampliaciones se ocupará de forma parcial otros edificios anexos también consolidados, por lo que no se alteran en ningún modo las alineaciones, retranqueos y vuelos de los mismos. La necesidad de un crecimiento vertical del edificio para dotarlo de las características e instalaciones idóneas en el desempeño de sus

funciones, junto con el objetivo de la conservación de su aspecto inicial, ha llevado a una forma semicilíndrica de la cubierta, prácticamente inapreciable desde la vía pública.

Finalmente indicar que la accesibilidad al escenario a efectos de carga y descarga se mantiene por el callejón contiguo al hombro izquierdo, si bien la puerta será sustituida por otra de mayores dimensiones que permita el paso de mercancías de mayor volumen. En cuanto al pasillo de comunicación del escenario con la calle Euskalduna se destinará a salida de emergencia.

## 5.- SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DEL EDIFICIO

El edificio muestra con sinceridad los sistemas constructivos empleados, distinguiéndose claramente las zonas murarias de las zonas de entramado metálico. Muestra a su vez un interesante racionalismo en el empleo de sistemas diferenciados según los usos y la exposición de los elementos a la intemperie o zonas más agresivas.

Tanto los sistemas como los materiales empleados hacen eco de las tecnologías de la época propio del estilo arquitectónico al que responde el edificio. Así los materiales principales del edificio son la piedra, la cerámica, el acero laminado y los morteros de cal y hormigones pobres de cemento Pórtland.

Sobre la estructura, de una riqueza notable, la cual cuenta con su apartado específico a continuación, se realiza la piel de la fachada, que se trata de un revoco de mortero en base cal sobre el que se colocan piezas prefabricadas del mismo material con una matriz de arpillera que les dota de rigidez y sirve de enlace con el entramado de las zonas caladas de fachada.

El interior del edificio presenta un lucido de yeso en toda su superficie, que en los techos de sala da soporte a las pinturas murales de techo y a la decoración de yeserías.

### 5.1.- SISTEMAS ESTRUCTURALES EMPLEADOS

El edificio presenta una riqueza estructural notable tanto en lo referente a los materiales utilizados en su construcción como en cuanto a su tipología constructiva, ya que cuenta en su momento con dos grandes superficies destinadas al propio uso del Teatro: la sala y la caja escénica. Destacan en ellos la combinación de técnicas constructivas basadas en perfilaría de acero laminado y elementos de fundición y en muros de fábrica de ladrillo macizo.



*Figura 5: Vista desde escenario. Se aprecian los pilares ornamentados soporte de la bóveda y la estructura de camerinos en el hombro izquierdo*

La obra de fábrica, siempre con arranque de mampostería en cimentación, se ubica en el perímetro del edificio, así como en las particiones de las sala con pasillo, escaleras, etc y en el muro de la caja escénica. Sin embargo, la estructura vertical interior de la sala está

resuelta mediante pilares metálicos, sobre los que se sustentan los pisos de las plantas, todos ellos contruidos mediante perfiles laminados. Existen ocho pilares en el perímetro del patio de butacas constituidos por piezas de fundición, que cuentan con una rica ornamentación y que son el soporte principal de la cúpula. Además de ellos existe otra serie de pilares soporte de distintas vigas, que están contruidos mediante perfiles de acero laminado, ensamblados por medio de roblones, y que quedan ocultos en los revestimientos del Teatro. Todos los pilares nacen de cimentaciones de mampostería, arrancando el perfil metálico siempre de un único sillar que reparte las tensiones sobre los mampuestos de la fábrica inferior.

La cimentación es en todos los casos superficial, estando apoyada a cotas variables, en función de la estimación efectuada en origen, pero siempre situada sobre un nivel arcilloso competente. Las cimentaciones aisladas cuentan con muros de arriostramiento entre ellos, siendo las cimentaciones de grupos de pilares comunes para todos ellos. El anillo proyección de los antepechos delimita igualmente el espacio bajo el patio de butacas, por donde se estima que funcionaba el sistema de calefacción, y donde se encontraban los dados de cimentación de la estructura de madera del entarimado del patio de butacas.

Los pisos de la plantas están resueltos mediante perfiles de acero entre los cuales se dispone un relleno de hormigón pobre, que contiene cemento Pórtland, escoria siderúrgica y yeso entre otros componentes. Las uniones con las vigas y los muros son mediante simples apoyos, no contando siquiera con tortillería o roblones cuando el apoyo es directo. Cuando se requiere mayor sección, las vigas se componen también en base a chapas y angulares ensamblados mediante roblones, formando vigas armadas, y llegando a alcanzar una luz máxima de 13,30 m.

De la estructura metálica de la sala, destaca la bóveda, que se ha contruido mediante perfilería de acero, formando un triple anillo en el interior de la sala. A estos anillos acometen estructuras trianguladas que arrancan de los 8 pilares perimetrales, formando un voladizo. El anillo interior está contruido mediante un perfil curvo en forma de ovoide, y soporta la cubierta en la zona plana central, por donde existía el acceso para las operaciones de iluminación. Los otros dos añillos se sitúan en la zona curva. De ellos, el superior está formado por celosías planas que sujetan, junto con el anillo interior, las viguetas de cubierta con el revoltón de ladrillo. El anillo inferior está formado por una viga de celosía en cajón, y aporta la estabilidad necesaria, trabajando a compresión, uniendo las diferentes cerchas dispuestas radialmente.



*Figura 6: Detalle anillo de bóveda*



*Figura 7: Celosía interior de bóveda*

Destaca igualmente la cubierta en la zona de la caja escénica, bajo la cual se desarrollaba el antiguo peine de madera. Dicha cubierta está formada por celosías cuyo cordón superior es un viga curva a base de triangulaciones.

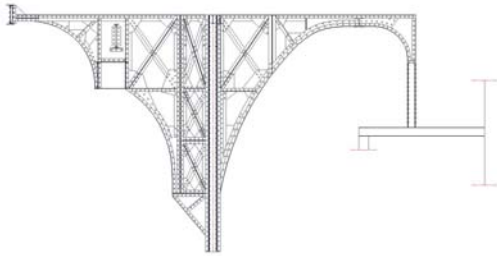


Figura 8: Celosía soporte bóveda



Figura 9. Estructura soporte cubierta original caja escénica

## 5.2.- MODIFICACION ESTRUCTURAL AÑOS 90

Tomando como base el proyecto de Jesús Aldama de 1.992, se procedió a efectuar una serie de modificaciones en la estructura del Teatro que se resumen a continuación, y que condicionan el estado en el que se recibió el propio edificio. Estas intervenciones han consistido básicamente en lo siguiente:

- Elevación de la altura del edificio en una planta sobre la sala. Se resuelve con cuatro pilares metálicos, dos adosados al muro de proscenio que soportan una celosía sobre la cubierta plana y otros dos adosados al muro de fachada en su cara interior, soportando una viga de gran canto bajo la cubierta, en la zona de paraíso. Sobre la celosía y la viga se soportan tres celosías planas que soportan el forjado y la cubierta.
- Creación de una estructura metálica en la caja escénica para alojamiento de camerinos. Se demuele el muro de ladrillo del hombro derecho. (véase imagen 5)
- Sustitución del peine primitivo de madera por un nuevo peine de acero, soportado por nuevas vigas en celosía.

Una vez finalizada la fase de estructura, no se acometen las fases sucesivas y el Teatro queda en el estado en que se recibe para la redacción de proyecto.

## 6.- SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE CIMENTACIÓN Y ESTRUCTURA PROYECTO ACTUAL

El incremento de superficie construida y de altura en el inmueble ha provocado cambios relevantes en el sistema de cimentación y en las solicitaciones sobre el terreno, así como la necesidad de contar con nuevos elementos estructurales no existentes inicialmente.

Destacan la creación de un nuevo cuerpo en hormigón armado, en la medianera de la C/Bertendona, que sustituye al antiguo núcleo de comunicaciones principal, la creación de un sótano bajo el edificio y la creación de una nueva planta sobre la ya añadida en los 90. El rebaje de la cota inferior del edificio ha provocado la existencia de espacios disponibles situados bajo las cotas de cimentación originales. Esto, unido a la existencia de un incremento notable de cargas sobre la caja escénica y sobre la estructura de los 90, así como a la propia naturaleza del terreno deformable bajo carga (arcillas y gravas con matriz limoarcillosa) ha motivado que la totalidad de los elementos estructurales,

tanto los nuevos como los antiguos, descansen sobre cimentación profunda. Para ello, se han construido muros pantalla en el interior de la sala y en la caja escénica. Donde era imposible el trabajo de la maquinaria debido a su altura, se ha recurrido a sustituirlo por pantallas de micropilotes revestidas por un muro de hormigón armado. En el caso del cuerpo lateral de hormigón, la cimentación es una losa micropilotada.

Para los pilares antiguos de fundición o acero, se ha procedido a la realización de una cimentación profunda mediante micropilotes, previo apeo de los mismos y posterior demolición de la cimentación original. Todo el proceso de apeo, gateo y puesta en carga se ha supervisado mediante topografía, a fin de evitar movimiento inesperados, especialmente durante el gateo, habida cuenta de la dificultad de valorar exactamente las cargas que descienden por cada pilar.



*Figura 10: Pilares de fundición apeados*

Los cuatro pilares de los años 90 que soportan las dos últimas plantas han cambiado su sistema de cimentación, pasando de una cimentación superficial a una cimentación profunda. Dado que no es posible su apeo, se han integrado las zapatas existentes en los nuevos encepados. Los casos más llamativos son los que corresponden a los pilares de muro de proscenio, en los que se han acometido dos vigas cargadero atravesando el muro entre encepados a ambos lados del mismo, con un canto de dos metros.

Una vez asegurada la cimentación nueva, se ha procedido a intervenir en la estructura de los pisos. Por la adecuación funcional, se han suprimido parcialmente los muros que delimitaban la sala de los accesos. Además, se ha creado una nueva estructura, a fin de completar la superficie en planta en altura junto a la fachada a correos y poder completar la superficie construida de las plantas superiores. Esto ha obligado a realizar además modificaciones estructurales para sustentar las vigas y forjados antiguos sobre los nuevos elementos estructurales. Así mismo, en la zona opuesta del edificio, se ha levantado una estructura de hormigón que acoge el núcleo de comunicaciones y servicios, y que sustenta, al igual que la de la zona de correos, los forjados de las planta mediante uniones articuladas. De esta manera, la estructura en la zona de la sala queda como un conjunto de vigas, pilares y forjado prácticamente con uniones articuladas, con dos estructuras estables por si mismas a ambos lados: la de hormigón del núcleo de comunicaciones y la metálica del lado correos.

Las viguetas de forjados antiguos presentan un notable estado de deterioro en algunas de las zonas donde se han visto sometidas al efecto de la humedad, lo que ha generado, en presencia de yeso, ataques corrosivos con pérdidas muy importantes de la capacidad resistente. Por este motivo, se ha procedido a la eliminación del relleno entre viguetas, a

la restitución de los perfiles con pérdida de sección y su sustitución por hormigón aligerado.



*Figura 11: Pérdida total de sección*



*Figura 12: Forjado preparado para hormigonar*

En relación a las dos últimas plantas, se han aprovechado las celosías de los años 90, procediendo a su refuerzo, para posteriormente elevar el edificio mediante la adición de un nuevo forjado a base de vigueta metálica. Para cerrar la edificación en esta zona, se crea una cubierta curva construida en acero.

En la zona de escenario, se sustituye la cubierta curva antigua por una cubierta plana a una cota más elevada. Esta se resuelve mediante perfiles HEM600 que se sujetan en sendas celosías paralelas, una junto a la boca de escenario y otra en el muro de fondo. Estas a su vez se sustentan por dos pilares en la boca y tres en la zona de fondo, apoyados sobre los muros pantalla. De los perfiles soporte de la cubierta cuelgan las varas y las pasarelas para la actividad propia de escena.

En la fecha de redacción del presente artículo la obra se encuentra en fase de estructura, habiéndose finalizado prácticamente su cimentación y estando muy avanzados los trabajos de ampliación de la estructura. En una próxima ocasión se podrá exponer el avance en otras fases de la obra.

## **REHABILITACION DEL CUARTEL DE GUARDIA DE CORPS DE SAN IDELFONSO – LA GRANJA EN SEGOVIA**

*Michell Posadas*<sup>1</sup> ([rogermichell.posadas.mercado@acciona.es](mailto:rogermichell.posadas.mercado@acciona.es));

*ACCIONA INFRAESTRUCTURAS*<sup>2</sup> ([webmail-infraestructuras@acciona.es](mailto:webmail-infraestructuras@acciona.es)).

<sup>1</sup> *Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.*

<sup>2</sup> *Acciona Infraestructuras – Departamento de I+D+i de Madrid*

### **Resumen**

El propósito de la presente comunicación es el explicar sobre la Rehabilitación del Cuartel de Guardia de Corps, definiendo la tecnología previa para la restauración de patrimonios históricos, las fases de su ejecución y enfocar las principales técnicas constructivas usadas en la rehabilitación de este edificio.

### **1.- Reseña Histórica.**

El Cuartel de Guardia de Corps de La Granja fue construido por mandato de Carlos III en el siglo XVIII, durante los años de 1764 a 1766. Juan Esteban fue el autor del proyecto y director de las obras y luego llevadas a cabo por los maestros Antonio Niño y Bartolomé Reale.

