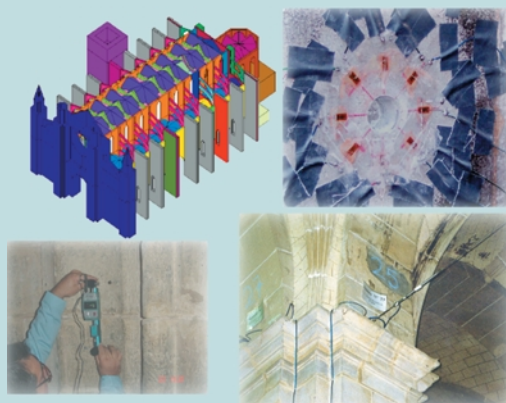




JORNADA TÉCNICA

**1ª JORNADA NACIONAL SOBRE  
METODOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS  
APLICADAS A LA REHABILITACIÓN  
DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO  
(REHABEND)**



Jornada Técnica subvencionada por el Ministerio de Fomento  
Santander, noviembre de 2006

Universidad de Cantabria



**GTED-UC**

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**

## Presentación

La Jornada Técnica Nacional sobre "METODOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS A LA REHABILITACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO (REHABEND)", cuyo Libro de Ponencias presentamos, se celebró en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, Santander, Cantabria, España el 14 de Noviembre de 2006.

La creciente relevancia que ha alcanzado en la sociedad actual la conservación del parque de edificios y de las infraestructuras, en particular las que constituyen el patrimonio histórico artístico, ha revelado la necesidad de calibrar métodos efectivos de análisis, planificación y ejecución de las medidas de rehabilitación de construcciones y estructuras.

Dicha relevancia se espera que se acentúe a corto-medio plazo. Según el último informe SEOPAN 2005 la producción de la rehabilitación y mantenimiento en España es del 25% del sector de la construcción; y tendría que crecer en torno a un 12% en nuestro país para alcanzar los niveles europeos (37% del sector). Además el alcance progresivo del límite superior del parque de viviendas en el país, va a redundar en un mayor interés por el mantenimiento y rehabilitación de edificaciones, que amplificará los flujos económicos destinados al sector de la rehabilitación, y la necesidad de puesta a punto de las metodologías mencionadas.

Del mismo modo hay una necesidad imperante de crear un foro nacional de debate, actualmente inexistente, en el que pueda ponerse al día el estado de los conocimientos de las metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido, así como de potenciar una red de trabajo nacional que aglutine a los diferentes actores que están trabajando, en la actualidad, en esta temática.

La 1ª Jornada Nacional sobre Metodologías No Destructivas aplicadas a la Rehabilitación del Patrimonio Construido (REHABEND) trató, entre otros objetivos, de contribuir a optimizar las necesidades referidas.

Finalmente, cabe mostrar nuestro más sincero agradecimiento a los autores y ponentes participantes, en tanto que han invertido parte de su tiempo y un gran esfuerzo en recopilar la información que disponían sobre sus experiencias en metodologías no destructivas 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 la Jornada Técnica*



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

Santander, Cantabria  
14 de Noviembre de 2006

ISBN 978-84-690-5269-3

# ÍNDICE

## PRESENTACIÓN

1. *LOS ESTUDIOS PREVIOS EN LA REHABILITACIÓN DE CONSTRUCCIONES DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.*  
*L. Villegas – I. Lombillo*
2. *METODOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS A LA REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DEL PATRIMONIO.*  
*L. Villegas – I. Lombillo*
3. *APLICACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICAS AL ESTUDIO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO.*  
*P. Roca*
4. *DEDUCCIÓN DE ESTADOS TENSIONALES EN SERVICIO EN ELEMENTOS PORTANTES DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO MEDIANTE LA TÉCNICA HOLE DRILLING.*  
*S. Sánchez Beitia*
5. *METODOLOGÍA PRÁCTICA DE DOS TÉCNICAS INUSUALES: LOS GATOS PLANOS Y EL IMPACTO-ECO.*  
*J. Ley*
6. *LA INSTRUMENTACIÓN EN EL DIAGNÓSTICO DE HUMEDADES.*  
*G. Lozano, A. Lozano*
7. *ANÁLISIS DE HUMEDADES EN OBRAS DE FÁBRICA.*  
*M. García*
8. *MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.*  
*I. Marcos, R. San Mateos*
9. *TÉCNICAS AVANZADAS DE AUSCULTACIÓN Y DIAGNOSTICO DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS. EL PROCESO DE DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL.*  
*J. Yuste, J.V. Fuente, J.V. Sabaté, V. Albert, G. Calzado*
10. *EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y DEL DETERIORO BIOLÓGICO DE LA MADERA IN SITU: TÉCNICAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVAS.*  
*A. Lozano, A. Martín*
11. *LA ENDOSCOPIA COMO TÉCNICA COMPLEMENTARIA EN LAS LABORES DE INSPECCIÓN VISUAL.*  
*J. Díez*
12. *APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTERIZADA EN INGENIERÍA CIVIL.*  
*J.A. Martínez, P.M. Bravo*

13. *LA TÉCNICA DEL GEORADAR EN LA REHABILITACIÓN.*  
*L.M. García*
14. *INTRODUCCIÓN A LA TERMOGRAFÍA DE EDIFICIOS.*  
*A. Padilla*
15. *SAYME: UNA ARQUITECTURA DISTRIBUIDA DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA RECOGER Y PROCESAR INFORMACIÓN DE ENTORNOS NO CONTROLADOS.*  
*D. Santo, J. Ibáñez, A. Murat, M. Alonso*
16. *LA INSTRUMENTACIÓN EN POSICIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS NO LINEALES: PASARELA EN HARO (LA RIOJA)*  
*G. Gutierrez*
17. *CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA PRECISA DEL PATRIMONIO CON LÁSER ESCÁNER 3D.*  
*V. Bayarri*
18. *LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA.*  
*R. Rodríguez*



# **LOS ESTUDIOS PREVIOS EN LA REHABILITACIÓN DE CONSTRUCCIONES DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO**

**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.**

Como primer paso a la rehabilitación de una construcción es necesario conocer en profundidad el estado en que se encuentra la misma, de modo que la inversión que va a llevarse a cabo, normalmente grande en este tipo de trabajos, se haga con las suficientes garantías: No hacerlo sería de necios.

Tal conocimiento se consigue a través de los denominados “Estudios previos a la rehabilitación”: En lo que sigue se reflexionará sobre diferentes aspectos de los mismos que consideramos de interés y centraremos nuestra atención al caso de recuperaciones y puesta al día de edificios, si bien las ideas que subyacen en nuestro trabajo pueden extrapolarse fácilmente a las obras públicas (puentes, canales, etc.).

Los estudios que nos ocupan conllevan la verificación de las tres partes principales de que consta una edificación: Sus estructuras, sus cerramientos, particiones y revestimientos, y sus instalaciones.

En general, las instalaciones estarán obsoletas y no cumplirán las exigencias de calidad y seguridad que actualmente se exige a este apartado del edificio; por lo que deberán ser sustituidas totalmente: Es sabido que la vida útil de las tuberías, dispositivos y aparatos de todo tipo que configuran las diferentes instalaciones es relativamente pequeña (unas pocas decenas de años en el mejor de los casos) en comparación a las otras partes de la construcción.

La casuística en cuanto a la situación de las particiones o tabiquerías y revestimientos del edificio puede ser muy amplia: En algunos casos, cuando las exigencias del nuevo espacio a configurar coinciden con la distribución preexistente y la conservación de los elementos en cuestión es adecuada se irá a su reparación, limpieza y pintado. En otras ocasiones, los requerimientos funcionales del edificio a rehabilitar exigirán una reordenación de los elementos separadores y construcción de unos nuevos. Otras veces, en fin, nos encontraremos con revestimientos de un alto valor artístico; los restauradores serán aquí los que tendrán que poner en valor tales acabados especiales.

Expuesto lo anterior, no entraremos en lo que sigue en esta problemática, siendo el objetivo último de nuestro trabajo los estudios previos que se llevan a cabo para analizar la adecuación de la parte estructural y de los cerramientos exteriores (fachadas y cubiertas) del edificio; en concreto, la verificación del cumplimiento de su “resistencia mecánica y estabilidad” (primer requisito básico de las construcciones, según establece la Directiva Europea sobre productos de construcción).

Habitualmente, la información existente sobre las características técnicas de la obra objeto de nuestra intervención profesional suele ser escasa, cuando no nula. La figura 1 muestra un edificio de oficinas de principios del siglo XX (zona izquierda de la fotografía), con posteriores ampliaciones en las décadas sucesivas (zona derecha de la imagen): En este caso

hubo que reconocer y caracterizar los diferentes elementos estructurales habida cuenta del desconocimiento total de sus particularidades.



*Figura 1: En el estudio previo a la rehabilitación de este edificio de oficinas hubo que reconocer y caracterizar sus diferentes elementos estructurales que eran desconocidos.*

Es frecuente, asimismo, que la construcción en estudio presente algún tipo de defecto o deterioro causado por el paso del tiempo, por el abandono o escaso mantenimiento que ha tenido, y que los técnicos habrán de analizar y diagnosticar: Las figuras 2 muestran el agrietamiento (izquierda) y la desagregación (derecha) en los muros portantes de dos edificios antiguos (varias veces centenarios).



*Figuras 2: Daños en los muros portantes de dos antiguos edificios y que en los estudios previos a su rehabilitación habrá que proceder a su análisis, diagnóstico y terapéutica.*

Debe señalarse, también, que los estudios previos que nos ocupan puede requerir, en algunas ocasiones, de equipos de técnicos de cierta amplitud:

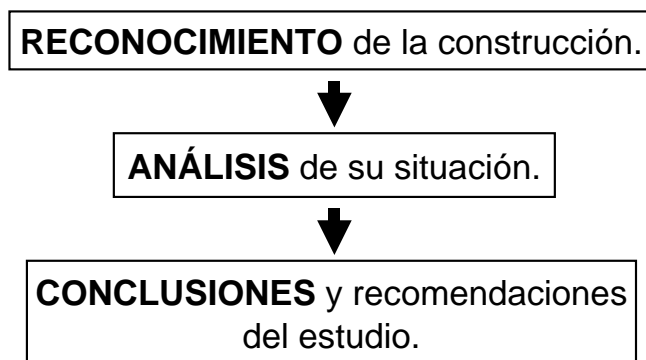
- En los casos de alcance limitado puede ser suficiente con uno o dos técnicos para la realización del estudio y redacción del informe correspondiente.
- En construcciones importantes, sobremanera si se trata de obras con daños de cierta entidad, normalmente se verán involucrados profesionales de varias disciplinas: Arquitectura, historia, bellas artes, ingeniería geotécnica y estructural, expertos en materiales, especialistas de laboratorios de ensayos, etc. Tal es el caso de los estudios previos que se están realizando en el Seminario Mayor de la antigua sede de la

Universidad Pontificia en Comillas (Cantabria); la figura 3 muestra la maqueta de este edificio que fue construido a finales del siglo XIX y que va a rehabilitarse en profundidad a partir de 2007 para la Fundación Campus Comillas.



*Figura 3: Los estudios previos a la rehabilitación de construcciones importantes requerirán la conjunción de conocimientos y experiencias de equipos de técnicos de diferentes especialidades.*

El estudio previo a la rehabilitación de una construcción de cara a investigar los diferentes procesos patológicos presentes y a evaluar su situación resistente suele llevarse a cabo en tres fases: Reconocimiento detallado de la obra, análisis de los defectos existentes y estructural y, finalmente, exposición de las conclusiones a que ha conducido el estudio. La gráfica 4 recoge esquemáticamente estas fases y en los siguientes apartados se reflexionará sobre los aspectos más relevantes a considerar en ellas.

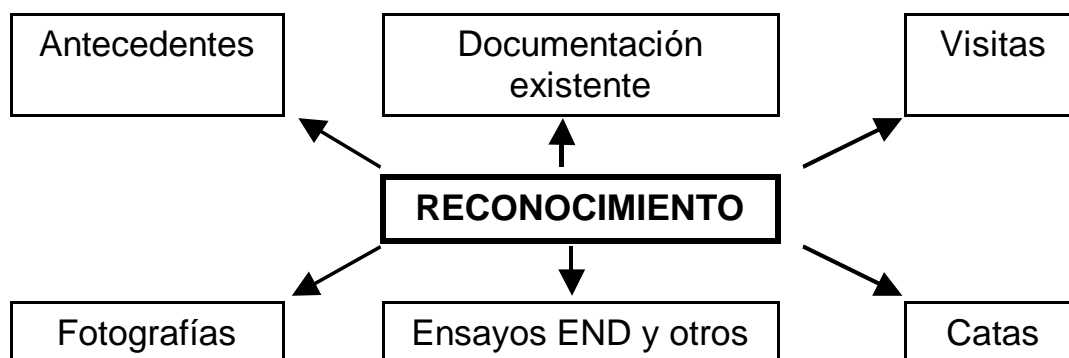


*Gráfica 4: Fases que comprende el estudio previo a la rehabilitación de una construcción.*

## **2.- EL RECONOCIMIENTO DE LA CONSTRUCCIÓN.**

Esta fase del estudio previo persigue conocer en detalle la construcción objeto de nuestra intervención: O sea, “comprender y caracterizar la obra”.

Para ello el equipo técnico que lleva a cabo la investigación debe recoger y estudiar cuanta información le sea factible; existen varias vías para ello: La gráfica 5 recoge esquemáticamente algunas de ellas, que se comentarán a continuación.



*Gráfica 5: La fase de “reconocimiento” de una construcción dañada y/o en vía de rehabilitación suele tener múltiples fuentes que ofrecen datos; muchas de ellas de gran importancia para conocer el fondo del problema que se quiere investigar.*

En primer lugar, se estará atento a los antecedentes que el cliente exponga sobre la construcción en cuestión: Las preocupaciones expresadas, las fechas, los objetivos perseguidos, las opiniones que se tienen de los daños existentes, etc.

Es necesario, asimismo, conseguir cuanta documentación de la construcción esté disponible: Su proyecto (cuando sea viable). Informes previos existentes sobre los daños (si los hubiere). Fotografías históricas. Etc.

En las construcciones a rehabilitar de cierta importancia es usual que existan informes previos de carácter diverso, que ayudarán a enmarcar la obra y sus problemas y a conocer datos varios que pueden ser útiles para la investigación que se desarrolla.

Las visitas, para que sean provechosas, deben planificarse previamente y se tratará de seguir un orden lógico en las mismas. Primero se observará el exterior inmediato de la construcción (viendo si existen movimientos de tierras, laderas inestables, flujos importantes de agua, etc.) y el entorno construido medianero o próximo (tipo de construcciones, estado de las mismas, etcétera). En segundo lugar, se inspeccionará sistemáticamente el interior: Tipo de estructura portante (muros, entramados, forjados), tipos de cerramientos de fachada y cubierta, nivel general de mantenimiento y estado de la construcción.

Es evidente que en estos reconocimientos es muy útil la toma de fotografías de todo lo que vayamos observando. Las cámaras digitales permiten un registro de imágenes sencillo e inmediato, de calidad aceptable y a un coste reducido; son, por lo tanto, un arma potente para estudiar los defectos de las construcciones y se constituyen en una “memoria adicional” de los técnicos que realizan el estudio previo.

En obras antiguas de las que no se dispone proyecto ni se conocen los cambios que la construcción ha tenido en el transcurso del tiempo resultan de interés la realización de catas que permitan al técnico identificar los elementos resistentes que estructuran los pisos de la misma, poder medir sus dimensiones y caracterizar los materiales constituyentes. Conviene señalar que en la mayoría de las ocasiones los revestimientos de acabado de los techos nos ocultan totalmente cómo son los forjados: En tales casos el dejar a la vista, parcialmente, estos elementos es imprescindible. La fotografía 6 muestra el aspecto de una cata realizada en un forjado de un edificio que iba a rehabilitarse; la misma permitió conocer su constitución.





*Figura 6: Cata realizada en un forjado de un edificio a rehabilitar y en donde pueden verse los diferentes elementos del mismo: Viguetas de madera, bovedillas de ladrillo, tarima y falso techo.*



*Figura 7: Cata realizada en un forjado de un edificio que iba a rehabilitarse: Se observa una losa de viguetas de hormigón, adosadas una junto a otra, sobre un forjado existente de vigería de madera.*

En ocasiones, la información que se obtiene de las catas difícilmente podría ser imaginada por el técnico. La figura 7 muestran una cata de un forjado: Sobre la antigua vigería de madera y tarima, se ha construido una losa de viguetas adosadas de hormigón armado.

Las catas nos permiten, asimismo, conocer las características del terreno de cimentación, cómo se ha realizado ésta (profundidad y sobrecancho que tiene respecto a los muros de carga), saber cuál es el material de los muros y poder obtener muestras (si se requiriera), etcétera.

Las figuras 8 recogen dos instantáneas al respecto: El pozo que se muestra (izquierda) buscaba conocer el tipo de terreno de cimentación y la profundidad a que aparecía el nivel freático después de un periodo de lluvia abundante (en el edificio en cuestión existían importantes problemas de humedad por filtraciones a través de un muro de semisótano y de capilaridad provenientes del terreno); la imagen derecha muestra una cata realizada en un muro. La figura 9 muestra la situación de las catas realizadas en los forjados de un edificio.



*Figuras 8: A la izquierda se recoge un pozo realizado junto a un muro de carga (para conocer el tipo de terreno de cimentación y la profundidad del NF). A la derecha se muestra un aspecto de la constitución del citado muro (una fábrica de ladrillo macizo).*

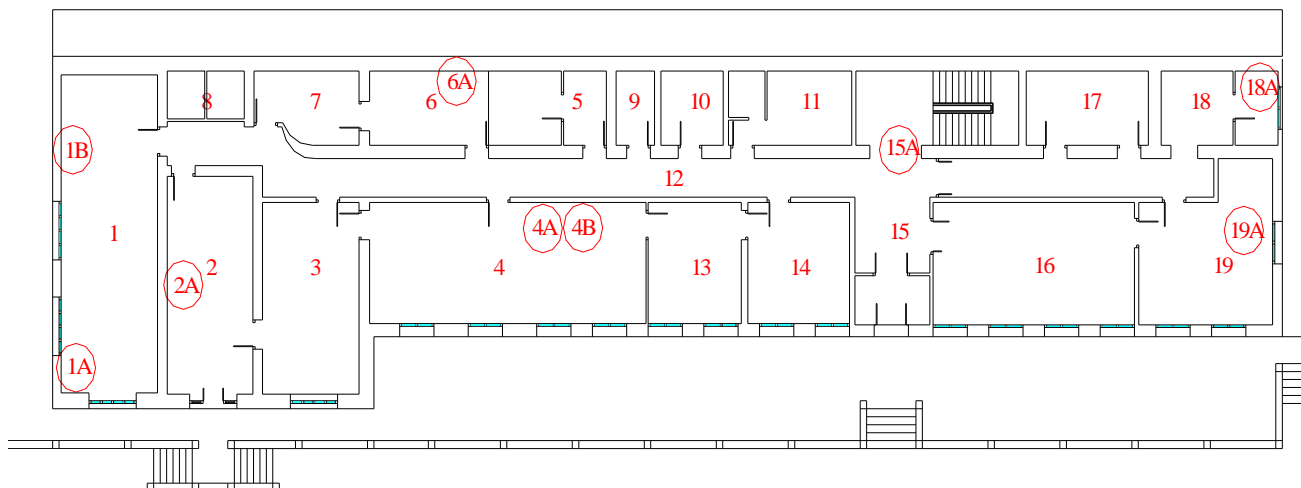


Figura 9: Ubicación de las 9 catas (1A, 1B, 2A, etc.) realizadas en el techo de la planta baja de un edificio para conocer las características y el estado de sus forjados. Se identificaron tres tipologías diferentes: De viguetas metálicas, de madera y una losa de hormigón armado.

Normalmente el reconocimiento de una construcción se aborda en tres etapas (gráfica 10).



Gráfica 10: Etapas en la fase de reconocimiento de una obra a rehabilitar.

En el examen global de la obra se toma contacto con ésta y se seleccionan las zonas de las que tomarán los datos (figura 9). En las diferentes visitas el “técnico va haciéndose con la construcción objeto del estudio previo”, madurando ideas, tomando nuevos datos y conociendo más detalles de la obra en cuestión.

Debe llevarse a cabo una inspección y registro sistemático de los procesos patológicos existentes. El material gráfico (fotos y croquis) obtenido en las diferentes visitas resulta siempre, a posteriori, muy útil: Permite un estudio detallado de aspectos que es difícil considerar in situ y la relación de diferentes imágenes entre sí. Además, las fotografías se utilizarán al redactar el informe técnico del estudio que nos ocupa, al ser pruebas evidentes de los daños y de los diferentes elementos que se van describiendo en el mismo. Las figuras 11 recogen dos instantáneas de defectos observados en una obra objeto de rehabilitación.



*Fotografías 11: Defectos existentes en una obra objeto de rehabilitación, después de algunos años sin uso y sin mantenimiento alguno: A la izquierda pueden observarse importantes humedades de capilaridad, provenientes del terreno, en los muros. La imagen de la derecha muestra la pudrición por humedad y el colapso parcial de un forjado de viguetas de madera y bovedillas de ladrillo.*

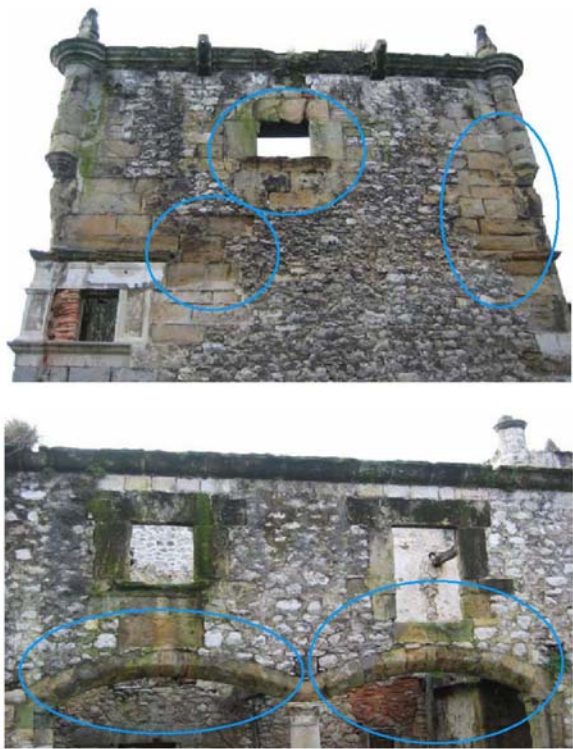
Las imágenes 12 recogen un voladizo (o ménsula) que carga en su extremo una balaustrada (foto izquierda) y sirve de remate de coronación, a modo de imposta, de una arcada resuelta con pilas de fábrica de bloques de hormigón perimetrales y hormigón ciclópeo en su interior y bóvedas de hormigón en masa (figura derecha): Las fotografías muestran cómo parte del elemento volado ha caído.



*Fotografías 12: Voladizo existente (izquierda) sobre una arcada de bóvedas de hormigón (derecha): La estabilidad a vuelco de aquél no era adecuada y una parte del mismo ha colapsado (se aprecia en ambas imágenes) por falta de equilibrio estático.*

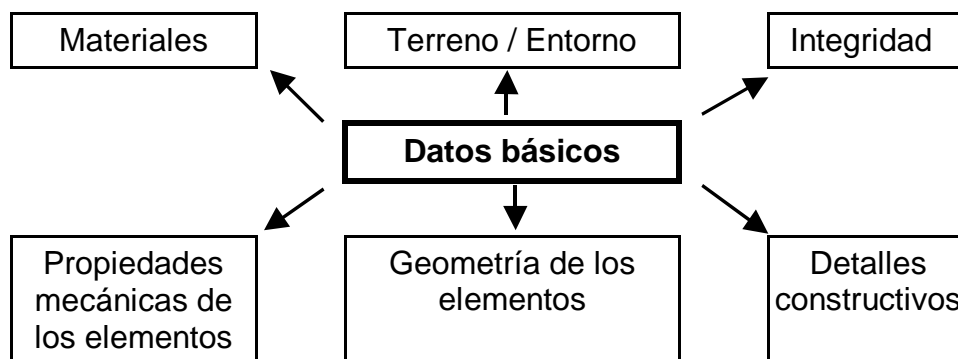
Es importante, además, que el equipo técnico que está realizando el estudio registre metódicamente las diferentes anomalías y defectos detectadas: Confeccionando fichas (figura 13) y mapas con los diferentes procesos patológicos existentes, lo cual le ayudará a globalizarlos y entenderlos.



PROCESOS PATOLÓGICOS EN MURO ESTE (PARAMENTO EXTERIOR).
<p><b>DESAGREGACIÓN</b></p> 
<p><b>COMENTARIOS</b></p> <p>Se observan descohesiones pétreas en coincidencia con las zonas del paramento exterior del muro este donde se localizan areniscas. Las disgregaciones presentadas responden a desagregaciones arenosas, comúnmente denominadas arenización.</p> <p>Por la presencia de pátina biogénica y piedras de naturaleza arenisca, la presencia de desagregación puede deberse a las tensiones internas generadas por la acción de los agentes causantes de dicha pátina o a variaciones volumétricas vinculadas a procesos de absorción de humedad.</p> <p>Para una información general de dicho proceso patológico se remite al lector al anejo A1.1 "Descripción general de los procesos patológicos presentes".</p>

*Figura 13:  
Ficha de uno de los  
procesos patológicos  
existentes en los muros  
pétreos de una  
construcción centenaria.*

Es necesario, además, la obtención de los datos básicos para el análisis. En la gráfica 14 y en la tabla 15 se recogen esquemáticamente los habitualmente requeridos y la información necesaria: Se persigue el conseguir suficientes datos de confianza de modo que la construcción pueda evaluarse adecuadamente.



*Gráfica 14: Datos necesarios para la fase de análisis.*



Datos	Información requerida
<b>Terreno / Entorno</b>	- Caracterización del terreno (tipo, propiedades, etc.). - Nivel freático, flujos de agua, etc.
<b>Materiales</b>	- Tipología de materiales (piedra, ladrillo, madera, etc.). - Propiedades resistentes y de deformabilidad.
<b>Estructuras portantes</b>	- Geometría de los elementos: Muros, vigas, arcos, etc. - Identificación de los sistemas y detalles constructivos.

*Tabla 15: Información requerida de la estructura del edificio.*

Esta etapa de consecución de datos de la construcción va acompañada, habitualmente, de toma de muestras de materiales y de ensayos (de campo y de laboratorio). Las figuras 16 recogen la extracción de testigos de un sillar (para posterior rotura de los mismos y obtención de la resistencia mecánica de la piedra) y la preparación de muestras de diferentes materiales previa a su ensayo.

También son muy útiles las metodologías no destructivas in situ; éstas (ensayos no destructivos o END) son particularmente interesantes para conocer la integridad de los elementos (métodos sónicos), la inspección de zonas inaccesibles (endoscopia), los niveles tensionales y las propiedades de deformabilidad de los muros portantes (“gatos planos”) y otras características. Las figuras 17 muestran END utilizados para determinar el estado de la madera en una construcción a rehabilitar.



*Figuras 16: Extracción de testigos de piedra de un sillar de un muro portante y preparación de muestras de materiales para su ensayo en laboratorio.*

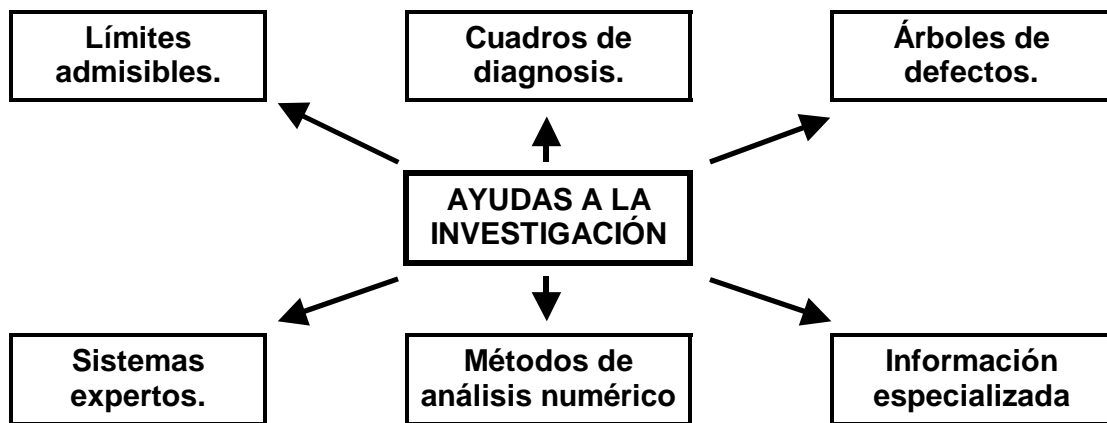


*Figuras 17: Ensayos no destructivos (END) en elementos de madera: Escucha de sonidos para investigar la actividad de insectos xilófagos (izq.) e inspección de huecos a través de endoscopio (dcha.): Cortesía de Montañesa de desinfección, S.L.*

### **3.- LA FASE DE ANÁLISIS.**

En esta fase se lleva a cabo el estudio patológico de la construcción y la verificación estructural de la misma (o sea, la comprobación del cumplimiento de los estados límites últimos, o de seguridad frente a rotura, y de servicio, o de comportamiento adecuado en condiciones de uso).

A la hora de realizar el diagnóstico de los defectos que presenta la obra a rehabilitar (registrados en la fase anterior del estudio) los técnicos cuentan con una serie de ayudas que facilitarán su labor (el gráfico 18 recoge esquemáticamente algunas de ellas): Esta información y apoyo junto con los conocimientos y experiencia del patólogo le permitirán hacer un buen diagnóstico del problema existente.



*Gráfico 18: El patólogo a la hora de abordar una investigación puede contar, en general, con algún tipo de ayuda pre-existente (preparada por expertos en los distintos tipos de problemas que pueden surgir en la construcción): Es importante, no obstante, que su juicio técnico presida, en cualquier caso, la toma de decisiones que más convenga.*

A modo de ejemplo, en la tabla 19 inspirada en un documento británico del Building Research Establishment (digest 251) se sugiere una clasificación de daño en paredes de fábrica de ladrillo en función del ancho de las fisuras que aparecen y de la facilidad de reparación de las mismas; de acuerdo con los siguientes comentarios:

- Nivel 0: “Fisuras pelo”, con anchura de menos de 0,3 mm, que son despreciables.
- Nivel 1: Fisuras de hasta 1 mm, que dañan ligeramente los morteros y son difícilmente apreciables en fábricas de ladrillo visto. Pueden ser fácilmente rellenas durante los trabajos de pintura (o selladas con productos transparentes si es una fachada de caravista).
- Nivel 2: Fisuras de hasta 5 mm. Darán problemas de estanqueidad si se encuentran en la cara externa de una fachada (aunque puedan no ser visibles desde el exterior). En la apertura o cierre de puertas o ventanas sus hojas pueden rozar ligeramente. Pueden ser fácilmente rellenas; y en el caso de que aparezcan recurrentemente, conviene: picarlas a ambos lados, retirar el revestimiento y disponer una banda de tejido elástico que sirva de sostén a un material de relleno flexible que permita una cierta movilidad.
- Nivel 3: Dan problemas de filtraciones de agua. La apertura de puertas o ventanas es difícil. Las tuberías de instalaciones pueden estar dañadas. Pueden ser reparadas por un albañil, posiblemente deberán remplazarse algunos ladrillos.

- Nivel 4: Daños en línea con el nivel anterior, pero a mayor escala. Los trabajos de reparación serán importantes y, probablemente, habrá que reemplazar el volumen de la pared en las zonas de puertas y ventanas.
- Nivel 5: Paredes con peligro de inestabilidad, es posible que requieran ser apuntaladas. Las ventanas presentan distorsiones apreciables. Una vez analizada detalladamente la causa del problema (al igual que en los niveles 3 y 4) la reparación conlleva el reemplazar zonas completas de la pared.

En los libros ingleses se recogen en broma comentarios del siguiente cariz (y según su particular sentido del humor) cuando se pide opinión a un técnico sobre estas grietas: Es posible que el patólogo opine “pensé que lo que usted me señala eran ventanas”.

Nivel de daño en paredes de fábrica de ladrillo	0	I	II	III	IV	V
Ancho de fisura (mm)	0,3	1 mm	5 mm	5 / 15	15 / 25	> 25
Calificación del daño	Poco importante			Importante		Grave

Tabla 19: Niveles de daño en paredes de fábrica de ladrillo fisuradas (inspirado en Building Research Establishmen - 251).

La verificación de la estabilidad y resistencia mecánica conlleva el análisis geotécnico y estructural de la construcción, con vistas a verificar que los niveles tensionales existentes en el terreno y en los elementos estructurales se encuentran dentro de los límites que pueden aceptar los materiales constituyentes de los mismos.

El cálculo estructural empieza con la discretización de la estructura y con la definición geométrica de sus diferentes elementos y la de sus características de deformabilidad. Asimismo, habrá que introducir las cargas gravitatorias (permanentes y sobrecargas) y acciones horizontales que actúan sobre la construcción.

La figura 20 muestra el esquema de cálculo de los diferentes forjados existentes en un edificio a rehabilitar. La imagen 21 recoge una sección de un edificio de muros de carga que posibilita el estudio de los efectos de la acción gravitatoria sobre aquellos.

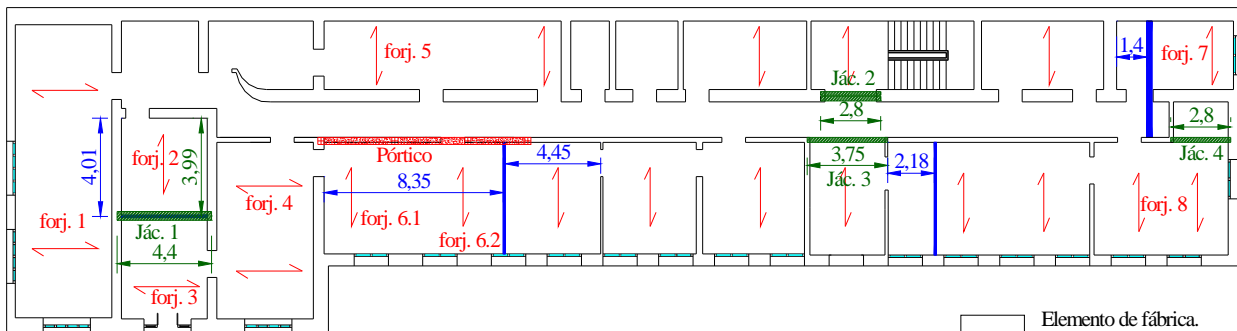


Figura 20: Esquema en planta de los forjados y muros portantes y dinteles de un edificio objeto de rehabilitación.

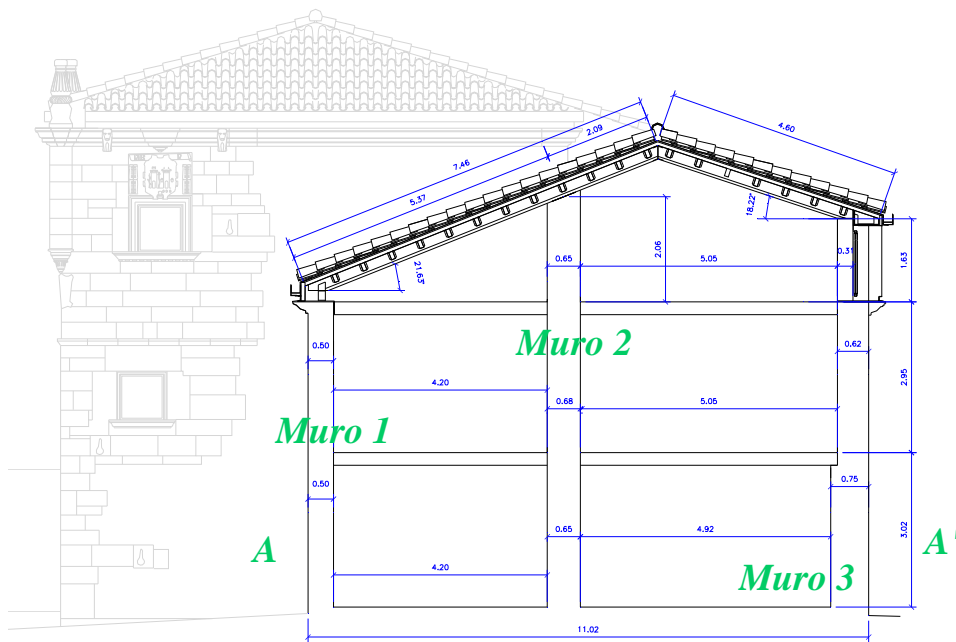


Figura 21: Sección adoptada para el cálculo estructural de los muros portantes de un antiguo edificio bajo la acción gravitatoria de unos nuevos forjados.

Añadir, que las posibilidades que ofrecen los métodos numéricos de análisis y los programas de cálculo con “elementos finitos” que disponen actualmente las oficinas técnicas permiten modelizar y abordar el estudio espacial de estructuras complejas: Iglesias con arcos y bóvedas de crucería, cúpulas, muros de carga y de arriostramiento con huecos, etc.

#### 4.- LAS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO

Finalmente, el estudio previo a la rehabilitación de una construcción deberá sancionar que elementos de la misma son satisfactorios y cuáles no y, además, proponer una serie de recomendaciones de cara a la terapéutica de los defectos diagnosticados y posibles soluciones de refuerzo en donde fueran necesarias.

SECCIÓN	N <sub>d</sub> (t)	M <sub>d</sub> (t-m)	V <sub>d</sub> (t)	M <sub>u</sub> (t-m) asociado al N <sub>d</sub>	V <sub>u</sub> (kN)	V <sub>u</sub> (t)	Ref.	Comentarios	E.L.U.	
									Frente solicitaciones normales	Frente a cortante
Sección centro luz del dintel	0.840	4.448	0.737	10.830	71.5	7.29	dintel0	Sólo se considera armado de tracción	Ok	Ok
	0.929	3.844		10.820			dintel1	Sólo se considera armado de tracción	Ok	
Empotramiento de dintel en pilar	1.819	-9.426	7.986	-7.570	62.4	6.37	dintel2	Sólo se considera armado de tracción	iii!!!	iii!!!
				-8.690			dintel3	Se considera armado de tracción y compresión	iii!!!	
	1.770	-8.038	7.390	-8.680			dintel4	Se considera armado de tracción y compresión y los esfuerzos de cálculo a la salida del pilar	Ok	
Sección empotramiento de voladizo	0.821	-6.918	5.950	-7.490	63.0	6.43	voladizo0	Sólo se considera armado de tracción	Ok	Ok
Pilar izq. Sección superior	14.115	1.139	0.528	8.570	70.7	7.21	pil_iz0	Se considera armado de tracción y compresión	Ok	Ok
	12.444	-1.196		-7.140			pil_iz1	Se considera armado de tracción y compresión	Ok	
Pilar izq. Sección inferior	14.399	-3.523	2.212	-3.080	44.2	4.51 (*)	pil_iz2	Se considera armado de tracción y compresión	iii!!!	Ok
				-3.180			pil_iz3	Se considera armado de tracción y compresión, y un hormigón de $f_{ck} = 106 \text{kp/cm}^2$ , $\gamma_c = 1.4$	iii!!!	
				3.040			pil_iz4	Se considera armado de tracción y compresión	Ok	
Pilar dcho. Sección superior	14.127	1.135	0.446	8.570	70.7	7.21	pil_de0	Se considera armado de tracción y compresión	Ok	Ok
	13.458	-3.186		-8.430			pil_de1	Se considera armado de tracción y compresión	Ok	
Pilar dcho. Sección inferior	15.407	-3.539	1.850	-3.120	45.1	4.60 (*)	pil_de2	Se considera armado de tracción y compresión	iii!!!	Ok
				-3.230			pil_de3	Se considera armado de tracción y compresión, y un hormigón de $f_{ck} = 106 \text{kp/cm}^2$ , $\gamma_c = 1.4$	iii!!!	
							pil_de4	Se considera armado de tracción y compresión	Ok	
				3.170						

Tabla 22: Resumen de conclusiones respecto a adecuación estructural de una zona en estudio de un edificio a rehabilitar: En ella se indica qué elementos son adecuados y cuáles no.