La lista de reseñas históricas que vinculan a los reyes de España con la Granja es muy extensa, del mismo modo que su legado arquitectónico e histórico perdura en el tiempo, siendo los más importantes: El Palacio Real, La Colegiata, La casa de los Infantes, el Cuartel de Guardia de Corps, Las Caballerizas, los Jardines Reales, La Real Fábrica de Cristal, etc., los cuales consolidaron el trazado urbanístico barroco que convirtió a la Granja (San Idelfonso) en la residencia veraniega de la Realeza y de la población aristócrata.

### **2.- Objeto del Proyecto.**

El fin de este proyecto de Ejecución es la recuperación del denominado Cuartel de Guardia de Corps, para integrarlo en el entorno urbano del Palacio de la Granja, situado a la izquierda del eje de acceso principal al mismo desde la puerta de Segovia y desarrollar en su interior un Centro de Convenciones y eventos que además de crear un equipamiento Socio-cultural de gran interés también rentabilice la inversión a realizar y su futura conservación como edificio histórico.

Con fecha 8 de agosto de 2002, se suscribe el contrato de arrendamiento de servicios entre la Sociedad Estatal de Gestión Inmobiliaria de Patrimonio S.A. (SEGIPSA) y el arquitecto Superior D. Jerónimo Arroyo García para el proyecto de Ejecución de la rehabilitación del edificio histórico Cuartel de Guardia de Corps.

Tras el oportuno concurso de Licitación SEGIPSA adjudicó la ejecución de las Obras de Rehabilitación del Cuartel de Guardia de Corps y la Casa de los Infantes a la Empresa ACCIONA INFRAESTRUCTURAS S.A. con un presupuesto cercano a los 30 millones de euros.

### **3.- Condiciones Urbanísticas.**

Ante la necesidad de la recuperación de bienes monumentales tanto por su interés histórico como de cara al atractivo turístico del municipio se contemplan el Plan

Especial de Protección del Patrimonio Histórico-artístico y Las normas complementarias del Plan General de Ordenación de La granja- San Idelfonso del año 1996.

El edificio del cuartel de Guardia de Corps se encuentra catalogado en el plan General con los siguientes datos:

- Número de ficha en el catálogo: 9
- Número de catálogos en ficha: 2-53.
- Localización denominación: Plaza de España (La Alameda) – Cuartel de Guardia de Corps.

Según su ficha normativa dentro de sus usos principales admitidos encontramos el uso hotelero, pudiendo establecer como uso vinculante al principal el de Centro de Negocios, salones multiusos y de Reuniones.

El nivel de protección del edificio es 2 en grado estructural, donde las obras permitidas en este tipo de edificios con este tipo de protección son las de conservación, restauración, consolidación y reforma.

Por tanto la restauración y la consolidación son obligatorias en las fachadas del edificio y la actuación deberá ser realizada con los mismos materiales, texturas, técnicas de acabado y colores originales del edificio.

### **3.1.- Obras permitidas en aplicación de la Normativa**

OBRAS	LOCALIZACION	INDICACIONES GENERALES
<b>A. RESTAURACION</b>	Fachadas	Textura, TÉCNICA, materiales y acabados originales
	Elementos estructurales	INTERVENCIÓN y SUSTITUCIÓN con materiales y solución constructiva similar
	Elementos de etapas anteriores	Estudio y AUTORIZACIÓN para su CONSERVACIÓN (coherencia y respeto de las CARACTERÍSTICAS originales del edificio).
	1. Acondicionamiento	
2. Reestructuración puntual		Fin: ADAPTACIÓN a normativa cpi y minusválidos EXCEPCIONALMENTE en puntos localizados
3. Reconfiguración		Fin: ELIMINACIÓN de impactos negativos Mismos materiales originales
<b>B. CONSERVACION</b>		Materiales originales o SUSTITUCIÓN por materiales de iguales CARACTERÍSTICAS
<b>C. CONSOLIDACION</b>		Materiales con función estructural igual a la original Posibilidad de otros materiales cuando sea imposible

*Tabla 1: Obras permitidas para la rehabilitación del edificio*



#### 4.- Estado previo a la rehabilitación.



Figura 1 Fotografía del estado previo a la rehabilitación

#### 4.1.- Plano de planta no rehabilitado.

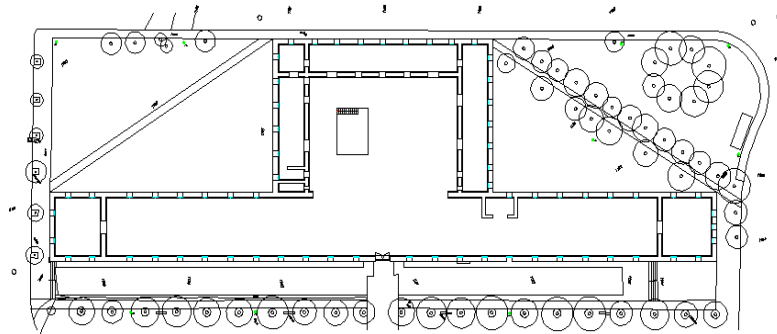


Figura 2 Plano de planta rehabilitado

#### 4.2.- Alzado principal y posterior no rehabilitado.

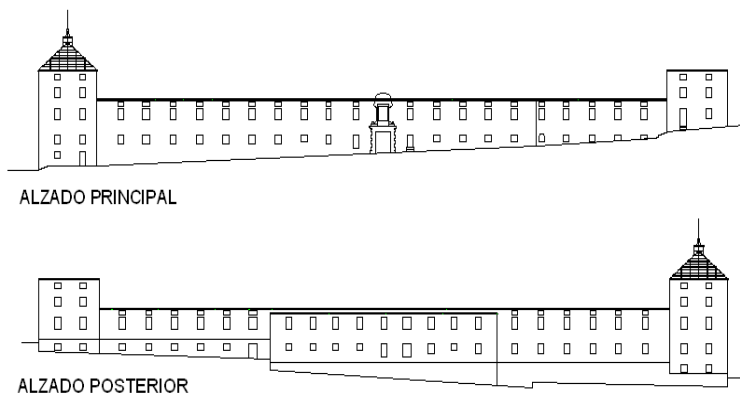


Figura 3 Alzado principal y posterior no rehabilitado

#### 4.3.- Fotos del edificio en estado previo a la rehabilitación.

- El edificio en estado previo a la rehabilitación conserva unos muros de cerramiento o fachada en un estado muy deteriorado. De la cubierta principal sólo existe, en estado ruinoso parte de la cubierta del torreón formada por perfilera de acero con uniones roblonadas, posterior a la fecha de construcción del edificio, el resto ha desaparecido con el tiempo (ver figuras 4 y 5).



Figura 4



Figura 5

- Se conservan en razonable estado parte de los forjados de la planta primera de construcción relativamente moderna formada por vigas y bovedillas de hormigón (ver figuras 6 y 7).



Figura 6



Figura 7

- La fachada principal que da a la Alameda cerca al torreón 1 tiene un estado de erosión muy avanzado formado por ladrillo macizo colocado en soga (ver figuras 8 y 9).



Figura 8



figura 9

- La fachada que colinda con la calle Infantes es de ladrillo hueco doble, donde se destacan reparaciones recientes (ver figuras 10 y 11).



Figura 10



Figura 11

- La fachada que colinda con la Plaza de la fruta presenta una fuerte erosión, se ve más degradado el ladrillo que el mortero, además en unas zonas se muestran una importante grieta de desarrollo vertical con una abertura máxima de unos 12 cm. en la parte inferior, posiblemente a un asentamiento de la cimentación (ver figuras 12 y 13).



Figura 12



Figura 13

- En la fachada principal cerca al torreón 2 se aprecian señales de reparación en los dinteles de las ventanas superiores y se presentan grietas verticales entre ventanas (ver figuras 14 y 15).



Figura 14



Figura 15

- El muro de separación entre el torreón 2 y la nave principal presenta características de ruina donde presenta una cimentación rota y estructuralmente no es utilizable (ver figuras 16 y 17).



Figura 16



Figura 17

## 5.- Tecnología previa a la Restauración de edificios históricos.

La tecnología previa a la restauración de edificios históricos describe todas las herramientas y técnicas en todas las fases anteriores a la propia restauración, desde la toma de datos inicial hasta la ejecución de la obra.

### 5.1.- Estudios previos

Los estudios previos son de suma importancia cuando queremos tener un diagnóstico acertado de los problemas que padece y se quieren resolver. Se realizaron los respectivos estudios para el diseño del proyecto. En la *tabla 2* se muestra una manera clara de clasificarlos según la casuística que abordan.

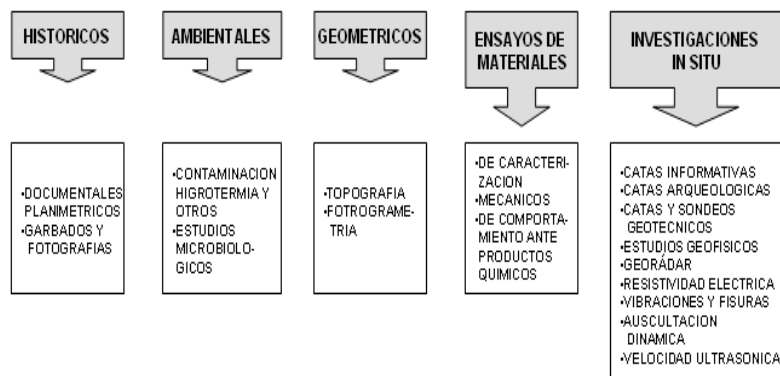


Tabla 2: Clasificación de los estudios previos

### 5.2.- Monitorización

Conjunto de medidas para controlar un proceso que varía o puede variar con el tiempo. En este caso refiriéndose a una rehabilitación nos interesó controlar aspectos relacionados con movimientos, deformaciones, humedad, temperaturas entre otros para establecer las patologías estructurales que presenta este edificio y como plantear la solución de diseño y ejecución.

Podemos establecer una posible clasificación a la que se muestra en la *tabla 3*.

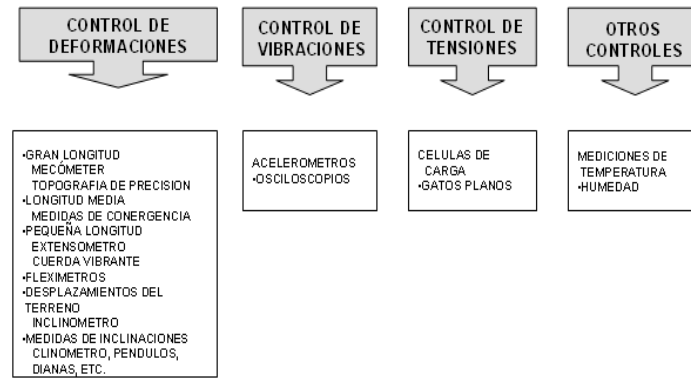
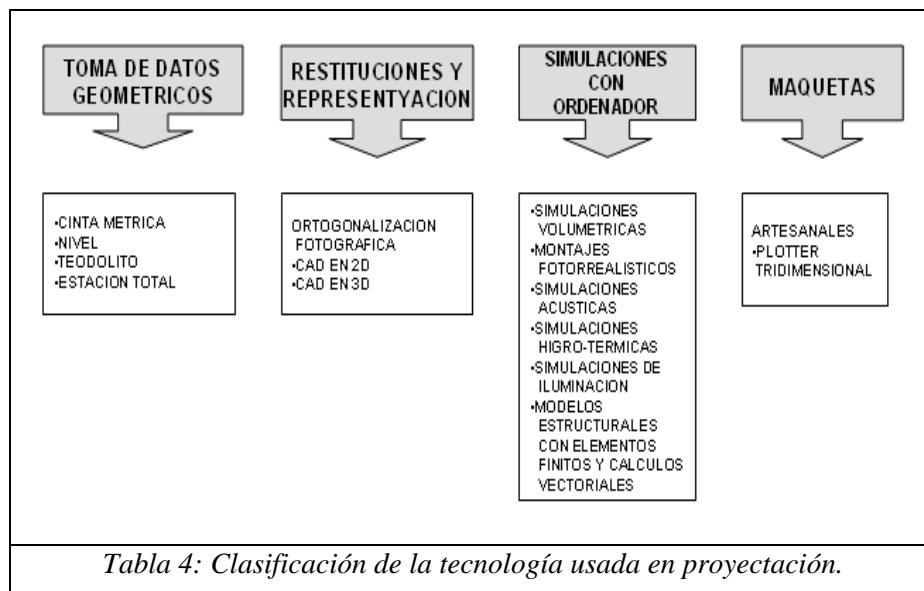


Tabla 3: Clasificación de los trabajos de monitorización.

### 5.3.- Realización del proyecto

Previo a la redacción del proyecto se realizaron trabajos de toma de datos de campo y su respectiva modelización y tratamiento de los mismos en gabinete. De acuerdo a las tecnologías existentes clasificaremos la proyectación en la *tabla 4* que se muestra a continuación.



#### Simulaciones con ordenador

Los modelos volumétricos asociados a montajes pueden ser una simulación real del resultado previsto en una intervención sobre un conjunto edificado.

Una de las ventajas del ordenador es la de realizar simulaciones de comportamiento térmico, acústico, estructural o de la evolución

#### Modelo estructural con elementos finitos.

Modelización de elementos estructurales del muro de fachada analizado con elementos finitos y con un programa de cálculo vectorial de análisis de daño localizado debido a efectos de cargas permanentes, peso propio, carga de viento y el efecto de la compresibilidad de los suelos debido a posible filtraciones de agua que incidieron en las sales y finos del suelo causando socavaciones ocasionando asentamientos del mismo afectando de esta manera a la estructura, produciéndose un agrietamiento del muro por pérdida de resistencia a tracción.

Se realiza un análisis de fisuración en función al grado de daño localizado para realizar la comparativa de daño del modelo simula con la estructura real fisurada que se muestra en la *figura 18*.



*Figura 18: Muro fisurado por asentamiento diferencial del suelo.*

### **Análisis de fisuración:**

El análisis de fisuración o pérdida de rigidez se realiza mediante el método de elementos finitos empleando un modelo constitutivo no lineal llamado modelo de daño escalar a tracción. En dicho modelo se plantea una relación constitutiva de la forma:

$$\sigma = (1 - d) D \cdot \varepsilon$$

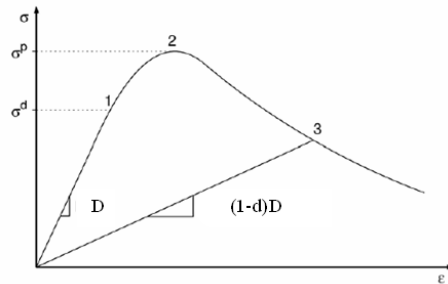
Donde  $\sigma$  es el tensor de tensiones de tracción,  $\varepsilon$  es el tensor de deformaciones y  $D$  es la matriz constitutiva elástica, que es función al coeficiente ( $\nu$ ) de poisson y del coeficiente de módulo de young ( $E$ ). Para el caso de tensiones de compresión, el material tiene un comportamiento elástico con  $d$  constante igual 0.

La variable escalar  $d$  representa el llamado índice de daño, que indica el nivel de degradación de la rigidez del material en cada punto. Las características de esta variable son las siguientes:

- Varía entre 0 y 1 (0 para el material intacto, con comportamiento elástico y 1 para el material completamente dañado, incapaz de soportar tensiones).
- Al inicio del cálculo,  $d$  tiene valor nulo, y comienza a evolucionar cuando las tensiones de tracción alcanzan las resistencia a tracción del material (punto 1 en la *figura 19*), parámetro definido por el calculista.
- $d$  es función de las deformaciones correspondientes al paso de carga actual y en la historia de deformaciones correspondientes a pasos de carga anteriores.
- $d$  es función creciente, no puede decrecer.
- En caso de descarga, no hay evolución de  $d$ . El material descarga con una rigidez elástica dañada, penalizada por un factor de  $1 - d$  (punto 3 en la *figura 19*).

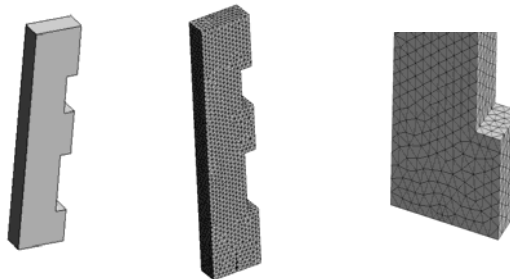
- El punto 2 en la *figura 19* Corresponde a la tensión pico, valor a partir del cual el material empieza a descargar tensiones por la pérdida de rigidez. El parámetro que define el comportamiento post-pico es la energía de fractura, que corresponde a la energía liberada en el proceso de degradación del material. Su valor equivale al área bajo la curva tensión deformación mostrada en la figura.

Este modelo constitutivo se encuentra implementado en un programa de elementos finitos capaz de resolver el sistema de ecuaciones no lineal que se forma al plantear el problema de daño escalar a tracción.

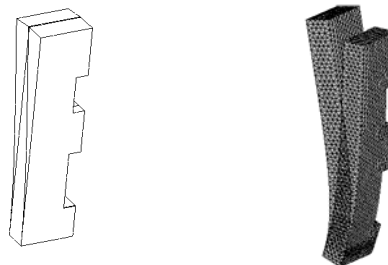


*Figura 19: Curva de tensión-deformación producida por el modelo de daño escalar*

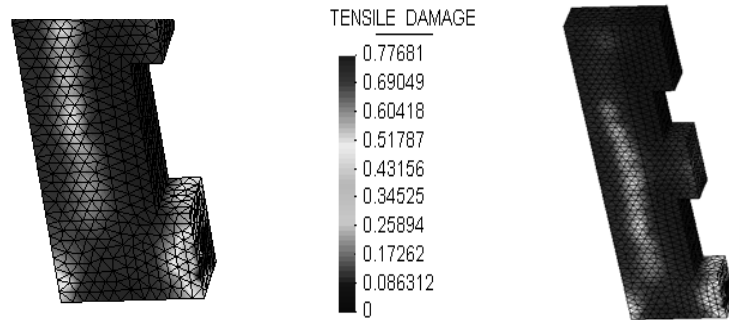
Para poder determinar el grado de daño producido ante un determinado asentamiento para el muro de fachada existente y poder diseñar la nueva cimentación con un rango de seguridad donde se controle el asentamiento permisible para que no vuelva a producirse el fenómeno de agrietamiento debido a asentamientos diferenciales del suelo.



*Figura 20: Modelo del muro mediante elementos finitos*



*Figura 21: Desplazamiento lateral y daño del muro debido a cargas permanentes y de viento.*



*Figura 22: Evolución del daño al 77,68 producido por el diferencial de asentamiento del suelo.*

*Figura 23: Formación de la fisura en el muro.*

## **6.- Ejecución de la restauración**

### **6.1.- Normativa de ejecución de obras.**

#### **6.1.1.- Condiciones generales, agentes participantes, planificación y normativa.**

##### **▪ Condiciones generales:**

Las obras en su conjunto y en cada una de sus partes, se ejecutó con estricta sujeción al presente Pliego de prescripciones y a las normas oficiales que en él se citan.

Además de a la normalización técnica, las obras estarán sometidas a la "Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo".

En caso de contradicción o duda, el Contratista atendió a las instrucciones que, por escrito, le sean dadas por la Dirección de Obra.

El Contratista tuvo total libertad para elegir el proceso, así como el programa y fases de ejecución de las obras que más le convenga, siempre cumpliendo con lo especificado en el Pliego de prescripciones, y cualquier daño o incidencia de retrasos que pudo surgir en la ejecución de las obras o de los medios empleados en ellas.

Dada la importancia de las obras y las dificultades que supone tanto el plazo como la situación de la misma empresa constructora se destinó al pie de obra un equipo lo suficientemente importante y cualificados que garantizó el desarrollo de los trabajos con la premura y calidad necesaria para el cumplimiento de los trabajos.

##### **▪ Agentes participantes:**

Se contó con un promotor "SEGIPSA" que contrata por un lado a un equipo facultativo que se encargó de redactar el proyecto y dirigir las obras "Arquitecto Superior D. Jerónimo Arroyo García; y por otro lado contrata la ejecución a un constructor "ACCIONA INFRAESTRUCTURAS S.A."

##### **▪ Planificación:**

Está sumamente ligada con la programación de obra, donde se planifica todas las actividades críticas y no críticas que puedan afectar el transcurrir normal de los trabajos. La planificación se realiza con los agentes implicados y la estructura que liga sus relaciones mutuas.



▪ **Normativa:**

Esta rehabilitación además de estar reglada, diseñada bajo una normativa administrativa, legal, técnica de diseño, instrucciones, pliegos y reglamentos que rigen las fases del proceso de ejecución, tiene la particularidad de contar con una serie de condiciones urbanísticas por ser considerado un edificio histórico cuya normativa está regida por el Plan Especial de Protección del Patrimonio Histórico-artístico y las normas complementarias del Plan General de Ordenación. A continuación se mencionan las normativas usadas en el presente proyecto.

En caso de presentarse discrepancias entre las especificaciones impuestas por los diferentes Pliegos, Instrucciones y Normas, se entenderá como válida la más restrictiva.

Lo mencionado en el Pliego de Condiciones y omitido en los planos o viceversa, habrá de ser ejecutado como si estuviera expuesto en ambos documentos. En caso de contradicción entre los Planos y el Pliego de Condiciones, prevalecerá lo prescrito en este último.

## **6.1.2.- Desarrollo de los trabajos según proyecto**

### **6.1.2.1.- Documentación del proyecto, control y dirección de ejecución**

▪ **Memoria resumen de la estructura**

Se plantea una estructura de forjados formados por placas alveolares apoyadas sobre elementos verticales, pilares metálicos y pantallas de hormigón armado.

La solución propuesta para los forjados, placas alveolares, se justifica por una construcción más rápida y sencilla, y por introducir menores cargas de peso propio sobre los pilares, respecto a forjados convencionales para estas luces.

Las placas alveolares se apoyan sobre vigas metálicas formadas por perfiles estándar. En el forjado del salón principal, debido a la gran luz existente, se recurre a un perfil armado, en cuyo dimensionamiento se ha tenido en cuenta los efectos de las vibraciones.

Se adoptan dos tipos de forjados, según las luces de los vanos. Por lo tanto, para luces de hasta 6m. se emplean placas alveolares (FAR-LAP) 22+5, mientras que para luces mayores se emplean placas alveolares 30+8. La planta semisótano se resuelve mediante forjado sanitario, con la utilización de placas alveolares (FAR-LAP) 22+5.

El forjado de la cubierta se plantea mediante estructura metálica de vigas y correas sobre las que se situará una cubierta de pizarra. La disposición de las vigas de cubierta se adapta a la situación de las mansardas.

Dadas las dimensiones en planta del proyecto, se sitúan dos juntas de dilatación, de forma que las dos alas quedan separadas del cuerpo central. La junta del ala derecha aparece en todos los forjados a partir de planta primera, y la junta del ala izquierda aparece a partir de la planta baja. Se resolverán mediante apoyos en junta de dilatación de las vigas metálicas, sin doblar pilares, y con conectores en el forjado, de forma que se transmitan los esfuerzos de cortante a través de la junta para resistir los empujes del viento.

Los elementos verticales están formados por pilares metálicos, a los que llegan las vigas metálicas que sostienen las placas alveolares, y por pantallas de hormigón armado, coincidentes con los núcleos de comunicación, que proporcionan la rigidez necesaria para soportar los empujes del viento.

La cimentación de los elementos verticales se realiza mediante zapatas aisladas en los pilares centrales, mientras que los metálicos y la fachada se apoyan en un muro de sótano con zapata corrida.

La cimentación se realiza mediante zapatas aisladas en los pilares centrales mientras que los pilares de fachada y el muro de fachada se apoyan en el muro de sótano con zapata corrida.

#### ▪ Planos

Las obras quedan descritas en los planos del proyecto a efectos de mediciones y valoraciones pertinentes, deduciéndose de ellos los planos de ejecución en obra o en taller.

Todos los planos de detalle preparados durante la ejecución de las obras, deberán estar suscritos por el Director, sin cuyo requisito no podrán ejecutarse los trabajos correspondientes.

A continuación se muestran los planos de los alzados principal y posterior (*figura 24*) del edificio mostrando la conservación del diseño arquitectónico inicial y los planos de estructuras de la cimentación y la planta baja (*ver figuras 25 y 26*).

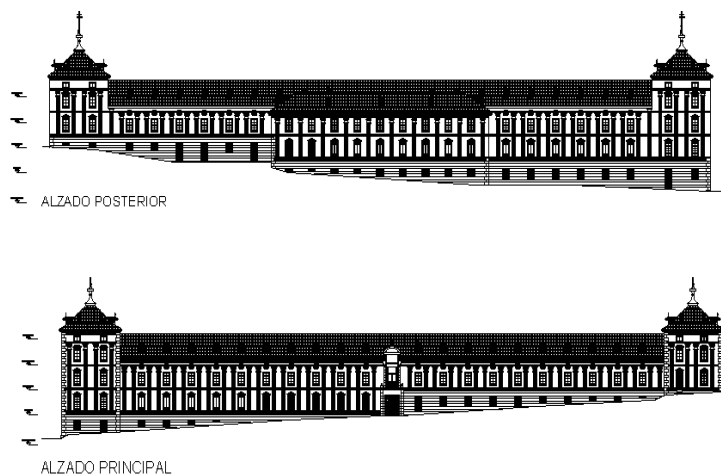


Figura 24: Alzado principal y posterior rehabilitado

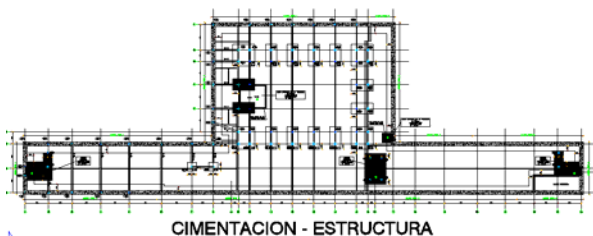


Figura 25: Plano de estructura de la cimentación

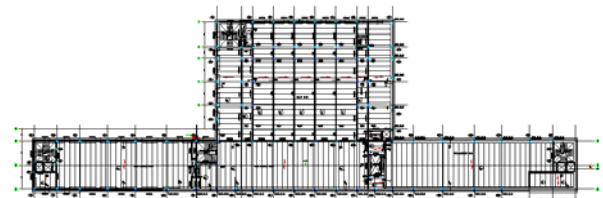


Figura 26: Plano de estructura de la planta baja.

#### ▪ Control y dirección de ejecución

El promotor contrató a un equipo facultativo que se encargó de redactar el proyecto y adjudicó a un constructor la ejecución del mismo, que a su vez subcontrató partes o

unidades de obra y solicitó los servicios de proveedores de materiales, maquinaria y equipo especializado.

Asimismo se solicitaron los servicios de una oficina de control técnico y constructivo (OCT) para realizar el control de calidad del proyecto y del desarrollo de los trabajos.