La tabla 22 resume las conclusiones obtenidas del cálculo estructural de una zona analizada de un edificio que iba a rehabilitarse. De igual modo, la figura 23 recoge las tensiones



existentes en diferentes secciones de un muro de carga de fábrica de bloques de hormigón e indica las zonas que no son satisfactorias.

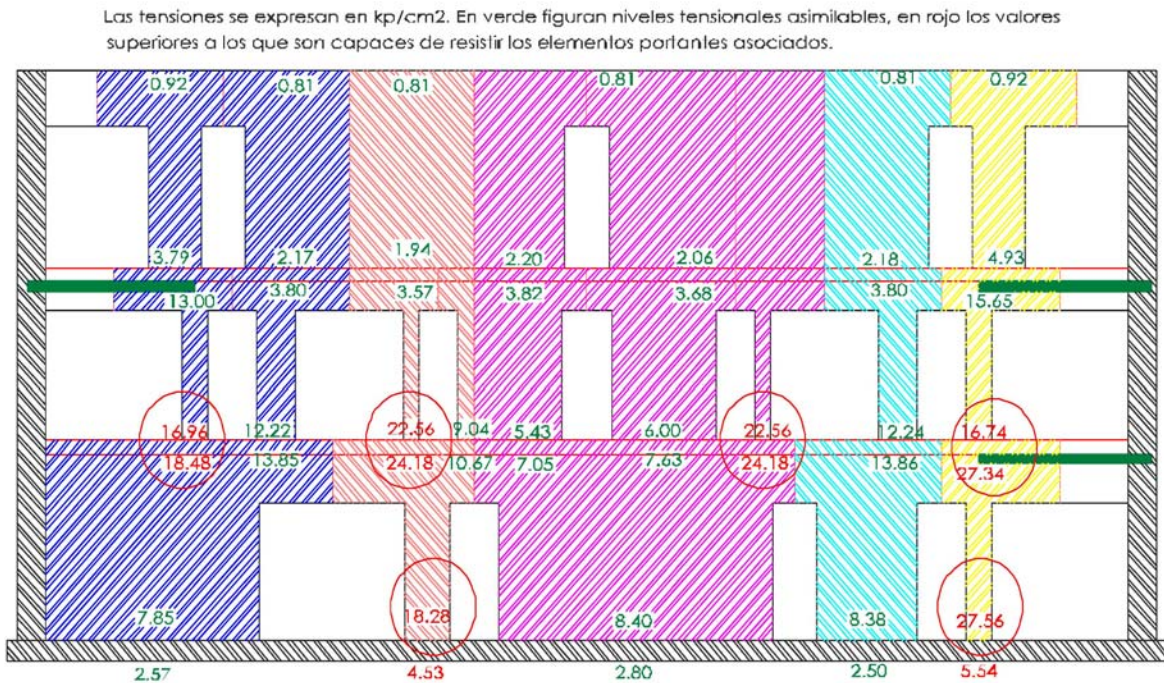


Figura 23: Croquis en el que se indican los niveles tensionales en diferentes secciones críticas de los paños de un muro de fábrica: En el mismo se señalan cuáles no son aceptables.

Para completar nuestro escrito y respecto a las recomendaciones del estudio previo, realizado con el objetivo de apoyar a los profesionales que abordarán a continuación el proyecto de ejecución de la rehabilitación, en lo que sigue se recogen dos ejemplos al efecto, que ilustran el alcance y la utilidad cierta de aquéllas.

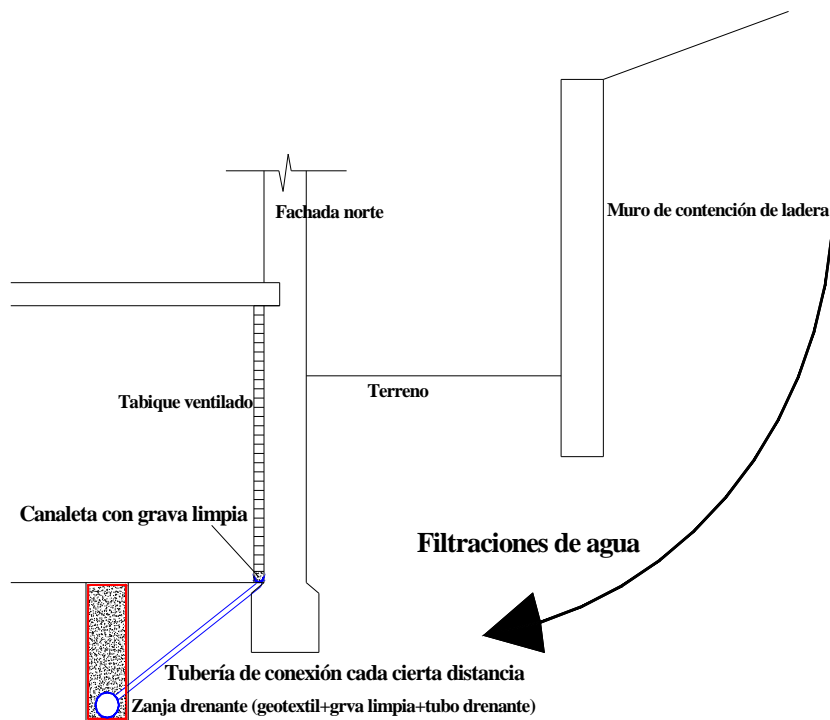
En primer lugar, se resume una propuesta de intervención de mejora que se hizo en el caso de un edificio que tenía importantes humedades de filtración a través de un muro de mampostería que configuraba una de las paredes de un semisótano (el mismo, figura 24, contenía las tierras de una colina colindante y de la cual procedía el agua que se infiltraba en el inmueble). Dos fueron las soluciones estudiadas para tratar de resolver el problema de humedades y aunque una de ellas era mejor que la otra desde el punto de vista técnico, se optó por la segunda habida cuenta de la valoración global de los diferentes condicionantes que intervenían en el asunto, tal como se recoge:

A) De cara a evitar la entrada de agua se ha estudiado la viabilidad de organizar una pantalla drenante en la cara exterior del citado muro. Ello conllevaría los siguientes pasos: Ejecución de una zanja, con la entibación adecuada, por bataches. Macizado de las aberturas existentes entre los mampuestos e impermeabilización de la cara externa del muro. Colocación de tuberías drenantes en el fondo de la excavación. Y relleno de la zanja con material filtrante que quedaría aislado del terreno a través de un geotextil.

Esta solución teóricamente es idónea, pero las dificultades que existen en este caso concreto son importantes: La zona de trabajo que existe en el patio trasero del edificio es estrecha y, además, está limitada por un muro de contención de una altura importante (del orden de 3,5 m) y que no se encuentra en buenas condiciones (está abombado y con agrietamiento), lo que podría suponer un peligro en caso de un periodo de lluvias intensas y un batache en proceso de ejecución. Lo anterior, junto al hecho de que la profundidad a excavar también sería elevada (de unos 3m) hace no recomendable esta propuesta.

B) Otra solución es organizar una zanja drenante en el interior del edificio, paralela al muro de semisótano citado, y suficientemente alejada del mismo de modo que no se afecte a su empotramiento en el terreno y al empuje pasivo que éste moviliza y que contiene las fuerzas horizontales que transmite el citado muro (se propone el situarla al centro del vano existente entre el muro exterior y el paralelo interior, que también es un muro de carga, y el hacerla por tramos: cada uno se irá acabando y cerrando antes de comenzar con el siguiente). Lo anterior, junto a la disposición de una canaleta interior en la base del muro, de recogida de las filtraciones de agua que pasen por éste, y complementado con una pared interior paralela al cerramiento, dejando una cámara de aire (adecuadamente ventilada) entre ella y el muro de contención de tierras.

Esta solución parece razonable y adecuada para este caso. Se elimina el riesgo cierto presente en la otra proposición y es independiente, prácticamente, de condiciones climatológicas adversas que pondrían en apuros aquélla, como se ha expuesto. La figura 24 muestra un esquema general de la solución propuesta para paliar, en gran medida, los graves problemas de humedad existente por la filtración de aguas desde la ladera de terreno que se encuentra al norte del edificio.



*Figura 24:  
Propuesta de  
solución para las  
humedades de  
filtración que  
acceden al edificio  
a través del muro  
de semisótano.*

Como segundo ejemplo, y último, de recomendaciones se recoge la propuesta de reestructuración que se hizo en un edificio a rehabilitar, para uno de los forjados que no satisfacían los estados límites últimos y/o de servicio: La misma trataba de ser fácilmente ejecutable (“constructividad”) y de aprovechar la ventaja que se tenía en el inmueble de contar con una “altura libre disponible”, entre suelo y techo, elevada. Ello permitía la introducción de “parteluces” que reducían el vano de los forjados que eran insuficientes y “vigas cargadero” de los anteriores elementos, que apoyaban los mismos y transmitían las cargas hasta los muros portantes. Esta estructura adicional quedaba oculta por el falso techo que serviría de acabado superior de los locales y detrás del cual se ubicarían diferentes instalaciones del edificio.

El dibujo que sigue (figura 25) recoge la situación, tentativa, que se propuso para el refuerzo del forjado de techo de la planta baja (se muestra una zona limitada del mismo). Se consideró que una solución con elementos metálicos era, probablemente, la mejor para el caso que nos

ocupaba; la misma conducía a pequeñas secciones de refuerzo. Dentro de las posibles piezas a elegir se recomendaba la utilización de perfiles HEB, que permitían resolver la problemática resistente con cantos mínimos.

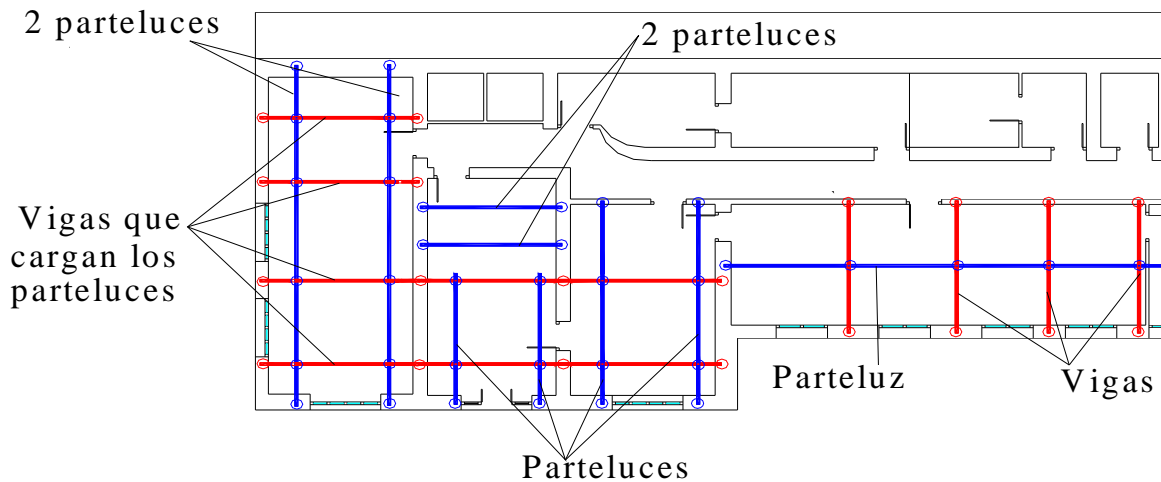


Figura 25: Planta parcial de los refuerzos de un forjado que no satisfacía la normativa de estructuras, a base de "parteluces" y "vigas cargadero" sobre muros de carga.

La solución propuesta evitaba la necesidad de refuerzo de los forjados, así como la que tenían varias jácenas existentes, al reducir notablemente las zonas tributarias de forjado que descansaban sobre las mismas.

En el informe en cuestión se recogía, además, que una idea que debiera tenerse en cuenta en el citado refuerzo era la conveniencia de utilizar un número suficientemente amplio de elementos: Ello permitiría repartir adecuadamente las cargas en los muros portantes, sin concentrar excesivamente aquéllas en los mismos, y conduciría, asimismo, a perfiles metálicos pequeños; lo que es doblemente beneficioso en una obra de reestructuración: Buena manejabilidad de las piezas resultantes y cantos reducidos en éstas (que no ocupan mucho de la altura disponible).

Por ello, en el refuerzo sugerido para el forjado de techo de la planta baja podía verse que en la zona de la izquierda (figura 25) se disponían dos parteluces para acortar los vanos (del orden de 5 m de luz) con que trabajan las viguetas metálicas existentes (IPN 140). Podría valer con uno sólo, pero ello conduciría a mayor canto de perfil (ya que el parteluz único tendría mayor área tributaria de forjado que en el caso de disponer dos) y, además, los cargaderos también requerirían mayor sección: Con un parteluz reciben una carga puntual en el centro del vano; mientras que en el caso de dos parteluces, serían dos cargas menores y actuando en unas posiciones muy favorables para el cargadero (cerca de sus extremos y sin movilizar grandes flexiones en éste) con lo que la sección necesaria sería menor.

Sin embargo, no debe olvidarse que la utilización de un único parteluz, siempre que al forjado que apoya en su centro le sea suficiente, presenta ventaja para los muros portantes: En efecto, cuando se utilizan dos parteluces las cargas concentradas que le llegan al muro a través de los cargaderos son mayores que en caso de utilizar un único parteluz; dado que en esta situación una parte importante de la luz del vano total (aproximadamente un cuarto, a cada lado del vano) es transmitida directamente a los muros por las viguetas existentes; cosa que no ocurre con la utilización de dos parteluces.

En la misma planta que la comentada en el párrafo anterior (figura 25), puede verse que para el vano que da a la fachada principal (con una luz del orden de los 5 m) se ha dibujado un sólo parteluz al centro. Cabrían aquí las mismas consideraciones que antes; habría que

analizar cual es la solución más interesante (si uno o dos parteluces) desde un punto de vista global: Dilema este que es habitual en la práctica profesional de los técnicos.

Para el proceso constructivo del refuerzo se proponían los siguientes pasos:

- Apertura en los muros de carga de unos cajeados donde apoyarían las vigas cargadero de los parteluces, a través de unos zunchos o cadenas de hormigón armado (de longitud suficiente, de modo que las tensiones sobre la fábrica fueran aceptables).
- Colocación de los parteluces contra los nervios cuyo vano iba a limitarse. Para el apoyo provisional de aquellos se utilizarían puntales metálicos que se presionarían contra las viguetas a reforzar.
- Es recomendable que los nuevos elementos se aprieten fuertemente (lo máximo posible) contra los viejos; de este modo se descargarán, en buena medida éstos, y recuperarán, en parte, una fracción importante de la deformación existente. Esto persigue limitar las flechas de la estructura auxiliar (y con ello que se fisuren las tabiquerías) cuando se retire, en su momento, el cimbrado temporal y el refuerzo entre en tensión.
- Colocación de las vigas cargadero, que se apretarán fuertemente (utilizando puntales metálicos) contra los parteluces que, posteriormente, descansarán sobre aquéllas.
- Hormigonado de los zunchos de apoyo sobre los muros. Una vez que el hormigón tenga la resistencia debida, transcurrido un plazo adecuado, se retirará el apuntalamiento y, entonces, el sistema de refuerzo por medio de parteluces y vigas entrará en carga y comenzará a ser efectivo.

**Epílogo:** La experiencia obtenida de varios “estudios previos a la rehabilitación de construcciones” en los que hemos intervenido nos permite concluir que los mismos constituyen un importante primer paso a la hora de abordar la recuperación de una edificación y permiten alcanzar un profundo conocimiento de ésta: Las propiedades de los diferentes materiales que conforman la misma, las características dimensionales de los elementos estructurales y sus detalles constructivos, los defectos existentes y sus causas; en suma todo aquello que nos permite verificar si la construcción satisface el requisito básico de resistencia mecánica y estabilidad; o, en caso contrario, apuntar posibles soluciones a las debilidades detectadas en aquéllas partes en que fuera necesario.

## **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 mismo:

- 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.



# **METODOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS A LA REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DEL PATRIMONIO**

**Ignacio Lombillo<sup>1</sup>, Luis Villegas<sup>2</sup>, GTED<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Ing. de Caminos, C. y P. Doctorando. GTED-UC.*

<sup>2</sup> *Dr. Ing. de Caminos, C. y P. Catedrático de la UC. GTED-UC.*

<sup>3</sup> *GTED-UC: Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria.*

## **1.- INTRODUCCIÓN.**

La conservación del patrimonio cultural está considerado como un principio fundamental en la vida cultural de las sociedades modernas. En los últimos años, se han realizado extensas investigaciones en torno a esta área, conduciendo a desarrollos en la inspección, ensayos no destructivos, monitorización y análisis estructural de monumentos. No obstante la comprensión, el análisis y la reparación de construcciones históricas continúa siendo uno de los desafíos más importantes de las técnicas modernas.

El análisis de construcciones antiguas formula importantes desafíos porque dada la complejidad de su geometría, la variabilidad de las propiedades de los materiales tradicionales, las diferentes técnicas de construcción, la ausencia de conocimiento sobre los daños existentes, de cómo afectan determinadas acciones a las construcciones a lo largo de su vida y la falta de códigos. En suma, las restricciones en la inspección y la falta de ejemplos de edificios de valor histórico, así como los altos costes movilizados en la diagnosis y en la inspección, a menudo derivan en una reducción de la información relativa a los sistemas de construcción interna o de las propiedades de los materiales existentes.

Los métodos no destructivos son, de hecho, necesarios para obtener las características mecánicas necesarias para el análisis y comprensión del comportamiento mecánico de las construcciones históricas, así como, para validar el análisis en sí mismo. Derivado de ello, el propósito de la comunicación es aportar una visión actualizada de algunas de las metodologías no destructivas aplicadas, de forma general, a la rehabilitación estructural del patrimonio construido, y en particular a las técnicas acústicas aplicadas a la evaluación de estructuras de fábrica.

Cabe aludir a que no son muchos los entes que en nuestro país se dedican a esta línea de investigación, contrariamente a lo que ocurre en otros países, por ejemplo en Italia, motivo por el que dicha línea de investigación cuenta con buenas perspectivas de futuro.

## **2.- TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS.**

La importancia de la evaluación de edificios de fábrica existentes mediante investigaciones in situ no destructivas ha sido aludida por muchos autores. Los NDT pueden ser empleados para varios propósitos: detección de elementos estructurales ocultos, detección de huecos y defectos en las fábricas, realización de mapas de heterogeneidad de materiales, evaluación de la extensión de daños mecánicos, evaluación del contenido de humedad y ascensión capilar, evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de morteros, piedras o ladrillos, etc.

Los métodos no destructivos están siendo cada vez más empleados en diferentes aplicaciones, especialmente la conservación del patrimonio cultural e histórico. La principal característica de estos métodos es su capacidad de investigar un lugar o estructura sin invadirla.

Como es obvio, debería darse preferencia a las técnicas no destructivas minimizando el empleo de las que tienen un carácter destructivo, especialmente cuando los edificios se ven envueltos en alto grado de deterioro, o estén dotados de una estética o una antigüedad que justifica su no alteración.

A continuación se listan algunas de las técnicas no destructivas aplicables a la evaluación de obras de fábrica, para posteriormente desarrollar con un poco de detenimiento las técnicas acústicas:

### ***ESTRUCTURAS DE FÁBRICA***

- Inspección visual (Endoscopia y videoendoscopia)
- Técnicas esclerométricas
- Técnicas basadas en aspectos tensionales
  - Técnicas basadas en gatos planos (Flat jacks)
  - Hole-drilling
  - Dilatómetro
- Técnicas acústicas
  - Velocidad de pulso sónico.
  - Velocidad de pulso ultrasónico
  - Impacto-eco
  - Tomografía sónica o ultrasónica
- Técnicas electromagnéticas
  - Técnicas termográficas
  - Técnicas radar ("Georadar", "Ground Penetrating Radar")
  - Tomografía de radar
  - Tomografía axial computerizada - TAC
- Técnicas aplicadas a morteros
  - Resistencia al corte de la junta del mortero ("In situ shear test" ó "Push test")
  - "In situ bond test" o "Bond Wrench Method"
  - Penetrómetro de morteros
  - Pull-out Resistance
  - Drilling Resistance

### **3.- METODOLOGÍAS ACUSTICAS.**

Los sistemas acústicos se basan en la generación de impulsos acústicos (sónicos o ultrasónicos) en un punto de la estructura bien mediante percusión o por un dispositivo transmisor, siendo posteriormente recibidos por un receptor que puede estar situado en varias posiciones diferentes (figura 1).

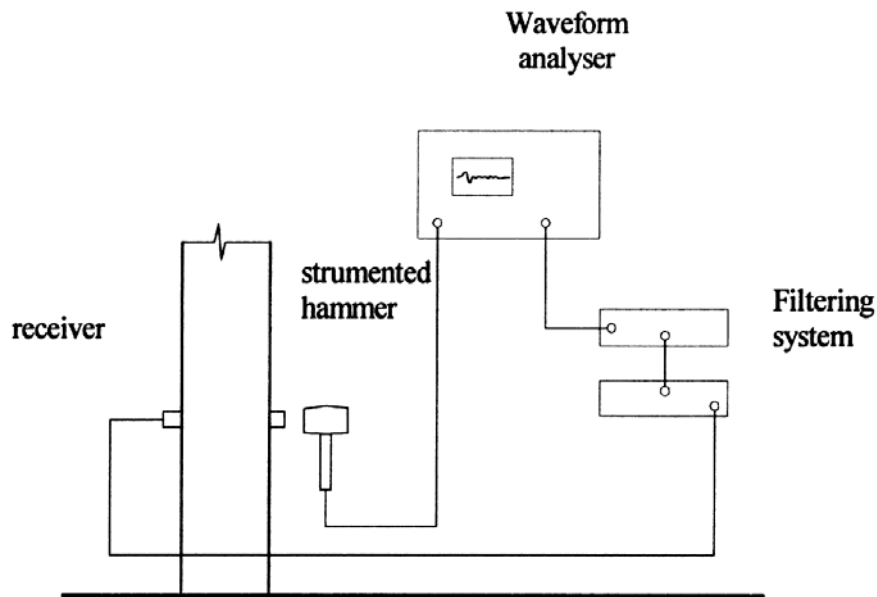


Figura 1.- Equipamiento del ensayo sónico

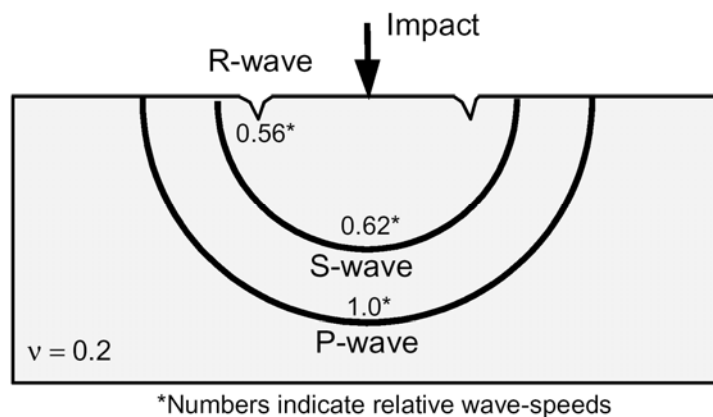
Si las oscilaciones mecánicas generadas son de alta frecuencia ( $> 20\text{kHz}$ ) el sistema se denomina ultrasónico, denominándose sónico si las frecuencias están entre 20 Hz y 20 KHz (en general entre 0,5 kHz y 10kHz).

Cuando una alteración (de tensión o de desplazamiento) es aplicada de repente en un punto de la superficie de un sólido, por ejemplo mediante un impacto, dicha alteración se propaga a través del sólido mediante tres tipos de ondas mecánicas diferentes: una onda-P, una onda-S, y una onda-R.

Las ondas P también se denominan longitudinales. La vibración de las partículas se realiza en dirección paralela al avance de la onda y se denominan “ondas primarias”, P, por ser las que presentan mayor velocidad de propagación.

Las ondas S también se denominan transversales. La vibración de las partículas se realiza en dirección perpendicular a la propagación de la onda. Se denominan “ondas secundarias”, S, por recibirse más tarde que las longitudinales, u “ondas de cizalla” por provocar este tipo de esfuerzos en el material.

Las ondas R también se denominan ondas de Rayleigh. Dichas ondas no penetran en el material más allá de su longitud de onda, por ello que se denominen también “ondas de superficie”.



\*Numbers indicate relative wave-speeds

Figura 2.- Ondas de tensión causadas por el impacto en un punto de la superficie de un elemento estructural

Como se muestra en la figura 2, la onda-P y la onda-S se propagan dentro del sólido a través de frentes de onda esféricos. La onda-P se asocia con la propagación de tensiones normales, mientras que la onda-S se asocia con tensiones de corte. Además, hay una onda-R que se aleja de la alteración provocada a lo largo de la superficie.

Los fundamentos de la propagación de ondas a través de sólidos permiten reconocer las capacidades teóricas y las limitaciones de los sistemas acústicos. En un sólido elástico isótropo, la velocidad de la onda-P,  $C_p$ , se relaciona con el modulo de Young de elasticidad,  $E$ , el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , y la densidad,  $\rho$ , como sigue (Krauthrämer y Krauthrämer):

$$C_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (1)$$

La resolución, en términos de defectos más pequeños reconocibles, se relaciona con la longitud de la onda incidente dominante y también con el tamaño del elemento ensayado, en tanto que, en primera instancia, un defecto sólo será detectable si la longitud de la onda incidente es menor que su tamaño efectivo.

La longitud de onda,  $\lambda$ , es directamente proporcional a la velocidad de onda e inversamente proporcional a la frecuencia del pulso. Por ello para una velocidad dada, a medida que la frecuencia aumenta la longitud de onda decrece, proporcionando la posibilidad de mayor resolución en la reconstrucción final de la velocidad. Es beneficioso emplear una alta frecuencia para suministrar la resolución más alta posible. De cualquier forma, existe también una relación entre la frecuencia y la atenuación de la energía de la onda. A medida que la frecuencia se incrementa la proporción de energía atenuada también incrementa limitando el tamaño de la sección de pared que puede ser investigada. La frecuencia óptima se elige considerando los requerimientos de atenuación y de resolución para obtener una combinación razonable de los dos parámetros limitantes, así unos rangos habituales, en función del material a estudiar, podrían ser los siguientes:

- Metales: 15 MHz. En metales (materiales de grano pequeño) es necesario emplear altas frecuencias y cortas longitudes de onda, lo que supone que el haz sea prácticamente recto, lo que le confiere gran poder resolutivo.
- Hormigones y madera: 45-54 KHz. En hormigones (materiales de grano relativamente grueso) es necesario que la longitud de onda sea mayor que el grano (80-100 mm) para que las oscilaciones no se reflejen en las interfases entre granos, lo cual redundaría en que tiene menor poder resolutivo.
- En general, para fábricas es preferible emplear un pulso sónico con una frecuencia alrededor de los 3,5 kHz. Los ultrasonidos no están indicados en el caso de fábricas altamente heterogéneas como las de muros de varias hojas.

El equipamiento de velocidad de pulso mecánico puede ser empleado para adquirir los datos de velocidad. Las señales de entrada son generadas por un martillo, a menudo instrumentado, o por un transductor emisor siendo recibido el pulso transmitido por un transductor receptor, en general un acelerómetro, posicionado sobre la superficie de la fábrica. Las señales son registradas por un analizador de onda acoplado con un computador para realizar procesados posteriores.

Pueden realizarse tres tipos de ensayo:

- Ensayo directo o a través del muro, en el cuál el martillo y los acelerómetros están situados en línea sobre caras opuestas del elemento de fábrica.

- Ensayo semidirecto, en el cual el martillo y los acelerómetros se emplazan formando un cierto ángulo entre uno y otro.
- Ensayo indirecto, en el cual el martillo y los acelerómetros se localizan ambos en la misma cara de la pared, en una vertical o en una horizontal.

A continuación se va a realizar una breve referencia a alguno de los diferentes sistemas acústicos existentes para la evaluación de estructuras de fábrica.

### **3.1.- MÉTODOS ULTRASÓNICOS**

Si las oscilaciones mecánicas generadas por el sistema acústico son de alta frecuencia (mayores que 20kHz) el sistema se denomina ultrasónico.

La generación de las ondas ultrasónicas se basa en que una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, el cuál mediante un cristal piezoeléctrico interno genera una onda de tensión de baja energía y alta frecuencia. A su vez los transductores o palpadores han de ser acoplados a la superficie de la fábrica mediante medios acoplantes para transmitir el máximo de energía posible. La onda viaja entonces a través de la sección, siendo captada por el transductor receptor, que puede situarse en varias posiciones en función del método empleado, el cuál a su vez convierte la energía de la onda en energía eléctrica. El tiempo de la transmisión puede visualizarse mediante un display de lectura, generalmente en microsegundos.

Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de transformar una corriente eléctrica en oscilaciones mecánicas, de esta forma cuando una carga eléctrica es aplicada sobre las caras polarizadas de este tipo de cristales produce un desplazamiento mecánico que origina una oscilación. Como ejemplos de dichos materiales pueden referirse el cuarzo, el titanato de bario, o el circonato de plomo y titanio. Un transductor se caracteriza por su frecuencia de transmisión, por la posición del cristal, por su forma (cilíndricos o cónicos), por su sensibilidad (capacidad de transformar energía eléctrica en energía mecánica acústica) y por su poder resolutivo (capacidad de detectar las señales de dos discontinuidades muy próximas). El material acoplante mejora la transmisión de las oscilaciones producidas por el cristal (ejemplos: vaselina o grasa consistente).

Debido a su corta longitud de onda los pulsos ultrasónicos se propagan en línea recta, por lo que éstos son muy direccionables. Cuanto mayor es la longitud de onda mayor es la dispersión angular que se produce.

Las primeras aplicaciones de los ensayos ultrasónicos para la evaluación de los materiales que conforman las fábricas fueron llevadas a cabo en los años sesenta. Dada la limitación de los ensayos ultrasónicos para evaluar materiales muy heterogéneos hace que los ensayos de velocidad de pulso sónico sean más apropiados para fábricas. Sin embargo en el caso de unidades de baja porosidad o empleo de morteros para macizar las cavidades presentes en la pared, los ensayos ultrasónicos pueden ser empleados satisfactoriamente. Del mismo modo los ultrasonidos son aplicables a la evaluación de elementos pétreos aislados (mampuestos o sillares de compacidad adecuada) o probetas extraídas de los mismos, para poder valorar tanto propiedades físicas como mecánicas. En torno a los 50 KHz son las frecuencias más apropiadas para la comprobación ultrasónica en materiales rocosos. A continuación se adjunta una tabla en la que se indican los rangos más habituales de velocidad de propagación de ultrasonidos en distintos tipos de rocas:

Tabla 1: Velocidad de propagación de ultrasonidos en distintos tipos de rocas

Tipo de roca	Velocidad de propagación (m/s)
--------------	--------------------------------

Granito	3000-5000
Basalto	4500-6500
Gabro	4500-6500
Arenisca	1400-4000
Caliza	2500-6000
Mármol	3500-6000
Cuarcita	5000-6500
Pizarra	3500-5500

También son aplicables a estructuras de madera y a estructuras de hormigón, en estos materiales existen correlaciones entre la velocidad ultrasónica y diferentes propiedades de los mismos, así como rangos de velocidades relacionados con la calidad del material. Finalmente presentan una extensa aplicación en el campo de los metales.

En RILEM MS-D.5, “Measurement of ultrasonic pulse velocity for masonry units and wallets”, puede encontrarse más información sobre el equipo involucrado y el procedimiento de ensayo.

Como ejemplo de aplicación de técnicas ultrasónicas a la rehabilitación del patrimonio construido se hace referencia a una pequeña parte de la investigación llevada a cabo en el Palacio de Riva Herrera<sup>1</sup>, edificio civil más antiguo de la ciudad de Santander (figuras 3 y 4), por varios grupos de investigación de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander en el año 2005. Previamente a la realización de las pruebas ultrasónicas fueron llevados a cabo ensayos de compresión sobre probetas cilíndricas de los tres tipos de piedra más representativos del conjunto arquitectónico (caliza, arenisca roja y arenisca blanca). Del mismo modo también se llevaron a cabo una serie de ensayos físicos sobre las piedras (densidades, porosidades, etc.).



*Figuras 3 4.- Palacio de Riva Herrera, Santander.*

Las pruebas realizadas sobre las areniscas alcanzaron resistencias, en promedio, que rondan los 36 MPa en el caso de la arenisca roja y los 32 MPa en el caso de la arenisca blanca, siendo superior a 100 MPa la resistencia de la piedra caliza. La forma de las roturas es la típica en estos casos con superficies de fractura a 45°, como se muestra en las figuras 5 y 6 siguientes.

<sup>1</sup> “Estudios Previos a la redacción del Proyecto de Rehabilitación del Palacio de Riva Herrera”, elaborado gracias al convenio suscrito entre el Excmo. Ayuntamiento de Santander y la Universidad de Cantabria.



Figura 5.- Rotura a compresión de una arenisca. Cortesía de LADICIM.



Figura 6.- Forma de rotura típica a 45°. Cortesía de LADICIM.

Para conocer la respuesta de las dos piedras frente a la propagación de las ondas elásticas fue determinada la velocidad ultrasónica por transmisión sobre las probetas de piedra (figura 7). Los dos materiales, caliza y arenisca, muestran un comportamiento diferenciado. De hecho, en el caso de la caliza los valores presentan un promedio de 4.244,5 m/s, mientras los valores de la arenisca alcanzan un promedio de 1.810,6 m/s en el caso de la arenisca roja, y 1.221,5 m/s en el caso de la blanca.

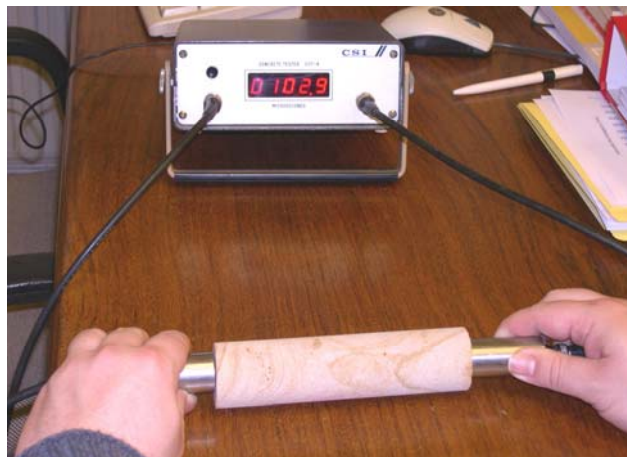


Figura 7.- Ensayo ultrasónico sobre probetas de piedra, método directo. Cortesía de LADICIM.

Como se adjunta en las tablas 2 y 3 que siguen, puede observarse el correcto ajuste en la valoración cualitativa de las propiedades mecánicas y físicas de las piedras naturales ensayadas a través del ensayo ultrasónico. A mayor densidad, menor porosidad, y por ende mayor resistencia mecánica y mayor velocidad de propagación ultrasónica.

Tabla 2.- Velocidad ultrasónica estimada en diferentes materiales.

Tipo de piedra	Testigo	L(mm)	t [microseg]	v [m/s]		
CALIZA	1,00	80,50	17,00	4.735,29	4.321,53	4.244,50
		80,50	20,60	3.907,77		
	2,00	120,00	28,40	4.225,35	4.167,47	
		120,00	29,20	4.109,59		
ARENISCA ROJA	1,00	160,00	72,40	2.209,94	1.659,76	1.810,57
		160,00	144,20	1.109,57		

	2,00	60,00	29,30	2.047,78	1.961,39	
		60,00	32,00	1.875,00		
ARENISCA BLANCA	1,00	160,00	120,20	1.331,11	1.185,38	1.221,45
		160,00	153,90	1.039,64		
	2,00	80,00	57,30	1.396,16	1.257,52	
		80,00	71,50	1.118,88		

Tabla 3.- Relación entre la velocidad ultrasónica registrada, la resistencia a compresión y determinadas propiedades físicas (densidad aparente y porosidad).

	Caliza	Arenisca roja	Arenisca blanca
Rm [MPa]	108,40	36,45	31,70
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.25	2.09
Porosidad (% en volumen)	1.48	7.83	16.36
Velocidad ultrasónica (m/s)	4.244,50	1.810,57	1.221,45
(m/s)/MPa	39,2	49,7	38,5

En la última fila de la tabla 3 se ha adjuntado un indicador, sin un sentido físico palpable, que representa la velocidad ultrasónica (m/s) que podría asociarse con una resistencia de 1 MPa en cada una de las piedras objeto de ensayo. Aludir a que estas cifras se refieren a este caso particular no siendo, en ningún caso, extrapolables a otras situaciones.

También se realizó una valoración de la durabilidad de los materiales en base a ensayos de heladicidad. Para cuantificar los resultados obtenidos se emplearon métodos usuales como la pérdida de masa o la pérdida de propiedades mecánicas mediante la realización de ensayos de rotura a compresión de las probetas tras haber completado el programa de ciclos previsto. Como método alternativo a los dos anteriores también fue aplicado el ensayo ultrasónico con la finalidad de estudiar la evolución en el tiempo de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos experimentada en una serie de testigos sometidos a diversos ciclos hielo – deshielo. En este sentido no se encontró una buena correlación de los resultados de la velocidad de propagación ultrasónica con los obtenidos a partir de la pérdida de masa y la pérdida de resistencias mecánicas, de lo cuál se dedujo que este método no resulta fiable cuando se emplea para la valoración del ensayo de heladicidad aplicado a materiales pétreos naturales.

### **3.2.- MÉTODOS SONICOS**

Los métodos sónicos se basan en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia (frecuencias sónicas) mediante un martillo instrumentado (figura 10). Los martillos suministran una masa cayendo de una determinada distancia, por lo que la masa y la dureza de la cabeza del mismo definen la energía y la frecuencia de la onda inicial. La onda mecánica es recogida por un receptor, normalmente un acelerómetro que puede situarse en varias posiciones, el cuál motiva a un osciloscopio adjunto o un registrador digital que comienza a compilar los datos a medida que son percibidos por el receptor.



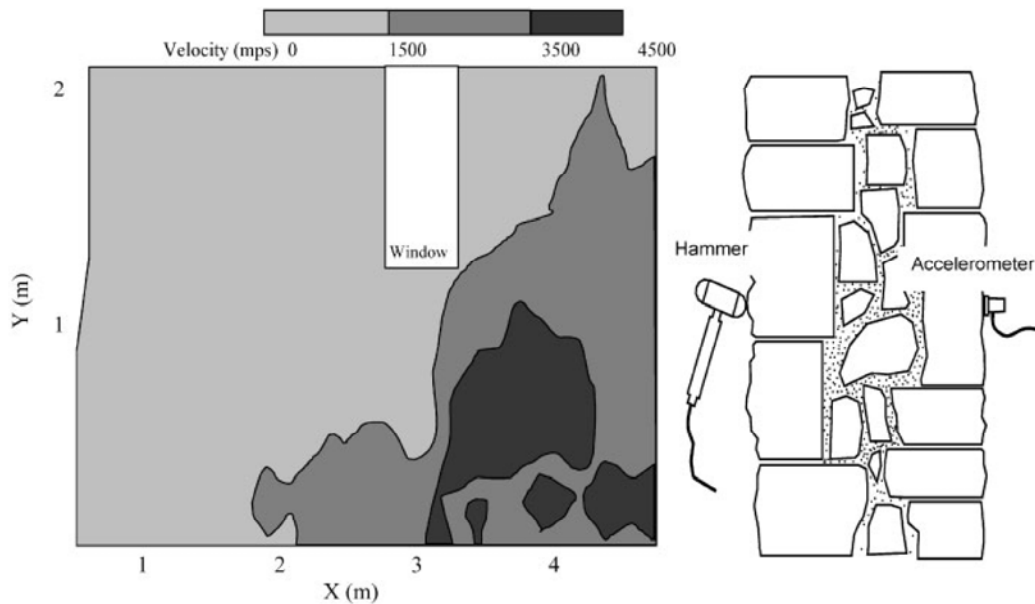


Figura 10.- El contorno representa la velocidad de pulso sónico a través de una pared que fue generada para evaluar la solidez de la hoja interna de un campanario mediante el método de velocidad de pulso sónico como se muestra a la derecha. La zona de velocidad más alta representa una construcción relativamente sólida; la región de baja velocidad de la parte superior izquierda de la imagen representa una separación interna o la existencia de vacíos entre las hojas. Las áreas en las que se identificaron bajas velocidades fueron subsecuentemente reparadas mediante inyecciones.(Fuente: Michael P. Schuller).