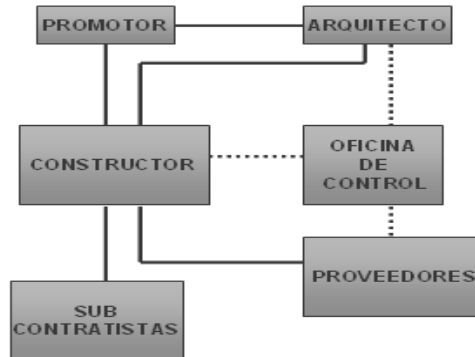


Tabla 5: Esquematización de la interacción de los agentes de control y dirección de ejecución.

#### ▪ **Pliego de prescripciones Técnicas.**

El pliego de prescripciones técnicas establece las condiciones de índole general que regirán en la ejecución de las obras de la presente rehabilitación, detalladas en las condiciones de garantía y recepción de las obras y las condiciones técnicas particulares de los materiales a ejecutar. Es muy importante señalar que este pliego tiene como misión complementar a las disposiciones contenidas en el pliego de bases del concurso y en caso de discrepancias prevalecen estas últimas.

El presente Pliego de Prescripciones Técnicas constituye el conjunto de instrucciones, normas, prescripciones y especificaciones que, además de lo indicado en la Memoria, Planos y Presupuesto, definen todos los requisitos de las obras de Restauración, Consolidación y Reforma del Edificio Guardia de Corps, en La Granja de San Idelfonso, Segovia.

#### ▪ **Mediciones**

El control y seguimiento de las mediciones es muy importante en cara a los pedidos de materiales con los proveedores y al gestionar la valorización de avance de obra con la promotora, asimismo contrastado con el cronograma poder llevar un control de rendimientos de obra.

#### ▪ **Presupuesto**

El presupuesto contratado asciende a la suma de quince millones seiscientos once mil ciento veinte euros.

### **6.1.3.- Medición y valoración de obra**

En la medición y valoración de las diferentes unidades se han aplicado los criterios del Pliego General de Condiciones Técnicas de la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de la Vivienda. Edición 1973.

Solamente fueron abonadas las unidades de obra que sean ejecutadas con arreglo a las condiciones que señala el Pliego de prescripciones, que figuren en los documentos del proyecto o que hayan sido ordenadas por el Director de las Obras.

En los precios de cada unidad de obra se consideran incluidos los trabajos, medios auxiliares, energía, maquinaria, materiales y mano de obra necesarios para dejar la unidad completamente terminada, todos los gastos generales directos e indirectos como transportes, comunicaciones, carga y descarga, pruebas y ensayos, desgaste de materiales auxiliares, costes indirectos, instalación, impuestos, derechos, etc. El Contratista no tuvo derecho a indemnización alguna como excedente de los precios consignados por estos conceptos.

Se consideraron incluidos en los precios aquellos trabajos preparatorios que sean necesarios, tales como caminos de accesos, nivelaciones, cerramientos, etc., siempre que no estén medidos o valorados en el Presupuesto.

#### 6.1.4.- Seguridad y salud

El contratista cumplió y estuvo al corriente en todo momento de las obligaciones que como empresa le incumben en materia laboral, de seguridad social y seguridad y salud en el trabajo siendo rigurosamente responsable con carácter exclusivo del incumplimiento de tales obligaciones.

#### 6.1.5.- Protección del entorno

Se preparó el terreno de forma adecuada, se protegió el arbolado existente así como las zonas colindantes, y teniendo en cuenta que ésta es un patrimonio cultural.

Se realizó la ubicación pertinente de la maquinaria, controlando la emisión de polvos y finalmente se mantuvo una limpieza permanente y final de la obra de rehabilitación.

#### 6.1.6.- Régimen sancionador

En el caso de incumplimiento de las prescripciones definidas, se hace uso de la fianza aportada por el contratista por no haber realizado los trabajos en el plazo mínimo fijado y la paralización de obras por incumplimiento de la normativa de seguridad y salud.

La constructora tuvo un desempeño óptimo y cumplió con todas las exigencias del caso.

### 6.2.- Clasificación de las técnicas usadas en la rehabilitación.

En la *tabla 6* se muestran las técnicas más habituales utilizadas en la rehabilitación.

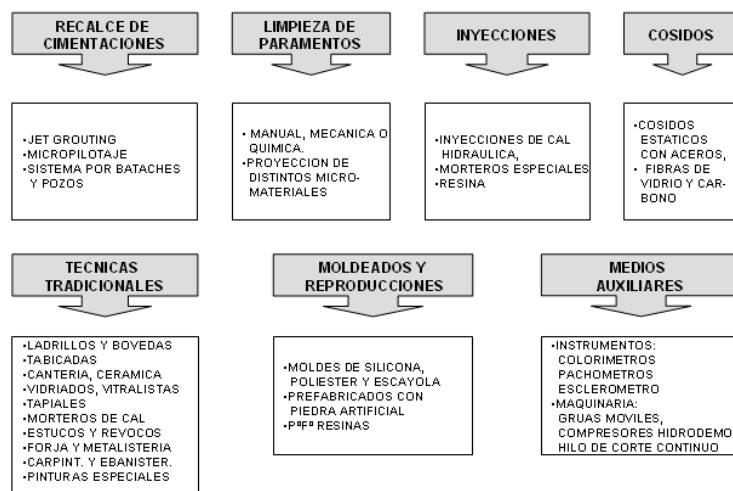


Tabla 6: Clasificación de las técnicas de rehabilitación.

## **6.2.1.- Recalce de cimentaciones.**

### **6.2.1.1.- Actuaciones sobre el terreno**

Las actuaciones sobre el terreno previas al recalce tienen como objetivo mejorar o corregir la capacidad portante del terreno u otras características, operando además sobre los cimientos.

La decisión suele requerir una investigación cuidadosa y una valoración detallada de las diversas soluciones tecnológicas y de sus posibilidades de éxito. Las soluciones son muy diversas. Inyecciones de cemento (lechada de cemento, gel de sílice, resinas), de relleno (bentonita, cemento, poliuretanos), o de compactación (morteros viscosos). Técnicas de jet-grouting, drenaje, y otras.

Se usó en este caso las inyecciones de lechada de cemento en dosificaciones agua/cemento de 1/2 con adición de bentonita y morteros viscosos para su posterior solidificación, son denominadas inyecciones convencionales.

Se usaron pequeños taladros dispuestos en la superficie lateral introducidos en el interior de la perforación previamente realizada a fin de obtener mejoras, tales como, la reducción de la compresibilidad, el aumento de la resistencia y la disminución de la permeabilidad.

### **6.2.1.2.- Técnica de recalce utilizada**

Se usó el recalce por pozos y bataches creando un entibado de seguridad con vigas en los diferentes tramos de la pared de estos pozos. De ésta manera se excavó todo el solar, excepto la zona cercana a medianeras y calles, que se deja en talud. Luego se excava en el talud hasta la medianería, construyendo el batache con una anchura que varía según la calidad del terreno y de la obra, entre 1,50 y 2 metros. Los bataches se distanciaron al menos dos veces su anchura, para no producir tramos de descalce muy largos. Fue conveniente soportar los costados verticales de cada batache. A continuación se excavó con cuidado debajo de la cimentación existente, se recalza y se realizan las operaciones deseadas de reparación o construcción. A veces el recalce no requiere continuidad y basta con hacerlo en determinados puntos.

Este método es el más económico por su facilidad de ejecución pero solo se puede aplicar cuando la excavación no sea muy profunda, hasta 5 metros, y el suelo sea bueno, y sin problemas de presencia de agua, siendo este el caso según geotécnico.

Ya sea la excavación por bataches y por pozos, ha de cuidarse especialmente el recorte del terreno, que será siempre manual, cuidando la verticalidad y de no socavar accidentalmente la cimentación.

Es un método empleado tradicionalmente en la consolidación de cimentaciones de muros. El sistema no es válido para zapatas aisladas ya que ofrece más riesgo en su ejecución y requiere la presencia de agua en cantidades apreciables en la excavación.

El recalce profundo por pozos se realiza por puntos, de forma similar a los recalces superficiales en la sustitución de las zapatas corridas, pero con excavación de pozos

hasta alcanzar el firme. Los pozos se elaboraron de un ancho de 1 a 2 metros, que es el mínimo necesario para poder trabajar, y la entibación será cuajada o no según la calidad del terreno. Posteriormente, se construyó la nueva cimentación y el muro de recalce, retirándose la entibación de abajo a arriba según permitía la seguridad. Para mayor seguridad, fue apropiado emplear un mortero expansivo para la puesta en carga del recalce. Las últimas hiladas o el retacado deberán realizarse una vez transcurrido un tiempo prudencial para dejar fraguar y retraer a las fábricas construidas.

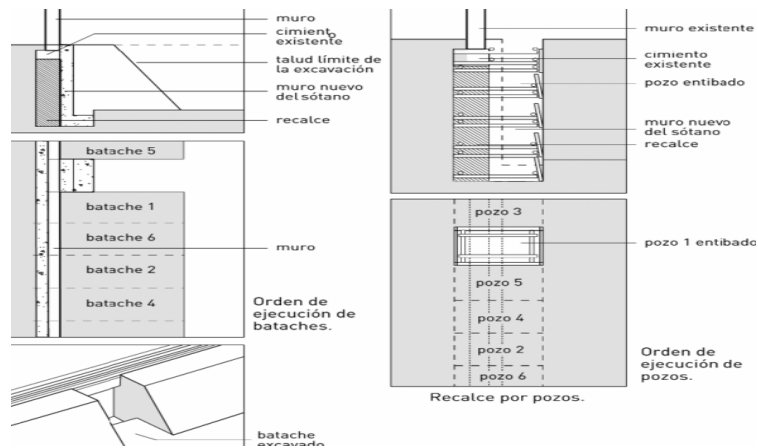


Figura 27: Recalde por pozos

### 6.2.1.3.- Fases del recalce

#### ▪ Refuerzo y apoyo provisional de la estructura.

Sólo la prudencia puede dictar normas a este respecto. En edificios antiguos, este trabajo preparatorio puede constituir la mayor parte de la operación como ocurre en este edificio histórico. Se reforzaron los muros con andamios adyacentes a ellos, por otro lado los huecos se rellenan mediante inyecciones de mortero.

En edificios modernos puede bastar un apuntalamiento exterior, quizás mediante estructuras reticulares o el apuntalamiento de arcos y vigas.



Figura 28: Refuerzo provisional y apuntalamiento

#### ▪ Transferencia de cargas de la cimentación primitiva al apoyo provisional.

Este proceso está íntimamente ligado al anterior. Primeramente se transmite la carga del miembro estructural que se va a recalzar a soportes provisionales, antes de proceder al recalce de aquel. Esto suele hacerse mediante cuñas y gatos hidráulicos.

Se procede a la ejecución de los pozos de acceso y el entibado de seguridad ante cualquier desmoronamiento o fallo del suelo excavado el cual pondría en peligro al personal de trabajo.

▪ **Construcción de la nueva cimentación.**

El método de recalce usado acopla las nuevas cimentaciones que se construyen debajo de las existentes, para ello se comienza por excavar bajo estas.

Para no tener que transferir las cargas a apoyos provisionales, se puede confiar en el efecto bóveda debajo del muro fachada previo tratamiento de rehabilitación del mismo pero es muy riesgoso, habiéndose descartado.

Un posible dispositivo para construir la nueva cimentación se indica a continuación.

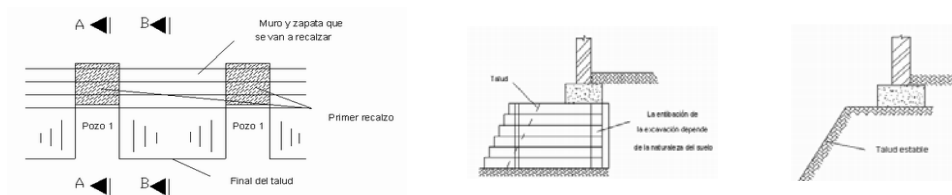


Figura 29: Recalce pozos 1 y entibados

En el caso de muros continuos la distancia entre zanjas abiertas simultáneamente debe ser igual, al menos, a 1 ½ veces su profundidad. Su ancho suele ser de 1 m y su longitud de 1.5 a 2 m.

Una vez terminado el primer recalzo se excavan los pozos 2 y se recalzan.

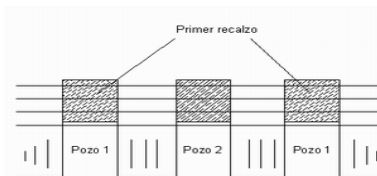


Figura 30: Construcción Muro Armado en pozos 1 y recalce de pozos 2.

Una vez terminado el segundo recalzo, se recalzan los espacios intermedios.

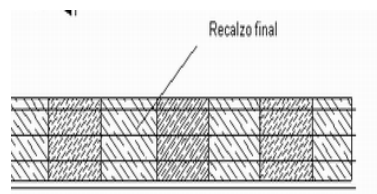


Figura 31: Construcción Muro Armado en pozos 2 y recalce de pozos 3 y construcción del muro en el pozo 3.

▪ **Transferencia de las cargas a la nueva cimentación**

Se uso mortero expansivo y posteriormente placas, cuñas y lajas de pizarra que se sitúan en el hueco entre la nueva cimentación y la antigua.

Una desventaja de este método es que la carga transferida no se conoce. No es adecuado para transferir cargas puntuales. Si la transferencia de la carga es insuficiente ocurrirán asientos al quitar los apuntalamientos.

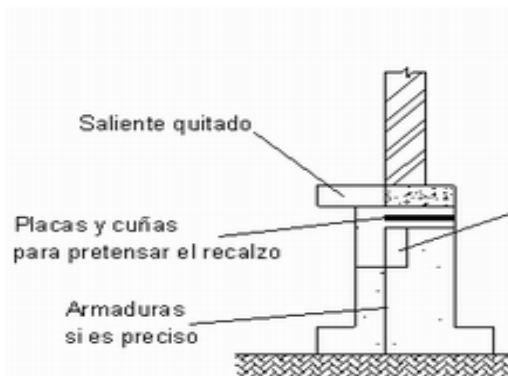
Las cuñas de acero representan un avance. Si se conoce el ángulo de un par de cuñas se puede calcular cuanto se han separado de las cimentaciones. Sin embargo, sólo se puede hacer una estimación grosera de la carga transferida.

Los gatos de husillo son, en este aspecto, semejantes a las cuñas de acero, pero son más cómodos, permiten un mejor control y mayor separación cuando se requiere.

Antes de transferir la carga de modo permanente a la nueva cimentación deberían terminarse los asientos. Esto puede requerir introducir nuevas cuñas de tiempo en tiempo o volver a dar presión a los gatos.

Cuando la nueva cimentación se lleva hasta un suelo granular el cual es nuestro caso, cabe esperar que el asiento sea pequeño, pero si el suelo es arcilloso puede haber asientos de consolidación importantes que según geotécnico no es el caso. Ensayos de laboratorio o in situ, anteriores, deben permitir predecir el asiento lento, y estos resultados deben corregirse con las primeras medidas en la obra. El ajuste de los gatos debe continuarse hasta que el asiento remanente pueda ser absorbido por la estructura sin daño.

Para la unión final se rejuntan las lajas de pizarra y se sueldan las cuñas. El espacio no ocupado por cuñas o gatos debe rellenarse y acunarse con lajas de pizarra o mortero seco apisonado. Los gatos pueden retirarse o reemplazar finalmente el fluido hidráulico por uno que se solidifique y proporcione un medio permanente de transferencia de cargas.



*Figura 32: Transferencia de cargas a la cimentación nueva usando placas, cuñas y morteros expansivos.*

## **6.2.2.- Limpieza de paramentos.**

Es la aplicación manual, mecánica o química de un tratamiento de limpieza previo a la aplicación de morteros, inyecciones u otra técnica de reparación previa. Se realizó mediante aspirado, soplado y eliminación manual de material disgregado y suelto en la zona de actuación.

## **6.2.3.- Inyecciones en muros y suelos**

### **6.2.3.1 Inyecciones con morteros de cal y armaduras**



Inyección armada con morteros de cal y armadura metálica o de FRP aumentan la resistencia de la mampostería al trabajar muy bien a tracción evitando las grietas y fisuras.



*Figura 33: Elemento de costura capaz de soportar esfuerzos de tracción*

### **6.2.3.2 Secuencia de reparación del muro lateral disgregado**



*Figura 34: Paso 1 - Disgregación del ladrillo y parte de la junta del mortero*



*Figura 35: Paso 2 Aplicación de mortero especial con cal hidratada.*



*Figura 36: Paso 1 - Mortero de cal hidratada y malla de refuerzo*



*Figura 37: Paso 2 Acabado de mortero fino de cal hidráulica y arenas finas.*

### 6.2.3.3 Inyecciones de morteros especiales para demolición (morteros expansivos).

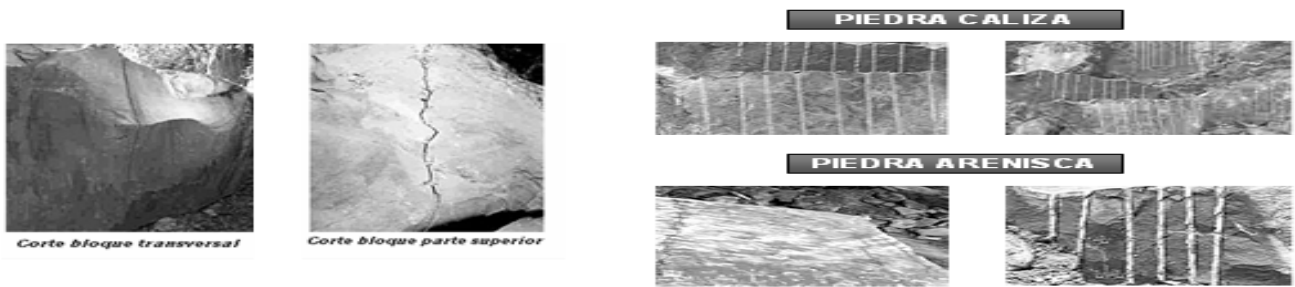


Figura 38: Demolición mediante inyección de morteros expansivos.



Figura 39: Inyección de mortero expansivo en roca.

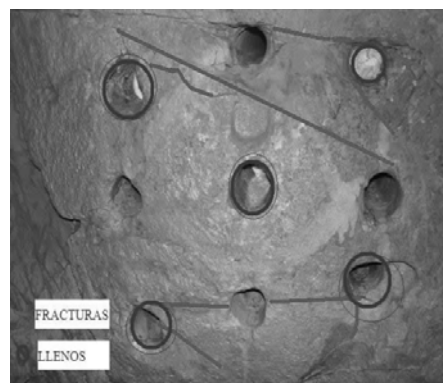


Figura 40: Estudio de zonificación de puntos de inyección (llenos) y de fisura y las respectivas líneas de fractura.

### 6.2.4.- Cosido estático con perfilería metálica

Finalizado el recalce se procede a consolidar y hacer solidario el muro con la estructura, mediante su cosido por pilares metálicos.

El cosimiento de los muros de albañilería con pilares metálicos se usa para reforzar al muro siendo el sistema de consolidación y estabilización mas adecuado.

Transfiere una proporción importante de la carga vertical soportada por el muro a la nueva estructura de acero insertada en cavidades hechas en el mismo muro.

Sistema de cosimiento empleado mediante el uso de pilares y vigas metálicas.



Figura 41

Marcos de acero usados en la sujeción de la ventana con el muro.



Figura 42

Sistema de arriostrado de acero (cruz de san andres) para la mejora del comportamiento lateral de la estructura.

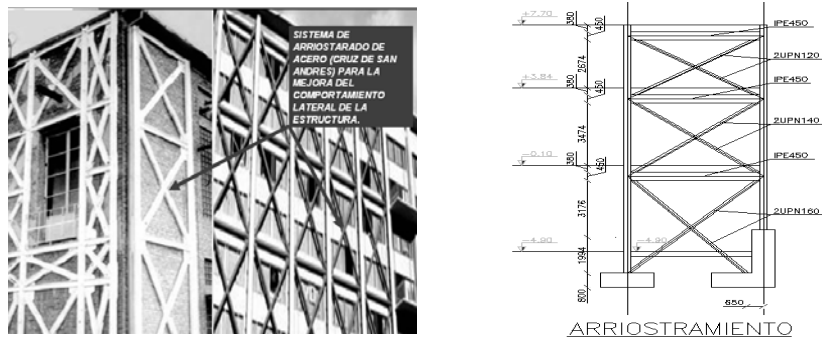


Figura 43

Creación de aberturas en la parte inferior del muro para albergar al pilar metálico y su respectiva placa de anclaje los cuales se apoyaran en el muro de hormigón.



Figura 44

Después de crear canales verticales y horizontales adecuados en los muros perimetrales, montaje de los pilares en toda la altura, montaje de vigas y los refuerzos temporales de estos en las diferentes alturas.



Figura 45

En la figura 46 se muestra el cosido de los pilares metálicos y el arriostramiento con las vigas metálicas para darle estabilidad al muro y recibir las cargas de la nueva estructura levantada.



Figura 46

### 6.2.5.- Técnicas tradicionales.

Las más usadas y tradicionales técnicas en la rehabilitación arquitectónica del Cuartel de Guardia de Corps fueron: ladrillos y bóvedas, tabicadas, cantería, cerámica, vidriados, vitralistas, tapiales, morteros de cal, estucos y revocos, forja y metalistería, carpintería y ebanistería y pinturas especiales

### 6.2.6.- Moldeados y reproducciones.

Asimismo se usaron moldeados y reproducciones para reconfigurar y sustituir materiales y acabados originales por nuevos con similares características, siendo estos los siguientes: Moldes de silicona, poliéster y escayola y prefabricados con piedra artificial.

### 6.2.7.- Medios auxiliares.

Instrumentos: Colorímetros, pachómetros (detección de metales ocultos), esclerómetro (medida de dureza superficial) y maquinarias: Grúas móviles, compresores hidrodemolición, hilo de corte continuo.

## 6.3.- Fotografías del estado rehabilitado



Figura 47



Figura 48

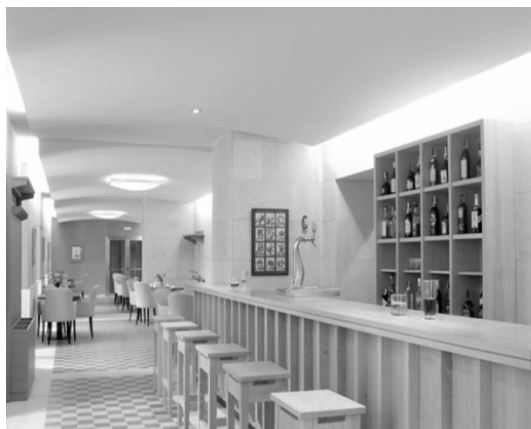


Figura 49



Figura 50

## 7.- Bibliografía

- (1) BECKMANN, Poul (1994) Structural Aspects of Building Conservation. McGraw-Hill, Londres.
- (2) BALLART, Josep (1997) El patrimonio histórico y arqueológico. Valor y uso. Ariel, Barcelona.
- (3) MONTERROSO, Juan Manuel (2002) Protección y conservación del patrimonio, principios teóricos. Tórculo Edicions, Santiago de Compostela.
- (4) HEYMAN, Jacques (1995) Teoría, Historia y Restauración de Estructuras de Fábrica, Instituto Juan de Herrera, Madrid. (2002) La Ciencia de las Estructuras, Instituto Juan de Herrera, Madrid.
- (5) ARROYO GARCÍA, Jerónimo (2003) Proyecto de ejecución de la Rehabilitación del edificio histórico del Cuartel de Guardia de Corps, Madrid.
- (6) Clemente Roberto, Tesis Doctoral, Análisis estructural de edificios históricos mediante modelos localizados de fisuración,, Barcelona.

## TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS: EL DIAGNÓSTICO ANTES DE LA INTERVENCIÓN

Manuel Floriano Abril<sup>1</sup> ([mflorianoageocisa.com](mailto:mflorianoageocisa.com)) ; Verónica Vidal Lij<sup>1</sup> ([vvidall@geocisa.com](mailto:vvidall@geocisa.com))

<sup>1</sup> GEOCISA

### RESUMEN

GEOCISA, en su compromiso de utilizar y participar en el desarrollo de las técnicas más punteras de auscultación, reparación y rehabilitación, ha colaborado en varios proyectos en los que se han utilizado diferentes técnicas no destructivas.

En este artículo se comentará la aplicación al diagnóstico, previo a cualquier intervención, de dos técnicas muy distintas: la monitorización, como técnica de seguimiento del comportamiento estructural y, posteriormente, la técnica del gato plano y su aplicación en estructuras de hormigón armado.

### 1.- Introducción.

Desde hace unos años en el mercado de la construcción se ha incrementado la actividad en el sector de la rehabilitación y reparación de estructuras. Esta creciente actividad ha impulsado, a su vez, un creciente uso de técnicas no destructivas (TND) en la imprescindible fase previa de estudio y diagnóstico de la estructura a reparar. Esto ha hecho posible un mayor conocimiento de las técnicas no destructivas por parte de la industria.

GEOCISA, en este aspecto, es pionera en el desarrollo y aplicación de estas técnicas, tales como la determinación de grietas por ultrasonidos, o el uso del georradar y de los gatos planos (Figura 1).

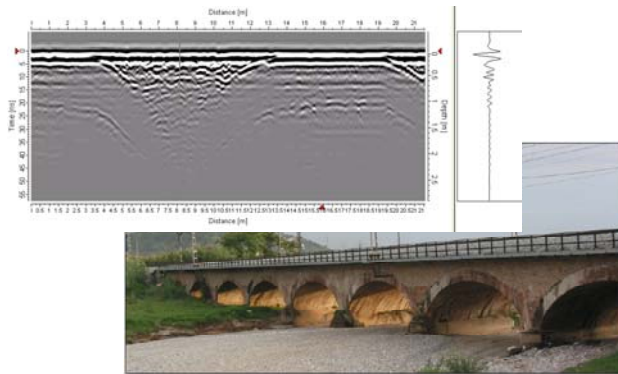
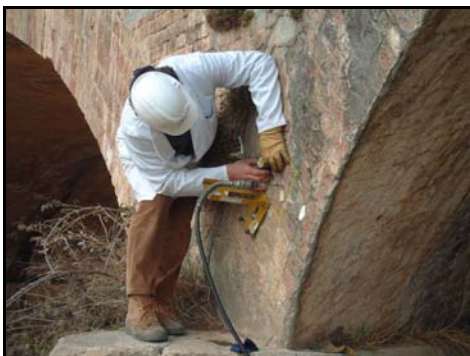


Figura 1:

*Izda: Radargrama obtenido en el Puente en la Riera del Rubí (Barcelona).*

*Inferior Izda: Ensayo de gato plano en el mismo puente.*

*Inferior Dcha: Ensayo de ultrasonidos en el estribo de un puente en Maqueda-Torrijos*



Asimismo, la monitorización estructural, en combinación con distintas técnicas de ensayo no destructivo, constituye una herramienta de diagnóstico de gran utilidad, dada la valiosa información que aporta de cara a posteriores intervenciones.