El equipo y el procedimiento de ensayo son descritos en RILEM MS.D.1, “Measurement of mechanical velocity for masonry”.

La elaboración de los datos consiste en medir el tiempo que toma el impulso para cubrir la distancia entre el transmisor y el receptor (tiempo de viaje), mediante dicha magnitud puede calcularse la velocidad de la onda que se propaga por el medio:

$$V_{onda} = \frac{\text{Espacio _ recorrido _ por _ la _ onda}}{\text{Tiempo _ de _ viaje}} \quad (2)$$

El empleo de los ensayos sínicos para la evaluación de estructuras de fábrica tiene los siguientes objetivos:

- Calificar la fábrica a través de la morfología de la sección de la pared.
- Detectar la presencia de vacíos y defectos.
- Encontrar patrones de agrietamiento y modelos de daño.
- Controlar la eficacia de la reparación por técnicas de inyección.
- Detectar cuando las características físicas de los materiales han cambiado.

Como ya se ha referido la limitación que tienen los ensayos ultrasónicos en el caso de materiales muy heterogéneos como las fábricas debido a la alta atenuación causada por las uniones, vacíos y heterogeneidades, hace que los ensayos de pulso sónico sean más apropiados para el estudio de las estructuras de fábrica. Aún así los sistemas sínicos aplicados a estas estructuras de fábrica presentan una serie de limitaciones:

- Coste relativo de las operaciones, debido al alto número de mediciones que hay que llevar a cabo.
- Difícil elaboración de los resultados debido a las dificultades creadas por la falta de homogeneidad del material.

- La velocidad de pulso sónico es característica de cada tipología de fábrica, siendo imposible generalizar los valores. Los ensayos han de ser calibrados para los diferentes tipos de fábrica directamente in situ.
- Dificultad para correlacionar los parámetros sónicos con las características mecánicas de los materiales.

Como ejemplo de aplicación de técnicas sónicas a la rehabilitación del patrimonio construido se hace referencia a la investigación llevada a cabo por Binda et al en la Catedral de Noto. El ensayo de velocidad de pulso sónico se llevó a cabo sobre los restos de las pilas derrumbadas y sobre los muros existentes de dicha construcción.

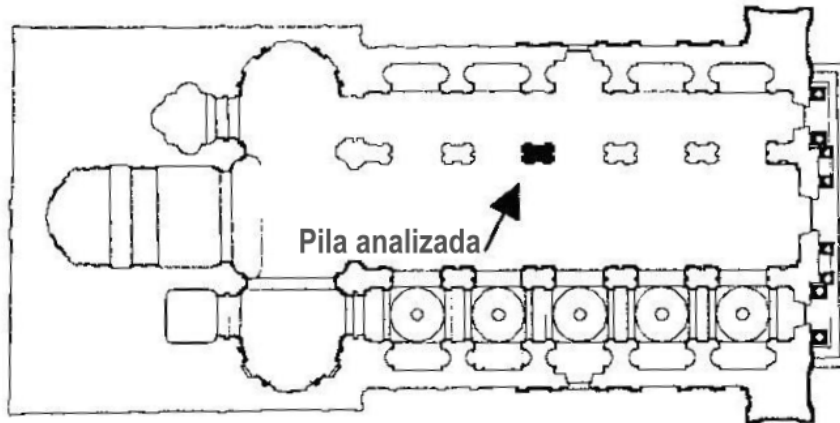


Figura 11: Pila de la que se van a mostrar los resultados del ensayo sónico. (Fuente: L. Binda, A. Saisi & C. Tiraboschi).

Las pruebas se llevaron a cabo mediante la colocación del martillo y los acelerómetros en línea sobre los lados opuestos de los elementos de fábricas a ensayar (ensayo directo), respetando la ubicación asignada en una malla previamente definida. Un analizador de forma de onda acoplado con un ordenador almacenó las señales para el tratamiento remoto. Las pruebas fueron repetidas en alturas diferentes para verificar la morfología general, el estado de daño y la variación en los materiales de las pilas y paredes. Del mismo modo se realizaron pruebas experimentales tanto in situ como en laboratorio sobre la eficacia de la inyección de cuatro preparados de diferente naturaleza, a este respecto las pruebas acústicas también fueron realizadas 28 días después de la inyección observándose un aumento general de la velocidad sónica como una consecuencia de dicha operación.

A modo de ejemplo se adjunta un gráfico en el que se definen, para una de las pilas ensayadas a 25 cm del suelo (figura 11), las trayectorias investigadas (figura 12) y los resultados tanto antes como después de la inyección (figura 13 y 14):

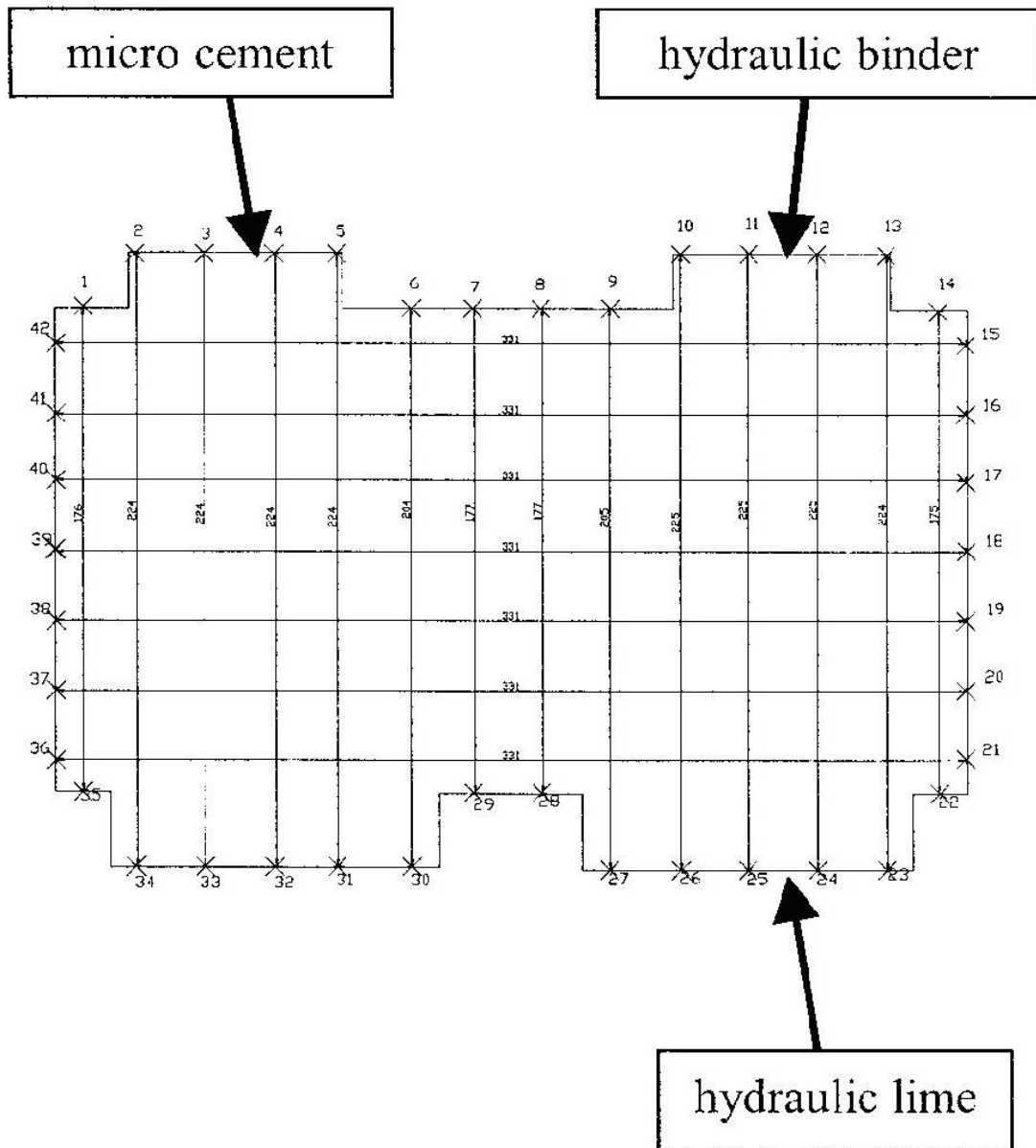


Figura 12: Trayectorias investigadas mediante sistemas s3nicos. (Fuente: L. Binda, A. Saisi & C. Tiraboschi).

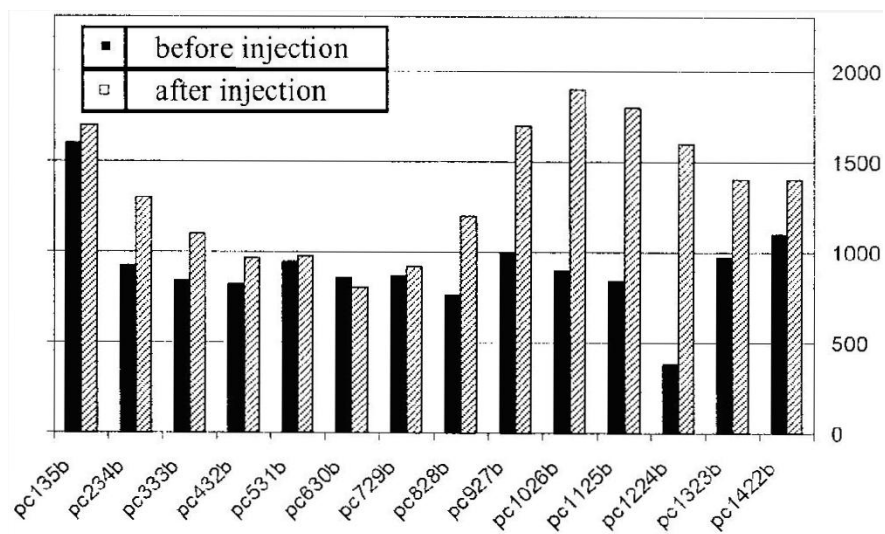


Figura 13: Resultados de los ensayos s3nicos llevados a cabo sobre una de las pilas de la catedral de Noto

antes y después de la inyección. (Fuente: L. Binda, A. Saisi & C. Tiraboschi).

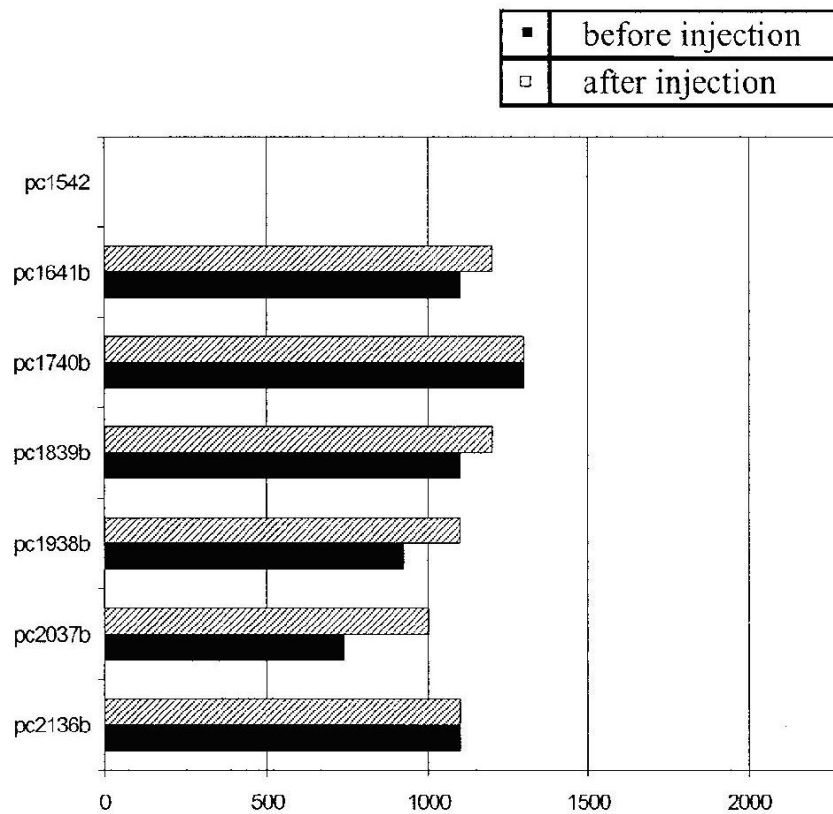


Figura 14: Resultados de los ensayos sónicos llevados a cabo sobre una de las pilas de la catedral de Noto antes y después de la inyección. (Fuente: L. Binda, A. Saisi & C. Tiraboschi).

### **3.3.- IMPACTO ECO**

Primeramente desarrollado para hormigones, el impacto-eco es una variación del método de transmisión de una onda mecánica que emplea un análisis basado en la frecuencia de los ecos de las ondas que se propagan dentro de la fábrica para localizar discontinuidades internas.

Las primeras aplicaciones satisfactorias de los métodos de impacto se desarrollaron en ingeniería geotécnica para evaluar la integridad de pilotes de hormigón (Steinbach y Vey). La técnica comenzó a denominarse impacto-eco o método de eco sísmico (ACI 228.2R)

El impacto-eco es atractivo porque solamente es requerido el acceso a la estructura por una cara. Las aplicaciones típicas en fábricas incluyen la localización de tizones, identificación de células macizadas en fábricas armadas, determinación del espesor de secciones transversales y localización de vacíos en construcciones de varias hojas.

#### **3.3.1.- Principios básicos.**

Cuando una onda de tensión que está viajando a través de un material 1 incide con la interfase de un material 2 distinto, una parte de la onda incidente es reflejada. En los métodos asociados a la transmisión de una onda mecánica por el seno de un material es de especial importancia el denominado “Principio de la impedancia acústica”. La impedancia acústica es el producto de la velocidad de la onda y la densidad del material. En la tabla 4 se hace referencia a unos valores aproximados de impedancias acústicas de varios materiales (Sansalone y Carino):

Tabla 4.- Valores aproximados de impedancias acústicas de varios materiales

Material	Impedancia acústica, $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$
Aire	0.4
Agua	0.5·10 <sup>6</sup>
Aceite	0.3 - 4·10 <sup>6</sup>
Hormigón	7 - 10·10 <sup>6</sup>
Acero	47·10 <sup>6</sup>

Dicho principio establece que la energía reflejada en una interfase será tanto mayor cuando mayor sea la diferencia entre las impedancias de los dos medios que forman la interfase. A su vez la amplitud de la reflexión es una función del ángulo de incidencia y es máxima cuando dicha incidencia es perpendicular a la interfase (ángulo de incidencia 90°, incidencia normal). Para una incidencia normal el coeficiente de reflexión, R, viene dado por la siguiente expresión (Krauthrämer y Krauthrämer):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

Donde:

$Z_2$  = Impedancia acústica específica del material 2.

$Z_1$  = Impedancia acústica específica del material 1.

En base al principio anterior, en un material heterogéneo, como la fábrica, se producirá una difracción de la onda de llegada siempre que haya una discontinuidad del material, produciéndose una pérdida de velocidad respecto a la que se obtendría en un material homogéneo. De la misma forma cuando la onda encuentra una interfase con el aire, prácticamente la reflexión en la interfase es total, en tanto que el coeficiente de reflexión puede considerarse que alcanza la unidad. Esta es la causa por la que los métodos no destructivos basados en la propagación de una onda de tensión han demostrado ser satisfactorios para localizar defectos dentro de sólidos.

El coeficiente de reflexión dado por la ecuación anterior puede ser negativo o positivo dependiendo de los valores relativos de las impedancias acústicas de los dos materiales. Si  $Z_2 < Z_1$ , como podría ocurrir en una interfase hormigón-aire, el coeficiente de reflexión es negativo. Esto significa que el signo de la tensión en la onda reflejada es opuesto al signo de la tensión de la onda incidente. De esta forma una onda-P incidente con tensión de compresión se reflectaría originando una onda-P con tensión de tracción. Si  $Z_2 > Z_1$ , el coeficiente de reflexión es positivo no habiendo un cambio en el signo de la tensión de la onda. En este caso, una onda-P incidente con tensión de compresión se reflectaría originando una onda con tensión también de compresión.

### **3.3.2.- El método.**

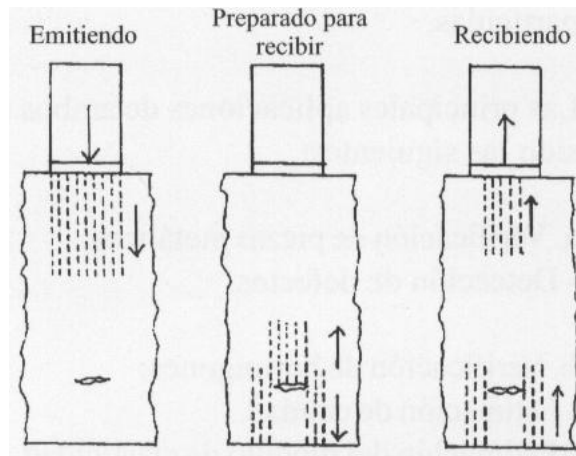


Figura 15.- Método de impacto eco

Un transductor electromecánico (en general un impactador) es empleado para generar un pequeño pulso de ondas de tensión acústicas que se propagan dentro del objeto que está siendo inspeccionado (figura 15). La excitación superficial (generalmente un impacto) produce ondas-P y ondas-S que viajan hacia dentro de la placa y ondas-R superficiales que se alejan del punto de impacto. Las ondas-P y S son reflejadas por los defectos internos (dada la diferencia entre impedancias acústicas) o por los contornos externos. Cuando las ondas reflejadas o ecos retornan a la superficie producen desplazamientos que son medidos por un transmisor receptor. Si el transductor está situado próximo al punto de impacto la respuesta está dominada por los ecos de las ondas-P (Sansalone y Carino). El gráfico de la izquierda de la figura 16 muestra el patrón de desplazamientos superficiales que se desarrollaría. El gran descenso de desplazamiento al comienzo del diagrama está causado por la onda-R, y las series de descensos de desplazamientos repetidos de menor amplitud son debidos a la llegada de las ondas-P originadas por las múltiples reflexiones entre la superficie y el vacío interno (puede observarse cierta periodicidad).

En ocasiones los pulsos reflejados retornan al transductor que también actúa como receptor. La señal recibida por el receptor es manifestada por un osciloscopio, siendo medido electrónicamente el tiempo de viaje, de ida y vuelta, del pulso. Mediante el conocimiento de la velocidad de propagación de la onda de tensión, la distancia a la interfase que produce la reflexión puede ser determinada.

### **3.3.3.- Análisis frecuencial**

En los trabajos iniciales que se llevaron a cabo en base al método de impacto-eco, fue empleado un análisis en el dominio del tiempo para medir el tiempo desde el comienzo del impacto hasta la llegada del eco de la onda-P. El proceso consistía en calcular el tiempo consumido y requería destreza para identificar correctamente el tiempo de llegada de la onda-P.

Un desarrollo clave, que condujo al éxito del método de impacto-eco, fue el emplear un análisis frecuencial en vez del análisis en el dominio del tiempo para registrar las ondas (Sansalone y Carino). El principio del análisis frecuencial se ilustra en la figura 16.

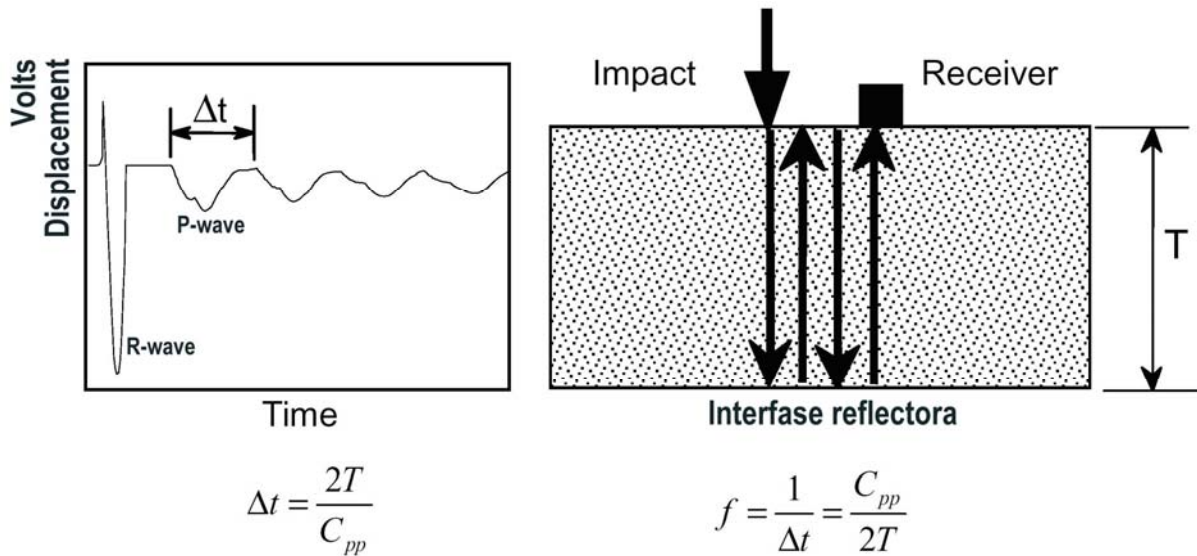


Figura 16.- Principio del análisis frecuencial: el dominio de tiempo de la onda tiene una periodicidad debida a la llegada de la onda-P como resultado de las múltiples reflexiones entre la parte superior y la inferior de la placa; la frecuencia de llegada de la onda-P se relaciona directamente con el espesor de la placa. (Fuente: Nicholas J. Carino).

La onda-P producida por el impacto experimenta múltiples reflexiones entre la superficie de ensayo y la interfase reflectora. Cada vez que la onda-P llega a la superficie de ensayo causa un desplazamiento característico. De esta forma la onda se caracteriza por una periodicidad que depende de la distancia de viaje, de ida y vuelta, de la onda-P. Si el receptor está cerca del punto de impacto, la distancia de ida y vuelta recorrida por la onda es  $2T$ , donde  $T$  es la distancia entre la superficie de ensayo y la interfase reflectora. Como se muestra en la figura 16, el intervalo de tiempo entre llegadas sucesivas de las múltiples reflexiones de la onda-P es la distancia recorrida dividida por la velocidad de la onda. La frecuencia,  $f$ , de llegada de la onda-P es el inverso de dicho intervalo de tiempo y viene dada por la siguiente relación aproximada:

$$f = \frac{C_{pp}}{2 \cdot T} \quad (4)$$

Donde:

$C_{pp}$  = velocidad de la onda-P a través del espesor de la placa.

$T$  = profundidad de la interfase reflectora.

La ecuación (4) es la relación básica para interpretar los resultados de los ensayos de impacto-eco. En las primeras investigaciones llevadas a cabo para el desarrollo del método de impacto-eco, se asumía que la velocidad de la onda a través del espesor del elemento era la misma que la velocidad de la onda-P en un sólido de gran longitud ( $C_{pp} = C_p$ ), tal y como se comentó con anterioridad:

$$C_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (5)$$

Estudios subsecuentes, mucho más rigurosos, mostraron que la velocidad de la onda era aproximadamente un 96% de la velocidad de la onda-P, esto es,  $C_{pp} = \beta \cdot C_p = 0.96 \cdot C_p$  (Lin y Sansalone).

### **3.3.4.- Amplitud del espectro**

En el análisis frecuencial de los resultados del método de impacto-eco, el objetivo es determinar las frecuencias dominantes de la onda registrada. Esto se consigue mediante el empleo de técnicas de Transformada Rápida de Fourier (FFT) para transformar la onda registrada al dominio de la frecuencia (Bracewell). La transformación arroja un espectro de amplitudes que muestran las amplitudes asociadas a las frecuencias contenidas en la onda. Para estructuras tipo placa, la frecuencia asociada con el espesor (thickness frequency) normalmente será el pico dominante. El valor del pico de frecuencia en el espectro de amplitudes puede emplearse para determinar la profundidad de la interfase reflectora mediante la ecuación (4) expresada de la forma que sigue:

$$T = \frac{C_{pp}}{2 \cdot f} = \frac{\beta \cdot C_p}{2 \cdot f} \quad (6)$$

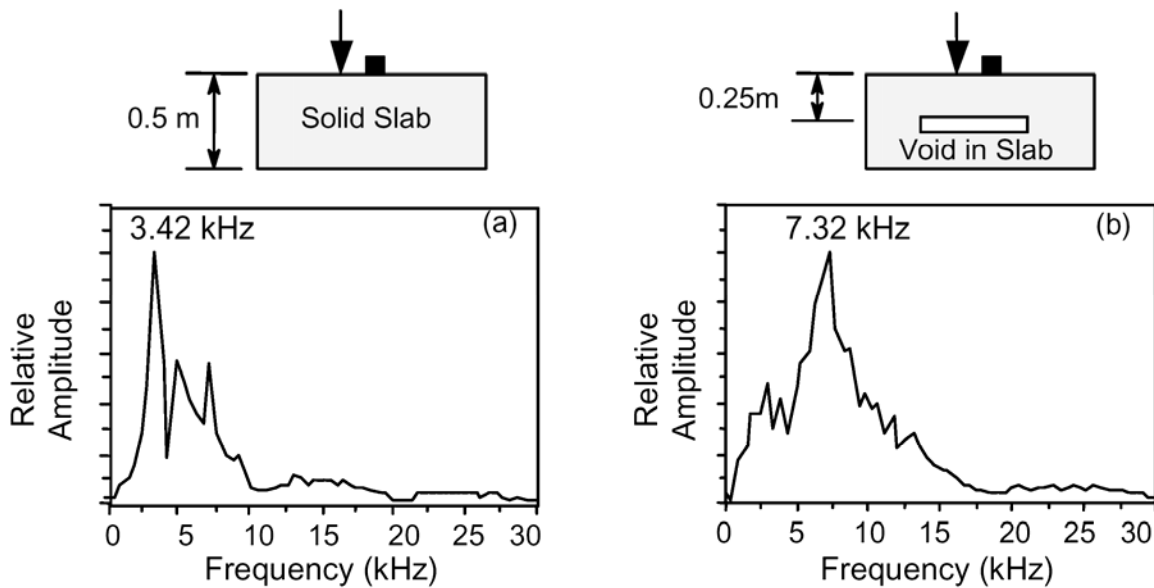


Figura. 17.- Ejemplos del espectro de amplitudes en ensayos de impacto-eco: a) Ensayo de una porción sólida de una losa de 0.5 m de grosor y b) ensayo sobre una cavidad artificial a 0.25 m de profundidad. (Fuente: Nicholas J. Carino).

La figura 17 ilustra el uso del análisis frecuencial en los ensayos de impacto-eco. La figura 17-a muestra el espectro de amplitudes de un ensayo sobre una porción sólida de una losa de hormigón de 0.5 m de grosor. Hay un pico de frecuencia de 3.42 kHz, el cuál corresponde a las múltiples reflexiones de la onda-P entre las superficies inferior y superior de la losa (frecuencia asociada con el espesor, thickness frequency). Usando las ecuaciones (4) y (6) y resolviendo para  $C_{pp}$ , la velocidad de la onda-P calculada en la losa es de 3420 m/s ( $C_{pp} = 0.5 \cdot 2 \cdot 3420 = 3420 \text{ m/s}$ ). La figura 17-b muestra el espectro de amplitudes para un ensayo sobre una porción de losa que contiene un vacío con forma de disco (Sansalone y Carino). El pico a 7.32 kHz es resultado de las múltiples reflexiones entre la parte superior de la losa y el vacío. Haciendo uso de la ecuación (6) la profundidad calculada para el vacío es  $\frac{3240}{2 \cdot 7320} = 0.23 \text{ m}$ , que se ajusta con bastante precisión a la conocida distancia de 0.25m.

### 3.3.5.- Instrumentación

El ensayo de impacto-eco se basa en tres componentes básicos:

- Un impactador mecánico capaz de producir impactos de corta duración. La duración de éstos puede ser variada.



- Un receptor de alta fidelidad para medir la respuesta superficial.
- Un sistema de adquisición y análisis de la señal para capturar la salida transitoria del receptor, almacenar las ondas asociadas con el movimiento de la superficie y realizar el análisis y procesado de la señal.

La figura 18 muestra los tres componentes de un sistema comercial de impacto-eco mientras está siendo utilizado para evaluar el armado de una viga de hormigón.



Figura 18.- Ejemplo del equipamiento de un ensayo de impacto-eco basado en un PC portátil. (Fuente: Nicholas J. Carino).

La distancia entre el punto de impacto y el transductor es importante. Si la distancia es demasiado grande la respuesta no está dominada por las ondas-P reflejadas, y las relaciones simples expresadas por las ecuaciones (4) y (6) no son aplicables. Si la distancia es demasiado corta, la respuesta está dominada por el efecto de las ondas de superficie. En base a una serie de estudios analíticos, se encontró que con espaciados de 0.2 a 0.5 de la profundidad del defecto se obtuvieron resultados aceptables (Carino et al). Sansalone y Streett recomiendan un espaciamiento menor que el 40% de la profundidad del defecto.

### **3.3.6.- Duración del impacto.**

La duración del impacto es crítica para el éxito del ensayo de impacto-eco. La idea básica del ensayo de impacto-eco es crear una vibración resonante correspondiente al modo asociado con el espesor (thickness mode). Para excitar el modo asociado con el espesor, el pulso aportado debe contener la frecuencia correcta, a su vez el receptor debe de ser de banda ancha para que pueda responder sobre una amplia gama de frecuencias.

Como aproximación, la frecuencia más alta de amplitud significativa puede ser tomada como el inverso del tiempo de contacto.

Por ejemplo, para una velocidad de onda-P de 4000 m/s y una profundidad de defecto de 0.2 m, la frecuencia (thickness frequency) es de 10 kHz ( $f = \frac{4000}{2 \cdot 0.2} = 10000 \text{ Hz}$ ). Por tanto el

tiempo de contacto del pulso ha de ser menor que 100  $\mu\text{s}$  ( $t_c = \frac{1}{f} = \frac{1}{10000} = 0.0001 \text{ s}$ ) para

“ver” el defecto en el espectro de amplitud.

### **3.3.7.- Defectos más pequeños detectables.**

En principio la longitud de onda (velocidad de onda dividida por la frecuencia máxima) más corta tiene que ser aproximadamente igual o menor que la dimensión del defecto para que este pueda ser detectado. A su vez a medida que la profundidad de un defecto aumenta,

también aumenta el tamaño más pequeño de defecto que puede ser detectado. En base a estudios analíticos y de laboratorio, Sansalone y Streett sugieren que si las dimensiones laterales de una grieta plana o un vacío sobrepasan  $1/3$  de su profundidad, la profundidad del defecto puede ser medida. Si las dimensiones laterales exceden 1.5 veces la profundidad, el defecto se comporta como un límite infinito y la respuesta es que el elemento tiene un espesor igual a la profundidad del defecto (figura 19).

Cuando un defecto cae dentro de la región que se muestra en la figura 19, el espectro de amplitud tendrá típicamente dos picos: un pico de alta frecuencia correspondiente a la profundidad del defecto y un pico de baja frecuencia correspondiente al espesor de la placa.

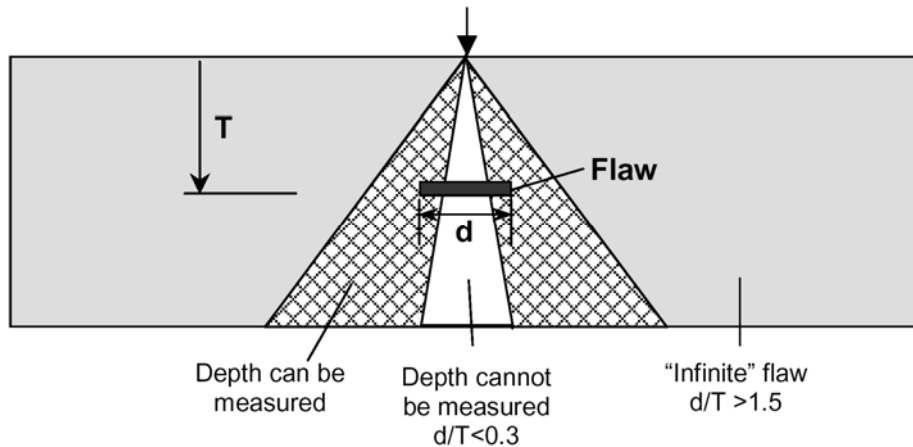


Figura 19.- La grieta o vacío horizontal detectable más pequeño depende de su profundidad, si el defecto cae dentro de la región blanca su profundidad no puede ser medida (en base a Sansalone y Streett).

### 3.3.8.- ASTM Test Method C 1383.

El desarrollo de un método de ensayo estándar para la detección de defectos empleando la técnica de impacto-eco es difícil en tanto que han de ser tenidas en cuenta una gran cantidad de variables en sus aplicaciones de campo.

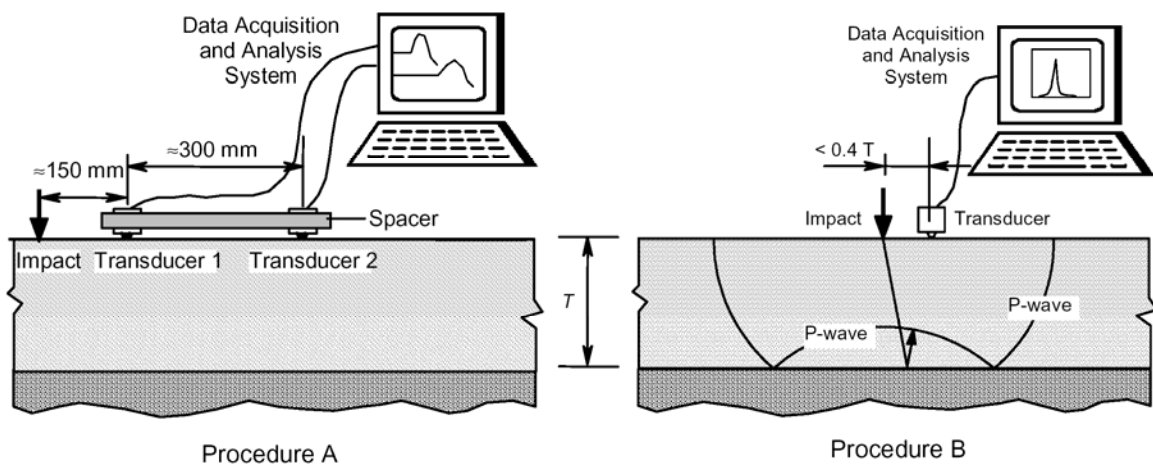


Figura 20.- Procedimiento en dos fases para la medición del espesor de un elemento tipo placa de acuerdo con ASTM C 1383: El procedimiento A es empleado para determinar la velocidad de la onda-P y el procedimiento B es utilizado para determinar la frecuencia asociada con el espesor (thickness frequency)

ASTM C 1383 incluye dos procedimientos:

- El procedimiento A, que se muestra en la figura 20, es empleado para medir la velocidad de la onda-P en el hormigón. Esta medida se basa en la medición del tiempo de viaje de la onda-P entre dos transductores separados una distancia conocida. El fondo de la investigación de esta técnica fue suministrado por Sansalone et al.

- El procedimiento B (figura 20-b) versa de la determinación de la frecuencia asociada con el espesor (thickness frequency) empleando el método de impacto-eco en el cuál el grosor de la placa se calcula usando la medida de la velocidad de la onda-P (calculada mediante el procedimiento A) y la ecuación (6).

Conviene hacer notar que la velocidad de la onda-P obtenida por el procedimiento A ha de ser multiplicada por 0.96 cuando se emplea en la ecuación (6).

En base a limitadas comparaciones entre los resultados de impacto-eco y la longitud de taladros perforados han demostrado que dichos resultados estaban dentro del 3% de las longitudes de los taladros, por lo que presentan una precisión importante.

### **3.3.9.- Ejemplos de aplicación en la rehabilitación del patrimonio.**

A continuación se adjuntan varios espectros de frecuencia extraídos de la investigación llevada a cabo por Afshin Sadri (Andec International Services Corporation) sobre una estructura de obra de fábrica pétreo (figuras 21 y 22).



Figura 21.- Relación de distancia entre la fuente de impacto y el receptor. (Fuente: Afshin Sadri).

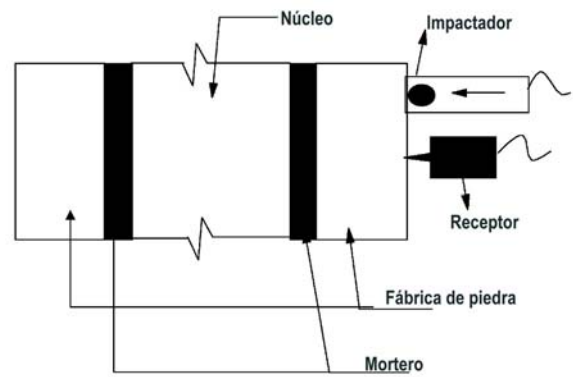


Figura 22.- Esquema de la estructura de fábrica y configuración del ensayo. (Fuente: Afshin Sadri).

En el primer caso (figura 23), la frecuencia máxima dominante en el espectro de 6054 Hz es generada por la interfaz fábrica de piedra-lechada. Un pico de amplitud más pequeña de 1172 Hz es generado por las reflexiones múltiples del lado opuesto del contrafuerte. El resultado indica que la mayor parte de la señal reflexiona en el interfaz piedra-lechada. Parte de la señal de la onda de tensión alcanza el lado opuesto del contrafuerte. Sin embargo, como la frecuencia asociada con el grosor de la pared es muy baja en amplitud, indica que la cantidad de energía que alcanza el lado de enfrente del contrafuerte es muy pequeña.

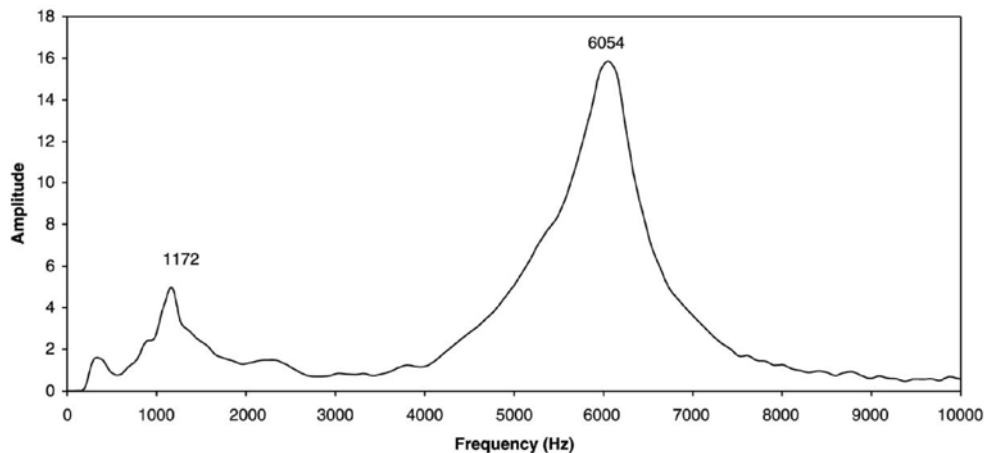


Figura 23.- Espectro de frecuencia. (Fuente: Afshin Sadri).