De especial interés resulta su aplicación en edificios históricos, a fin de dimensionar y enfocar adecuadamente las actuaciones que pudieran resultar precisas y, finalmente, de corroborar la eficacia de las soluciones adoptadas.

## **2.- La Monitorización Estructural**

De forma similar a los chequeos médicos periódicos, que permiten evaluar el estado de salud de un paciente a través de la evolución de ciertos marcadores, el estudio de las “constantes vitales” de una estructura puede aportar información de gran interés en circunstancias relativamente frecuentes, como lo pueden ser el diagnóstico de procesos patológicos y el control de las actuaciones que pudieran ser precisas.

La monitorización estructural se basa en la obtención de todo tipo de información, relativa al comportamiento real de una estructura, para analizar su evolución a lo largo del tiempo. En este ámbito, el estado de salud puede ser determinado a través de la evolución de distintos parámetros o magnitudes características, inherentes a la propia estructura o, en su caso, al proceso a controlar.

La experiencia acumulada a lo largo de años de trabajo en el campo de la instrumentación y monitorización de estructuras, ha llevado al convencimiento de que un preciso conocimiento previo de lo que en determinada situación está ocurriendo conlleva un mejor dimensionamiento de la actuación a realizar, así como a establecer distintas prioridades en la misma.

La necesidad de responder con celeridad ante la aparición de determinados deterioros lleva a acometer, en ocasiones, actuaciones precipitadas que, por falta de información, pueden llegar a ser, a veces, desproporcionadas y, por tanto, antieconómicas.

Para que una monitorización resulte eficaz, de cara a establecer un diagnóstico, han de establecerse previamente los distintos parámetros o magnitudes estructurales afectadas y definir los puntos más significativos o que, por su mayor grado de deterioro, puedan presentar un mayor interés de cara a su seguimiento.

Tras ello, se deberá diseñar la instrumentación más adecuada que permita su medida de forma precisa y efectiva. Puesto que cada estructura presenta una serie de peculiaridades, su instrumentación y seguimiento han de adecuarse a ellas y a las características del proceso de deterioro en cuestión, constituyendo en cada caso un traje a medida.

Las posibilidades técnicas disponibles, al igual que sucede en el ámbito clínico, son muy amplias. De la misma forma que en instrumentación clínica siguen siendo indispensables instrumentos tales como termómetros o estetoscopios, dado que la información que aportan es fundamental y de gran utilidad en ciertos procesos, en monitorizaciones estructurales pueden ser válidas técnicas igual de simples, sin tener que recurrir para ello a complejos y sofisticados sistemas.

Así, en ciertos casos, puede ser suficiente con un seguimiento relativamente periódico de ciertas magnitudes, sobre un número reducido de puntos, mediante instrumentos de lectura directa (extensómetros, clinómetros, niveles topográficos, etc.) (Figura 2).



Figura 2.- Extensómetros mecánicos y de cinta de invar.

Pese a la simplicidad de estas técnicas de instrumentación, este tipo de monitorización, combinada o no con otras técnicas no destructivas, constituye una herramienta eficaz que, adecuadamente diseñada, permite acotar el alcance de la patología observada, lo que redundará en una actuación más ajustada, eficaz y económica.

Prueba de ello es la monitorización llevada a cabo en el Puente de Titulcia, sobre el río Jarama, en Madrid, en el que se detectó el descenso y giro de una de sus pilas, como consecuencia de una posible socavación.

El seguimiento inicial de la estructura, orientado al diagnóstico y basado en nivelaciones topográficas de precisión de carácter periódico, permitió cuantificar de forma precisa sus movimientos. La entidad de los descensos, así como el súbito incremento observado en la velocidad de los mismos a partir de mayo de 2004, obligaron a acometer un recalce de carácter urgente, cuya eficacia pudo verificarse mediante un seguimiento de la respuesta de la estructura (Figura 3).

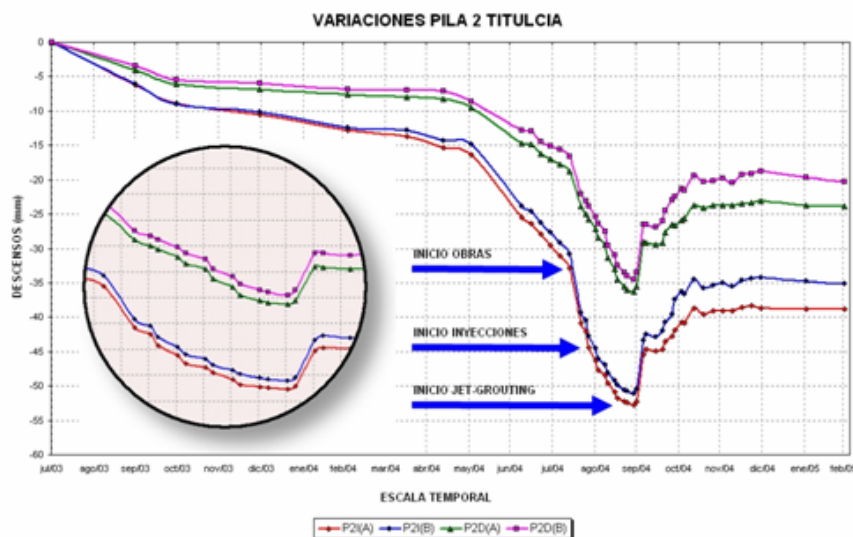


Figura 3.- Evolución de asientos de pila en el Puente de Titulcia.

Dicha actuación se inició a mediados de agosto de 2004. En una primera fase, y como consecuencia de las labores previas (vertido de escollera sobre la cimentación de la pila y trabajos de perforación previos a las inyecciones), los descensos se acentuaron considerablemente.

Una vez comenzadas las inyecciones se siguieron produciendo descensos, pero a una menor velocidad, y presentando una cierta tendencia a la estabilización. A finales de septiembre se iniciaron de forma progresiva los trabajos de jet-grouting, cuyos efectos



empiezan a ser evidentes a partir de los primeros días de octubre de 2004, fecha a partir de la cual se empiezan a producir ascensos notables. Los distintos controles periódicos realizados a partir de primeros de noviembre, tras finalizar los trabajos, denotaron una estabilización total en los movimientos de la pila, lo que corroboró la eficacia de la actuación realizada.

En otras ocasiones, como sucede durante intervenciones delicadas o en procesos de especial complejidad técnica, no basta con tener una cierta idea de la tendencia seguida, sino que resulta prioritario disponer de información permanentemente actualizada en la que basar una posible toma de decisiones. En esos casos la solución más adecuada se basa en un sistema automatizado que proporcione información del comportamiento de la estructura en tiempo real, de forma desatendida, sin intervención de operador alguno (control intensivo). Ejemplo de ello fue el sistema de monitorización utilizado durante la movilización del cimborrio de la Catedral de Tarazona, en Zaragoza [1].

Estrictamente hablando, el concepto “tiempo real” presenta ciertas características de determinismo e implica unas restricciones en cuanto a tiempos y respuestas en sistemas críticos. No obstante, dicho término resulta ambiguo y ha de entenderse, en este tipo de monitorizaciones, como de una cierta inmediatez en el suministro de datos, y no presenta las mismas connotaciones que en otros ámbitos.

Dependiendo del número y localización de los puntos a medir puede optarse por sistemas centralizados o distribuidos, basados estos últimos en subsistemas autónomos de medida y registro, estratégicamente repartidos en la estructura, e interconectados entre sí y con un ordenador de supervisión y control próximo mediante un bus o red de datos. Las soluciones distribuidas se muestran como la opción más conveniente cuando los puntos a controlar se encuentren considerablemente dispersos, dada la reducción de los tendidos de cable requeridos y la mayor calidad e integridad de las medidas realizadas, al ser transmitida la información en forma digital.

En los últimos años, el desarrollo de los sistemas de monitorización y control automatizados ha evolucionado en paralelo con el de las comunicaciones. Hasta hace pocos años el acceso remoto a un sistema tenía, habitualmente, carácter circunstancial y se realizaba, punto a punto, a través de la red telefónica convencional o móvil, a baja velocidad.

La amplia difusión que hoy en día han llegado a alcanzar las redes de datos, y en especial Internet, ha permitido no sólo compartir la información de múltiples formas (publicación web, transferencia de archivos, difusión de e-mail, etc.), sino el pleno control remoto del sistema de monitorización mediante el software cliente adecuado.

En un futuro próximo, el desarrollo de las llamadas redes sensoriales inalámbricas (WSN) y su adaptación al ámbito estructural pueden suponer una importante transformación en el panorama de la instrumentación y monitorización, como ya lo está siendo en otros campos.

A continuación se describen brevemente algunas de las monitorizaciones realizadas por GEOCISA en edificios históricos, adoptando para ello distintas soluciones:

### **Muralla del Parador de Tortosa**

Los orígenes del antiguo Castillo de la Zuda, en Tortosa (Tarragona), se remontan al siglo X, sirviendo en la actualidad como Parador de Turismo.

A finales del año 2003, y a raíz del deslizamiento de la ladera sobre la que se sustenta su muralla, se revelaron ciertas grietas en ésta, cuya evolución, en tanto no se acometieran los trabajos de consolidación, era necesario tener en todo momento bajo control.

A fin de determinar la evolución de los principales deterioros observados se procedió a la instalación y puesta en marcha de un sistema de monitorización automatizado que los pudiera medir y registrar de forma permanente, sin intervención de operador alguno.

El control se centró, fundamentalmente, en la medida de abertura de las principales grietas existentes, mediante transductores inductivos de tipo palpador, y en la de giros, por medio de servoclinómetros de elevada precisión.

El sistema adoptado medía continuamente un total de dieciséis puntos, registrando su evolución con una periodicidad de diez minutos, a fin de poder elaborar un archivo histórico de evolución.

El acceso al sistema se realizaba de forma remota, desde las oficinas centrales de GEOCISA, a través de Internet; lo que permitía conocer en todo momento el estado de los distintos puntos de medida y seguir su evolución a origen.

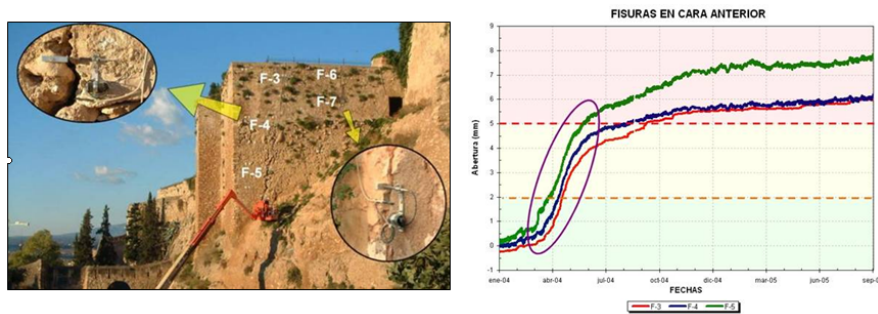


Figura 4.- Monitorización de la muralla. Umbrales de aviso y de alarma.

Este control intenso de la estructura permitió detectar, en abril de 2004, un aumento significativo en la velocidad de evolución de los deterioros observados (Figura 4), lo que obligó a la colocación de un apeo preventivo de seguridad, en tanto pudieran iniciarse los trabajos de consolidación de la muralla.

Durante los meses siguientes, y hasta finales de ese año, se produjo la progresiva entrada en carga de este apeo, con la consiguiente disminución en la velocidad de abertura de las grietas existentes, hasta su final estabilización, todo ello corroborado a través de la monitorización dispuesta, que adicionalmente fue ampliada a fin de determinar las variaciones tensionales en el apeo.

Finalmente, en 2006, se iniciaron los trabajos de consolidación de la muralla, durante los cuales se mantuvo el seguimiento remoto de la instrumentación, a fin de constatar posibles reacciones estructurales adversas. A día de hoy, los valores registrados por el sistema denotan una estabilidad de los deterioros controlados.

### **Basílica del Sagrado Corazón (Gijón)**

A finales del año 1.999 GEOCISA inició un seguimiento de la Basílica del Sagrado Corazón en Gijón (Asturias), consistente en la medida de convergencias entre muros laterales, abertura de fisuras, asientos y niveles freáticos. Estas lecturas se realizaron con instrumentación manual, de forma discontinua, y con distinta periodicidad, hasta principios de 2.002.

Años más tarde, a finales de 2.005, se reanudó su seguimiento, observándose un considerable aumento de la separación entre muros, en la zona próxima a la fachada principal, así como un significativo asiento en los puntos próximos a ésta, especialmente en sus esquinas (Figura 5).

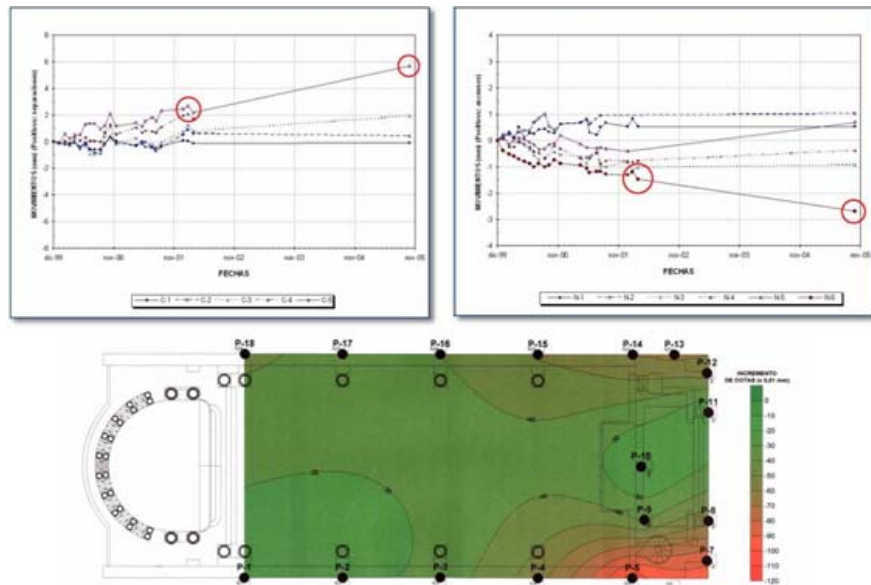


Figura 5.- Seguimiento de asientos y fisuras en *Basílica del Sagrado Corazón* (Gijón).

La tendencia, claramente negativa, de los daños observados, condujo a la necesidad de acometer una consolidación urgente de la cimentación, durante la cual era preciso mantener en todo momento bajo control el estado de la estructura.

Esta circunstancia motivó la puesta en marcha de un sistema de monitorización, a fin de medir y registrar de forma sistemática y continuada las convergencias en la nave, las principales fisuras, y distintos giros en la fachada principal. Junto a los valores instantáneos de cada uno de ellos, reflejados sobre paneles sinópticos, se incluía una indicación de su estado con respecto a sendos límites, de aviso y de alarma, previamente establecidos de forma individualizada.

La gestión de las posibles alarmas era llevada a cabo por un ordenador local de supervisión, mediante la distribución de mensajes a través de correo electrónico, a fin de que pudieran ser tomadas las acciones oportunas con la mayor rapidez.

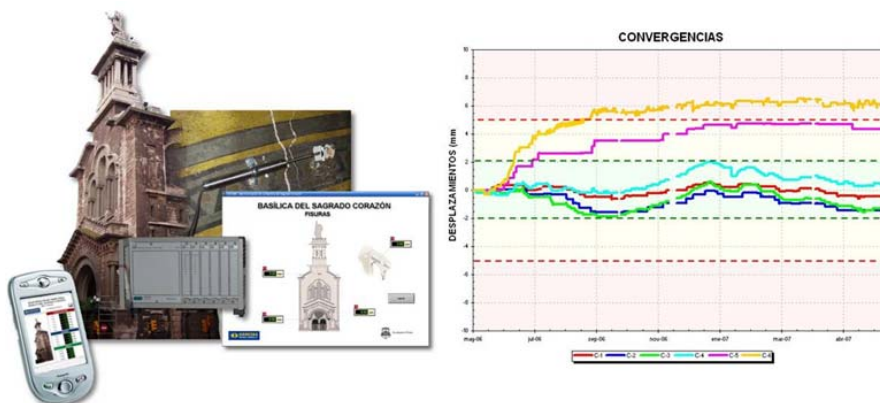


Figura 6.- Sistema de monitorización en *Basílica del Sagrado Corazón*.

El control y supervisión del sistema ha sido realizado de forma remota desde las instalaciones de GEOCISA, en Madrid, siendo accesibles los datos instantáneos desde cualquier otro equipo con conexión a Internet, a través de una página web.

Si bien no fue posible conservar el origen histórico de las medidas manuales previas, tras la puesta en marcha del sistema de automatizado, en mayo de 2006, la situación se vio agravada durante los tres primeros meses, a la vista de la alarmante evolución de algunas de las convergencias y fisuras medidas (Figura 6). Tras esta fase inicial, a partir de julio 2006, se constató una significativa disminución en la velocidad de evolución de las magnitudes monitorizadas, una vez que comenzaron a surtir efecto las inyecciones de consolidación hasta entonces realizadas. Finalmente, a partir de septiembre de 2006, la situación se ha mantenido estabilizada, como se desprende del seguimiento remoto realizado.

### 3.- Gatos Planos.

El ensayo de gato plano se define como un ensayo poco destructivo que permite conocer el estado tensional del elemento de fábrica estudiado cuando está sometido a esfuerzos de compresión. El fundamento de esta técnica se basa en la liberación de la tensión en la zona de ensayo, mediante la realización de un corte, para posteriormente restituirla mediante una célula de presión de dimensiones similares a las del corte realizado (Figura 7).

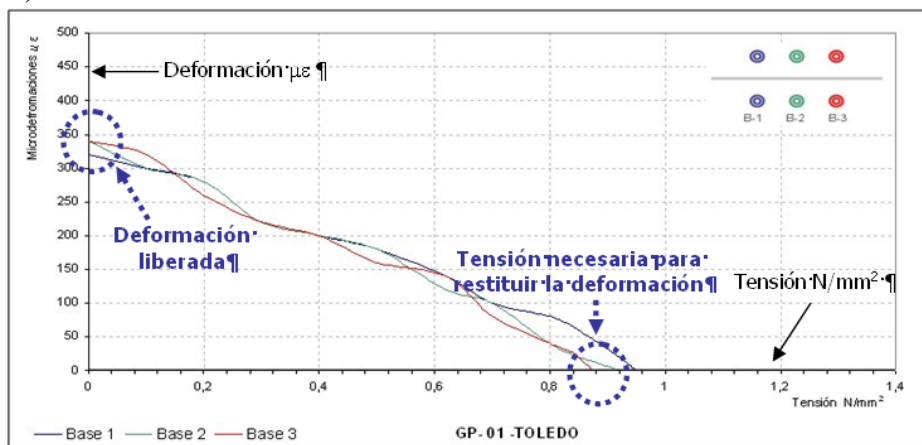


Figura 7.- Representación de resultados de ensayo de gato plano.

El procedimiento de actuación utilizado en GEOCISA está basado en la normativa ASTM C 1197 [2] y la recomendación RILEM [3], adaptando las especificaciones de la normativa según la propia experiencia de GEOCISA en el análisis estructural [4].

Históricamente, se ha venido aplicando a estructuras antiguas de fábrica con muy buenos resultados. Sin embargo, recientemente se está comenzando a aplicar en hormigón armado con resultados muy satisfactorios.

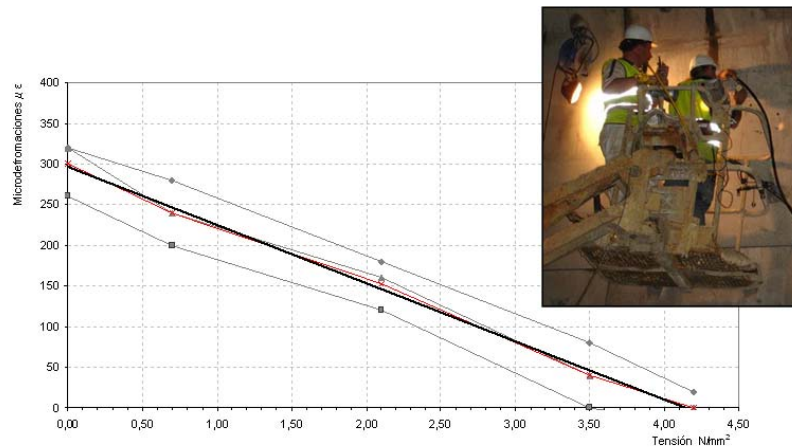


Figura 8: Proyecto Lote 3 Túnel alta velocidad, Pajares.

De la experiencia acumulada hasta el momento se puede concluir que:

- Como demuestran los resultados tipo de sus ensayos (Figura 8), se obtienen unas curvas bastante bien definidas, donde se aprecia con cierta exactitud la deformación liberada por el corte en cada una de las tres bases de medida empleadas, y la tensión necesaria para restituirla; como se aprecia en el gráfico superior los valores estimados para cada una de las bases resultan relativamente similares entre sí.
- La diferencia principal que tiene esta aplicación en hormigón respecto al uso tradicional radica en las propiedades de los materiales; es decir, la mayor rigidez del hormigón armado va a permitir alcanzar valores más altos de tensión y, por lo tanto, la presión que se va a necesitar en el gato será mayor. En la actualidad, esos valores de presión aplicada se están aproximando a los máximos admisibles y, por tanto, hace necesario prever la utilización de gatos mayores.
- Finalmente, otro aspecto a tener en cuenta durante la ejecución del ensayo es la zona del elemento en estudio. Ésta no debe contener armadura, para no desvirtuar el ensayo. Este pequeño inconveniente se soluciona fácilmente mediante la detección previa de la misma por métodos magnéticos, siempre y cuando la separación entre barras lo permita.

Como consecuencia, esta nueva aplicación hace del gato plano un ensayo más versátil, debido a su utilización en estructuras de fábrica como diagnóstico previo a la intervención y en estructuras de hormigón como control de ejecución. Sin embargo, conviene recordar que esta técnica posee un carácter puntual, parcialmente destructivo y exige un protocolo de actuación muy riguroso. Aun así, es un tipo de ensayo muy apropiado para obras de restauración o rehabilitación y obras donde sea necesario un control riguroso del estado tensional de los elementos por su excelente ratio coste/información.

#### 4.- Conclusiones

En este artículo se han presentado dos técnicas no destructivas muy eficaces en la conservación, rehabilitación y restauración y reacondicionamiento de estructuras tanto de fábrica como de hormigón armado. Las principales conclusiones que podemos obtener de ellas son las siguientes:

La monitorización estructural constituye una herramienta eficaz y económica tanto de cara al diagnóstico de deterioros en todo tipo de estructuras como en el control de ejecución de obras. Su aplicación no es exclusiva en obras singulares o actuaciones de gran complejidad, pues en todos los casos se trata de soluciones a medida de cada necesidad y, como tal, han de ser diseñadas.

Monitorizaciones sencillas, basadas en instrumentos de lectura directa, y con pocos puntos de control, pueden aportar información valiosa de cara a acotar el alcance de los posibles daños y a dimensionar adecuadamente la actuación requerida, todo ello con un coste mínimo.

Por otra parte, una adecuada monitorización de control permite garantizar la efectividad de las actuaciones y la seguridad de los trabajos, al mantenerse una supervisión permanente de los efectos que éstos producen. El establecimiento de ciertos límites de aviso y alarma facilita, llegado el caso, la activación de los procedimientos de emergencia previamente establecidos.

En definitiva, tanto en patología estructural como en la ejecución de obras evolutivas, un medio eficaz para tener controlada la situación es una adecuada instrumentación que permita disponer de la información necesaria para poder tomar las decisiones adecuadas.

En cuanto a la técnica del gato plano, su ampliación a estructuras de hormigón armado, hacen de esta ella una técnica muy interesante y práctica, ya que por un coste razonable se obtiene una información muy significativa sin el agravio de daño a la estructura.

## **5.- Referencias.**

- (1) F. Aguerri, I. Aguerri, A. López, J. Perelli, J. M. Rodríguez, “Movilización del Cimborrio de la Catedral de Tarazona (Zaragoza)” - II CONGRESO ACHE - Nov 2002.
- (2) ASTM C 1197: “Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method”.
- (3) RILEM Recommendation MDT, D.4: In-situ stress tests based on the flat jack” *Materiaiv. and Structures I Matériaux et Coostroctjcx.*, VoL 37, August-September 2004, pp 49-496.
- (4) De Diego, Ana; Knupfer, Beatriz. 4<sup>th</sup> International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions (SACH). Padova, Italy. 10-13 Nov, 2004.

## **ANOMALIES DIAGNOSIS AS A SUPPORT TO rehabilitation strategy for large scale housing buildings**

*Vitor Abrantes<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Full Profesor, FEUP – University of Porto (Portugal)*

### **1.- INTRODUCTION. STATE OF THE ART**

The establishment of a rehabilitation strategy for large scale housing buildings implies the use of a simplified system of diagnosis of pathologies. The proposed system is a matricial system that divides the building into zones, elements and components of the construction and the anomalies into 4 groups, presenting for each diverse causes, also being able to consider different risks or gravity for each case. The system is flexible enough to be able to add not only more elements or components of the construction but also more causes for the anomalies. The main goal is to perform the inspection of the building, always led by a specialist, through the exterior, the common zones and the interior (in this in case, guided by the users), to register the anomalies, through photograph and written notes, and to fit the anomalies into the cited matrix after inspection. For each anomaly, referenced by its localization (examples: Exterior (zone), wall (element), covering (component)) and its type and cause (example: moistness (anomaly), upward of the land (cause)), there is one corresponding strategy form. The introduction of this simplified diagnosis into a database will later allow for different types of manipulation, from the definition of the maintenance to its management.

We can refer that there are many systems for management of buildings, some still in development, that self-contain the diagnosis of anomalies as the base for the rehabilitation proposals. The following can be cited: EPIQR [1], TOBUS [2], Sureuro [2], EFM [3], Buildings life system [4], NCREP/FEUP [5], MER HABITAT [6], MEXREB [7], SIME [8], LNEC [9]

### **2.- PROPOSAL OF METHODOLOGY for ANOMALIES DIAGNOSIS**

The proposed methodology, assigned by Simplified Diagnosis of Anomalies (SDA) has the following objectives:

- Application to large scale housing buildings;
- Simplification and some quickness in its application;
- Use to define global strategies for rehabilitation intervention

It is evident that the determination of the pathologies is sometimes rather complex [3]. It is not always possible to identify a cause for the occurrence of an anomaly, as this can be a result of many simultaneous causes. The correct identification of the anomaly and moreover its cause very often demands the intervention of an experienced specialist. In the proposed methodology, the enunciated targets were taken into account and some simplification was attempted by considering, at this stage, each cause per se, regardless

---

of its gravity level. However, it is possible to extend the proposal matrix in the future, adding to each cause one determined level if more specific objectives of intervention are intended. The methodology starts by dividing the building in 3 distinct zones: exterior, common zones and interior.