En el siguiente espectro (figura 24) un valor de frecuencia en 878 Hz indica que la onda de tensión alcanza el lado de enfrente del contrafuerte, sin embargo, los numerosos picos de frecuencia entre 5100 y 7200 Hz indican la presencia de pequeños vacíos y disoluciones detrás de la cara de fábrica de piedra. Este espectro también indica la presencia de vacíos y cavidades dentro del núcleo principal.

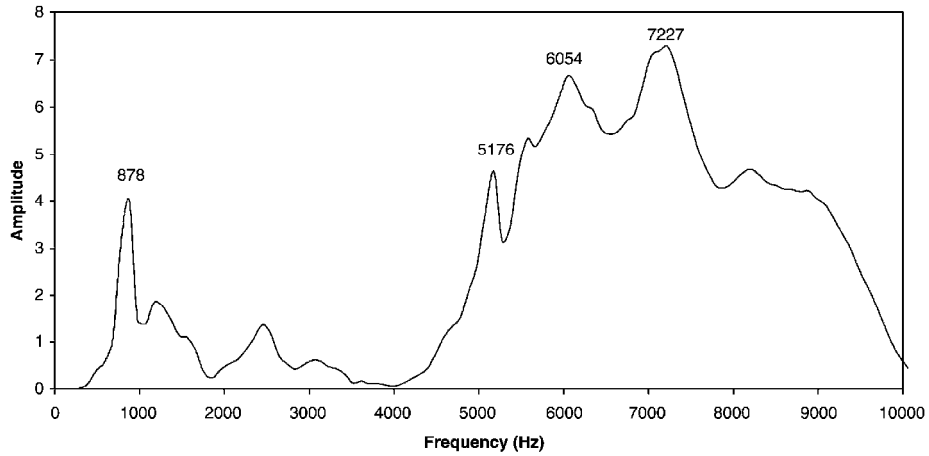


Figura 24.- Espectro de frecuencia. (Fuente: Afshin Sadri).

En el que sigue (figura 25), hay múltiples reflexiones en el lado de opuesto del contrafuerte dando un pico de 1269 Hz, que es alto en amplitud. Esto indica que una parte sustancial de la onda de tensión alcanza el lado opuesto del contrafuerte. El pico máximo en el espectro, 5273 Hz, es resultado de las reflexiones de un defecto dentro del núcleo. Los valores más pequeños de las frecuencia más altas después del pico máximo son generados por la interfase fábrica de piedra-lechada y dentro de la piedra.

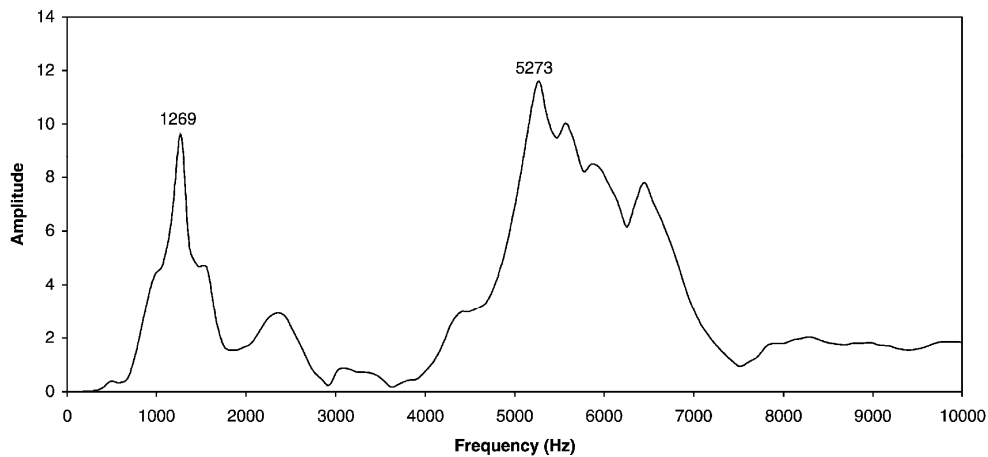


Figura 25.- Espectro de frecuencia. (Fuente: Afshin Sadri).

Finalmente en el espectro representado en la figura 25, la frecuencia máxima del mismo es generada por reflexiones múltiples entre la superficie de ensayo y el lado opuesto del contrafuerte. La mayor parte de la onda de tensión pasa a través de varias capas del contrafuerte sin reflexión de importancia.

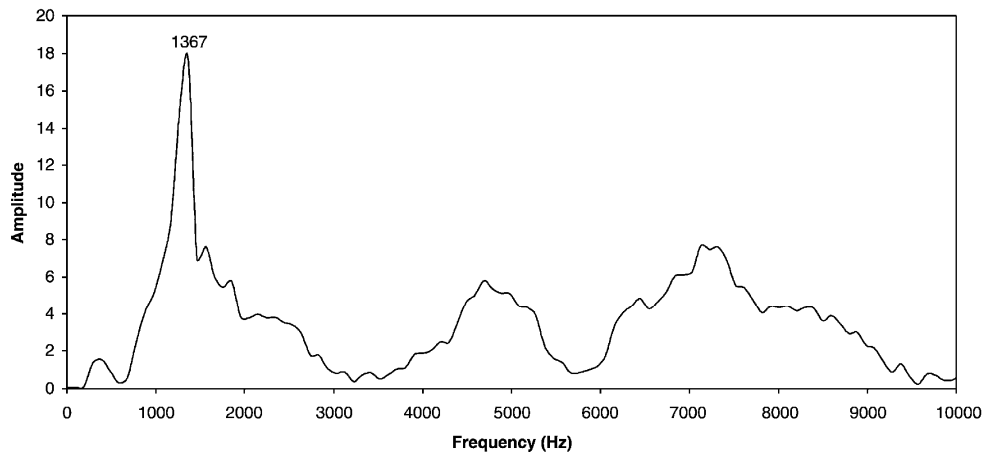


Figura 26.- Espectro de frecuencia. (Fuente: Afshin Sadri).

Cabe aludir a que la velocidad media de la onda P en el contrafuerte y pared fue de 3000 m/s. El grosor medio hallado para las areniscas de fachada fue de 0.13 m, si bien dicho grosor no es constante pues en algunos casos las areniscas encontradas alcanzaron espesores de hasta 0.25 m. Del mismo modo fue detectada la presencia de vacíos y discontinuidades dentro del núcleo de la estructura de fábrica y en las hojas externas de la pared.

### **3.4.- TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA, SÓNICA O DE RADAR.**

De todas las aplicaciones no destructivas las técnicas tomográficas son bastante atractivas por la alta resolución que puede obtenerse. La tomografía, desarrollada en medicina y en otros campos, muestra ser una herramienta a tener en cuenta para ofrecer representaciones en dos y tres dimensiones de las características físicas de un sólido. La tomografía reproduce la estructura interna de un objeto a partir de medidas recogidas desde su superficie externa.

La imagen tomográfica es una técnica computacional que utiliza un método iterativo para el procesado de una gran cantidad de datos.

Los datos de los ensayos ultrasónicos o sónicos pueden ser empleados como datos de entrada de un algoritmo de reconstrucción tomográfica para proporcionar una representación de las propiedades internas de una determinada sección.

Los procedimientos desarrollados para exploraciones geofísicas han sido adaptados para el empleo en fábricas, el enfoque ha mostrado una razonable aproximación del tamaño y extensión de las anomalías internas. Defectos internos como vacíos, grietas y deterioro pueden ser localizados y tallados mediante la imagen tomográfica.

El resultado de la inversión tomográfica es un mapa de una propiedad del material. En el caso de optar por una tomografía de tiempo de viaje (TT) la magnitud medida es el tiempo de viaje de una señal y el mapa obtenido se asocia con la distribución de la velocidad de propagación dentro del objeto. En el caso de la tomografía de amplitud (AT) la magnitud medida es la amplitud de la señal y el mapa se relaciona con la distribución del coeficiente de absorción.

Las técnicas de análisis tomográfico envuelven un considerable esfuerzo para adquirir el extenso conjunto de datos requerido. Una distribución típica de las trayectorias de los rayos y la reconstrucción tomográfica de la velocidad se muestra en la figura 27 siguiente:

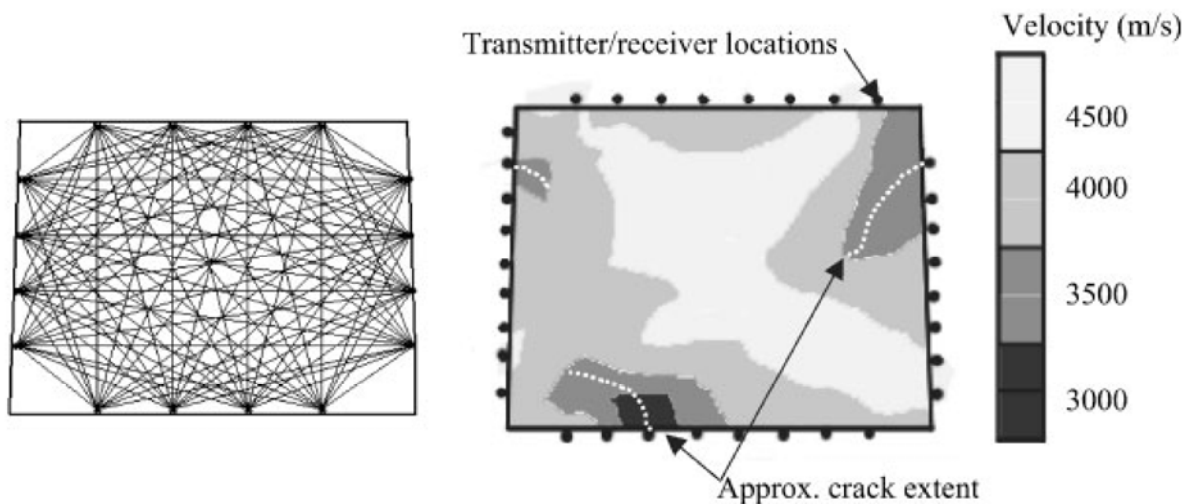


Figura 27.- Los resultados tomográficos mostrados aquí representan el perfil de velocidades a través de una sección de un monumento de piedra. Mediadas de velocidad de pulso ultrasónico tomadas a lo largo de trayectorias representadas a la izquierda fueron empleadas para calcular la reconstrucción de velocidades y para estimar la profundidad de penetración de las grietas superficiales que se muestran a la derecha. (Fuente: Michael P. Schuller).

Por su parte en la figura 28 se muestra una reconstrucción tomográfica, a diferentes alturas, de un pilar de la iglesia de S. Nicoló l' Arena (Binda et al) a partir de los datos obtenidos en una campaña realizada por métodos sónicos.

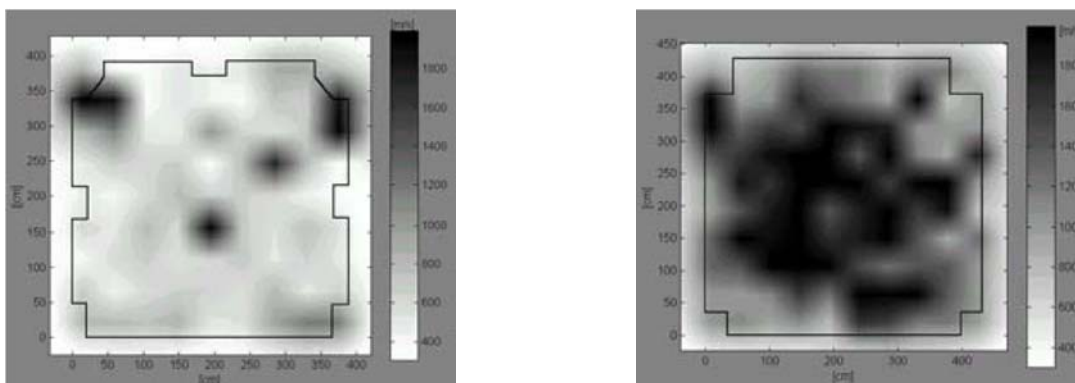


Figura 28.- Tomografía de pulso sónico de un pilar de S. Nicoló l' Arena a diferente altura. (Fuente: Binda et al.)

#### **4.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

1. RILEM MS-D.5, "Measurement of ultrasonic pulse velocity for masonry units and walltes".
2. RILEM MS.D.1, "Measurement of mechanical velocity for masonry".
3. BINDA L., SAISI A., ZANZI L., "Sonic Tomography and Flat Jack Tests as Complementary Investigation Procedures for the Stone Pillars of the Temple of S.Nicolo' L'Arena (Italy)", *NDT & Evaluation Int. Journal*, Vol. 36/4, pp. 215-227, 2003.
4. BINDA L., SAISI A., TIRABOSCHI C. "Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures". *NDT&E International* 34 (2001) 123-138.
5. BERRA M., BINDA L., ANTI L., FATTICIONI A., "Utilitation of sonic tests to evaluate damaged and repaired masonries". *Conf. Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, Boulder, Colorado*, pp. 329-338, 1992.



6. ABBANE S., BERRA M., BINDA L., FATTICIONI A., “Non destructive evaluation of bricks-masonry structures: calibration of sonic wave propagation procedures”, *Int. Symposium Non-Destructive Testing in cvivil Engineering (NDT-CE), Berlino, Vol. 2, pp. 1173-1180, 1995.*
7. SAISI A., VALLE S., ZANZI L., BINDA L., “Radar and Sonic as Complementary and/or Alternative Tests in the Survey of Structures”, *Int. Congr. “More than Two Thousand Years in the History of Architecture Safeguarding the Structure of our Architectural Heritage Bethlehem, (Palestine), Vol. 1, Section 1b, pp. 1-6, 2001.*
8. AFSHIN SADRI; “Application of impact-echo technique in diagnoses and repair of stone masonry structures”; *NDT&E International 36 (2003) 195-202.*
9. RODRIGUEZ LIÑÁN C., RUBIO DE HITA P. “Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos”. *Universidad de Sevilla. Secretariado de publicaciones. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción*
10. DE LA FUENTE CRESPO J., RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ F. J. “Análisis Experimental Mediante Ultrasonidos para la Determinación de la Resistencia de la Piedra”. *Paper ID: 090 /p.1. Guimarães, Portugal.*
11. L. BINDA, A. SAISI, C. TIRABOSCHI, S. VALLE, C. COLLA, M. FORDE. “Application of sonic and radar tests on the piers and walls of the Cathedral of Noto”. *Construction and Building Materials 17 (2003) 613–627.*
12. Nicholas J. CARINO. “The impact-echo method: an overview”. *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 2001. 18 p.*
13. Michael P. SCHULLER. “Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures”. *Structural Masonry. Prog. Struct. Engng Mater. 2003; 5: 239–251.*
14. L. BINDA, A. SAISI, C. TIRABOSCHI. “Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries”. *Construction and Building Materials 14 (2000) 199-233.*

# **APLICACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICAS AL ESTUDIO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO**

**Pere Roca<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Dr. Ing. de Caminos, C. y P. Catedrático de la Universidad Politécnica de Cataluña*

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El análisis profundo de una construcción histórica plantea importantes retos al especialista. Las dificultades derivan no sólo de la necesidad de tratar con geometrías materiales y acciones de gran complejidad, sino también del significado de la historia y la necesidad de relacionar el análisis estructural con los acontecimientos históricos. Parte de las dificultades proviene de la complejidad de las estructuras históricas en términos de materiales, geometría y acciones.

Por una parte, estas estructuras se hallan realizadas en materiales tales como la piedra o la obra de fábrica de ladrillo, cuyo comportamiento mecánico es sin duda muy complejo (y en cualquier caso muy distinto al comportamiento de materiales tecnológicamente más actuales como el hormigón armado o el acero). La obra de fábrica, como material de carácter compuesto y frágil, desarrolla complejos fenómenos mecánicos y resistentes cuya simulación precisa constituye aun un reto para la formulación teórica y la simulación computacional. Por todo ello, los conceptos y métodos de cálculo convencionalmente utilizados para cálculo de construcciones modernas de hormigón armado o estructura metálica, pueden no ser aplicables para el análisis del estado de conservación y de las necesidades de refuerzo de las construcciones históricas.

La modelización del material y de la morfología se ve también dificultada por la imposibilidad efectiva de alcanzar una caracterización completa. Esta imposibilidad resulta, entre otros aspectos, de la necesidad de limitar en lo posible el recurso a la inspección de carácter destructivo y de basar el reconocimiento preferentemente en métodos no destructivos o casi no destructivos, de naturaleza más indirecta. Ciertamente, la información disponible en relación a materiales y composición interna resulta muy limitada en muchos casos prácticos.

Estas estructuras presentan con frecuencia una geometría compleja formada por una gran variedad y multiplicidad de elementos estructurales, incluyendo a muros de carga, contrafuertes, pilares, arcos y bóvedas o cúpulas. La geometría orgánica de muchas construcciones de la obra de fábrica, resultado de una combinación de elementos estructurales unidimensionales o bidimensionales, rectos o curvos, debe ser descrita por medio de una técnica de modelización capaz y versátil.

A todo ello hay que añadir el efecto de acciones muy diversas, de tipo estático, dinámico o cíclico, susceptibles de actuar o aparecer en periodos de tiempo muy largos.

Las estructuras históricas están sujetas a acciones extrañas a nuestra comprensión convencional de la seguridad y las técnicas actuales para la evaluación estructural y resistente. Entre estas posibles acciones están los terremotos o los episodios de viento huracanado de muy largo periodos de retorno, el efecto repetido de terremotos menores o de ciclos térmicos durante espacios de tiempo muy largos. También deben tomarse en consideración a fenómenos físicos, químicos o biológicos desarrollados a largo plazo e implicados en el lento decaimiento de las estructuras. Algunas acciones históricas están directamente causadas por la mano del hombre (como alteraciones arquitectónicas o bien destrucciones causadas por guerras). Junto a las dificultades técnicas que puedan hallarse en

la tentativa de simular numéricamente tales acciones, el técnico topa además con el insuficiente conocimiento de sus aspectos físicos o históricos.

Los efectos acumulativos de tales acciones contribuyen a causar una transformación gradual de la estructura. Las estructuras históricas no son algo inerte ni inmutable, sino algo vivo y siempre cambiante. Debido a la acumulación de daño, la transformación de la estructura deriva normalmente en una mayor sensibilidad y vulnerabilidad, a menos que se practiquen un suficiente mantenimiento y una eventual restauración (los cuales a su vez implicarán ciertas modificaciones). Esta evolución gradual es clara en lo que concierne la geometría debido al aumento constante de la deformación producida por una variedad acciones (fluencia bajo carga sostenida, asientos del terreno, ciclos térmicos...). Las modificaciones de origen antrópico y las reparaciones contribuyen asimismo a esta naturaleza cambiante.

Otra dificultad, asimismo ligada a la historia, reside en la comprensión de los conceptos ligados al diseño y a los métodos originalmente utilizados para erigir las construcciones. Ciertamente, desconocemos en gran medida los objetivos originales, las ideas que inspiraban el diseño y la organización de las estructuras y los procesos constructivos antiguos.

Debido a todo ello, los métodos convencionales del cálculo, así como los criterios convencionales para la evaluación de la seguridad estructural, son apenas aplicables al estudio de construcciones antiguas. Las normas o instrucciones para el diseño estructural orientadas a construcciones modernas, no son directamente aplicables al caso de edificios históricos (tal y como se reconoce en las Recomendaciones del Comité de Iscarsah, 2001).

Es la huella de la historia lo que hace el análisis de un edificio histórico halle tantos retos y lo que a su vez invalida a las aproximaciones más convencionales para el análisis estructural. Sin embargo, la historia es también una posibilidad y una fuente de la comprensión, pues la historia puede ser también interpretada como un experimento desarrollado en la escala real del tiempo y del espacio. El conocimiento de hechos históricos puede proporcionar información empírica preciosa. Por todo ello, al estudiar una construcción antigua es preciso adoptar un enfoque más general que, entre otros aspectos, considere la historia en tanto que fuente de conocimiento. De hecho, es posible concebir una aproximación de carácter general basada en la consideración (e integración) de diversas fuentes de conocimiento, incluyendo la inspección, la historia, la instrumentación y el análisis estructural.

Conviene remarcar que el análisis estructural no constituye más que uno de los varios aspectos que habitualmente integran el estudio completo de una construcción antigua (junto con la inspección, exploración histórica y constructiva, experimentación en laboratorio o in situ, y otros). Por este motivo, y antes que abordarse de forma aislada, el análisis estructural debe plantearse desde una perspectiva de conjunto y en combinación con el resto de actividades. Es preciso tener presente que el análisis resistente de la estructura constituye tan sólo uno de los múltiples elementos o actividades que un estudio dirigido a la restauración o rehabilitación de una construcción puede despertar. Los estudios relativos a la preservación de obras emblemáticas del patrimonio arquitectónico son llevados a cabo por equipos multidisciplinarios integrados por arqueólogos, historiadores, químicos, geólogos, arquitectos e ingenieros estructuralistas. En cualquier caso, el análisis resistente no puede plantearse como una actividad desvinculada del resto; por el contrario, el análisis debe llevarse a cabo desde una visión de conjunto y en interacción con el resto de actividades.

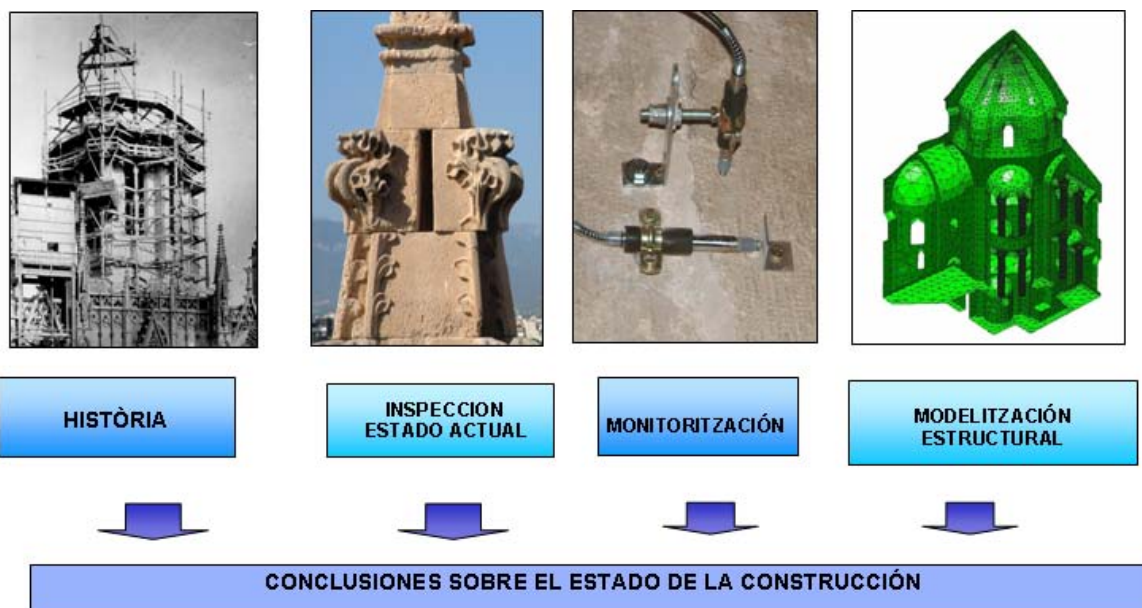
En cualquier caso, y con independencia del tipo de acercamiento practicado, existe un obvio consenso sobre la conveniencia de obtener un conocimiento preciso y, en base a éste, definir una intervención lo más respetuosa posible con la realidad constructiva y resistente del monumento.

## 2.- LOS ELEMENTOS DEL ANÁLISIS

### 2.1.- PRINCIPALES ACTIVIDADES

Entre las múltiples actividades que un estudio de este tipo puede movilizar, la posible experimentación in situ constituye un aspecto de gran interés por su carácter muy informativo. Además, el acoplamiento de la experimentación con el análisis numérico es bien posible y da lugar a una de las principales facetas del moderno acercamiento al estudio de las construcciones antiguas o existentes en general.

Los estudios de estructuras de construcciones antiguas se basan en la combinación de un conjunto de las actividades que incluyen (1) la inspección y caracterización del estado presente de la construcción mediante el reconocimiento de visual y la observación profunda por medio de (preferiblemente) las técnicas no destructivas, (2) la investigación histórica llevada a cabo por historiadores expertos a partir de de la documentación histórica disponible, (3) la instrumentación del edificio por medio de diferentes tipos de sensores y (4) la modelización y el análisis estructural. Estos son, en resumen, los elementos principales del estudio a partir de los cuales puede ser posible extraer conclusiones relativas al estado del edificio y a la necesidad de reparación refuerzo (figura 1).



*Figura 1. El análisis como actividad amplia basada en integración de la investigación histórica, la inspección, la monitorización y la modelización estructural.*

### 2.2.- INVESTIGACIÒN HISTÒRICA

Como ya se ha mencionado, la historia puede ser entendida como un experimento natural ocurrido a escalas geométrica y temporal reales. Este experimento tiene en cuenta el efecto de acciones reales susceptibles de ocurrir en períodos históricos. Por ello, la investigación histórica puede proporcionar indicios importantes para la comprensión de la condición presente o para caracterizar la respuesta del edificio bajo tales acciones. La investigación histórica proporciona información muy significativa y debe ser considerada como una de las fuentes más preciosas de conocimiento. Sin embargo, el uso de información histórica para la mejor comprensión de una estructura antigua no es siempre es posible o inmediato. Las fuentes (tal como los libros disponibles en los archivos de los capítulos de catedrales góticas)

deben ser investigados e interpretado por historiadores especializados. La cooperación y comunicación efectivas entre arqueólogo o historiador y el analista estructural puede hallar ciertas dificultades. No obstante, esta cooperación puede resultar muy provechosa cuando se alcanza una comunicación fluida y se comparten e intercambian objetivos comunes.

Desgraciadamente, una cooperación fructífera entre historiadores e ingenieros o arquitectos no es suficiente para asegurar una interpretación precisa la información extraída de los archivos históricos. Las fuentes históricas proporcionan, en muchas ocasiones, información sólo parcial e inexacta, y raramente de cariz realmente técnico. Por otra parte, no siempre se dispone de documentos o de evidencia histórica de otro tipo referida al proceso construcción o a los avatares experimentados por el edificio a lo largo de su vida. Incluso si existe cierta documentación, posiblemente ésta sólo alcance a proporcionar una información ambigua o muy parcial

A pesar de sus limitaciones, la investigación histórica constituye una valiosa fuente de evidencia sobre el comportamiento del edificio. Seguramente no permita, por si misma, concluir sobre el estado del edificio y de sus necesidades de reparación o refuerzo; sin embargo, la investigación histórica es una de las principales actividades susceptibles de contribuir a un mejor conocimiento del edificio.

### **2.3.- INSPECCIÓN**

La inspección, superficial o profunda, proporciona información cualitativa sobre la condición presente del edificio. Una combinación adecuada de técnicas puede permitir obtener un conocimiento substancial de la geometría, la morfología, los detalles constructivos, los materiales, las alteraciones y reparaciones históricas y el daño existente.

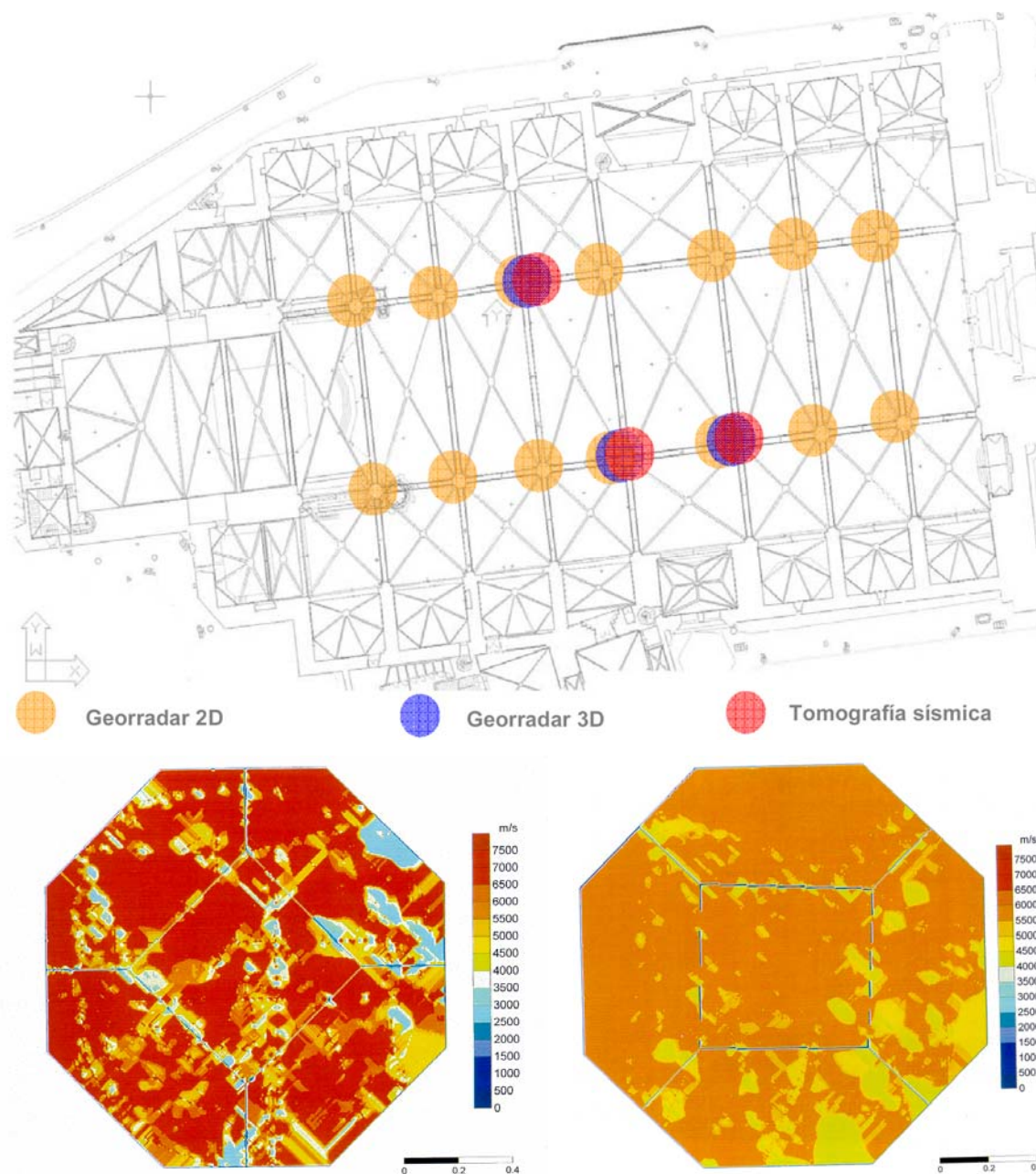
En particular, la inspección puede proporcionar la información esencial sobre geometría, materiales, morfología y daño necesario para la construcción de un modelo estructural suficientemente representativo.

Los ensayos no destructivos son preferibles a los ensayos que impliquen alteraciones de la estructura; si no son suficientes, es preciso valorar el beneficio que se obtendrá haciendo calas o pequeñas intervenciones en la estructura teniendo en cuenta la pérdida de material con valor cultural que ello pueda suponer (análisis de costes y beneficios).

Los ensayos siempre deben ser realizados por personas experimentadas capaces de evaluar correctamente su fiabilidad y deben valorarse cuidadosamente las implicaciones de sus resultados. Si es posible deben utilizarse varios métodos y comparar los resultados. También puede ser preciso realizar ensayos sobre muestras tomadas de la estructura.

En algunas ocasiones, la evidencia proporcionada por la inspección puede permitir una cierta calibración del modelo estructural. Esta calibración puede alcanzarse a través de la comparación de ciertas predicciones del modelo (en particular, el alcance y la distribución de la deformación y el daño) con efectos realmente observados en el edificio. Por ejemplo, una primera constatación de la validez (o la insuficiencia) de un modelo puede obtenerse simulando el efecto de la carga de gravitatoria en el modelo estructural y comparando la distribución de fisuras y deformación predicha por éste con sus correspondientes manifestaciones reales en el edificio. Sin embargo, este tipo de la calibración puede resultar difícil de aplicar en muchas ocasiones debido a que el estado exhibido por el edificio pueden haber resultado de una variedad acciones (además de la gravedad) como efectos térmicos, terremotos, asentamientos, u otros.

En el caso de la Catedral de Mallorca, el uso combinado de diversas técnicas (barridos por radar de impulsos y tomografía sísmica, Caselles et al., 2006) ha permitido determinar la morfología interior de los pilares sin necesidad de generar ningún daño en los mismos (figura 2). Las propiedades de la piedra que forma los pilares ha sido determinada ensayando testigos de piedra tomados de las canteras de las que el material fue originalmente extraído (según ha resultado de la investigación histórica), nuevamente sin causar daño alguno en la estructura. De esta forma ha sido posible definir un modelo completo (que, calibrado en base a las medidas dinámicas, está siendo actualmente utilizado para estudiar la respuesta resistente del edificio ante distintas acciones y particularmente ante el efecto del terremoto (Martínez et al., 2006).



*Figura 2. Arriba: Ensayos no destructivos realizados en los pilares de la Catedral de Mallorca, incluyendo barridos de georadar y tomografías sísmicas. Abajo: Resultado de la tomografía sísmica en dos pilares en forma de distribución de velocidades, el cual revela la constitución interna del pilar: cuatro grandes bloques hexagonales envuelven un gran bloque cuadrado interior.*



## 2.4 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación proporciona información cuantitativa sobre la respuesta de la estructura en un espacio de muy breve (en comparación con la vida de la estructura) y contemporáneo. La instrumentación puede ser entendida como abertura de una pequeña ventana a través de la cual es posible obtener una cierta percepción (incluso cuantitativa) de procesos que se desarrollan a largo plazo (en el tiempo histórico) y que de otra forma resultarían inaccesibles excepto por sus consecuencias finales (figura 3).

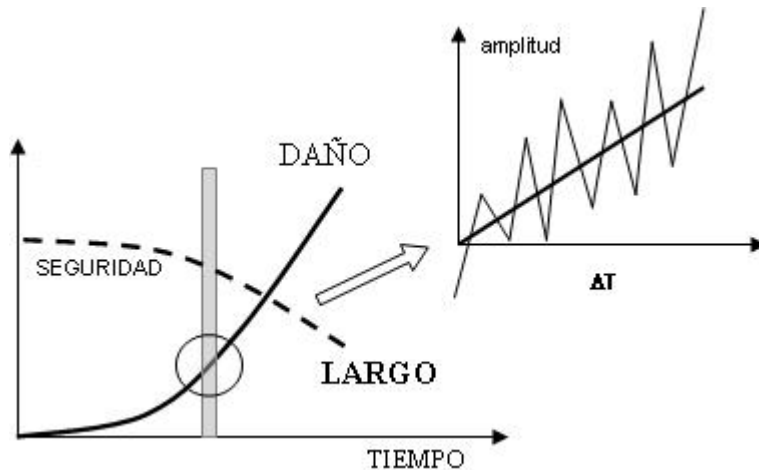


Figura 3. La instrumentación como breve ventana en el tiempo histórico.

En particular, la instrumentación puede permitir el reconocimiento, en un plazo ingenierilmente razonable, de procesos complejos y lentos y así proporcionar información útil para el estudio y la toma de decisiones sobre la reparación y el refuerzo de las construcciones. Sin embargo, la caracterización del daño desarrollado a largo plazo es una tarea compleja debido a la lentitud de los procesos implicado y al hecho de que éstos pueden quedar enmascarados por ciclos o variaciones ocurridas a más corto plazo, como las causadas, por ejemplo, por los efectos térmicos. Para caracterizar los procesos desarrollados a largo plazo la instrumentación debe ser diseñada para permitir una distinción clara entre las componentes reversibles o cíclicas de los parámetros medidos, por una parte, y las componentes de carácter monótonico o acumulativo, por otro lado. La posibilidad de reconocer y diferenciar entre ambos tipos de componentes demanda las siguientes condiciones: (1) La instrumentación debe extenderse en un tiempo suficiente largo que cubra períodos completos de desarrollo de las acciones cíclicas; puesto que las variaciones anuales de la temperatura deben ser consideradas en cualquier caso, el período mínimo aceptable, en un sentido muy estricto, es un año completo. Sin embargo, es conveniente que la instrumentación cubra varios años (al menos cuatro y cuantos más mejor) con el fin de caracterizar adecuadamente las tendencias y analizar su posible evolución a largo plazo. (2) La instrumentación debe diseñarse de forma que permita caracterizar las acciones ambientales ocurridas durante el período estudiado. Esto es en particular aplicable a las acciones climáticas; parámetros tales como la temperatura y la humedad deben ser medidos tanto en el interior y como en el exterior del edificio. La velocidad y dirección del viento en el exterior y las vibraciones producidas por posibles micro-temblores pueden ser asimismo medidas mediante equipos convencionales. El registro del efecto de terremotos de diversa intensidad puede proporcionar información valiosa sobre el comportamiento dinámico del edificio.

Tanto el análisis estructural como la instrumentación manejan cantidades y así permiten una comparación directa. Los resultados de la instrumentación puede ser utilizados para calibrar

un modelo numérico, con tal de que no sólo los parámetros asociados a la respuesta (como las deformaciones, los desplazamientos, las rotaciones o las vibraciones) sean medidos, sino también aquellos relativos las acciones (los efectos térmicos ambientales, tales como temperaturas, humedades, parámetros de viento y vibraciones en la base del edificio). Por otra parte, la simulación mediante un modelo numérico puede ayudar a diseñar una instrumentación provechosa proporcionando criterios para determinar la disposición óptima de los sensores, las variables más significativas o los rangos de variación esperables.



Figura 4. Acelerómetro triaxial (izquierda) y sistema con antena GPS (derecha) instalado sobre un arco toral de la Catedral de Mallorca.

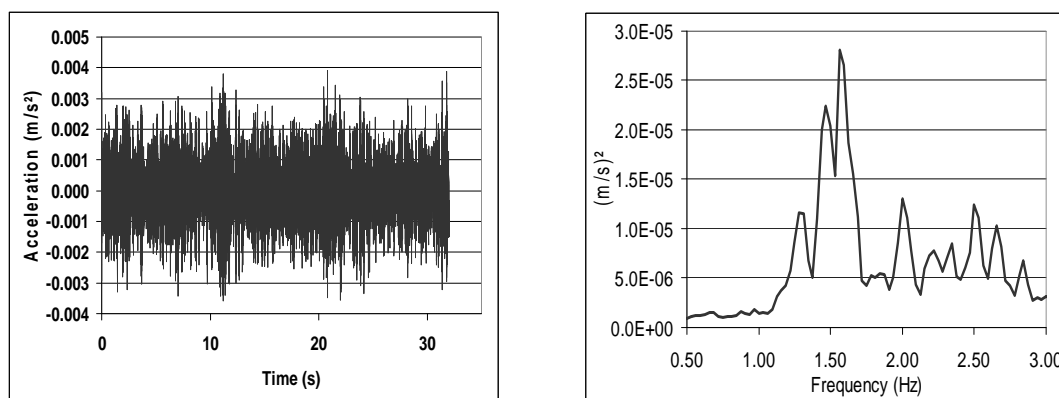


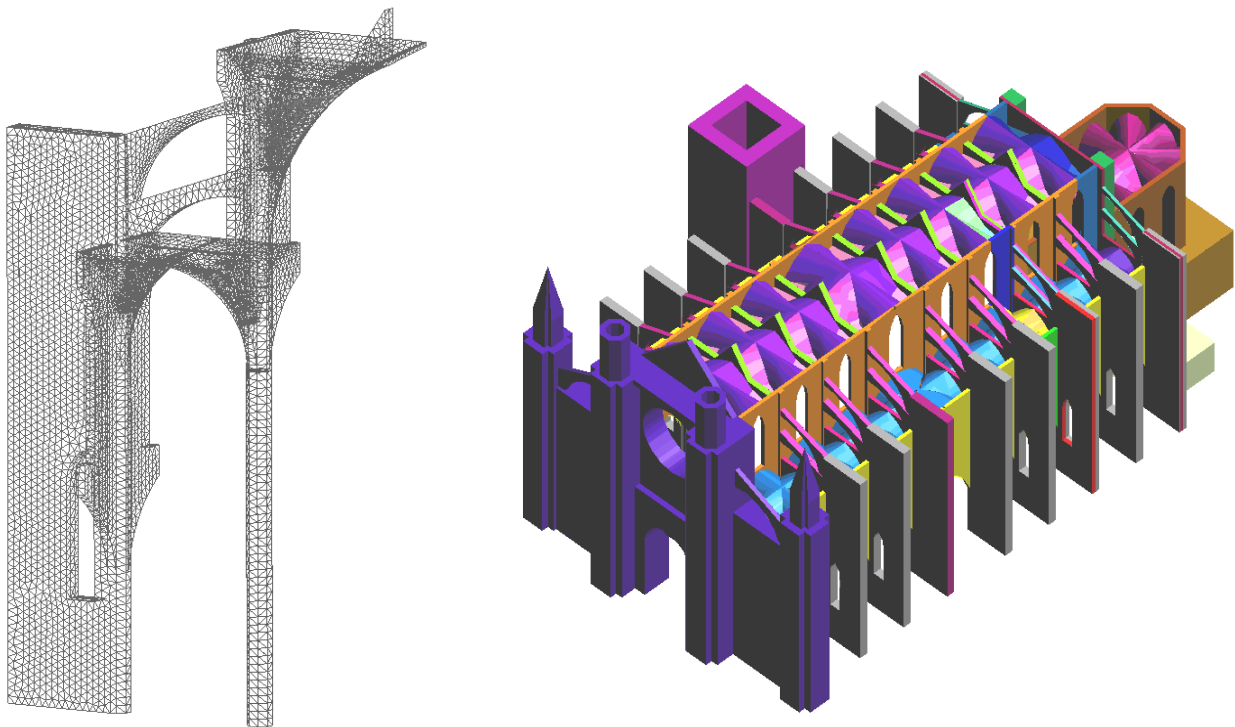
Figura 5. Ejemplo de acelerograma registrado mediante acelerómetro instalado en la Catedral de Mallorca durante la ocurrencia de un terremoto con epicentro lejano (izquierda) y resultado del análisis espectral, revelando la frecuencia de los primeros modos de vibración (en particular, una frecuencia fundamental de 1.28 Hz).

Con la finalidad de caracterizar el comportamiento dinámico de la Catedral de Mallorca y de recabar evidencia experimental que contribuya a la calibración del modelo elaborado, el edificio está siendo instrumentado mediante una serie de sensores para la medida de movimientos, abertura de fisuras, inclinaciones, temperatura, humedad y parámetros de viento. Además de ello se han instalado dos acelerómetros triaxiales (figura 4) conectados a un sistema de antena GPS con el fin de registrar vibraciones en todo momento y particularmente durante la ocurrencia de temblores menores o terremotos lejanos. El análisis de la información obtenida ha contribuido a caracterizar el comportamiento dinámico del edificio (figura 5).

## 2.5.- ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Dadas las peculiaridades de las construcciones antiguas, idealmente el análisis resistente debería integrar las siguientes facultades:

- Descripción precisa de la geometría. La fundamental importancia de la geometría de arcos y bóvedas en su respuesta resistente requiere disponer de técnicas de modelización geométrica suficientemente capaces y versátiles, susceptibles de tratar con precisión elementos curvos en el espacio. Asimismo, el método debe ser capaz de tratar secciones transversales de geometría irregular y compleja (en arcos y pilares, por ejemplo) y compuestas de materiales distintos (como obra de sillería con relleno de mampostería irregular en pilares o en enjutas de arco).
- Descripción precisa de las acciones actuantes, y en especial de la carga gravitatoria y del sismo.



*Figura 6. Modelo local de crujía tipo (izquierda) y modelo global utilizados para el estudio de la Catedral de Mallorca.*

- Adecuado tratamiento del comportamiento real de los materiales. El análisis elástico lineal resulta inadecuado para entender el comportamiento del sistema en condiciones cercanas a la rotura y, como consecuencia, estimar su capacidad resistente ante diversas acciones tales como sobrecargas, viento o sismo. Por ello, se considera importante adoptar ecuaciones constitutivas especialmente desarrolladas para representar el trabajo de los elementos de obra de fábrica de ladrillo y piedra, tales que, al menos, consideren la casi nula capacidad de este material para resistir tensiones de tracción, junto a pertinentes limitaciones de su máxima capacidad a compresión y a corte.
- Incorporación de los fenómenos de no linealidad geométrica producidos por grandes movimientos, dada su demostrada incidencia en el equilibrio y por ende en la capacidad portante de arcos y bóvedas esbeltas.

- Idealmente, el método debería integrar la influencia de la secuencia de la construcción, a partir de un análisis de tipo evolutivo que permitiera tener en cuenta la incorporación o eliminación de elementos constructivos auxiliares o definitivos, así como posteriores modificaciones intervenciones de refuerzo desarrolladas a lo largo de la historia. El estado tensional y las deformaciones finales dependen de la secuencia de acontecimientos constructivos tal y como se han desarrollado en el tiempo. En particular, es de gran importancia el hecho de que los periodos de construcciones de muchos de estos edificios hayan sido muy largos (del orden de decenios o incluso de siglos).

No consta a los autores la existencia de herramientas de cálculo que alcancen a incorporar todos estos factores, siendo por ello necesario que el técnico base su estudio en la combinación de diversas posibilidades antes que en la utilización exclusiva de un único recurso numérico. Además de utilizar distintas aproximaciones teóricas (como análisis límite o macromodelización mediante elementos finitos) puede ser también conveniente trabajar a partir de modelos de distinto nivel de detalle (figura 6). En cualquier caso, es preciso llevar a cabo una interpretación juiciosa de los resultados, basada en la experiencia y en el conocimiento, tal y como ya se ha mencionado, de los hechos históricos.

### **3.- INTEGRACIÓN DE LAS DISTINTAS ACTIVIDADES**

Puesto que los métodos y las teorías convencionales difícilmente podrán ser aplicables al estudio de construcciones antiguas, los técnicos deben basarse su investigación en el enfoque más general basado directamente en el método científico. De hecho, las actividades mencionadas aportan precisamente los elementos necesarios para aplicar satisfactoriamente el método científico. Aplicar el método científico requiere, en primer lugar, formular un conjunto de hipótesis y, en segundo lugar, recabar evidencia empírica con la que confirmar o descartar las hipótesis. Para aplicar el método científico, las hipótesis formuladas deben ser efectivamente susceptibles de una confirmación o refutación.

Parte de las actividades descritas (de hecho, la modelización y el análisis estructural) están relacionadas con la primera etapa del proceso, es decir, a la formulación o adopción de las hipótesis. El modelo, cualquiera que sea su naturaleza (conceptual, analógica, numérica...) viene a constituirse en el recipiente de las hipótesis sobre la naturaleza física y mecánica de la construcción. La historia, la inspección y la instrumentación constituyen principalmente actividades orientadas a la producción de la evidencia empírica necesaria para validar las hipótesis y, en su caso, para refutarlas, corregirlas o mejorarlas hasta el extremo necesario (figura 7).

Un enfoque muy discutible y en contradicción con estas ideas reside en la utilización de la evidencia histórica como única fuente de conocimiento. Ciertamente, la mera constatación de que un edificio se halle en pie constituye una prueba empírica de su viable estabilidad bajo (al menos) la acción de la gravedad. Sin embargo, el significado verdadero de este hecho sólo puede ser completamente interpretado a la luz de un análisis estructural desarrollado a partir de un cierto modelo (conceptual, analógico, numérico) de la estructura. Tal y como ilustran diversos casos reales, algunas estructuras antiguas pueden colapsar tras haberse mantenido en pie durante siglos y sin haber exhibido señales que pudieran alertar de la proximidad del fallo (como en el caso de la Torre Cívica de Pavia o de la Catedral de Noto, ver en Macchi, 1998, Croci, 1998, y Binda et al. 2003). Semejantemente, el hecho que un edificio haya podido resistir algunos terremotos históricos no es suficiente como para concluir sobre su capacidad de resistir futuros terremotos. La seguridad del edificio en estos casos no está garantizada debido el decaimiento estructural (causado por el progreso del daño), las posibles

alteraciones arquitectónicas o estructurales introducidas en el edificio, o a las posibles características particulares del nuevo terremoto (como en el caso de la Basílica de S. Francis de Asís, ver en Croci, 1998). Incluso dado relieve a la historia como fuente de conocimiento, una evidencia experimental y analítica es también necesaria para entender realmente, de manera precisa, el estado y las necesidades del edificio.

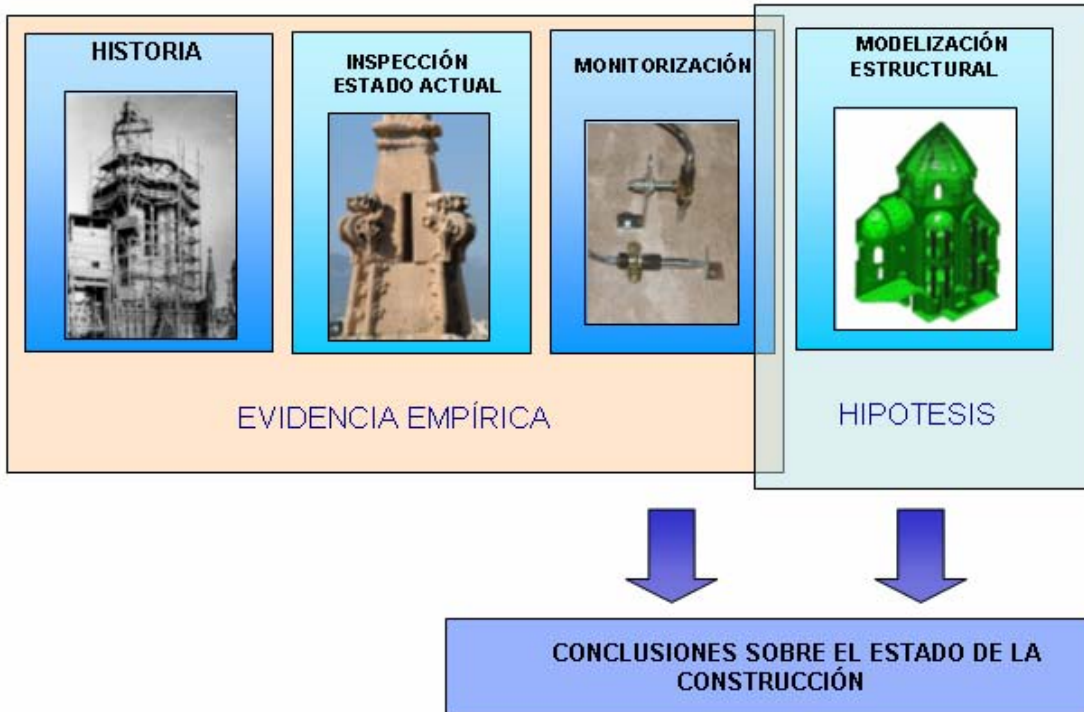


Figura 7. Los elementos del estudio como piezas necesarias para la aplicación de una aproximación científica.

## **4.- CALIBRACIÓN DE MODELOS ESTRUCTURALES**

### **4.1.- ESTRATEGIA PARA LA CALIBRACIÓN**

Una forma de comprobar o calibrar los modelos estructurales preparados para el estudio de construcciones reales reside en la simulación de ensayos realizados in situ y la comparación sistemática de los resultados experimentales obtenidos con las predicciones numéricas. De la coincidencia o de la discordancia de los resultados numéricos y experimentales resulta la validación de los modelos estructurales o la necesidad de mejorar la descripción de su geometría del tratamiento del material.

En este sentido, se alude a dos posibles técnicas. Por una parte, la medida de tensiones y de características deformacionales in situ mediante un ensayo de gato plano. Por otra parte, la ejecución de pruebas de carga dinámicas basadas en la medición de vibraciones ambientales o forzadas.

### **4.2.- ENSAYO DE GATO PLANO**

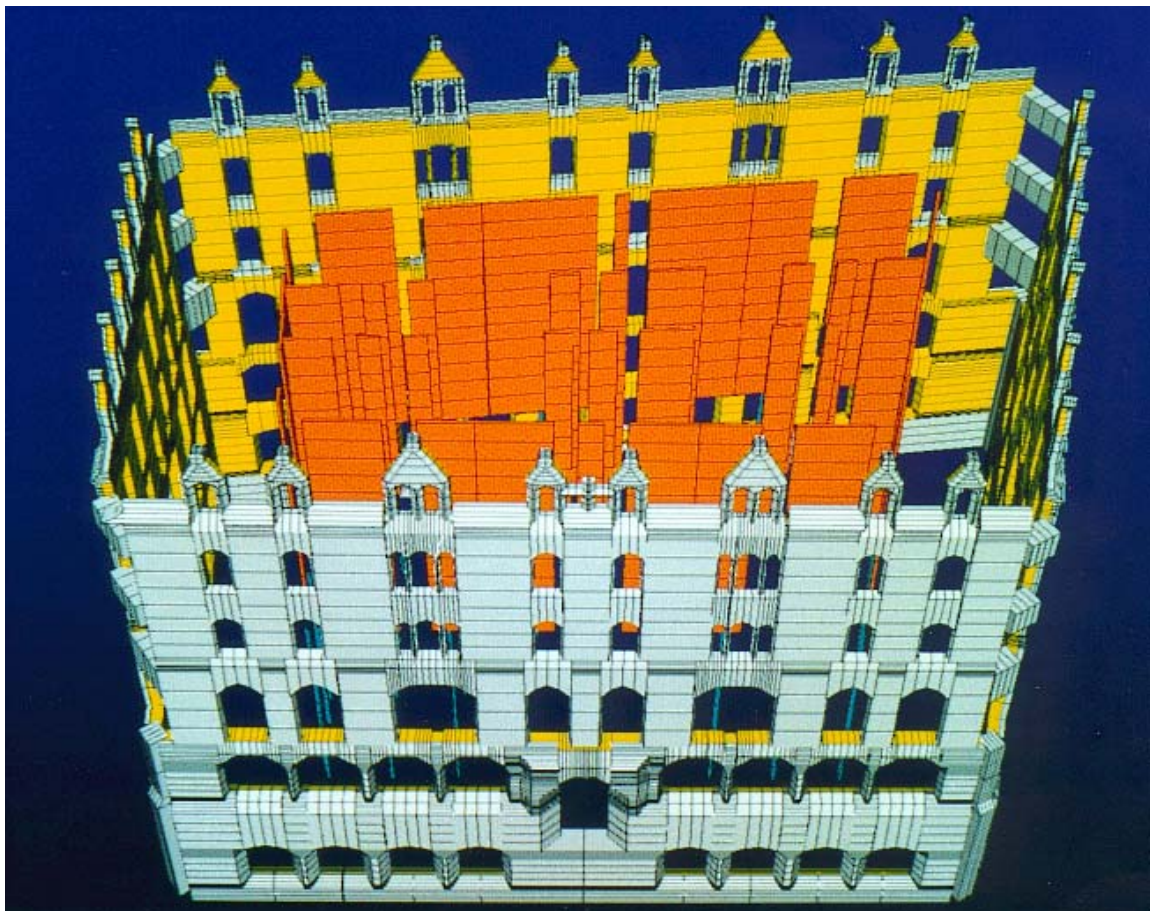
A modo de ejemplo, referimos una de nuestras primeras experiencias en el estudio de una construcción antigua, consistente en el análisis de Casa Botines, de Antonio Gaudí, en León. Para ello se procedió elaborando un modelo estructural para su análisis mediante



Formulación Matricial Generalizada (Molins y Roca, 1998, Roca, Molins y Marí, 2005, figura 8). La principal razón para la elaboración del modelo radicó en el deseo de estudiar la estabilidad horizontal del edificio (puesta en duda por técnicos prestigiosos) bajo el efecto de viento y sismos moderados. Sin embargo, el análisis del edificio bajo el efecto exclusivo de las cargas gravitatorias se mostró de gran interés, permitiendo llevar a cabo una comparación entre predicciones numéricas relativas a los niveles de compresión existentes en distintos puntos del edificio, bajo peso propio, y sus correspondientes valores empíricos medidos in situ mediante el ensayo de gato plano.

A este efecto se realizaron varios ensayos de este tipo siguiendo el método definido por la normativa norteamericana ASTM C1196-91. Tales ensayos se llevaron a cabo en distintos puntos ubicados en las paredes interiores de ladrillo y en los muros exteriores de fachada, y en éstos tanto desde su cara interior de mampostería como desde su cara exterior de sillarejo. Los ensayos fueron realizados por personal del CEDEX.

Como puede observarse en la tabla 1, el cálculo elástico efectuado bajo carga gravitatoria dio lugar a una predicción correcta de los valores de las tensiones de compresión en los lugares en que éstas fueron medidas. Debe tenerse en cuenta que tales valores se ven influenciados por aspectos tales como el carácter compuesto de las paredes, las excentricidades causadas por las cargas aplicadas y por la geometría escalonada de los mismos muros, y por el efecto arriostrante de los distintos forjados. Todo ello parece haber quedado adecuadamente recogido por el modelo.



*Figura 8. Modelo estructural de Casa Botines construido para su análisis mediante Formulación Matricial Generalizada (Roca, Molins y Marí, 2005).*



Tabla 1. Comparación entre las tensiones verticales de compresión predichas por el modelo y medidas experimentalmente in situ en Casa Botines.

Tensiones de compresión (MPa)			
	Ubicación	Medida experimental <sup>1</sup>	Predicción numérica
Paredes interiores (ladrillo)	L1	0,90	0,70
	L2	0,64	0,66
	L3	0,29	0,39
Fachada, hoja de sillarejo	S1	1,01	0,98
	S2	0,94	0,93
Fachada, hoja de mampuesto	M1	0,16	0,22
	M2	0,22	0,25

Localizaciones: L1: principal, ala izquierda; L2: principal, ala derecha; L3: primer piso, ala izquierda; L4: 2o piso, ala izquierda; S1, S2, M1, M2: principal, machones primero y segundo (de izquierda a derecha) en fachada posterior. (Derecha e izquierda se entienden relativas al observador que desde el exterior se dirige hacia la fachada principal).

### **4.3.- ENSAYO DINÁMICO**

El estudio se basa en la comparación del comportamiento dinámico real, medido mediante un ensayo dinámico, con la predicción analítica que surge de la simulación a partir de un modelo numérico detallado. En caso de obtener resultados no adecuadamente coincidentes, en términos de frecuencias propias de vibración o geometría de modos de vibración, el modelo debe ser reconsiderado y mejorado. De esta forma, la prueba dinámica puede utilizarse como criterio para la calibración o corrección del modelo.

En el caso del ensayo realizado en el Puente de Periques en Puig-Reig (Barcelona, figura 9) la excitación del puente se consiguió mediante el paso de un eje de 120 kN de carga total de un camión por encima de un sistema de tabloneros superpuestos formando un escalón de 30 cm. de altura. Las vibraciones así provocadas, apenas perceptibles por las personas, fueron sin embargo perfectamente registradas por los instrumentos de alta sensibilidad utilizados (9 acelerómetros en total). Mediante el post-proceso de la señal temporal y del gráfico de densidad espectral se identificaron las primeras frecuencias naturales del puente y se asociaron a ellas unos ciertos modos de movimiento. En la tabla 2 se recogen estos resultados. Los datos obtenidos en el ensayo permitieron además constatar que las mayores amplitudes registradas correspondían a modos con movimiento predominante en la misma dirección que la excitación suministrada. Por otra parte, la ejecución de un análisis modal a partir de un modelo numérico del puente permitió determinar una serie de modos de vibración con sus frecuencias numéricas. En un primer intento, se observó un cierto desajuste entre las frecuencias experimentales y los correspondientes valores numéricos. No obstante, la aplicación de un proceso de optimización –tomando como variable la

distribución de rigidez en el puente- permitió determinar una configuración satisfactoria ajustada a la evidencia experimental (tabla 2).



*Figura 9. Modos de vibración obtenidos mediante análisis modal de vibraciones a partir de un modelo preparado para el Puente de Periques en Puig-Reig (Barcelona).*

Un método semejante ha sido aplicado para la calibración de un modelo numérico preparado para el análisis de uno de los minaretes más altos del mundo: el Qutub Minar, en New Delhi, construido enteramente en obra de fábrica de piedra durante siglo XIII y de 72 m de altura. El modelo, desarrollado mediante elementos finitos volumétricos (de tipo tetraédrico) reproduce tanto la estructura interior, compuesta por un núcleo y una escalera, como la estructura cónica exterior.

Se disponía de un cierto conocimiento (limitado) de las propiedades de los materiales gracias estudios realizados por tomografía sónica y gato plano en el contexto del proyecto de colaboración Europa-India “Mejora de la resistencia sísmica de los edificios del patrimonio arquitectónico” (ALA/95/23/2003/077-122). La medida de las vibraciones se tomó bajo los efectos exclusivamente ambientales (tráfico y viento). La comparación sistemática de frecuencias experimentales y numéricas ha permitido, como en el caso anterior, obtener un modelo optimizado que se ajusta satisfactoriamente a la evidencia experimental. Para ello, y en base a determinados indicios facilitados por la documentación histórica y la inspección, el modelo fue dividido en tres zonas caracterizadas por materiales de rigidez posiblemente distinta (figura 10). El proceso de análisis llevo a determinar valores de la rigidez de los materiales en cada una de las zonas para las cuales el ajuste entre frecuencias y geometría de modos experimentales y numéricos resultaba optimizado. La tabla 3 compara la serie de frecuencias experimentales y numéricas finalmente obtenidas. Tras esta calibración, el

modelo ha sido utilizado para obtener una predicción de la capacidad de la estructura para resistir un terremoto.

*Tabla 2. Puente de Periques. Frecuencias y modos propios experimentales.*

Modo Predominante	Frecuencia experimental (Hz)	Frecuencia numérica (Hz)	Movimiento
1	4.88	4.61	transversal
2	6.00	6.53	transversal
3	9.50	10.40	longitudinal
4	11.00	11.30	vertical
5	12.75	13.70	vertical
6	14.00	14.80	vertical
7	15.5	16.40	vertical
8	17.5	17.90	complejo
9	18.5	18.70	vertical

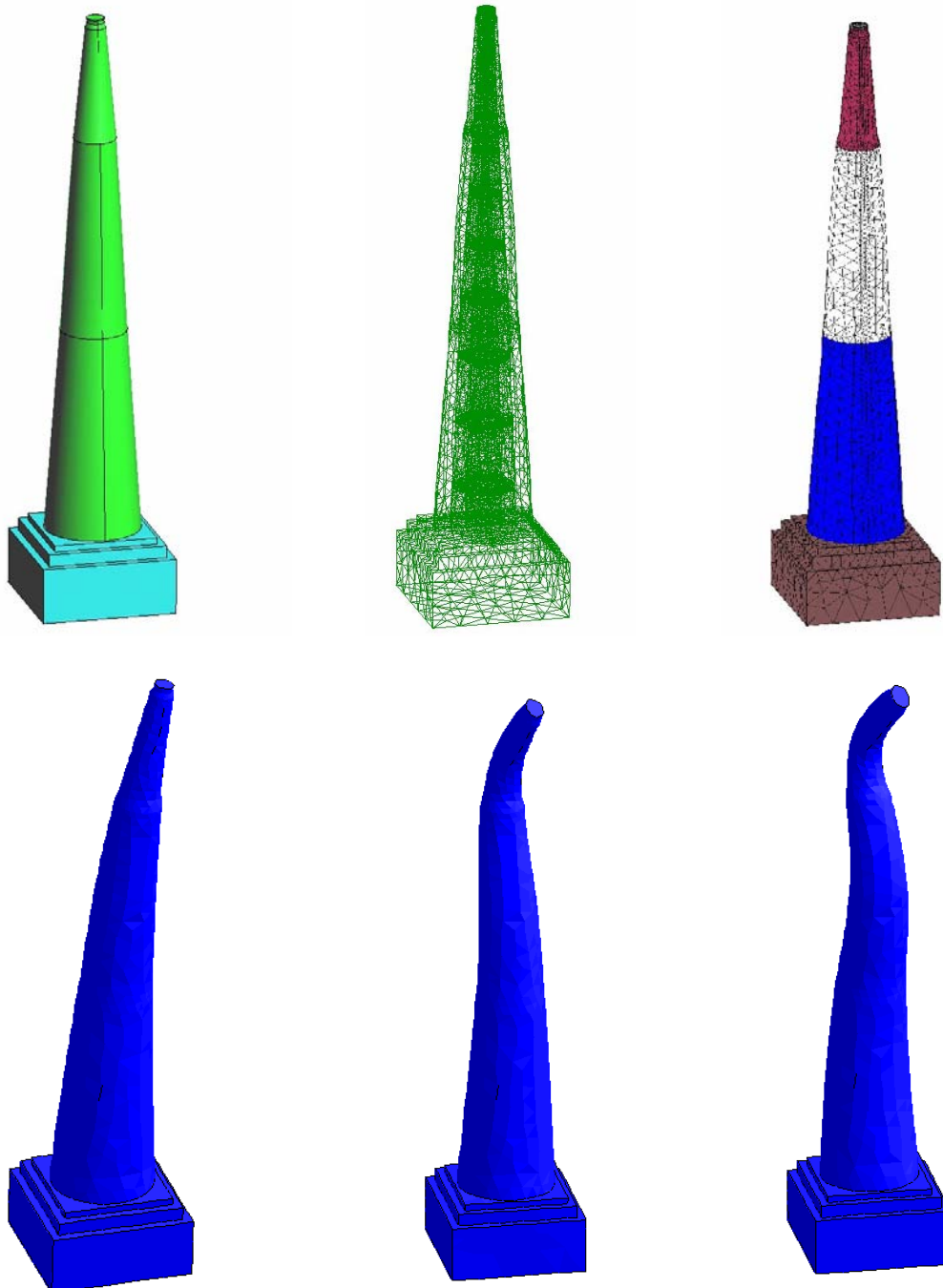
## **5.- NOTAS FINALES**

*Tabla 3. Qutub Minar. Comprobación de frecuencias experimentales y numéricas para el modelo optimizado.*

Modo	Frecuencia experimental (Hz)	Frecuencia numérica (Hz)
1 flexión	0,78	0,824
2 flexión	0,81	0,829
3 flexión	1,97	1,93
4 flexión	2,03	1,94
5 flexión	3,81	3,99
6 flexión	3,91	4,04
7 torsión	4,47	4,37
8 flexión	6,3	6,3
9 flexión	6,09	6,35
10 axial	6,28	5,76
11 torsión	6,84	-
12 torsión	7,06	7,16
13 flexión	8,66	8,66
14 combinado	8,69	8,59
15 torsión	10,5	9,99

Debido a la complejidad que en geometría y morfología, materiales y acciones presentan las construcciones históricas, su estudio requiere una aproximación amplia basada en la combinación de distintas fuentes de conocimiento, entre las que se hallan la investigación histórica, la inspección (superficial y profunda), la instrumentación y el análisis estructural. Estas actividades aportan los ingredientes necesarios para la aplicación de una aproximación

científica, basada en el planteamiento de hipótesis (encerradas en el modelo numérico) y en su comprobación a partir de la evidencia empírica disponible. Una vez el modelo puede considerarse calibrado (siempre con cierta incertidumbre), éste puede ser utilizado para estudiar la respuesta bajo una variedad de acciones. De esta forma, las conclusiones sobre la seguridad de la estructura y sobre sus necesidades de refuerzo resultan de un estudio que combina aportaciones diversas, tanto de tipo cuantitativo como cualitativo, y que en particular integra el posible conocimiento disponible sobre la historia del edificio.



*Figura 10. Modelo de elementos finitos de Qutub Minar y zonificación en zonas de materiales posiblemente distintos en rigidez (arriba). Geometría de los modos de vibración 1º, 3º y 6º (abajo).*

## **6.- REFERENCIAS**

1. *Binda, L., Anzani, A., Saisi, A-. 2003, Failures due to long-term behaviour of heavy structures: the Pavia Civil Tower and the Noto Cathedral. Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture VIII, Southampton: WIT Press*
2. *Caselles, O., Martínez, G., Clapés, J., Roca, P., Canas (2006), J. A. Non-destructive geophysical surveys for dynamic characterization of Mallorca Cathedral. Proceedings o the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.*
3. *Croci, G., 1998, The collapses occurred in the Basilica of St. Francis of Assisi and in the Cathedral of Noto. Structural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona: CIMNE*
4. *Iscarsah Committee, 2001, Recommendations for the analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. ICOMOS International Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage.*
5. *Macchi, G. ,1998, Problems related to the original conception. The case of Pavia Cathedral. Structural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona: CIMNE*
6. *Martínez, G., Roca., P., Caselles, O., Clapés, J., Canas , J. A. (2006). Dynamic investigation and linear análisis of Mallorca Mallorca Cathedral. Proceedings o the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva*
7. *Molins, C., Roca, P. Capacity of masonry arches and spatial frames. Journal of Structural Engineering, ASCE, 124 (6), 653-663.*
8. *Roca, P., Molins, C., Marí, A. R. (2005) Strength capacity of masonry wall structures by the equivalent frame method. Journal of Structural Engineering ASCE, 131 (10), 1601-1609.*

# **DEDUCCIÓN DE ESTADOS TENSIONALES EN SERVICIO EN ELEMENTOS PORTANTES DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO MEDIANTE LA TÉCNICA HOLE DRILLING**

**Santiago Sánchez Beitia<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Dr. en Ciencias Físicas. E.T.S. de Arquitectura de San Sebastián –UPV.*

## **1.- OBJETIVOS DEL EMPLEO DE LA TÉCNICA HOLE DRILLING**

Mediante el empleo de la técnica Hole Drilling se pretende cuantificar las tensiones reales de servicio a la que están sometidas las fábricas de sillería y de ladrillo como elementos portantes en construcciones del Patrimonio Arquitectónico. El método propuesto se enmarca en el campo de los Ensayos No Destructivos (NDT) o Casi No Destructivos (Minor Destructive Testing en terminología anglosajona) para la caracterización in situ de la seguridad o tiempo de vida de una estructura en servicio. Los trabajos que se describen a continuación se han desarrollado al amparo del Proyecto de investigación del Programa de Construcción con referencia BIA2004-05801, financiado por el Plan Nacional de I+D del Ministerio de Educación y Ciencia y de diversas ayudas de la Excm. Diputación Foral de Guipúzcoa.

En la actualidad, además de la técnica Hole Drilling sobre la que se ha realizado una fuerte campaña experimental, se emplea de modo habitual la técnica de los Gatos Planos (Flat Jacks en terminología anglosajona). Esta técnica está considerada como Casi No Destructiva pero en una apreciable cantidad de ocasiones es destructiva para el elemento estructural analizado y por tanto inhábil para ser utilizada en Patrimonio Arquitectónico.

## **2.- FUNDAMENTOS**

La Norma ASTM E837-95 (Ref. 1 y 2), y posteriores actualizaciones, 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 propuesta 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. La Técnica Hole Drilling en Patrimonio Arquitectónico



consiste, por tanto, en adaptar experimentalmente un procedimiento normalizado para la cuantificación de las Tensiones Residuales (tensiones cercanas a la superficie del material). El método propuesto permite deducir las tensiones principales ( $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$ ), y su dirección ( $\beta$ ), a partir de tres deformaciones ( $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ ) registradas en tres direcciones. En la Figura 1 se observa la disposición convencional de tres bandas extensométricas y la zona de taladrado de acuerdo con la Norma ASTM E837-95.

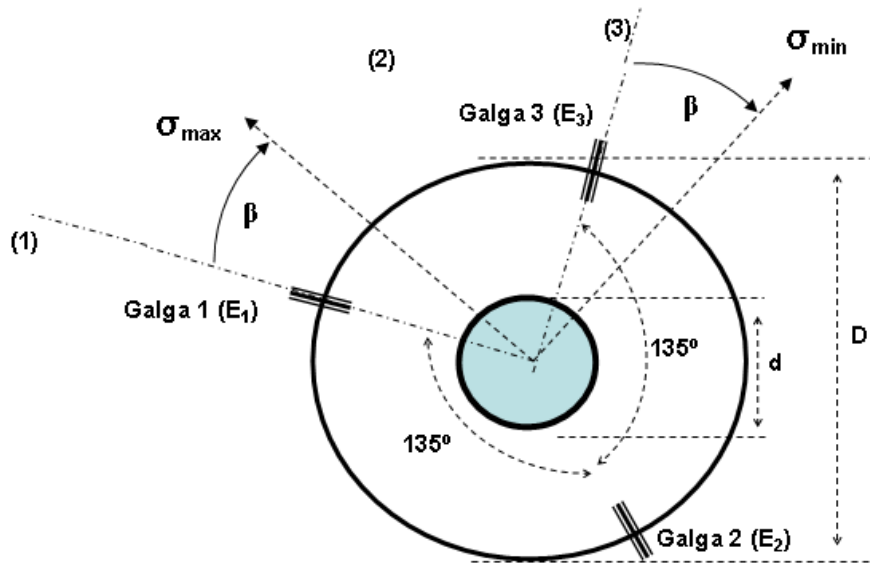


Figura 1. Disposición convencional de las bandas extensométricas y del taladro (círculo central) de acuerdo con la Norma ASTM E837-95. Las galgas 1 y 3 se disponen perpendicularmente entre sí, mientras que la galga 2 se dispone sobre la bisectriz, en el lado opuesto, de dichas direcciones. “ $D$ ” es 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.

### **3.- PREPARACIÓN DE LA ZONA ANALIZADA**

En el caso de fábricas de sillería la zona de medida se elige de tal modo que todo el proceso experimental pueda realizarse en un sillar. Nunca las bandas o el taladro deben de incluir el mortero. Una vez elegida la zona, se pule ligeramente con una pulidora manual convencional. El pulido garantiza que las bandas extensométricas se van a adherir sobre una superficie razonablemente lisa. En la mayor parte de los casos, la superficie del elemento analizado (p.e. pilar, contrafuerte, arco, etc.) presenta irregularidades superficiales o pátinas que son preciso eliminar. En lo que respecta a las fábricas de ladrillo el pulido superficial debe de abarcar una zona tal que asegure que las bandas extensométricas se colocarán sobre un ladrillo (cada una en un ladrillo) y que el taladro se centre en otro. En todo caso, en el análisis de fábricas de ladrillo el taladro abarcará forzosamente mortero y ladrillo.

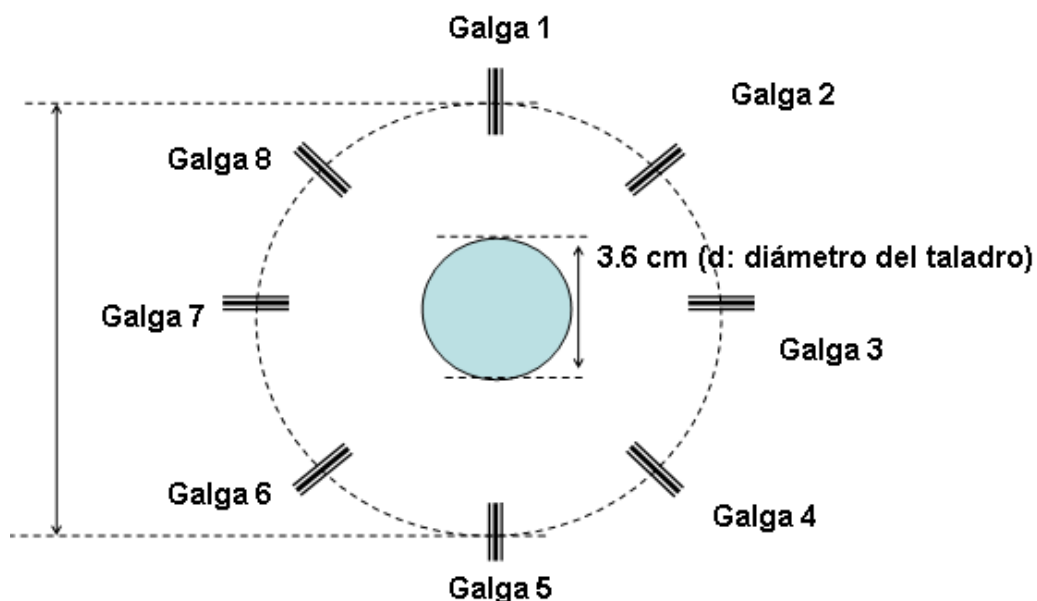
#### **4.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL (REF. 3 A 13)**

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. En vez de utilizar tres bandas extensométricas como propone la Norma ASTM E837-95, para el análisis de las fábricas de sillería se van emplear siempre ocho bandas con el objeto de eliminar o modular posibles errores experimentales. No es posible utilizar un número tan elevado de galgas en fábricas de ladrillo por lo que se empleará el número inicial de tres. La praxis es la siguiente:

##### **i) Elección y pegado de las bandas extensométricas**

Las galgas empleadas son en todos los casos de 6 mm de longitud. Esta dimensión asegura que miden, al menos, diez veces más que el tamaño de grano del material. Sobre la zona pulida se marca un sistema de referencia vertical-horizontal y ocho radios cada 45° en el caso de fábricas de sillería. En cada radio se marcan las zonas de pegado de las bandas que se colocarán sobre una circunferencia de 4 cm de radio. Mediante un pegamento estándar adecuado (1), se adhieren a la superficie del sillar las ocho galgas, cada una sobre un radio (Figura 2). En el caso de fábricas de ladrillo el radio de la circunferencia debe de garantizar que las bandas se colocarán sobre un ladrillo y el centro del taladro se ubicará en otro. Se puede utilizar una circunferencia de 4 cm de radio u otra de 6 cm de radio hasta encontrar al menos tres posiciones adecuadas (Figura 3). En este tipo de fábricas es difícil encontrar más de tres posiciones posibles para las galgas por lo que en general se emplearán tres bandas extensométricas. El producto empleado para el pegado de las galgas es el mismo que el utilizado en la fábrica de sillería. En ambos casos y sobre una zona alejada de la analizada se coloca otra banda extensométrica, que servirá como banda de compensación de temperatura.

(1) Se recomienda utilizar un pegamento específico que se haya empleado en otros trabajos similares (p.e. hormigón). La firma HBM comercializa pegamentos adecuados para roca y ladrillo.



*Figura 2. Esquema de la posición de las ocho galgas en fábricas de sillería (Ver Nota 3).*

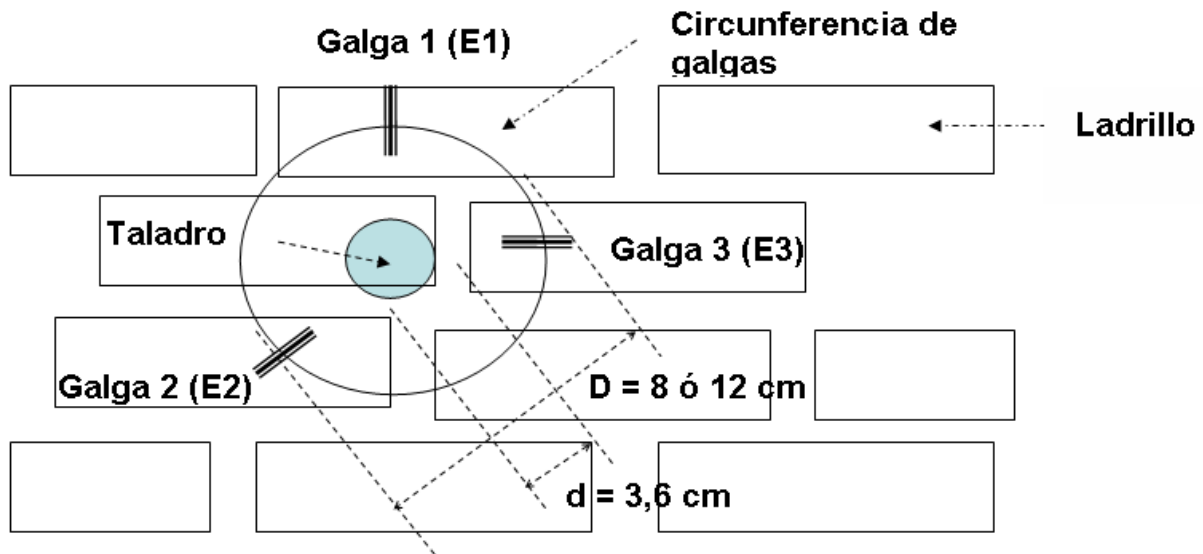


Figura 3. Esquema de la posición de galgas en fábricas de ladrillo (Ver Nota 3).