Zones of Building	Elements of Construction	Components of Construction	Anomalies	Causes of Anomalies
Exterior [E]				
Common Zones [ZC]				
Interior [I]				

For each one of these zones, the following different elements of construction, for example, are considered:

Zones of Building	Elements of Construction	Components of Construction	Anomalies	Causes of Anomalies
Exterior [E]	Inclined Coverings [CO]			
	Plain Coverings [TE]			
	External Walls [PE]			
	Opening [VA]			

The next step is to consider, for each element, its subdivision into components. For example, the following components are considered for the element external wall:

Zones of Building	Elements of Construction	Components of Construction	Anomalies	Causes of Anomalies
Exterior [E]	External Walls [PE]	Fabric [01]		
		Covering [02]		
		Expansion Joint [03]		
		...		
		Other [99]		

Concerning the anomalies, they have been divided into 4 groups:

Zones of Building	Elements of Construction	Components of Construction	Anomalies	Causes of Anomalies
Exterior [E]	External Walls [PE]	Covering [02]	Cracking [F1]	
			Humidity [HU]	
			Degradation [DE]	
			Error [ER]	



Then, each one of the mentioned groups of anomalies is associated with its possible causes. For example, for Humidity the following possible causes would be the following:

Zones of Building	Elements of Construction	Components of Construction	Anomalies	Causes of Anomalies
Exterior [E]	External Walls [PE]	Covering [02]	Humidity [HU]	Ascensional from soil [01]
				Infiltration in common area [02]
				Condensation [03]
				Construction [04]
				Accidental infiltration [05]
				Infiltration in singular points [06]

Thus in the case of the diagnosis of anomalies of an external wall, in whose covering a moistness spot attributed to water proceeding from the ground is verified, the anomaly would be assigned by PE-02-HU-01.

As examples, some photographs of diverse anomalies are shown.

#### EXTERIOR



PE-02-DE-03  
External wall - Covering  
Degradation - Blistering

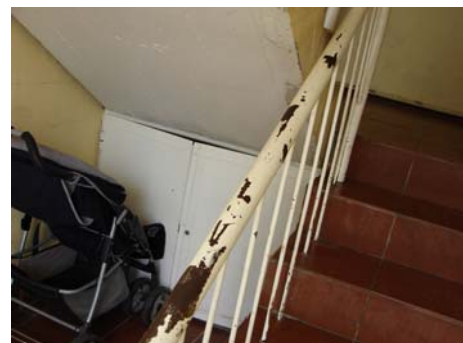


PE-02-HU-01  
External wall - Covering  
Humidity - Ascensional from soil

#### COMMON ZONES



PvI-02-FI-07  
Internal floor - Floor  
Cracking - Variation of humidity and temperature



CE-03-DE-10  
Stairs - Handrail  
Degradation - Improper use/insufficient or inadequate

maintenance

INTERIOR



PE-02-HU-02

External wall - Covering  
Humidity - Infiltration in common area



VA-01-HU-06

Opening - Frame  
Humidity - Infiltration in singular points

In the following tables the matrices for two of the most current elements of construction are presented as examples.

Element	Component	Anomaly	Ref.	Cause / Evidence		
External Walls [PE]	Fabric [01]	Cracking [FI]	1	Differential settlement of the foundation		
			2	Load concentration		
			4	Variation of the temperature of the materials or elements of construction		
			5	Extreme deformation of the support element		
	Covering [02]	Cracking [FI]	2	Load concentration		
			3	Variation of the water content of the construction elements		
			4	Variation of the temperature of the materials or elements of construction		
			5	Extreme deformation of the support elements		
			7	Variation of humidity and temperature		
			Humidity [HU]	Humidity [HU]	1	Ascensional from soil
					2	Infiltration in common area
	3	Condensation				
	4	Construction				
	5	Accidental infiltration				
	6	Infiltration in singular points				
	Degradation [DE]	Degradation [DE]	1	Dirtiness spots		
			2	Efflorescence		
			3	Detachment / blistering		
4			Detachment/scale/delaminated			
9			Vandalism			
Expansion joint [03]	Error [ER]	2	Improper use/insufficient or inadequate maintenance			
		Degradation [DE]	10	Improper use / insufficient or inadequate maintenance		
			Error [ER]	2	Construction error	

Figure 1 - Matrice for external wall.

Element	Component	Anomaly	Ref.	Cause / Evidence
Opening	Frame [01]	Humidity [HU]	6	Infiltration in singular points
			3	Condensation
			9	Vandalism
		Degradation [DE]	8	Degradation of materials / rotting / corrosion
			10	Improper use / insufficient or inadequate maintenance
			1	Conception/project error
	Error [ER]	2	Execution error	
		9	Vandalism	
	Glass [02]	Degradation [DE]	9	Vandalism
	Sill [03]	Humidity [HU]	6	Infiltration in singular points
			5	Break
		Degradation [DE]	1	Conception/project error
	Error [ER]		2	Construction error
		Jamb [04]	Cracking [FI]	3
	99			Other
	Humidity [HU]		6	Infiltration in singular points
			Degradation [DE]	4
	Header [05]	Cracking [FI]		3
			4	Detachment/scale/delaminated
		Degradation [DE]	9	Vandalism
Error [ER]	1		Conception/project error	
	Blinds/shutters [07]	Degradation [DE]	5	Break
Error [ER]			1	Conception/project error
	Parapet [09]	Degradation [DE]	4	Detachment/scale/delaminated
10			Improper use/insufficient or inadequate maintenance	

Figure 2 - Matrice for opening.

### 3.- Data base

In the case of large scale housing building inspections, there are always numerous facts to be registered. It is therefore useful to compile, in a wise and organized way, the collected information into a dedicated database, so that information does not get lost and can later be used and worked on.

In this database, the photographic records of the pathologies identified during the visits are organized, as schematized below, by different Zones (Exterior, Common Zones and Interior), and named according to the codification (element-component-anomaly-cause/evidence) presented above in point 2.

		Neighbourhood			
		Building			
Exterior		Common zones		Interior	
Front		Floor		Dwelling	
Floor				Room	
<b>Element-Component-Anomaly-Cause/evidence</b>					

Figure 3 - General schema of organization of records into the database.

The database can be in Access format and all the fields are loaded in a simplified way through interfaces created for the purpose.

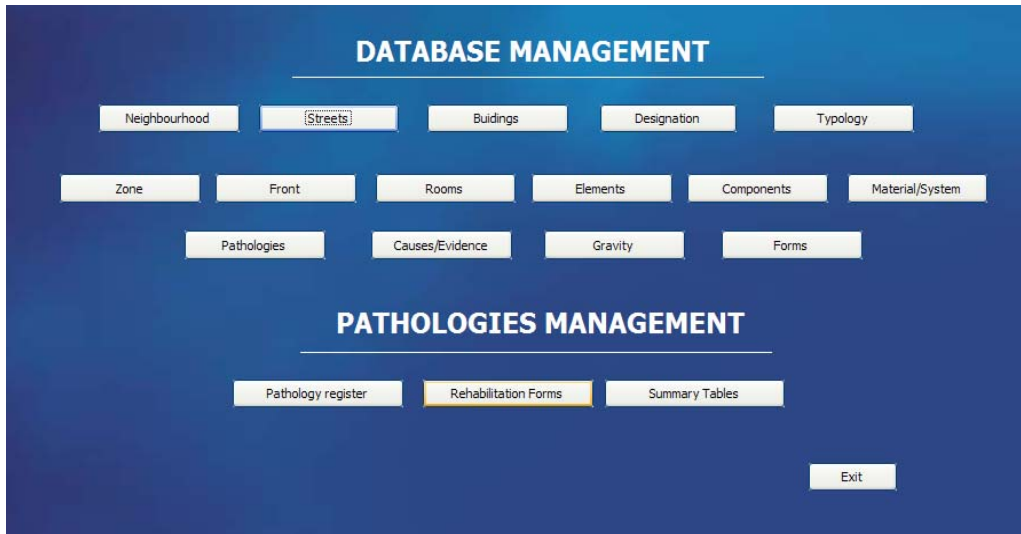


Figure 4 - Desktop environment for the database, with access buttons for the different fields.

From this database it is possible to get, for each code element-component-anomaly-cause/evidence, a Rehabilitation Form with the following fields:

- Description of the pathology
- Possible Causes
- Consequences
- Rehabilitation Strategies

As an example, the form with reference PE-02-HU-03, referring to the Condensation Humidity in the Covering of Exterior Walls, in the interior of a dwelling, is presented.

<b>REQUALIFICATION OF XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX: NEIGHBOURHOOD.....</b>	
<b>REHABILITATION FORM</b>	Ref. Form <b>PE-02-HU-03</b>
	Element <b>External Wall</b>
<b>INTERIOR</b>	Component <b>Covering</b>
	Pathology <b>Humidity</b>
	Cause/evidence <b>Condensation</b>
<b>DESCRIPTION OF THE PATHOLOGY</b>	
Fungus and mould in interior walls as result of the effect of superficial condensations. Degradation of the painting and the plaster covering walls and roof of some apartments is observed.	
<b>POSSIBLE CAUSES</b>	
Phenomena of interior superficial condensation occur as a consequence of reduced thermal resistance of the involvement, difficult ventilation of the dwellings (not guaranteed by the window frames, which are too much staunch) and intermittent or inexistent heating. The eventual overcrowding of the apartments and residents' habits can constitute a significant aggravation of the situation. Infiltrations, very often due to rupture of pipes of fall and leakage of the gutter, can aggravate the situation, as they contribute to the moistening of the constructive elements and the	

reduction of its thermal resistance, therefore diminishing the corresponding superficial temperature in Winter.
<b>CONSEQUENCES</b>
Degradation of aspect, conditions of comfort and salubrity. Coverings degradation.
<b>REHABILITATION STRATEGY</b>
After exterior rehabilitation, with elimination of damp and reinforcement of the thermal resistance of the façades and coverings, repair interior coverings, using criterious cleaning techniques and in accordance with adequate technique specification. Foment habits of transversal ventilation of the dwellings, daily, as well as the adoption of measures tending to the containment of water vapour production.

Figure 5 - Example of Rehabilitation Form.

The database also allows for the production, for each habitational set, of tables summarizing the introduced pathologies, also discriminated into Exterior, Common Zones and Interior, with the localization of the identified pathology.




REQUALIFICATION xxxxxxxx					
Neighbourhood		Building		Street	
xxxxxxx		xxxxxxx		xxxxxxx	
Floor	Designation	Room	Element	Component	Material
1º	A	Bedroom	External wall	Covering	Paint
Pathology	Cause/Evidence	Gravity	Inspected		
Humidity	Infiltration	High	Yes		
<b>PICTURE 1</b>		<b>PICTURE 2</b>		<b>PICTURE 3</b>	
					

Figure 6 - Example of Summary Table.

#### 4.- CONCLUSIONS

The presented system of simplified diagnosis results from the experience of the author in its application during 2 years in 40 habitational sets with more than 4000 dwellings. The studied system of diagnosis presents, relatively to other studies, an effort of

applicability and elasticity simplification. The most immediate goal of this type of approaches is the possibility, for the building management, of access to the observation of the anomaly in any place and to the strategy for its resolution. Other objectives can then be defined from this database containing the application of the considered system of simplified diagnosis.

- 
- <sup>1</sup> EPIQR - Un outil d'aide à la decision pour la réhabilitation des bâtiments d'habitation - Les principes de la methode, C.S.T.B., France, 1999.
  - <sup>2</sup> Balaras, C.A. et al. - *EPIQR - TOBUS - XENIOS - INVESTIMMO European Methodologies & Software Tools for Building Refubishment, Assesment of Energy Savings and IEQ*, 33rd Congress on Heating, Refrigerating and Air Conditioning, Belgrade, Servia, 2002.
  - <sup>3</sup> Calejo, R. M. - *Gestão de edifícios - Modelo de simulação técnico-económica*. FEUP, Portugal, 2003.
  - <sup>4</sup> Paulo, P. V. et al - *A inspecção de edifícios no sistema de gestão de património edificado - Buildingslife.com*, PATORREB 2006, FEUP, Portugal, 2006.
  - <sup>5</sup> Romão X., et al- *Novas perspectivas para a sistematização da informação resultante de inspecções técnicas*, PATORREB 2006, FEUP, Portugal, 2006.
  - <sup>6</sup> Marco, D. et al. *MER HABITAT - Méthode de diagnostic des dégradations, des désordres et des manques et d'évaluation des coûts de remise en état des bâtiments d'habitation* (Bulletin du logement, vol. 64) Office federal du logement, OFL, Granges, Suíça, 1996.
  - <sup>7</sup> Lanzinha, J.C.G et al - *Exploração de metodologia de diagnóstico exigencial de apoio à reabilitação de edifícios de habitação*, PATORREB 2006, FEUP, Portugal, 2006.
  - <sup>8</sup> Calejo, R.M.; Barbosa, A.C. - *An Integrated Management System for Housing Maintenance*, Construção 2004, FEUP, Portugal, 2004.
  - <sup>9</sup> LNEC - *Proposal for an evaluation method of buildings'conservation state*. Proc.0801/01/15644, 2006.