#### ii) Conexión de las galgas

Una vez adheridas las bandas extensométricas, se conectan mediante “medio puente de Wheastone” a un equipo multicanal de registro de deformaciones. La banda de compensación de temperatura se conecta de igual modo. Esta galga tiene por objeto eliminar efectos térmicos no mecánicos.

#### iii) Registro de deformaciones antes del taladrado

Es conveniente que el comienzo de registro de las deformaciones se realice tres horas, al menos, después de su pegado y cableado. Una vez que las galgas han sido adheridas y conectadas al equipo de medida se registran las deformaciones durante 90 minutos hasta su estabilización. Ésta puede considerarse alcanzada cuando las fluctuaciones captadas en las galgas en función del tiempo son menores, como caso ideal, que  $5 \mu\text{m/m}$  (2).

(2) En zonas cercanas a la existencia de un tráfico intenso o en zonas elevadas y sometidas a fuerte viento estas fluctuaciones pueden ser mayores e incluso estabilizarse alrededor de un valor distinto de cero. Si tiene lugar esta situación se precisa estimar el promedio de las deformaciones durante 90 minutos al menos.

#### iv) Taladrado

Antes del proceso de taladro se dispone el equipo en situación de parada (no apagado), “memorizando” los valores registrados anteriormente. El taladro se realiza mediante un taladro manual de alta calidad al que se le acopla una corona de diamante de 36 mm de diámetro (Figura 4), con una broca trazadora para asegurar el centrado del taladro. La circunferencia de la posición de las galgas y el taladro deben de ser coincidentes. Para asegurar esta coincidencia puede marcarse el centro mediante una broca de diámetro reducido previamente al empleo de la corona de diamante. Es conveniente controlar la posición del taladro con un nivel adherido al útil y ejecutar el taladrado a pasos, con breves paradas entre cada uno, con objeto de no generar un calentamiento excesivo de la zona donde se ubican las galgas. La profundidad del taladro debe de ser 0,4 veces el diámetro de la circunferencia de

galas. Esta profundidad asegura la completa relajación de las tensiones existentes alrededor de la zona eliminada por taladrado. En fábricas de sillería esta profundidad será siempre de 36 mm (3). En el caso de fábricas de ladrillo esta profundidad dependerá del diámetro de la circunferencia de bandas, 36 mm para un diámetro de 8 cm y 50 mm para un diámetro de 12 cm.

(3) La longitud de la zona resistiva de las galgas empleadas es de 6 mm de longitud. A su vez la parte resistiva está integrada sobre un soporte plástico, ligeramente mayor, por lo que la longitud real de las galgas es de 8 mm. Si las galgas se colocan con uno de sus extremos sobre la circunferencia de 8 cm de diámetro, el diámetro real de la circunferencia de posición de las galgas será de 8,8 cm. En el caso de que la circunferencia sea de 12 cm de diámetro esa magnitud será de 12,8 cm.



*Figura 4. Corona de diamante utilizada para el taladro. Por claridad de la imagen se ha extraído la broca trazadora central.*

#### v) Registro de las deformaciones después del taladro

Una vez finalizado el taladro, se registran las deformaciones cada 5 minutos durante 180 minutos. En la gran mayoría de los casos se ha observado una variación asintótica en las deformaciones captadas por las bandas extensométricas hasta su nueva estabilización. En algunos casos se observa una variación asintótica combinada con una senoidal. Las deformaciones válidas para la continuación del proceso son los valores asintóticos después de 180 minutos de realizarse el taladro. En aquellos casos en los que la variación no es perfectamente asintótica se ajustan los valores finales a aquella recta que tenga una pendiente menor que  $1/20$  o simplemente estimar su promedio (4).

(4) El ajuste matemático asintótico deformación-tiempo se puede realizar con una aplicación informática convencional. El valor de deformación elegido será aquél a partir del cual la curva de ajuste alcanza una pendiente menor que  $1/20$ . Este valor es producto de la experiencia y puede considerarse aceptable. En aquellos casos en los que la variación no sea claramente asintótica se acepta como deformación válida el promedio del conjunto de las deformaciones registradas durante los últimos 90 minutos. Si las fluctuaciones registradas

antes del taladro son mayores de +/- 5 um/m o se estabilizan alrededor de un valor diferente de cero, es preciso añadir su promedio a las obtenidas después del taladrado.

## **5.- OBTENCIÓN DE LOS ESTADOS TENSIONALES**

### **5.1.- FORMULACIÓN**

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 la Norma ASTM E837-95 las tensiones principales y sus direcciones se obtienen a partir de las siguientes expresiones (Figura 1):

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= ( (E1 + E3) / A ) - ( ((E3-E1)^2 + (E3 + E1 - 2 E2)^2 )^{1/2} / B ) \\ \sigma_{\min} &= ( (E1 + E3) / A ) + ( ((E3-E1)^2 + (E3 + E1 - 2 E2)^2 )^{1/2} / B ) \quad [1] \\ \beta &= \frac{1}{2} \arctang \left( \frac{ ( E3 + E1 - 2 E2 ) }{ ( E3 - E1 ) } \right)\end{aligned}$$

siendo E1, E2 y E3 las deformaciones registradas a 0°, 225° y 90° con una dirección de referencia,  $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$  son las tensiones principales máxima y mínima respectivamente y  $\beta$  es el ángulo entre  $\sigma_{\max}$  y la dirección de E1 medido en sentido antihorario (también es el ángulo entre  $\sigma_{\min}$  y la dirección de E3). Para la deducción del ángulo  $\beta$  debe de tenerse en cuenta los signos del numerador y del denominador. En la gran mayoría de ordenadores puede emplearse la función ATAN2. De acuerdo con el procedimiento experimental, en el caso de fábricas de sillería se disponen de ocho deformaciones en otras tantas direcciones cada 45°. 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 2):

Combinación 1: Galgas 1 (E1), Galga 3 (E3) y Galga 6 (E2)

Combinación 2: Galgas 2 (E1), Galga 4 (E3) y Galga 7 (E2)

Combinación 3: Galgas 3 (E1), Galga 5 (E3) y Galga 8 (E2)

Combinación 4: Galgas 4 (E1), Galga 6 (E3) y Galga 1 (E2)

Combinación 5: Galgas 5 (E1), Galga 7 (E3) y Galga 2 (E2)

Combinación 6: Galgas 6 (E1), Galga 8 (E3) y Galga 3 (E2)

Combinación 7: Galgas 7 (E1), Galga 1 (E3) y Galga 4 (E2)

Combinación 8: Galgas 8 (E1), Galga 2 (E3) y Galga 5 (E2)

En el caso de fábricas de ladrillo se dispondrá en general de una única combinación posible que dará lugar a un valor del estado tensional (Figura 3).

### **5.2.- DEDUCCIÓN DE LAS CONSTANTES A Y B**

a) Constantes A y B en función de unos parámetros adimensionales, del Módulo de Young y del Coeficiente de Poisson

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 ( $\nu$ ). En este caso las constantes se denominan  $A_t$  y  $B_t$  y se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$A_t = -4 \left( (1 + \nu) / 2E \right) a$$

$$B_t = -4 \left( 1 / 2E \right) b$$

Los parámetros a y b dependen de la geometría experimental y se encuentran tabulados para las dimensiones empleadas en la referida Norma. A continuación se reproduce parte de dicha Tabla (5).

(5) 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 aunque se continúa realizando más comprobaciones. Consecuentemente pueden considerarse válidos en principio los valores tabulados de “a” y “b” para los objetivos de esta Propuesta. No obstante en su versión definitiva estos valores serán ligeramente modificados.

d/D	a	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.*

Los valores del Módulo de Young y del Coeficiente de Poisson se obtienen a partir de ensayos normalizados convencionales sobre muestras de material de calidad similar al analizado in situ. En el caso de fábricas de sillería la obtención de estos valores no presenta dificultad alguna siempre que se pueda conseguir un material similar al que forme parte de un elemento portante en servicio. En el caso de fábricas de ladrillo se dispone de dos posibilidades. Una de ellas es construir y ensayar una probeta de fábrica de ladrillo similar a la que se analice in situ. Otra opción es caracterizar el mortero y el ladrillo mediante ensayos diferentes y emplear uno de los diversos esquemas existentes para obtener las características de la fábrica de ladrillo a partir de las de sus componentes individuales.

#### b) Constantes A y B deducidas experimentalmente

La Norma ASTM propone un método totalmente experimental para la deducción directa de las constantes A y B (en este caso se denominarán  $A_s$  y  $B_s$ ). Sobre una probeta paralelepípedica de similar calidad al material ensayado in situ, se colocan sobre una cara vertical dos galgas en direcciones vertical y horizontal. La posición de las bandas debe de ser idéntica a la disposición empleada en un ensayo in situ. Una vez cableadas y conectadas al equipo de registro de deformaciones, la probeta se somete en laboratorio a una tensión conocida  $\sigma$ , registrando las deformaciones en ambas galgas que se denominarán  $E_{vb}$  (galga vertical) y  $E_{hb}$  (galga horizontal). Con la probeta descargada se realiza un taladro idéntico al realizado en un elemento portante en servicio. Posteriormente la probeta se somete a la



misma tensión  $\sigma$ , registrando una vez más las deformaciones en ambas bandas extensométricas que se denominaran Eva y Eha respectivamente. Las constantes As y Bs se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$A_s = 4 ((E_{ha}-E_{hb}) + (E_{va} - E_{vb})) / (2 \sigma )$$

$$B_s = 4 ((E_{ha}-E_{hb}) - (E_{va} - E_{vb})) / (2 \sigma )$$

Esta operación puede realizarse tanto en fábricas de sillería como en fábricas de ladrillo. No obstante en ese caso debe de tenerse en cuenta que el taladro debe de abarcar una proporción similar de mortero y ladrillo al que se produce en la fábrica analizada en servicio. Este es un tema que va a requerir un exhaustivo trabajo experimental en el próximo futuro.

### **5.3.- DEDUCCIÓN DE LAS TENSIONES EN SERVICIO**

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, puede 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 correspondientes 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 (6).

(6) En el marco del Proyecto BIA2004-05801, se está analizando la posibilidad de detectar a priori las deformaciones que son anómalas, reduciendo su impacto sobre los valores de los estados tensionales. Se están investigando diversas opciones con perspectivas de éxito pero no es posible por el momento proponer un método contrastado.

## **6.- UN CASO CONCRETO: LA IGLESIA DE SAINT JAKOBS EN LEUVEN (BÉLGICA)**

La Iglesia de Saint Jakobs (Figuras 5 a 9) presenta, como en la mayor parte de los casos, diversos elementos correspondientes a las diferentes etapas constructivas. Del período constructivo inicial se puede observar la Torre de estilo románico con añadidos góticos. La mayor parte del resto de los elementos constructivos conservan el formalismo gótico (arbotantes, contrafuertes y bóvedas) de los siglos XIII y XIV. En otros elementos añadidos se detectan estilos renacentista y posteriores. La Iglesia se encuentra cerrada al uso público desde mediados de los años sesenta del pasado siglo debido a su alarmante estado estructural, originado por asentamientos diferenciales entre diferentes partes del Templo. Interiormente los elementos portantes se encuentran totalmente apeados desde entonces e incluso exteriormente se han substituido los arbotantes por una ligera estructura metálica de urgencia. La ciudad de Leuven fue un importante nudo del Camino de Santiago desde los Países Bajos,

en el que la Iglesia de Sain Jakobs tuvo especial relevancia. Hoy en día la denominación de las vías urbanas donde se ubica recuerda este hecho (Pelgrimstraat) detectándose un especial apego de la ciudadanía por el Templo. En la actualidad, se pretende recuperar la Iglesia de Saint Jakobs para uso público (auditorio, salas de exposiciones, etc.) por lo que se ha encargado al Departamento de Ingeniería Civil de la KULeuven (Universidad Católica de Lovaina), la realización de los estudios estructurales necesarios que conduzcan a la diagnosis completa del monumento y a la propuesta de las medidas de intervención apropiadas. Se pretende que en un período de tiempo razonable se pueda reabrir el Templo con otros usos. Los trabajos están en fase de realización y en este contexto se han analizado dos pilares de la Iglesia de Saint Jakobs mediante la Técnica de Hole Drilling. Uno de ellos se encuentra bajo el coro a los pies del Templo mientras que el otro es el de esquina de la nave central y el transepto. Las tensiones para ambos pilares se muestran en Figura 15.



*Figura 5*



*Figura 6*



*Figura 7*



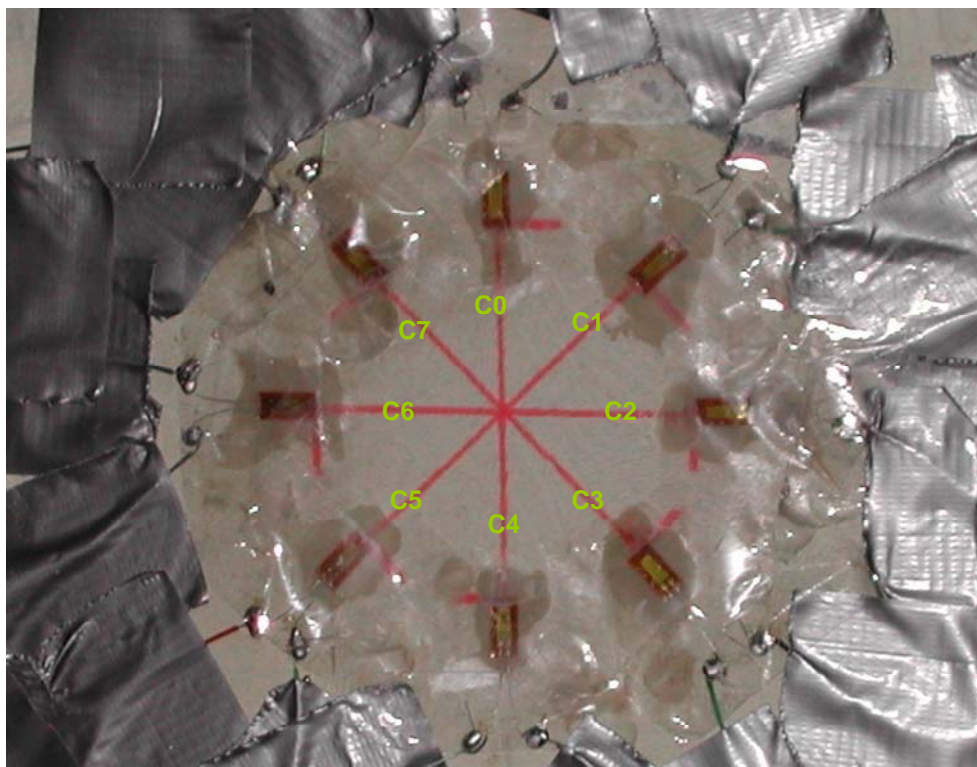
*Figura 8*



*Figura 9*

**Pilar bajo el coro**

Las bandas pegadas y conectadas se muestran en la Figura 10 mientras que en la Figura 11 se muestran las deformaciones registradas a lo largo de todo el ensayo. La Figura 12 muestra las deformaciones en una representación polar.



*Figura 10*

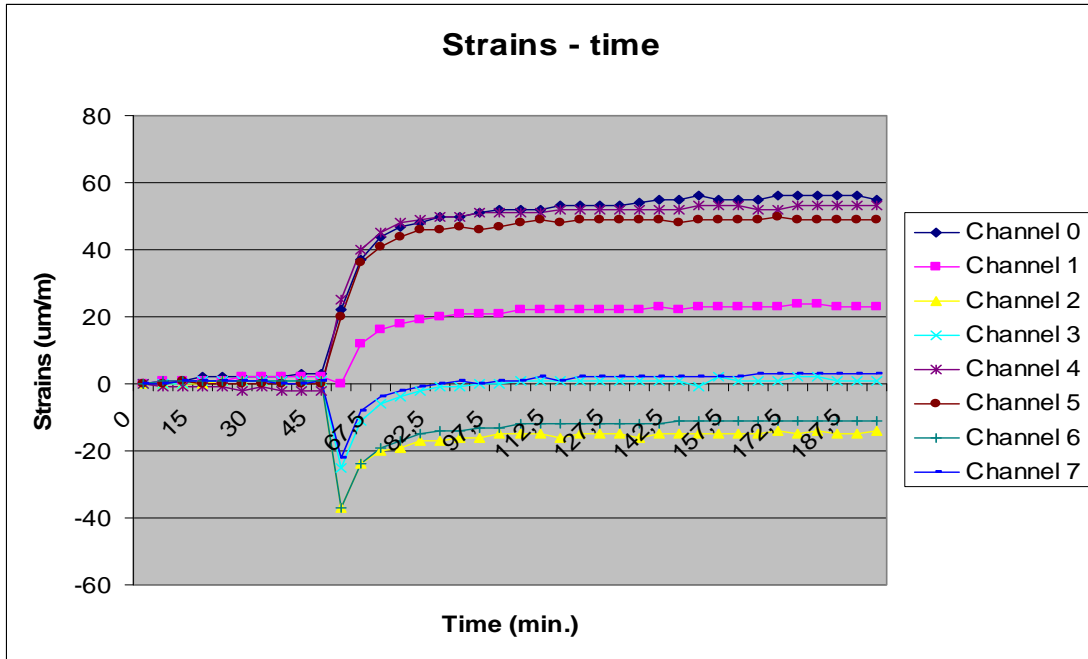


Figura 11

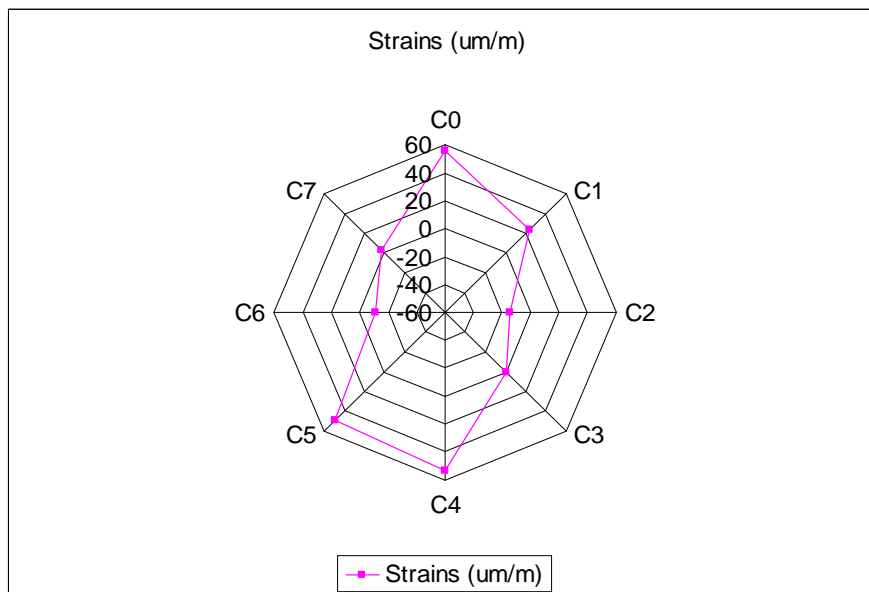


Figura 12

**Pilar en el encuentro sur de la nave central y el transepto**

Las Figuras 13 y 14 muestran los resultados en las ocho bandas extensométricas.

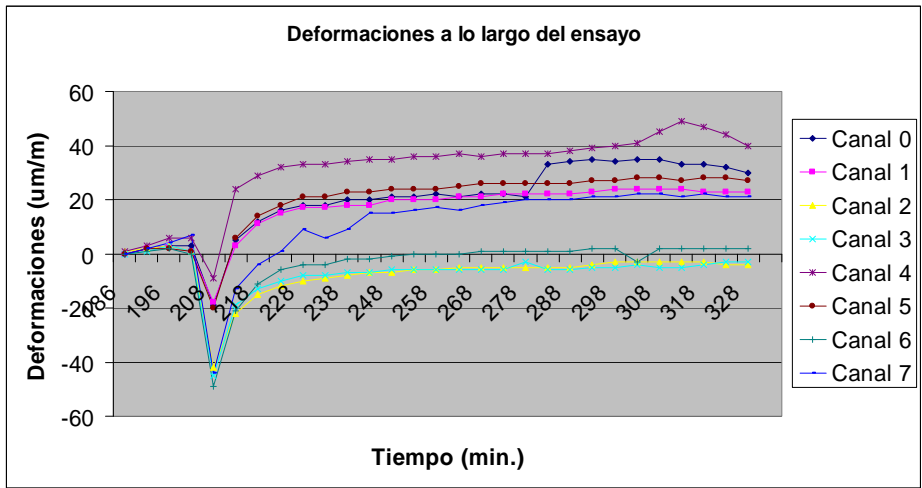


Figura 13

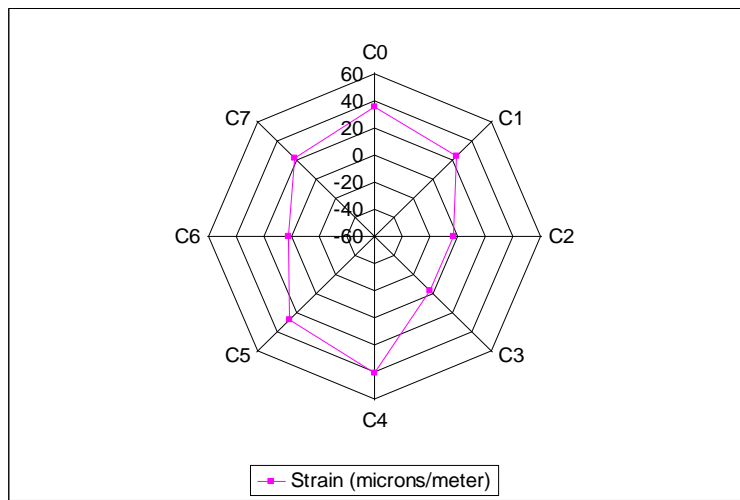


Figura 14

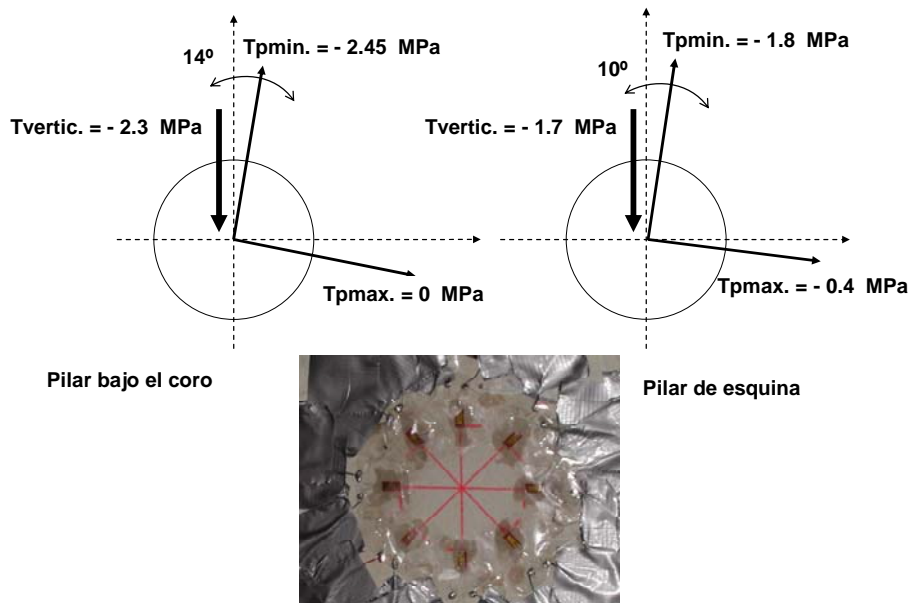


Figura 15



## **7.- DISCUSIÓN**

### **7.1.- VENTAJAS DE LA TÉCNICA**

En la actualidad únicamente se encuentran apoyadas mediante Normalización, la técnica Hole Drilling y la Técnica de los Gatos Planos (Flat Jacks) para la medida de tensiones en elementos portantes del Patrimonio Arquitectónico (Ref. 14). Esta técnica es destructiva para el elemento portante, permitiendo deducir únicamente tensiones a compresión en una dirección perpendicular al gato plano. La técnica propuesta permite deducir un estado tensional plano completo, con un daño sensiblemente inferior sobre el Patrimonio Arquitectónico siendo posible obtener, además, estados a tracción.

### **7.2.- DIFERENCIAS CON RESPECTO A LA PRAXIS CONVENCIONAL DE NORMA ASTM E837-95**

Como ha sido mencionado, en origen, esta Norma se emplea para la deducción de las Tensiones Residuales que se manifiestan en superficie por lo que las dimensiones experimentales son del orden de milímetros. Para esta aplicación, el procedimiento se realiza en general, sobre muestras en posición horizontal lo que permite disponer de útiles estándar de taladrado que se posicionan fácilmente sobre la muestra. El diámetro del taladro es del orden de 1 mm que se realiza de modo concéntrico con una roseta de tres galgas de 1,5 mm de diámetro. Estas rosetas se sirven en formato estándar prefabricadas. Tanto el objeto final de la técnica propuesta como el procedimiento experimental que contiene, son por tanto muy diferentes a la técnica aquí descrita. Únicamente el concepto de eliminación de material por taladrado es común para ambos procedimientos experimentales.

### **7.3.- SOBRE EL CARÁCTER LOCAL DE LA TÉCNICA HOLE DRILLING**

En medios científicos donde se ha presentado la técnica propuesta se menciona, como su mayor inconveniente, el carácter local de los estados tensionales deducidos. Éstos son los estados existentes en las cercanías del taladro y no representan a priori el estado general o global de un elemento portante (p.e. pilar, contrafuerte, etc...). Existen diversas opiniones que contradicen a este inconveniente. La carga sobre un elemento portante se transmite hasta un sillar a través de los que se encuentran adyacentes a él. La heterogeneidad que constituye la junta de los sillares disminuye muy rápidamente dentro de un sillar, siendo esperable que el estado tensional transmitido esté presente de modo uniforme en el sillar a partir de una corta distancia desde la junta. Por otra parte el mortero juega un papel de acomodo de la transmisión de la carga puesto que sus características mecánicas así lo permiten. Muy pocas fábricas en Patrimonio Arquitectónico se construyen a hueso.

Recientemente se han encontrado situaciones en el beneficio de este carácter local cuando los datos experimentales se comparan con métodos analíticos basados en la obtención de Líneas de Presiones.

### **7.4.- SOBRE LA CASUÍSTICA**

El Proyecto de Investigación del Programa de Construcción del Plan Nacional de I+D con referencia BIA2004-05801 es continuación de otros dos anteriores financiados por el mismo Plan Nacional con referencias 2FD97-0013-CO2-01 y MAT2000-0059-P4-02. Por otra parte, durante los pasados años se ha obtenido financiación de diversas entidades (Caja España,



Gobierno de la Rioja, Universidad del País Vasco, Ayuntamiento de Fuenterrabía y Diputación Foral de Álava) para analizar las tensiones en servicio en fábricas de sillería y ladrillo en diferentes Conjuntos Monumentales. La relación de aplicaciones prácticas de la técnica Hole Drilling es la siguiente: Catedral de Santa María de Vitoria, Casa Botines de León, Acueducto del Sultán El Ghouri en El Cairo, la Iglesia de la Asunción del Monasterio de Yuso en San Millán de la Cogolla, Murallas de Fuenterrabía (Guipúzcoa), Colegiata de Toro, Iglesia-Fortaleza de Turégano (Segovia), Palacio Privado en Carrera 25, Altes Museo de Berlín (Ref. 13 y 15), Catedral de Tarazona (Zaragoza), Catedral Gótica de Barcelona, dos muros de fábrica de sillería de ladrillo y de ladrillo construidos de modo específico y ensayados en laboratorio y recientemente en la Iglesia de Sain Jakobs de Leuven (Bélgica). En el Proyecto del Plan Nacional de I+D con referencia 2FD97-0013-CO2-01 se puso a punto la Técnica Hole Drilling sobre 16 sillares individuales, en el Proyecto de Referencia MAT2000-0059-P4-02 se puso a punto el método en muros de fábricas de sillería y ladrillo, construidos al efecto, y en la actualidad está previsto aumentar la casuística con otros siete monumentos, según consta en la Memoria aprobada en su momento del Proyecto BIA2004-05801 actualmente en curso.

## **8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

[1] *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM E837-95 Standard. American Society for Testing Materials.*

[2] *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM E837-01 Standard. American Society for Testing Materials.*

[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.. *Stress Measurements on Ancient Structures. Proc. de Int. Conf. on Residual Stresses, ICRS4, Experimental Mechanics Society, Baltimore, 1994, pp.290-294.*

[5] Barrallo J, Zulueta A, Sánchez Beitia S. *Stress Measurements on Rock Structures : A Building by the Architect Antoni Gaudi. Proc. de Mechanical Behavior of Materials-VII, A. Bakker-Delft, Delft Univ. Press, 1995, pp.145-146*

[6] Barrallo J, Zulueta A, Sánchez Beitia. *Stress Measurements on Historical Buildings by the Hole Drilling Method In Brebbia C. editor. Proceedings of STREMAH 95. San Sebastián, 1995. p. 255-261.*

[7] Barrallo J, Zulueta A, Sánchez Beitia. *The Hondarribia City Walls. In Brebbia C, Sánchez-Beitia S, editors. Proceedings of STREMAH 97. Donostia-San Sebastián, 1997. p. 559-565.*

[8] Barrallo J, Zulueta A, Sánchez Beitia S. *El Metodo Donostia para la Medida de Esfuerzos en Servicio en Patrimonio Arquitectónico. Ingeniería Civil 1999, 114: 37-43.*

[9] 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.*

[10] Barrallo J, Zulueta A, Sánchez Beitia S. *Métodos de Análisis de Cargas en Patrimonio Arquitectónico. Ingeniería Civil 2001; 121: 103-108*

[11] *Sánchez Beitia, S. Métodos de Análisis de Cargas en Patrimonio Arquitectónico. RESTAURAR LA MEMORIA (pp. 298-303). Ed. Fundación del Patrimonio Histórico de Castilla y León. VALLADOLID (España). 2001.*

[12] *Barrallo J, Zulueta A, Sánchez Beitia S. El Método Donostia en torno a los 20 kg/cm<sup>2</sup>. Ingeniería Civil 2002; 125: 113-123*

[13] *Sánchez Beitia S. Stresses analysis at the Altes Museum of Berlin by means of the Hole Drilling Technique. Construction and Buildings Materials 2006 (Aprobado y pendiente de fecha de aparición en formato impreso).*

[14] *Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements. ASTM C 11Standard. American Society for Testing Materials.*

[15] *Final Report of the European Project ONSITEFORMASONRY con referencia EVK4-CT-2001-00060 (No publicado).*

# **METODOLOGÍA PRÁCTICA DE DOS TÉCNICAS INUSUALES: LOS GATOS PLANOS Y EL IMPACTO-ECO**

**Prof. Jorge Ley Urzaiz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Director del Área de Ensayos Estructurales del Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC)*

## **1. ENSAYO DE GATO PLANO**

El ensayo de gato plano (o de gatos planos) es la técnica más utilizada para la evaluación no destructiva de algunas propiedades mecánicas en estructuras de obra de fábrica.

Si las características del elemento estructural lo permiten, el ensayo de gato plano puede aportar una valiosa información sobre el estado tensional del elemento y también nos puede proporcionar una estimación de la deformabilidad de los materiales que conforman dicha estructura.

Esta técnica fue desarrollada en el campo de la mecánica de rocas y finalmente fue modificada y adaptada por el Profesor Rossi en Italia con el objeto de aplicarla a estructuras de fábrica de ladrillo y mampostería.

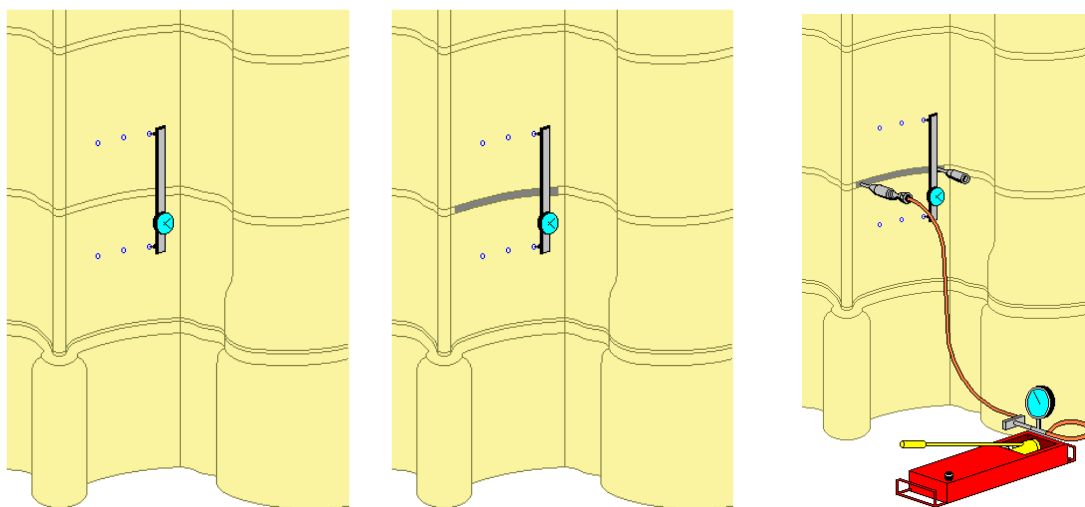
El ensayo de gato plano se considera una técnica no destructiva ya que una vez finalizado el ensayo basta reparar la zona de corte con un mortero para restituir la situación original.

### **1.1 ESTIMACIÓN DEL ESTADO TENSIONAL DE COMPRESIÓN:**

El ensayo se encuentra recogido en la norma ASTM C 1196/91 “In situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flat –Jack Measurements”.

La estimación del estado tensional del elemento estructural se consigue midiendo la deformación liberada en un plano de corte ortogonal a la superficie del elemento, estando situado el plano de corte en una de las capas de mortero existente.

Previamente a la realización del corte se han fijado unas bases para la medida con extensómetro y determinado la longitud inicial entre bases. Una vez realizado el corte se introduce el gato plano en la “incisión” y se aplica presión hasta recuperar la longitud inicial. En las figuras y fotografías siguientes podemos observar el proceso:



*Figura nº 1*



*Ensayo para la estimación de nivel tensional.*

La capacidad operativa de los gatos comercialmente existentes esta alrededor de los 7 Mpa. El estado tensional del elemento ensayado es directamente proporcional a la presión inducida en los gatos planos corrigiéndola por un factor propio de la calibración de los gatos y otro factor que relaciona el área del gato y el área del corte realizada.

## **1.2 ESTIMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDAD DE LA FÁBRICA.**

Si lo que se persigue es obtener las características de deformabilidad de la fábrica ensayada lo que se hace es colocar las bases para la medida con extensómetro entre dos ranuras ejecutadas en tendeles paralelos.

Se introducen dos gatos en cada una de las ranuras y se va aplicando carga y leyendo las deformaciones que sufre la fábrica. La norma ASTM C 1197 “ In situ Measurements of Masonry Deformation Properties using Flat-Jack Method” especifica la metodología a seguir.

En las fotografías siguientes podemos observar el proceso:

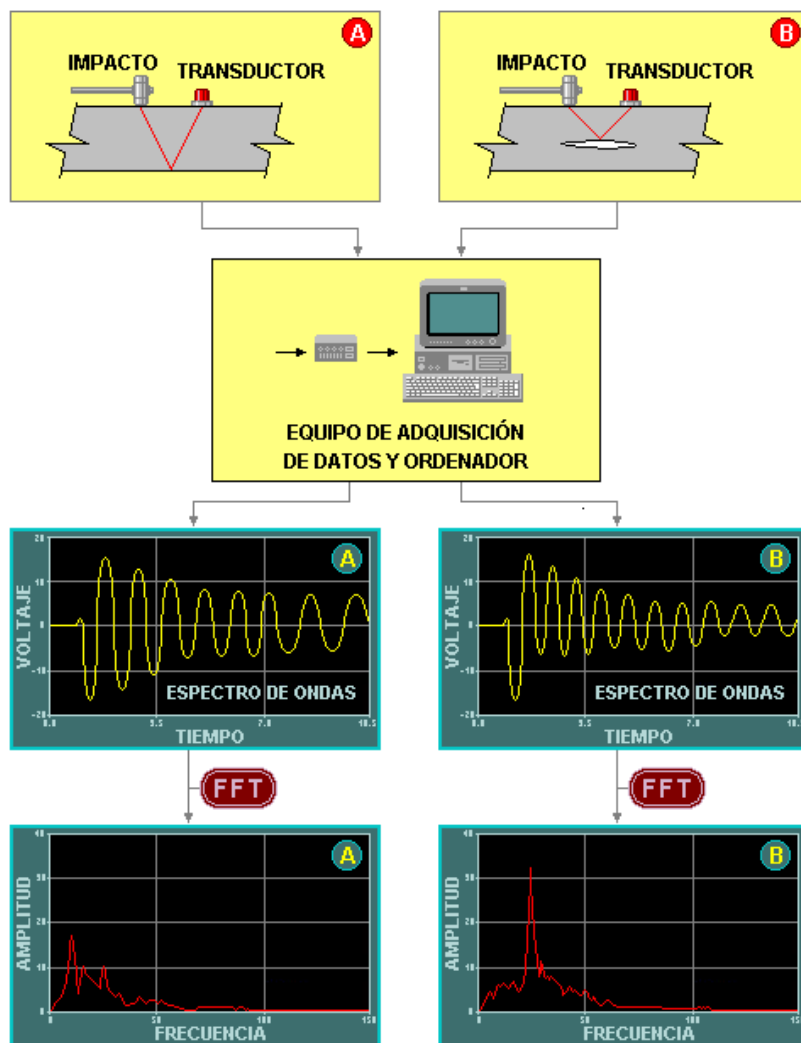




*Ensayo para la estimación de características deformacionales.*

## **2. EL METODO DE IMPACTO ECO**

El método del Impacto-Eco es una técnica basada en el estudio de las ondas de presión. La técnica fue puesta en practica por M. Sansalone y N.J. Carino en la Universidad de Cornell (USA) a mediados de los años 80 para la detección de delaminaciones en elementos de hormigón tipo soleras , muros o tableros de puentes.



*Figura nº2. Principio del Método de Impacto Eco*



La técnica del Impacto-Eco utiliza el impacto de un objeto, en general, una esfera de acero de pequeño tamaño sobre el objeto de ensayo. Al impactar la esfera en su superficie, se origina una onda pulsatoria que rebota en los bordes de la pieza. Si se coloca un transductor adecuado en la superficie de la pieza (normalmente un acelerómetro piezoeléctrico) se pueden registrar los desplazamientos ocasionados por la onda procedente de la reflexión en el fondo de la pieza o allá donde exista un cambio brusco de densidad, una coquera, etc. Estudiando en el dominio de la frecuencia las señales obtenidas puede obtenerse el espesor del elemento, o la profundidad a la que se encuentre el defecto.

En la figura siguiente se puede observar una representación simplificada del uso de esta técnica donde se aprecia como en el ensayo de una losa maciza de hormigón de 0,50 m de espesor se obtendrían frecuencias distintas en una zona sana que en una zona con una coquera situada a 25 cm. de profundidad.

En las fotografías siguientes puede observarse el equipo en uso:





## **2. APLICACIÓN PRÁCTICA AL ESTUDIO DE ESPESORES DE UNA SOLERA DE 70.000 M2**

Se solicitó del Instituto Técnico de Materiales y Construcciones la realización del estudio de los daños que presentaba una solera rectangular de 200 x 350 m x m de lado. Una de las fases del estudio fue la caracterización del espesor de los distintos módulos de solera, ya que en alguno de los módulos ya reparados tras solo dos años de funcionamiento se había constatado un espesor inferior al nominal (15 cm.). El estudio de espesores se realizó mediante 690 ensayos de Impacto Eco realizando cada 600 m<sup>2</sup> una recalibración del equipo mediante la medida directa de espesores sobre probetas testigo extraídas en esos puntos.

### **2.1 DISCRETIZACIÓN EN LOTES DE LA SOLERA**

Al ser prácticamente rectangular se subdividió la solera en 690 lotes de 10 m de lado.

En la figura nº 3 se observa la discretización realizada:

### **2.2 ENSAYOS DE IMPACTO ECO**

Para realizar el ensayo se coloca el equipo contra la solera, se excita el solenoide y se lee en pantalla el valor obtenido mediante el análisis en el dominio de la frecuencia del espectro de onda recogido por el equipo. La operación se realiza tres veces determinando como valor de espesor la media de los tres valores registrados. El software del equipo da directamente el espesor del elemento.

En el cuadro nº1 se han recogido los valores obtenidos en los ensayos realizados. Como ya se señaló el valor nominal del espesor del solado era de 15 cm.



CUADRO N° 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	MEDI A	
A	**	13.4	15.9	14.4	14.2	15.0	**	**	13.0	15.1	15.1	14.4	14.2	14.0	15.2	16.8	15.4	12.8	14.9	15.2	13.8	15.4	12.3	17.8	13.6	18.2	15.7	13.6	11.8	10.4	12.1	12.6	11.6	14.2	**	**	**	14.3	
B	17.0	14.2	12.6	11.4	11.4	12.6	**	**	13.0	15.9	16.8	14.2	13.8	13.8	15.1	13.8	16.5	13.2	13.4	17.1	13.6	13.0	15.2	13.6	13.2	14.9	13.6	15.1	12.6	13.6	13.0	11.7	14.4	15.4	**	**	**	14.0	
C1	18.5	12.2	12.2	12.8	12.8	13.8	**	**	13.0	14.2	13.8	17.1	13.8	15.4	15.2	14.2	14.3	15.5	13.0	16.8	16.8	15.2	15.2	15.2	15.2	14.0	14.0	16.8	16.8	17.5	17.5	14.9	17.6	15.4	15.2	14.7	13.4	15.0	
C2	18.5	14.0	14.0	15.0	12.8	12.6	12.6	15.5	15.5	13.0	13.0	13.4	13.4	15.5	15.5	14.0	15.8	15.0	13.0	15.5	15.5	15.5	15.5	13.6	13.0	14.0	14.2	14.2	14.2	15.2	15.2	14.9	17.6	15.4	13.6	16.1	14.8	14.6	
D	14.4	13.0	11.0	12.7	14.2	15.0	13.8	12.6	13.6	11.0	13.6	14.8	15.5	14.3	15.0	13.8	15.0	13.8	14.5	16.2	13.8	13.1	12.5	12.9	12.6	12.3	13.0	12.3	12.6	13.9	10.5	13.0	12.2	13.6	12.0	14.4	14.7	13.4	
E	13.2	14.5	18.2	12.6	13.2	13.0	13.8	15.8	13.8	14.7	14.8	15.0	14.0	14.0	14.3	15.0	15.0	13.9	13.1	16.1	12.9	11.8	14.2	14.5	14.6	13.6	14.2	12.8	13.8	14.0	12.6	13.0	12.7	14.2	12.0	12.8	12.9	13.9	
F	14.2	13.7	**	11.4	14.1	14.5	13.9	15.3	15.3	14.5	16.1	14.3	15.5	13.5	14.0	13.6	13.5	13.6	12.5	14.4	**	14.9	14.4	13.7	14.7	13.2	**	14.9	13.4	14.1	13.5	13.7	14.2	11.1	14.9	13.8	12.9	14.0	
G	12.4	12.8	**	13.7		12.2	13.6	14.4	13.5	15.1	14.4	15.7	13.5	14.6	15.1	13.7	13.5	14.2	13.0	13.6	**	12.8	12.6	15.2	17.2	15.0	**	**	14.0	13.7	15.5	14.1	13.7	13.5	15.1	15.4	13.3	14.1	
H1	11.6	11.5	11.5	13.0	13.0	13.5	13.5	14.3	14.3	15.3	15.3	13.9	13.9	15.8	15.8	12.3	12.3	14.0	14.0	13.7	13.7	15.7	15.7	16.7	16.7	12.6	12.6	13.4	13.4	15.5	15.5	16.1	14.7	14.7	18.7	19.5	16.7	14.4	
H2	12.5	11.2	11.2	14.5	14.5	14.5	14.5	13.2	13.2	14.7	14.7	13.9	13.9	15.3	15.3	16.2	16.2	13.9	13.9	14.1	14.1	14.3	14.3	15.4	15.4	12.0	12.0	14.6	14.6	15.4	15.4	14.0	15.3	15.3	11.9	13.8	13.8	14.1	
I	14.5	12.9	14.7	12.8	13.1	16.2	14.1	11.2	12.9	13.3	15.1	14.3	13.4	13.8	15.0	16.2	16.2	16.2	13.9	15.0	14.2	14.2	17.1	17.4	14.8	14.0	13.9	13.8	14.6	16.1	15.3	14.7	**	**	11.9	12.9	17.5	14.5	
J1	12.5	12.1	13.0	13.1	14.0	15.3	12.8	14.2	14.6	11.6	12.2	13.5	13.0	15.4	14.0	14.1	14.3	15.4	14.7	13.0	14.8	13.0	13.3	16.1	13.5	15.0	14.7	10.1	11.8	13.4	14.1	14.1	15.4	**	**	11.9	13.2	17.5	13.7
J2	12.5	12.1	13.0	13.1	14.0	15.3	12.8	14.2	14.6	11.6	12.2	13.5	13.0	15.4	14.0	14.1	14.3	15.4	14.7	13.0	14.8	13.0	13.3	16.1	13.5	15.0	14.7	10.1	11.8	13.4	14.1	13.6	13.6	13.8	13.8	13.2	17.5	13.7	
K	13.7	13.7	12.7	10.0	12.9	13.9	14.5	12.0	14.7	14.0	14.5	14.2	15.7	16.3	13.8	14.7	12.8	13.6	14.0	11.2	14.2	14.0	12.5	10.8	13.8	13.2	12.4	12.5	10.5	12.5	14.9	14.7	14.9	12.2	12.5	14.9	13.4	13.4	
L	12.5	15.9	15.6	13.6	14.1	13.5	13.9	11.8	14.1	15.2	14.6	14.3	14.1	16.0	14.5	13.0	12.8	13.5	15.4	13.1	14.7	12.8	11.8	16.6	14.4	13.0	12.8	13.0	14.3	11.2	12.5	13.4	14.7	12.2	13.0	11.6	14.7	13.7	
M	14.0	17.2	14.7	12.8	13.5	13.4	13.0	12.2	13.8	14.7	14.5	14.5	13.0	14.6	13.9	13.5	14.0	14.0	14.5	13.8	13.3	13.9	12.8	13.8	14.8	14.6	12.7	13.2	12.8	10.9	14.5	13.8	12.6	13.4	11.8	11.8	16.4	13.7	
N	14.4	14.1	12.7	14.2	14.2	15.2	14.6	13.0	13.0	15.2	14.4	15.0	13.0	15.1	**	14.0	13.5	13.5	14.4	17.2	13.9	10.2	13.6	14.9	13.9	14.5	15.7	12.0	12.1	11.9	13.6	14.2	13.7	15.8	12.6	12.0	12.7	13.8	
O	14.1	15.5	14.6	15.0	14.4	14.1	15.3	17.0	13.5	14.5	14.7	14.8	11.1	16.1	**	14.8	11.5	14.4	14.5	14.8	13.2	14.8	13.3	15.5	13.6	13.6	14.8	14.6	15.6	15.3	14.8	16.1	15.8	16.4	15.2	14.0	14.6	14.6	
P	14.9	13.0	16.5	15.0	13.8	14.9	15.8	11.9	16.1	12.5	15.2	14.0	11.2	15.5	14.0	**	15.0	13.9	**	**	13.7	**	**	12.4	13.9	11.5	15.2	15.6	15.0	**	13.7	15.9	17.1	16.0	14.6	13.2	13.8	14.3	
Q	13.9	14.5	15.0	15.5	13.9	13.9	15.8	13.2	15.0	14.2	14.5	15.3	14.9	16.0	**	13.8	**	13.9	16.0	13.8	13.9	13.0	14.5	14.1	14.3	14.9	14.9	16.5	16.5	**	14.4	17.1	15.0	17.1	14.7	14.4	14.2	14.8	
R	11.9	14.0	12.0	14.6	15.0	14.6	15.2	13.8	14.8	15.5	15.0	15.5	14.7	15.1	14.8	15.0	14.4	14.8	17.0	16.0	13.8	11.4	**	13.9	14.6	15.4	12.4	15.0	16.5	16.0	16.3	16.0	14.5	15.0	15.5	14.8	13.2	14.7	
S	15.0	12.9	15.0	13.9	16.3	13.9	14.5	15.5	14.1	14.3	13.9	14.8	13.5	14.8	15.7	12.7	15.2	13.7	14.6	14.0	15.7	**	**	14.7	17.0	14.8	14.5	14.5	17.0	15.0	18.1	15.5	17.6	16.6	17.4	17.5	16.0	15.1	
T	12.8	15.0	14.7	11.4	13.1	13.1	13.8	12.3	14.0	16.5	12.7	14.5	13.1	13.1	13.5	13.3	14.8	14.5	13.5	17.0	14.5	**	**	14.5	15.0	17.3	15.1	12.4	14.5	16.1	15.7	17.8	16.8	18.2	16.3	16.0	16.0	14.7	
MEDI A	14.0	13.6	13.8	13.3	13.8	14.1	14.1	13.7	14.1	14.2	14.4	14.6	13.7	14.9	14.7	14.2	14.4	14.2	14.2	14.2	14.2	13.6	13.9	14.8	14.5	14.2	14.0	13.7	13.9	14.1	14.5	14.6	14.8	14.7	14.0	14.3	14.8	14.2	

NOTAS:

Se han coloreado en **rojo** los lotes con espesor de solera inferior a 12,5 cm.

Se han coloreado en **fucsia** los lotes con espesor de solera comprendidos entre 12,5 cm. y 15 cm.

Los lotes marcados con **\*\*** son zonas reparadas donde se nos indicó que no efectuáramos ensayos.



### **2.3 MEDIDAS DIRECTAS DEL ESPESOR DE SOLERA**

Con objeto de evitar que eventuales diferencias en la resistencia del hormigón de la solera (proporcional al cuadrado del módulo de deformación del hormigón) pudieran incrementar el error en la medida de los espesores, aproximadamente cada 600 m<sup>2</sup> se procedía a extraer una probeta testigo, se determinaba directamente el espesor de la solera con un calibre y se ajustaba el equipo.

Los resultados obtenidos en estas medidas se resumen en la tabla n° 1.

*Tabla n° 1*

<b>PROBETA TESTIGO N°</b>	<b>LOTE N°</b>	<b>ESPELOR DE SOLERA (cm.)</b>
1	S-37	16.62
2	T-31	14.91
3ª	T-18	14.43
4	T-4	15.20
5ª	I-1	13.59
6	L-16	14.16
7	L-27	12.76
8	K-35	11.84
9	A-30	10.24
10	B-20	17.26
11	A-10	17.46
12	B-2	14.21

Además en aquellas zonas donde se habían detectado los menores espesores se decidió también realizar medidas directas para contrastar los valores obtenidos mediante los ensayos no destructivos. Los valores obtenidos se presentan en la tabla n° 2.

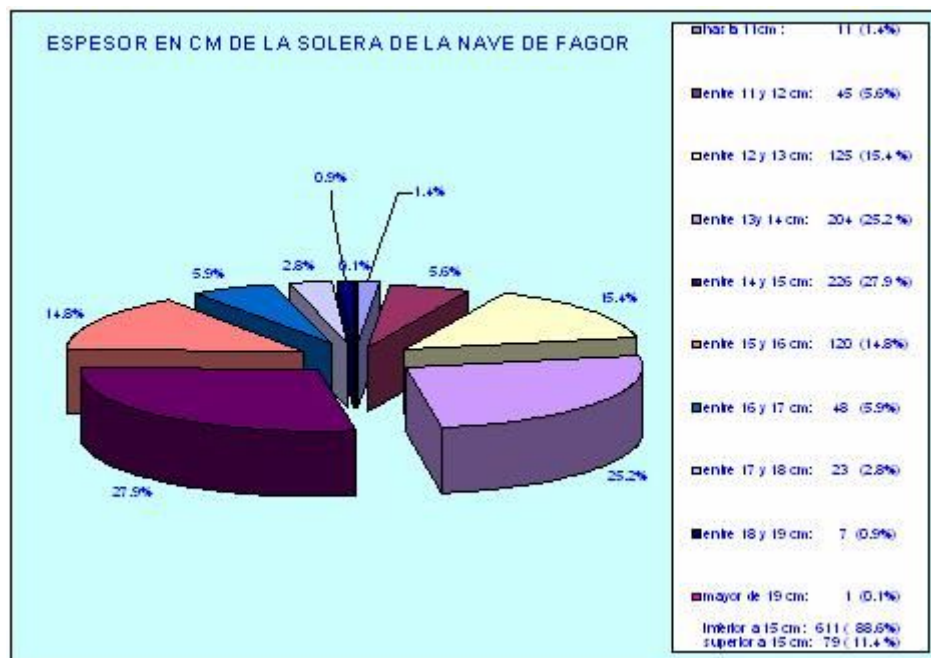
Tabla n° 2

LOTE N°	ESPESOR DE SOLERA (cm.)	
	Imp-Eco	Directa
J-28	10.1	10.08
R-22	10.6	10.37
D-31	10.5	10.78
O-13	11.1	10.84
K-4	10.0	10.18
I-8	11.2	11.00
D-10	11.0	10.71
D-3	11.0	11.26

Como puede observarse los ensayos efectuados para verificar a posteriori la fiabilidad del método no destructivo utilizado, han resultado plenamente satisfactorios registrándose una desviación media del 0.3% y una desviación máxima de un 2.7%

## 2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO.

En el grafico n° 1 se han representado los valores obtenidos



## 2.5. CONCLUSIONES

En los apartados previos se ha descrito el fundamento del método del Impacto Eco y su aplicación al estudio de una solera de grandes dimensiones (70.000 m<sup>2</sup>). La verificación directa en aquellos puntos donde los ensayos no destructivos habían arrojado valores de

espesor inferiores ha mostrado la gran fiabilidad del método que permite con un gran rendimiento evaluar el espesor de soleras y muros. El estudio antes descrito con la realización de 690 ensayos de Impacto Eco y la extracción de 20 probetas testigo se efectuó en tres días de trabajo de campo y sin alterar la logística de uno de los almacenes de distribución más grandes de España.



# LA INSTRUMENTACIÓN EN EL DIAGNÓSTICO DE HUMEDADES

Gerónimo Lozano<sup>1</sup>, Alfonso Lozano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr. Ingeniero y Arquitecto Técnico. Catedrático de las U. de Oviedo y P. de Madrid

<sup>2</sup>Dr. Ingeniero Industrial. Profesor del Área de Ing. de la Construcción U. de Oviedo

## 1.- ANTECEDENTES

Una encuesta realizada sobre dos mil siniestros habidos en las infraestructuras de edificación (1), llega a la conclusión que el:

- 32% de los accidentes tuvieron origen en la acción del agua.
- 25% fueron debidos a defectos de diseño por desconocimientos de los suelos.
- 25% se produjeron por los rellenos.
- 8% se debieron a causas diversas.

Es decir que:

- Un accidente de cada cuatro fue debido a la influencia del agua.
- Uno de cada cinco, a la falta de conocimiento de los terrenos.
- Otro de cada cinco, a la presión ejercida por los rellenos.
- Y tan solo uno de cada seis, a otras causas.

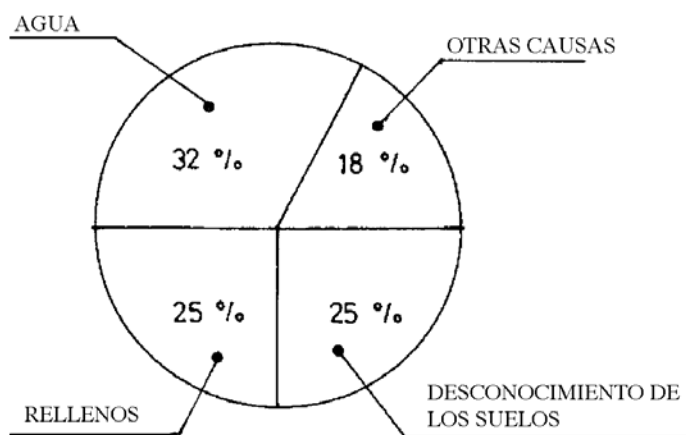


Figura 1

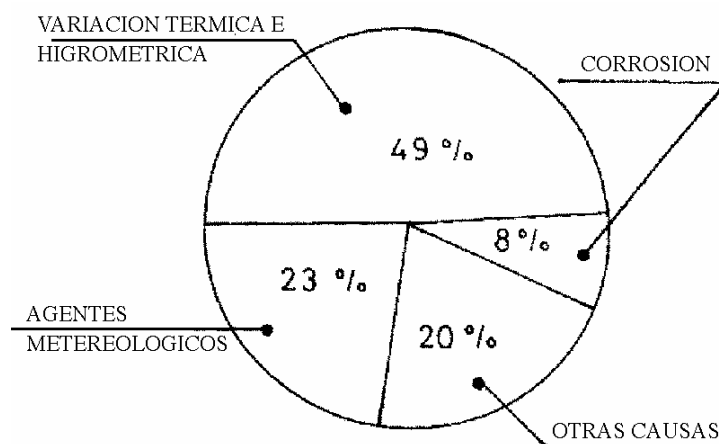


Figura 2

Otra encuesta, realizada en Francia como la anterior por el propio Bureau Securitas (aunque en este caso basada en una muestra de diez mil siniestros denunciados en el resto del edificio), llega a la conclusión que el:

- 23% de los accidentes tuvieron origen en los agentes meteorológicos.
- 49% en las variaciones térmicas e higrotérmicas.
- 8% en los procesos químicos y electroquímicos de corrosión.
- Y el 20% restante en otras causas

Por consiguiente, en cuatro de cada cinco accidentes interviene la acción del agua de forma más o menos directa.

Las citadas encuestas (2) se han sintetizado en las gráficas circulares de las figuras 1 y 2.

## **2.- OBJETO Y ORDENACION DEL TRABAJO**

La presente comunicación tiene por objeto dar a conocer los equipos y la instrumentación que ofrece el mercado para facilitar el diagnóstico en los dictámenes debidos a la acción de las humedades en el edificio.

Por este motivo, después de los Antecedentes y del Objeto expuestos, comienza aclarando algunos Conceptos relacionados con términos clínicos y con recomendaciones de la Metodología en el diagnóstico de humedades.

Continúa con la Determinación del contenido en agua, de interés tanto en la recepción de materiales como en el prediagnóstico de las diferentes tipologías de humedades.

Sigue por este orden con la Medición de las condensaciones, con la Comprobación de la existencia de sales, y con la Obtención de los parámetros higrotérmicos.

Concluye con la Determinación de la humedad en las soleras, previa a la colocación de los pavimentos.

Sumario:

1. Antecedentes
2. Objeto y ordenación del trabajo
3. Conceptos sobre Patología de la Edificación
4. Metodología del diagnóstico en humedades
5. Determinación del contenido en agua
6. Comprobación de la existencia en su caso de humedades de condensación
7. Determinación de la presencia de sales
8. Obtención de los parámetros higrotérmicos
9. Determinación de la humedad en soleras

## **3.- CONCEPTOS**

Es frecuente que en los informes y en los dictámenes, los técnicos empleemos erróneamente algunos términos clínicos. De aquí la conveniencia de aclarar dichos conceptos.

La enfermedad del edificio, al igual que la de un ser vivo, sigue un proceso patológico cuyo origen es un mal que por unas causas determinadas evoluciona, manifestándose a través de un síndrome: inicialmente por medio de síntomas y de lesiones característicos que de no atajarse a tiempo pueden terminar en un estado límite o de ruina.

El proceso descrito se ha sintetizado en la gráfica de la figura 3.



*Figura 3*

Aparecidas las lesiones, y si fuera posible al detectar los síntomas, el patólogo se afana:

1º.- En el estudio patológico. Siguiendo un proceso inverso al anterior estudia la naturaleza de la enfermedad; es decir, a partir del síndrome, se investigan las causas que desencadenaron el mal. Figura 4.



Figura 4

A este estudio se le denomina también patología. El diccionario la define como “estudio de la naturaleza de la enfermedad a través de los cambios estructurales y procesos morbosos que presenta el enfermo”.

Por consiguiente la patología no es una lesión sino todo lo contrario: El estudio de la naturaleza de la enfermedad

2º.- Una vez determinadas las causas, el patólogo califica la enfermedad; o lo que es igual, emite el diagnóstico.

3º.- Por último aplica el remedio para su tratamiento o terapéutica. Volviendo al diccionario, la define como “Preceptos y remedios para el tratamiento de la enfermedad”.

La terapéutica puede ser de orden curativa, a aplicar al edificio afectado, y preventiva cuando se refiere a preceptos para evitar la aparición del mal.

A modo de resumen, las fases citadas se han consignado en la gráfica de la figura 5.

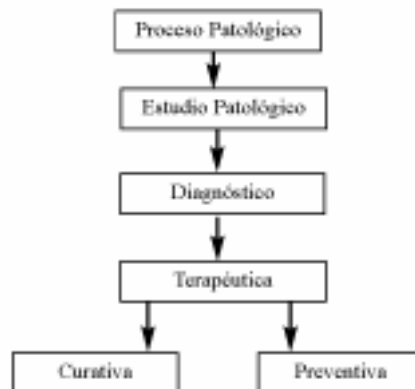


Figura 5

#### **4.- METODOLOGIA PARA EL DIAGNOSTICO DE LAS HUMEDADES**

En el caso particular de las humedades, el esquema del estudio patológico podría ser el representado en la gráfica de la figura 6.

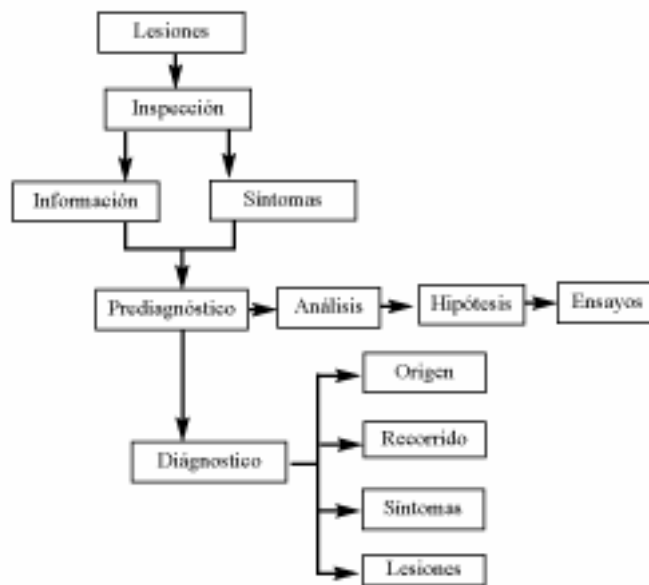


Figura 6

A la vista de las lesiones se realiza una inspección a fin de identificarlas, independizarlas de otras y determinar su amplitud. Se recaba después la información previa necesaria, al tiempo que se analizan los síntomas (aparición, situación, forma, extensión, etc.).

Continúa con el prediagnóstico en el que, a la vista del análisis de la información y de los datos anteriores, se establecen las hipótesis que se comprueban a través de los ensayos con la ayuda de la instrumentación. Y de confirmarse se emite el diagnóstico en el que ha de definir el origen o procedencia del agua, su evolución o recorrido, sus manifestaciones o síntomas y finalmente las lesiones.

Para garantizar un diagnóstico fiable, deben conocerse los parámetros fundamentales que siguen:

- Contenido en agua del material
- Datos higrotérmicos (temperatura y humedad relativa del aire)
- Temperatura superficial del paramento
- Contenido en sales

Existen diferentes técnicas para medir cada una de estas características. Se resumen en la gráfica de la figura 7, basándonos en los estudios del profesor Ippolito Massari (3):

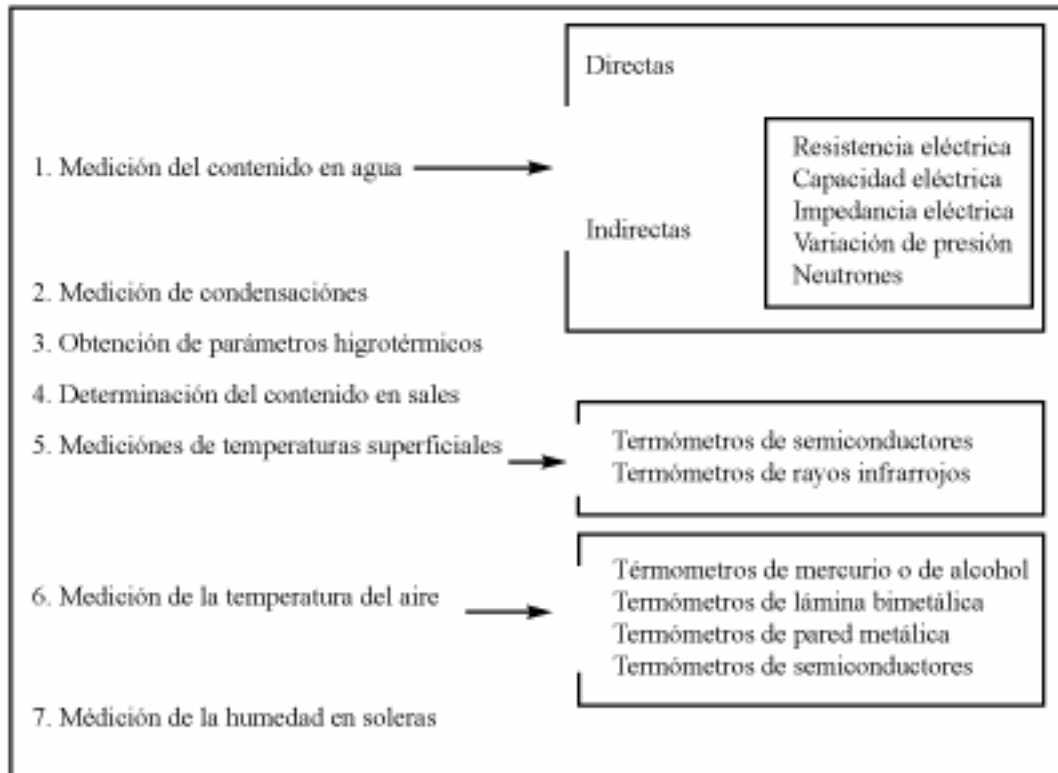


Figura 7

Las temperaturas superficiales y del aire (mediciones 5 y 6) se pueden obtener con los instrumentos de los apartados 2 y 3. Por este motivo nos limitaremos a comentar los equipos disponibles en el mercado para las determinaciones 1, 2, 3, 4 y 7. Además son las de mayor interés práctico para los arquitectos técnicos, tanto si intervienen en la dirección de obra o como patólogos de la edificación.

## **5.- DETERMINACION DEL CONTENIDO EN AGUA**

### **5.1.- MEDIDAS DIRECTAS**

También denominado ensayo al horno, se trata de un método analítico basado en la diferencia de peso de al menos tres muestras húmedas, y el que tendrían después de desecadas en una estufa. Es un proceso lento y laborioso, pues implica tres extracciones de material (procedimiento destructivo), sin modificar su composición ni condiciones higrotérmicas en que se encontraba, incluyendo el traslado al laboratorio.

Las muestras, una vez pesadas, se secan al horno según un proceso normalizado, y se vuelven a pesar. El contenido en humedad vendrá dado por la expresión:

$$\% \text{ Contenido de humedad} = \frac{\text{Peso húmedo muestra} - \text{Peso seco muestra}}{\text{Peso seco muestra}} \times 100$$

A modo de ejemplo, en la figura 8 se ha obtenido el contenido en agua de tres muestras de arena de 948, 1.022 y 1.326 gramos.

PESOS Y HUMEDADES	MUESTRAS		
	1	2	3
PESO INICIAL PH (gr)	948	1.022	1.326
Después del 1º ciclo	920	992	1.287
Después del 2º ciclo	912	984	1.276
Después del 3º ciclo	910	982	1.273
Peso seco P <sub>2</sub>	910	982	1,273
$H_2 = 100 \frac{P_1 - P_2}{P_1}$	4,17	4,07	4,16
Grado de humedad H = 1/n (H <sub>15</sub> + H <sub>20</sub> + ... H <sub>NS</sub> ) = 4,133			

Figura 8

El método es el más exacto y preciso de los existentes, al tiempo que la muestra puede servir para obtener otros datos adicionales (contenido en sales, composición).

Sin embargo se trata de un ensayo destructivo, dura más de treinta horas, obliga a trabajar en laboratorio, y sobre todo se deben extremar las precauciones para no modificar las condiciones ambientales reales y composición del material, una vez extraída la muestra.

En la práctica nos es imprescindible trabajar a pie de obra, de forma que con las mediciones realizadas en situ podamos hacernos una idea aproximada del estado real del edificio, en detrimento de los valores precisos obtenidos con procesos de laboratorio.

### **5.2.- MEDIDAS INDIRECTAS**

La forma más rápida y relativamente precisa de determinar el contenido de humedad en los materiales se consigue con la ayuda de los higrómetros.

De todos ellos, los más prácticos y por tanto los más utilizados, son los basados en las variaciones que experimenta la resistencia eléctrica con la humedad (humidímetros) y en los cambios de presión (ensayo Speedy).

#### **5.2.1.- EL HUMIDIMETRO**

El humidímetro es un galvanómetro que mide contenidos de humedad en función de la mayor o menor dificultad al paso de la corriente eléctrica ante la presencia de agua en los materiales.

Generalmente están calibrados para dar lecturas directas en la madera de construcción. E indirectamente, y con ayuda gráficas o de tablas, en maderas especiales y en diferentes materiales.

Paralelamente a la escala de valores (de 6 a 80%), el modelo Mini (4) dispone de otra que a través de tres colores (verde, amarillo o rojo) indica Fotografía 9:





Figura 9



Figura 10

En verde: contenidos en agua no peligrosos.

Amarillo: humedades ligeramente por encima de las admisibles, que requieren atención especial complementaria.

Rojo: humedades excesivas que exigen medidas correctivas urgentes.

El humidímetro es de gran utilidad en Terapéutica Preventiva (control de humedad en la recepción de materiales y en las superficies soportes), de Terapéutica Curativa, (trabajos de desecación), así como en el Estudio Patológico y en el Prediagnóstico (determinación del tipo de humedad).

#### 5.2.1.1.- APLICACION EN LA RECEPCION DE MATERIALES

Una de las aplicaciones más importantes es la determinación del contenido de humedad en la recepción y puesta en obra. Para ello es suficiente con aplicar los electrodos al material o a la unidad de obra. Fotografía 10.

Si se trata de madera da la proporción directamente. En el caso de otros materiales indica niveles seguros o admisibles en color verde, dudosos o límites en amarillo y peligrosos o inadmisibles en rojo.

#### 5.2.1.2.- CONTROL DE HUMEDADES EN SUPERFICIE SOPORTES

En ocasiones, la ejecución de una unidad de obra depende del contenido de humedad del soporte. Tal es el caso de la colocación de parquet, aplacados, pinturas, etc. Para alcanzar puntos de difícil acceso el instrumento se suministra con una sonda complementaria. En la imagen Fotografía 11 se está comprobando el contenido de humedad de un marco.



Figura 11



Figura 12

#### 5.2.1.3.- CONTROL DE TRABAJOS DE DESECACION

Previamente a las actividades de desecación de muros afectados por ascensiones de capilaridad es necesario conocer la distribución y el contenido de humedad a fin de planificar y aplicar el tratamiento de forma adecuada. Y una vez concluido, conocer la eficacia del tratamiento.

En ambas intervenciones es muy eficaz el humidímetro. Así, sobre el paño de la vista 12 se han determinado los contenidos cada 60 cm. en anchura y cada 20 en altura. A partir de ellos se han representado las curvas del mismo grado de humedad. Obsérvese las existentes en el ángulo superior derecho que corresponden a pérdidas de una conducción.

#### 5.2.1.4.- HUMEDAD EN LOS CERRAMIENTOS

Con la ayuda de la sonda de profundidad es posible determinar la humedad en los paramentos. Sobre una recta r de máxima pendiente, se realizan pares de taladros de  $\varnothing 6$  cada 20, 25 ó 33 centímetros. Figura 13.

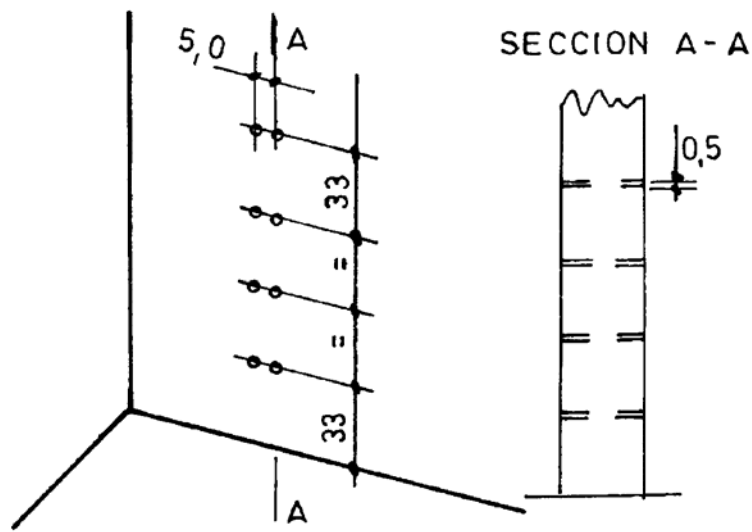


Figura 13

Una vez transcurrido un tiempo prudencial (aproximadamente 1 hora a fin de regularizar las pérdidas de agua debidas a la fricción) se determina con la ayuda de la sonda de profundidad del humidímetro el contenido de humedad en la superficie, hacia la mitad y en el fondo de los mismos. Fotografía 14.

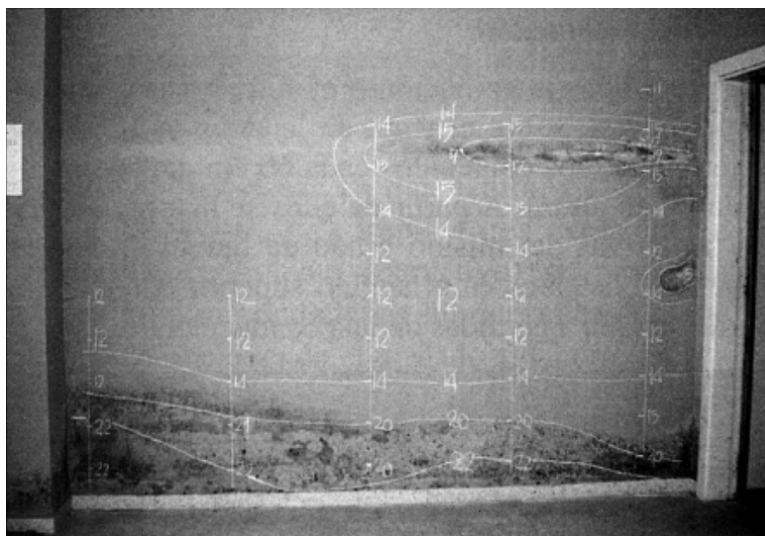


Figura 14

Si el contenido en agua decrece con la altura hasta desaparecer a una cierta cota, manteniéndose constante en todo el espesor del muro, se trata de una humedad de capilaridad. Efectivamente, llevados los contenidos al diagrama de la figura 15a se deduce que el origen está en la ascensión capilar del agua proveniente del terreno.

Cuando el contenido de agua decrece inicialmente con la altura y hacia el interior, manteniéndose constante después, su origen está en el ambiente externo. Figura 15b.

Se trata de una humedad de fachada, con origen en las precipitaciones atmosféricas.

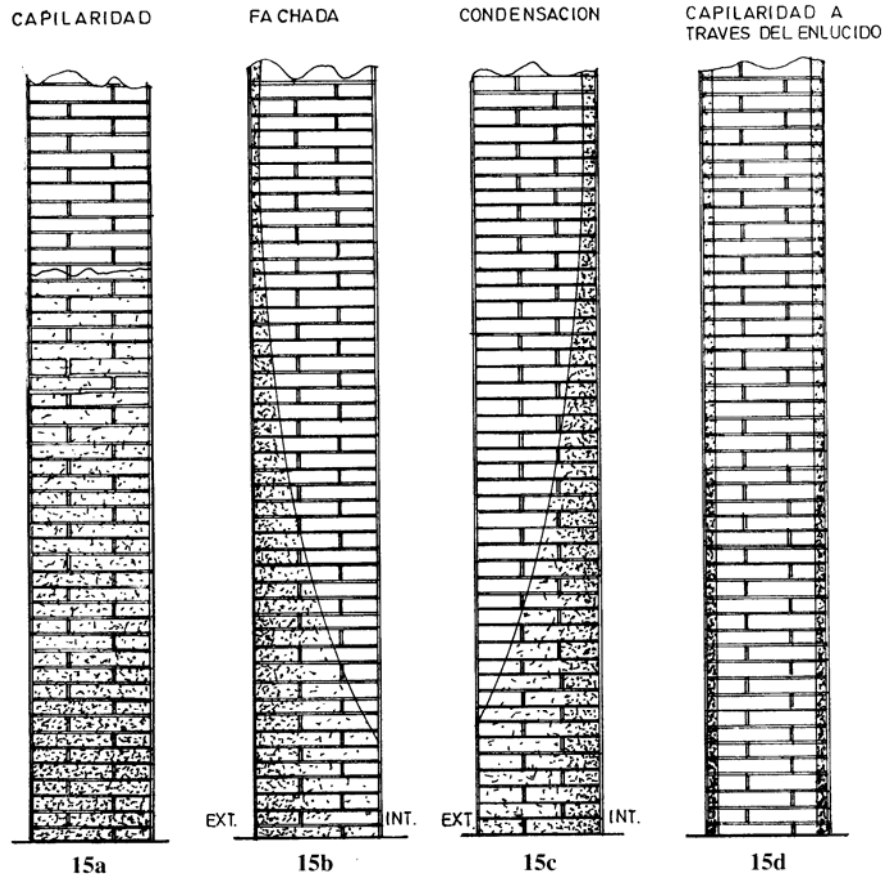


Figura 15

Si la humedad existe en el interior, decreciendo inicialmente con la altura y en profundidad, (figura 15c) se está ante una humedad de condensación.

Cuando el contenido en agua es únicamente superficial, disminuyendo en altura (figura 15d) se trata de una ascensión capilar a través del revoco.

#### **5.2.2.- SURVEYMASTER SM (4)**

El tipo habitual de humidímetro (como los descritos anteriormente) basa su funcionamiento en el paso de una corriente eléctrica que circula entre las dos clavijas aplicadas directamente sobre el paramento a estudiar. También se vio como esta lectura era superficial, y para estudiar el comportamiento en el interior se hacía imprescindible la realización de unos taladros donde introducíamos las sondas de profundidad.

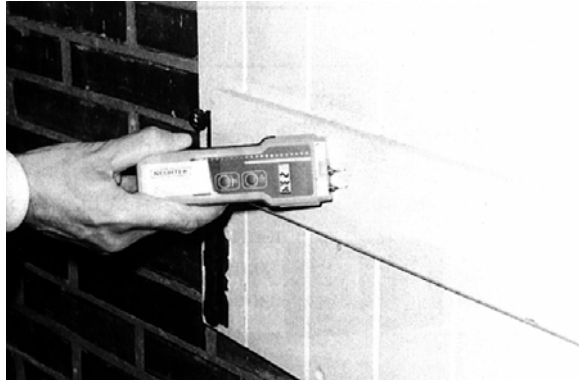


Figura 16

Últimamente han aparecido en el mercado instrumentos que combinan el sistema habitual de utilización superficial (modo de medición) con un novedoso emisor de radiofrecuencia (método de búsqueda). Fotografía 16. De esta forma permiten el estudio de superficies debajo de revestimientos, de baldosas cerámicas, de aplacados, etc.



Figura 17-a



Figura 17-b

Ambas lecturas aparecen en indicadores de color rojo, amarillo y verde, similares a los mencionados para los humidímetros; al igual que éstos, disponen del mismo display digital que señala el contenido exacto de la humedad para madera; y aproximadamente y con ayuda de tablas, en otros materiales.

De la misma forma, si operamos en el modo búsqueda, en zonas de difícil visibilidad existe un avisador acústico que se activa al detectar el agua bajo la superficie.

Está provisto de sondas y demás accesorios utilizados para los controles en el interior o en lugares poco accesibles. Fotografía 17 a.

La imagen 17 b muestra su última versión.

### **5.2.3.- ENSAYO SPEEDY**

Como ya se dijo, la extracción de muestras para su posterior análisis en laboratorio es la técnica más precisa en la determinación del contenido en humedad. Sin embargo exigía un tiempo, del que en ocasiones no se dispone, así como condiciones ambientales difíciles de mantener in situ.

Para paliar estas deficiencias han surgido instrumentos que permiten llevar a cabo ensayos casi tan perfectos como los de laboratorio, pero realizados a pie de obra. Es el caso del comprobador Speedy (5).

En esencia es una botella (fotografía 18) cerrada con un manómetro a forma de tapón, en cuyo interior se coloca la muestra con una ampolla de carburo de calcio como reactivo.



*Figura 18*

La humedad del material reacciona con el componente químico produciéndose acetileno y haciendo que la presión aumente.

La lectura del manómetro indica el contenido en agua de la cata.

El proceso es muy rápido y suficientemente preciso ya que se realiza inmediatamente después de la extracción.

La manejabilidad y sencillez del instrumento, unida a la fiabilidad de los resultados, ha hecho que el comprobador Speedy se emplee en obras civiles para determinar la humedad de los terraplenes.

Y en la industria cerámica para conocer el estado de la arcilla almacenada en los pudrideros.

#### **5.2.4.- DEC SCANNER - LEAK SEEKER**

Las multicapas utilizadas en la impermeabilización de cubiertas planas, hacen que la gotera o la mancha de humedad no coincida con el punto de infiltración.

La localización con métodos tradicionales es lenta y difícil. Para facilitarlos, el mercado ofrece instrumentos rápidos y eficaces. El Dec-scanner (6) es uno de ellos. Está basado en la creación de un campo eléctrico de baja intensidad que, por medio de unos electrodos flexibles, es capaz de detectar el aumento de la conductancia eléctrica ante la presencia de agua.

Su utilización es muy simple; no hay más que hacer pasar el instrumento por la cubierta y, bien por medio de una señal acústica o a través de la pantalla gráfica, detectaremos la presencia o no de humedad.

La frecuencia de la señal de audio aumenta proporcionalmente a la intensidad de la medición, con lo que se agiliza el proceso.

Existen tres escalas de trabajo: la primera, menos sensible, está indicada en cubiertas planas donde la humedad esté cerca de la superficie; la segunda se emplea en aquellos casos de penetración parcial en el aislamiento; y la tercera, más sensible, para concentraciones elevadas y profundidades hasta de 75 mm.

## **6.- MEDICION DE CONDENSACIONES**

### **6.1.- TERMOHIGROMETRO (7)**

Comprueban, si en un local y en un cierto momento, se producen condensaciones. A su gran sensibilidad unen una información instantánea.

El representado en la fotografía 19, con sus accesorios (7), consta de la unidad central, de la sonda, del termómetro de superficie y de un alargador para tomas de difícil acceso.

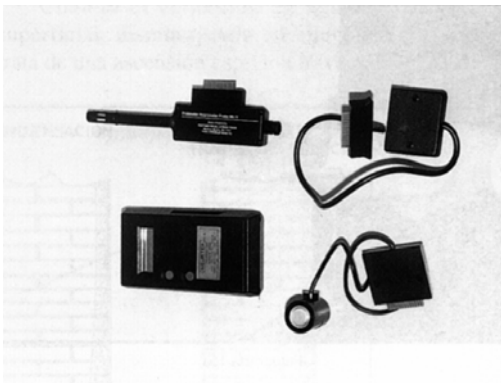


Figura 19



Figura 20

Su utilización es la siguiente:

- Se conecta la sonda y tras agitarla varias veces en el aire, se pulsan los botones rojo y azul, obteniéndose respectivamente la temperatura y la humedad relativa. Vista 20.
- La regla de cálculo situada en la parte posterior del instrumento, al enfrentar la temperatura ambiente con la humedad relativa, proporciona directamente el valor de la temperatura de rocío; es decir aquella, que de producirse, provocaría la aparición de condensaciones. Fotografía 21.

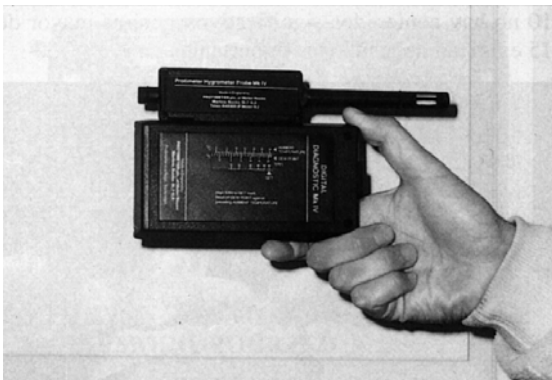


Figura 21



Figura 22

c) Interesa por tanto conocer si las temperaturas de los paramentos están por encima o por debajo de la temperatura de rocío calculada. Para ello se conecta a la unidad central el termómetro de superficie y se aplica a los paramentos más fríos en los que se sospecha puedan aparecer condensaciones. Fotografía 22.

d) En aquellos puntos en los que al apretar el botón rojo se obtengan temperaturas  $T$ , inferiores a la de rocío ( $T < T_r$ ), se están produciendo condensaciones en ese momento.

Dado que esta temperatura es función del contenido del vapor, conviene realizar las mediciones cuando la producción de éste es máxima y las temperaturas mínimas; es decir,



durante la madrugada. Para evitar la presencia del patólogo a horas tan intempestivas se dispone del instrumento que sigue.

### **6.2.- COMPROBADOR DAMPCHECK (8)**

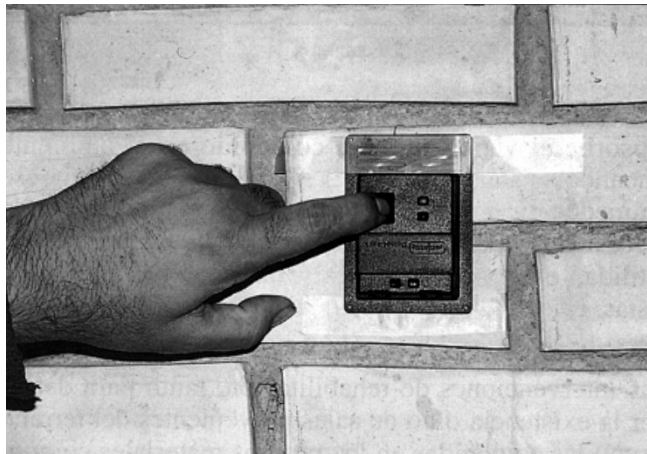
Es el instrumento encargado de comprobar si, en un punto de un local, se han producido o no condensaciones durante un tiempo determinado. En general durante las horas de la noche que son las más críticas.

Por consiguiente complementa la labor del termohigrómetro evitando la presencia del técnico durante las veinticuatro horas del día.

Se basa en la colocación de dos electrodos muy próximos entre sí sobre una base aislante de baja inercia térmica que se adosa al muro. Si no hay condensación aquella permanece seca, y por tanto la resistencia entre electrodos será elevada. La presencia de agua hace que esta resistencia decaiga.

Su aplicación es muy sencilla:

a) Con la ayuda de una cinta adhesiva o cuatro chinchetas (fotografía 23) se aplica sobre la superficie que se desea comprobar.



*Figura 23*

b) Se activa pulsando el botón principal, momento en el que se enciende el piloto verde.

c) Se deja en funcionamiento durante el tiempo que se desee (generalmente 24 horas), y si al cabo de ellas se enciende la luz roja confirmará la aparición de condensaciones.

En caso contrario, continuará encendido el piloto verde.

d) Para reutilizar el comprobador, se retira y se deja secar. A continuación se pulsa el botón situado bajo la tapa de la pila, después el principal, y se comprueba si de nuevo se enciende la luz verde.

Como es lógico el comprobador debe situarse en aquellos puntos en los que, durante el ensayo anterior, el termómetro de superficie del termohigrómetro detectó la temperatura más baja.

### **6.3.- MEDIDOR MULTIFUNCIÓN MMS.**

Se trata de un instrumento que aúna las prestaciones de los equipos anteriores ya que, además de la determinación de las humedades superficiales y en los materiales, informa de las humedades absoluta y ambiental, las temperaturas superficial y ambiente y el punto de rocío.

Dispone además de memoria, salida de datos a PC y software de análisis de datos. Fotografía 24



*Figura 24*

## **7.- DETERMINACION DEL CONTENIDO EN SALES**

De existir sales en el terreno o en los componentes de los muros, las aguas que ascienden por capilaridad en principio las disuelven y posteriormente las precipitan o las hacen cristalizar sobre los paramentos y las soleras en forma de eflorescencias.

Ocurre entonces que la higroscopía de las sales absorbe el vapor de agua contenido en el ambiente (cuando se alcanzan valores elevados), manteniéndose húmedos los revestimientos de las paredes.

Y lo que es más grave, su cristalización en el interior de los poros (criptoflorescencias) da lugar a la arenización y desintegración de los mampuestos y de los sillares. De aquí la necesidad de su determinación.

A este respecto es de utilidad el detector de sales y, para analizar el tipo de estas, el analizador químico in situ.

El equipo citado es también de gran utilidad en las intervenciones de rehabilitación, tanto para detectar la existencia o no de sales provenientes del terreno como las contenidas en los propios materiales componentes de la fábrica.

### **7.1.- DETECTOR DE SALES**

Es un galvanómetro que detecta la presencia de sales al adosar contra el electrodo de cuatro pins de que consta el instrumento un papel absorbente previamente humedecido en agua

limpia y posteriormente presionado contra la superficie a estudiar imagen 25. Si la diferencia entre ambos valores es menor de 10 no hay contenidos significativos; y si es mayor de 15 existirán deposiciones importantes.



*Figura 25*

## **7.2.- ANALIZADOR QUIMICO IN SITU**

La determinación del tipo de sal se basa en la coloración que adquieren los reactivos al añadirles una muestra de la superficie.

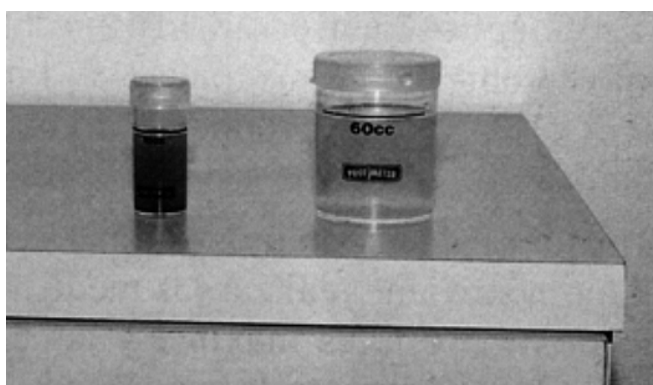
Los nitratos se detectan adicionando a la solución dos pastillas (nitratos 1 y 2). Tras unos minutos y si ésta se torna:

Amarilla, no existe presencia de nitratos.

Naranja, aparecen trazas de nitratos.

Roja, existen en cantidades importantes.

Para verificar la presencia de cloruros, disolveremos una pastilla de «cloruro». Existirán o no según que la solución se vuelva marrón o amarilla. Fotografía 26.



*Figura 26*

La mayor parte de los equipos descritos hasta ahora se incluyen en el «kit» de la firma Protimeter representado en la fotografía 27.

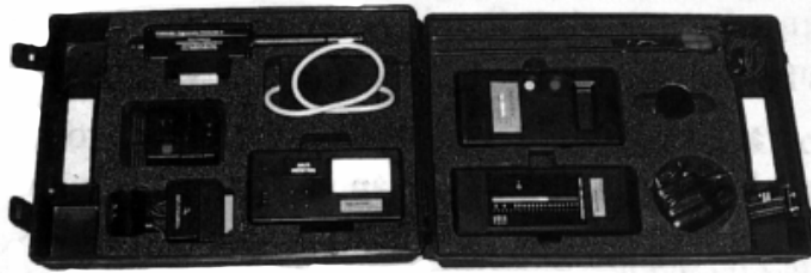


Figura 27

## **8.- MEDICION DE DATOS HIGROTERMICOS: EL TERMOHIGROGRAFO (9)**

Informa sobre la humedad relativa y la temperatura del aire de forma continua, quedando registradas las lecturas sobre una hoja durante el período de programación establecido (1, 7, 31 ó 62 días). Esta información es fundamental para el estudio de las humedades de condensación. Para ello es conveniente disponer de dos «termos», uno de los cuales se coloca en el interior y otro en el exterior a resguardo de la lluvia y del sol directo.

La interpretación de las curvas obtenidas (la superior suele corresponder a variaciones de temperatura y la inferior a humedades; (figura 28), se facilita dibujando sus valores sobre el ábaco psicrométrico. Se sigue así la evolución de la temperatura y la presión, tanto en el interior como en el exterior, y con ello la existencia o no de condensaciones.

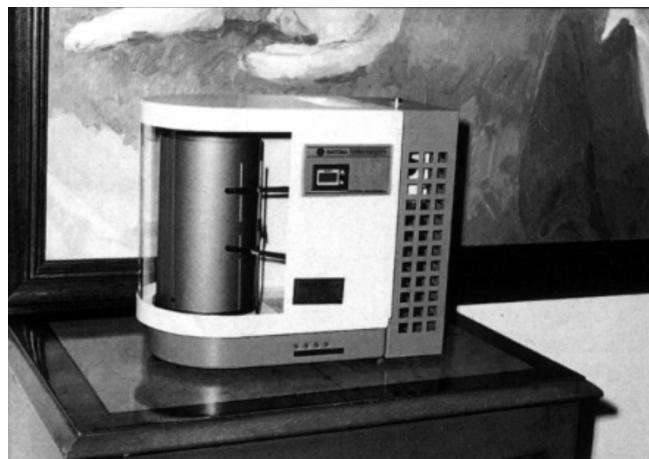


Figura 28

Son de aplicación en museos, bibliotecas, etc.; es decir en lugares donde se deba controlar periódicamente las características del aire.

## **9.- DETERMINACION DE LA HUMEDAD EN LAS SOLERAS**

La madera es muy sensible a las variaciones húmidicas, frente a las que responde con hinchamientos y mermas. Cuando su contenido en humedad supera el 25%, se encuentra en condiciones de ser atacada por los organismos xilófagos. Así, en una tarima prácticamente seca (humedad inferior al 12%) pueden aparecer fendas o pudriciones si la losa soporte no lo

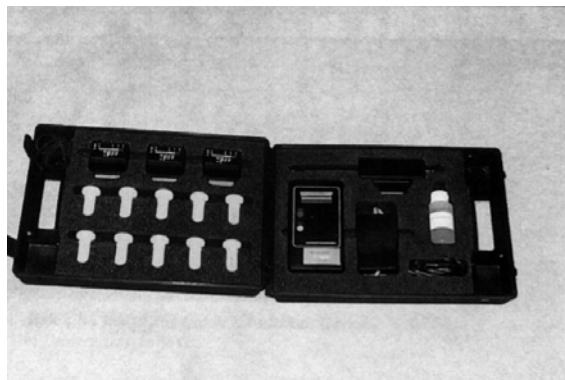
está. Se plantean problemas en la puesta en obra de las membranas y de los revestimientos. Antes de colocar un parquet, una membrana o un revestimiento debemos comprobar que la solera, la cubierta y el muro respectivamente no sobrepasen un cierto grado de humedad.

### **9.1.- ENSAYOS NORMALIZADOS**

El British Standards Insitute recomienda dos ensayos para la determinación de humedad en las soleras: El Test de Higrometría y el de Conductividad. Aunque son ensayos alternativos, la manera más segura de llegar a un resultado correcto sería la realización conjunta. A su vez, cada uno de ellos puede efectuarse mediante los métodos consignados en la gráfica 29.

ENSAYOS	MÉTODOS
Higrometría	BSI del maguito
Continuidad	Puente de gel Clavijas de acero

También la firma Protimeter, ofrece el kit de la fotografía 29, que conjuntamente con el termohigrómetro incluye las claves de programación, sondas, clavijas, manguitos, alargadores e incluso un frasco conteniendo el gel.



*Figura 29*

#### **9.1.1.- ENSAYO DE LA HIGROMETRIA**

Está diseñado para medir la humedad en las soleras de arena/cemento u hormigón. Se evitan así las pudriciones en la madera y el despegue de los revestimientos. Como ya se dijo, puede realizarse mediante el método BSI o el del manguito. Para realizar el primero, colocamos la sonda bajo una lámina de polietileno, asegurándonos que contenga aire en su interior. Fotografía 30.



Figura 30



Figura 31

Una vez alcanzado el equilibrio de humedad entre el aire y la solera (12 horas) conectamos la sonda al Concretemaster II y efectuamos directamente la lectura de la «Humedad Relativa de Equilibrio» (HRE). Los valores inferiores a 75% indican que la solera es apta para recibir el revestimiento.

El segundo método se basa en la colocación de manguitos que se introducen en unos taladros practicados en las soleras a intervalos regulares. Una vez transcurridas 12 horas conectamos la sonda de humedad. Figura 31.

Tendremos que esperar a que se alcance el equilibrio, y al igual que en el caso anterior realizamos la lectura.

### **9.1.2.- ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD**

Permite una rápida determinación del contenido de humedad para bases soporte de cemento/arena, en las proporciones 1:3, 1:4 y 1:5.

Al igual que el ensayo anterior puede realizarse de dos formas: el método del puente de gel y el de la clavija.



Figura 32



Figura 33

Para el primero, tras practicar dos taladros de 6 mm. de diámetro, se rellenan con un gel conductor especial que se suministra con el kit. Conectamos la correspondiente clave de programación de la base, e introducimos los electrodos en los taladros. Fotografía 32.

El color rojo indica una solera excesivamente húmeda, el amarillo un estado límite y el verde seguro.

El método de la clavija es un test muy rápido de realizar, aunque de menor precisión. Es suficiente con clavar dos puntas de acero en la solera que posteriormente se conectan a los electrodos. La interposición de la clave de programación, acorde con la proporción de componentes, proporciona una lectura idéntica al caso anterior. Fotografía 33.

### **9.2.- EL “CONCRETE ENCOUNTER”.**

Este equipo proporciona información instantánea de pavimentos y paramentos mediante cuatro palpadores flotantes, para lo que dispone de escalas de hormigones para los primeros y de yeso para los segundos. Fotografía 34.



*Figura 34*

## **10.- ULTIMAS TENDENCIAS**

Además de estos instrumentos habituales en el estudio de la temperatura y humedad relativa del aire ambiente, de la temperatura superficial y del contenido de agua de los materiales, hoy día existen otros de funcionamiento similar, pero más avanzados tecnológicamente.

Así, los antiguos termohigrógrafos de tambor han dejado paso a modernos sistemas de reducido tamaño (más pequeños incluso que un paquete de tabaco), con capacidad de almacenar enormes cantidades de datos que posteriormente pueden ser vertidos a un ordenador.

Sondas de contacto de altísimas prestaciones, capaces de precisar más la auténtica temperatura superficial.



# **ANÁLISIS DE HUMEDADES EN OBRAS DE FÁBRICA.**

**Marta García Guillot<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Doctora en Ciencias Químicas. GEOCISA*

## **1. INTRODUCCIÓN.**

De cara a diseñar la reparación más acorde con la problemática específica de un determinado edificio, es necesario diagnosticar completamente las posibles causas y mecanismos de deterioro, que no tienen por que ser únicos o iguales para toda la estructura.

Además, abordar una reparación sin suprimir las causas del deterioro, implica unos resultados deficientes, a medio o incluso corto plazo, ya que al no eliminar el foco del problema, la situación de deterioro se repetirá y probablemente incrementada.

La manera de poder abordar la rehabilitación integral de un edificio, tiene que estar basada en un estudio previo de patología, que además debería ir acompañado de un estudio sobre la compatibilidad de los nuevos materiales de reparación con los originales.

Enfocando la cuestión a la problemática específica de las humedades, una forma de abordar este estudio previo puede ser diseñándolo de forma que sea algo sencillo, que implique una instrumentación elemental, accesible a cualquier laboratorio medianamente especializado. Esto permitirá optimizar la relación coste/información del estudio, siendo viable para cualquier obra de tipo patrimonial que se aborde, no únicamente para los monumentos más emblemáticos.

En esta ponencia se muestran algunos estudios relacionados con la presencia de humedades, abordados con una metodología sencilla que requiere un nivel de instrumentación muy elemental, pero que adaptada a cada circunstancia, puede proporcionar una información muy útil sobre la posible problemática de una estructura. De esta forma, una vez dictaminadas las causas de la presencia de humedades y sus deterioros asociados, será posible erradicar o mitigar el problema, incluyendo en la rehabilitación de la estructura las medidas a adoptar para ello.

## **2. EL AGUA Y LA PRESENCIA DE HUMEDADES.**

El agua se encuentra presente en todos los materiales que constituyen la edificación, así como en el terreno sobre el que ésta se encuentra. Dependiendo de las características de esta agua y de la acción conjunta con los agentes atmosféricos, puede tener lugar una serie de procesos que resultan degradativos para la durabilidad del edificio o conjunto monumental.

La susceptibilidad a la acción del agua de un material viene fundamentalmente definida por la red porosa del mismo, determinada por su microestructura característica.

El agua, junto con los agentes agresivos, puede discurrir a través de esta red porosa produciendo la disolución selectiva de parte de sus componentes, así como el arrastre de sustancias, tanto de las constituyentes del material como de las transportadas desde el terreno u otros materiales contiguos.

El tiempo que el agua, tanto en forma líquida como en forma de vapor, está en contacto con el material y la temperatura a la que esto se produce, determinan el tipo y nivel de deterioro que puede sufrir un material.

Al efecto degradativo que el agua produce hay que sumarle el que frecuentemente provoca la actividad humana: contaminación, alteraciones ambientales, restauraciones defectuosas, etc.

Las humedades que afectan a un edificio, de cara a plantear un estudio de patología, de forma genérica, pueden ser las siguientes:

- **Humedad de origen freático:** Este tipo de humedades que se produce en la cimentación queda dentro de la zona de variación del nivel freático. En este caso la aparición de agua se presenta acompañada de un efecto de presión, producido al interceptar con el agua alguno de los elementos constructivos (cimentación, pantallas, etc.).

- **Humedad capilar procedente del terreno:** En este caso, el origen de la humedad es el agua contenida en el terreno, sin que el nivel freático alcance la cimentación del edificio. Mediante un mecanismo de succión capilar el agua asciende desde el terreno a través de los cimientos, soleras o cualquier elemento constructivo que esté en contacto con la zona húmeda del terreno.

- **Humedad del terreno debido a rotura de redes de abastecimiento o sanitarias:** Cuando algún elemento de la red sanitaria o de abastecimiento se rompe en las proximidades de un edificio, bien por falta de mantenimiento o accidentalmente, las consecuencias se ponen de manifiesto en la zona inferior de la estructura. Habitualmente afecta a una zona de los muros, disminuyendo el foco de humedad al aumentar la distancia al punto de rotura.

- **Higroscopicidad:** En muros sometidos a un efecto de absorción capilar se puede producir el arrastre de sales solubles, procedentes de la propia piedra, del terreno o de otros materiales. Cuando el agua se evapora, estas sales quedan retenidas en el muro, cristalizando en la zona de evaporación. Varias de estas sales pueden ser higroscópicas, absorbiendo agua del aire cuando la humedad relativa ambiental se hace mayor que la de equilibrio de la sal, produciendo su disolución y la humectación del muro. Cuando la humedad relativa desciende, la sal recrystaliza en forma de eflorescencias superficiales o interiores que pueden producir la disgregación de los materiales, especialmente cuando este fenómeno se produce de una forma cíclica.

- **Condensación:** El vapor de agua contenido en un recinto a una temperatura ambiental determinada tiene una cantidad de masa de agua variable en función de la presión de vapor de agua existente. A esta masa de agua y presión de vapor les corresponde una temperatura de rocío. Cuando el vapor de agua entra en contacto con una superficie suficientemente fría y con temperatura igual o menor que la de rocío, se produce la condensación de agua en el paramento.

Analizando térmicamente los muros y determinando las condiciones ambientales del edificio, tanto interiores como exteriores, se determina el riesgo de condensación.

- **Infiltraciones:** El agua de lluvia debido a la gravedad y al efecto del viento, puede filtrarse por grietas, juntas y solapes mal ejecutados o zonas deterioradas.

Este tipo de humedades a veces puede ser complicada de resolver, ya que el punto en el cual se manifiesta puede estar alejado de la zona de infiltración.

- **Salpicaduras:** Este tipo de humedades aparece cuando en los paramentos horizontales se produce el rebote del agua de lluvia, provocando la humectación de los paramentos verticales inferiores e incluso su erosión.

Este tipo de humedades, por su morfología, pueden confundirse con capilaridad desde el terreno.

Lo habitual es que no exista un único tipo de humedad que sea la responsable de los deterioros que se estén produciendo, sino que sea un compendio de todas o varias de ellas.

### **3. METODOLOGÍA TRABAJO.**

La metodología de trabajo que aquí se propone resulta sencilla y está básicamente centrada en la inspección visual de la estructura y su entorno, estudiando las posibles variaciones que también pueden tener lugar durante el periodo en el cual se analiza la estructura.

Una vez realizada la inspección detallada del edificio, la cual debe ser efectuada por un técnico con experiencia en este tipo de problemas, se plantean las hipótesis de trabajo, las cuales se comprobarán mediante la realización de ensayos y controles sencillos, entre los que podemos encontrar:

- Registros de temperatura y humedad instantáneos.
- Registros continuos de temperatura y humedad (Data Logger).
- Registros de resistividad o conductividad eléctrica.
- Análisis químicos (determinación de sales fundamentalmente).
- Determinación del contenido en humedad de muestras y comportamiento hídrico del material.

Una cuestión clave para que el trabajo no sea excesivamente complejo y laborioso, es plantear un muestreo adecuado, tanto para la recogida de material como para los puntos de registro, de forma que el número de puntos sea suficiente y representativo del conjunto de la estructura, sin suponer un procesamiento excesivamente complejo.

Este tipo de estudio debe prolongarse durante un año, con el fin de completar un ciclo anual e identificar la posible influencia de las condiciones climáticas, realizando visitas periódicas trimestrales o cuatrimestrales.

Para ilustrar esto se presentan, a modo de ejemplos algunos de los trabajos realizados.

Primeramente se presentará un estudio de tipo general que se realizó en una iglesia de la Comunidad de Madrid, en el cual la dotación presupuestaria era bastante escasa, lo que limitaba los trabajos a realizar.

Posteriormente se tratarán aspectos muy concretos de otros trabajos realizados, que pretenden ser indicativos de algunas de las posibilidades que esta metodología sencilla de trabajo tiene: efecto de la ventilación en la zona bajo cubierta, efecto de una cámara bufa mal diseñada, humedades originadas por la colocación de una nueva cubierta mal resuelta, etc.

### **4. CASOS PRÁCTICOS.**

#### **4.1. ESTUDIO DE HUMEDADES EN UNA IGLESIA DE LA COMUNIDAD DE MADRID**

La iglesia es la única del pueblo en el que se ubica, siendo de gran tradición entre sus habitantes, que la consideran como un elemento importante dentro de la vida de dicha comunidad. Esta parroquia sigue manteniendo la representación de un Nacimiento viviente todas las Navidades, lo que da una idea de la importancia que dentro del pueblo tienen las actividades de la Iglesia.



Tiene unas dimensiones reducidas y una estructura muy sencilla con una única nave y 2 capillas adosadas. Presentaba claros daños por la presencia de humedades y además los fieles que acudían a ella se quejaban de que en su interior había unas condiciones ambientales que resultaban excesivamente húmedas.

Este trabajo se realizó durante aproximadamente un año, habiéndose efectuado 3 visitas de control en este periodo. Dentro de los trabajos efectuados en este tiempo están los siguientes:

- Recopilación de la documentación existente: no se efectuaron estudios geotécnicos por lo que hubo que recurrir a los que se habían realizado anteriormente en las proximidades.
- Levantamiento de los daños que se aprecian tanto por el interior como por el exterior, relacionados con los posibles problemas de humedad.
- Seguimiento del nivel de agua de los pozos más cercanos, con el fin de tener una idea de las variaciones del nivel freático, sin realizar sondeos.
- Seguimiento del contenido de humedad en muros mediante la utilización de un equipo basado en la resistividad eléctrica de los materiales y su variación con la humedad. Los puntos se han localizado a aproximadamente 20 y 200 cm. del suelo, tanto en el trasdós como en el intradós.
- Determinación del contenido real de humedad de 11 muestras y comportamiento hídrico de las mismas, en condiciones obtenidas en los registros de humedad y temperatura efectuados.
- Determinación de sales higroscópicas.
- Registro de temperatura y humedad ambiente mediante la colocación de 6 termohigrómetros tipo Data Logger.

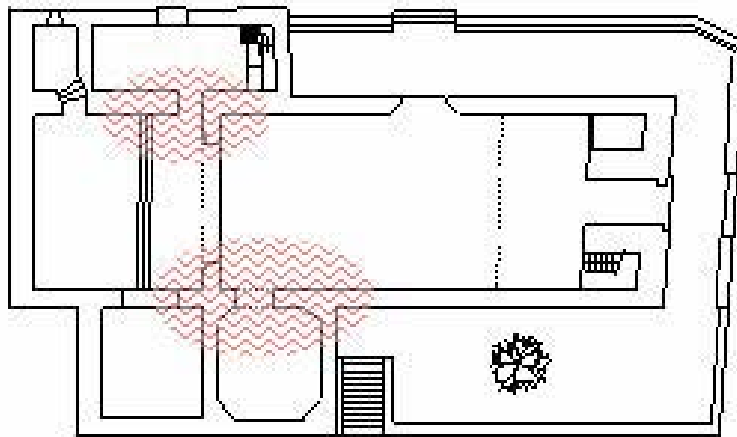
Las conclusiones que de este estudio se extrajeron son las siguientes:

1 - La iglesia muestra claros síntomas de humedad, que se mantienen durante todo el año.

En general la morfología de los daños parece indicativa de la existencia de humedades con distinta tipología:

- Filtraciones
- Capilaridad
- Salpicaduras del agua de lluvia

2 - Las zonas en las que se ha detectado más humedad en las tres visitas de control efectuadas (verano, invierno y primavera) han sido el intradós del muro izquierdo de la nave central así como el del muro interior de la sacristía y las dos pilastras de acceso al altar. Incluso en la solera que queda entre ambas pilastras se puede apreciar humedad. Esquemáticamente se muestran el siguiente croquis.



3 - La humedad ambiente en el interior de la iglesia es función del contenido en humedad de los materiales, produciéndose un equilibrio entre ambos.

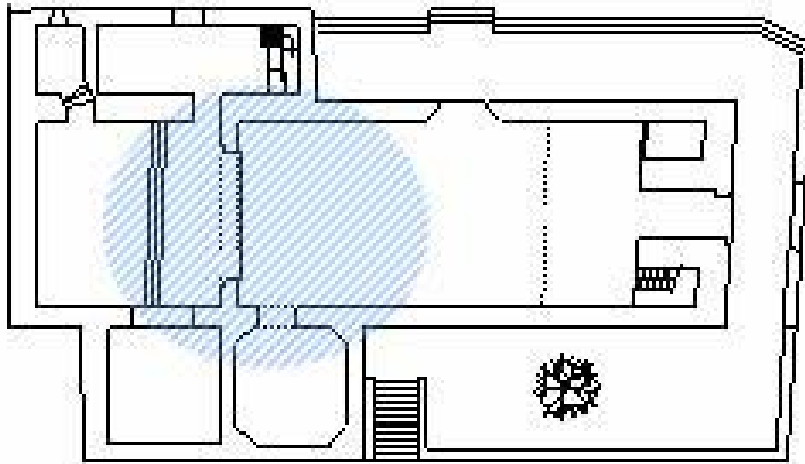
El nivel de agua de los pozos se ha considerado función del régimen de lluvias, dada la escasa utilización de los mismos.

A lo largo de las visitas de control efectuadas durante el transcurso de un año, se ha registrado que la evolución de la humedad ambiente en el interior de la iglesia es paralela a la variación de agua en los pozos próximos, lo que parece indicativo de que la humedad de la iglesia está relacionada con las precipitaciones que se producen.

4 - Durante los meses comprendidos entre octubre y mayo, se han registrado temperaturas inferiores a las recomendadas en la NBE (15°C), con la consiguiente falta de confort y sensación de humedad que ello conlleva.

5 - En algunas muestras se ha detectado la presencia de sales higroscópicas, obteniéndose comportamientos típicos de dichos procesos (absorción excesiva de agua). Esas sales se han detectado fundamentalmente en los enfoscados del intradós de los muros.

6 - Se pone de manifiesto un proceso capilar mediante el cual se produce una absorción de agua desde el terreno. Esto es especialmente notable en la zona de las pilastras de acceso al altar y las zonas intermedias y adyacentes.



El agua que origina esta capilaridad puede tener distinta procedencia. Por un lado, puede ser un nivel de agua que quede atrapado en los lentejones de arena intercalados en el primer nivel arcilloso, poco permeable. Además, parte del agua podría proceder de las filtraciones de la cubierta, en la zona del encuentro de la cubierta a dos aguas de la nave central con la de cuatro aguas situada sobre el altar, que parece quedar mal resuelto, permitiendo que se filtre el agua por los extremos laterales, fundamentalmente en la zona de la pilastra izquierda, que conducen el agua hasta la cimentación y el terreno.

Al ser el terreno arcilloso, hace que el agua quede como un nivel colgado, teniendo como única salida la ascensión capilar a través de los materiales en contacto (cimentación, muros, solera y pilastras).

Las recomendaciones hechas en este estudio fueron las siguientes:

1. Tratamientos de los muros.
2. Tratamiento de humedades en las pilastras de acceso al altar y muros adyacentes (electro ósmosis forosis).
3. Saneado de solera.
4. Revisión de cubiertas.
5. Instalación de un sistema de calefacción en el interior de la iglesia.

#### **4.2. EFECTO DE LA VENTILACIÓN DE LA ZONA BAJO CUBIERTA.**

Se realizó el estudio higrotérmico de una de las zonas de cubierta inclinada de un edificio que alberga uno de los museos más emblemáticos españoles, debido a los problemas que estaban surgiendo al hacer la obra de reposición de cubiertas.

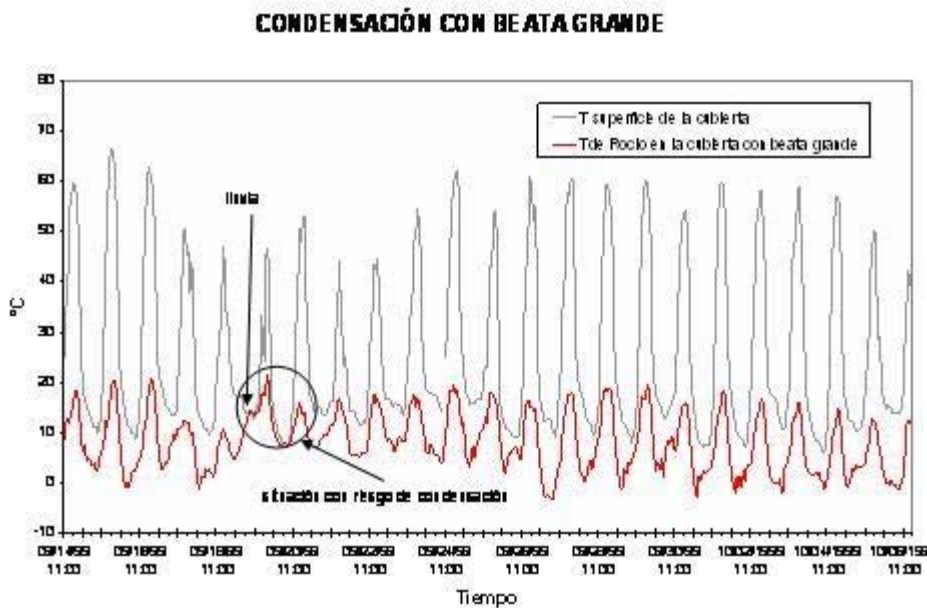
Una vez realizada la inspección, la hipótesis de trabajo a confirmar, es que se trataba de un problema provocado por la presencia de humedades de condensación en el interior de la cámara, las cuales se originan por una falta de aireación. Para la realización de este estudio,

únicamente se recurrió al registro con Data Logger de las condiciones de temperatura y humedad de tipo, en 9 puntos localizados en distintas cubiertas de ésta estructura, con distintas condiciones de ventilación (sin beatas, con beatas pequeñas y con beatas grandes), durante 3 meses y medio. Los equipos de medida utilizados fueron muy pequeños con el fin de poderlos introducir en el interior de la cámara de la cubierta.

Los resultados obtenidos confirmaron que se daban las condiciones de condensación, especialmente en los paneles con menor ventilación (cubiertas sin beatas), las cuales ocurren cuando la temperatura es inferior a la de rocío, lo que puede ocurrir en el interior de la cubierta cuando se produce un descenso brusco de la temperatura exterior.

En el estudio efectuado se comprueba que hacia las 8 de la mañana en la mayoría de los días, la temperatura de la cubierta desciende por debajo de la temperatura de rocío del ambiente, produciendo condensación por la cara exterior de la cubierta. En algunos casos y por periodos cortos, se puede también producir condensación en el interior de las cubiertas sin ventilación (cubiertas sin beatas).

También, se observó que la temperatura de rocío de las condiciones aireadas (con beata) siempre es inferior que la temperatura de la cubierta, al menos en las condiciones de temperatura y humedad estudiadas, no pareciendo posible el que se produzca condensación. Únicamente se detectó una excepción, coincidiendo con un momento de fuertes precipitaciones que pudieron provocar la entrada directa de agua de lluvia por el hueco de ventilación, ya que este no estaba protegido.



Las conclusiones que se obtienen fueron:

- La utilización de beatas de mayor tamaño favorece la ventilación de la zona bajo cubierta, alcanzándose menores temperaturas y contenidos en humedad.
- En el caso de los paneles sin ventilación, cuando se produce un descenso brusco de la temperatura, se dan las condiciones para que ocurra la condensación por el interior de los mismos.
- En el caso de los paneles ventilados, al menos en la época del año estudiada (de junio a



octubre) no se producen condiciones de condensación.

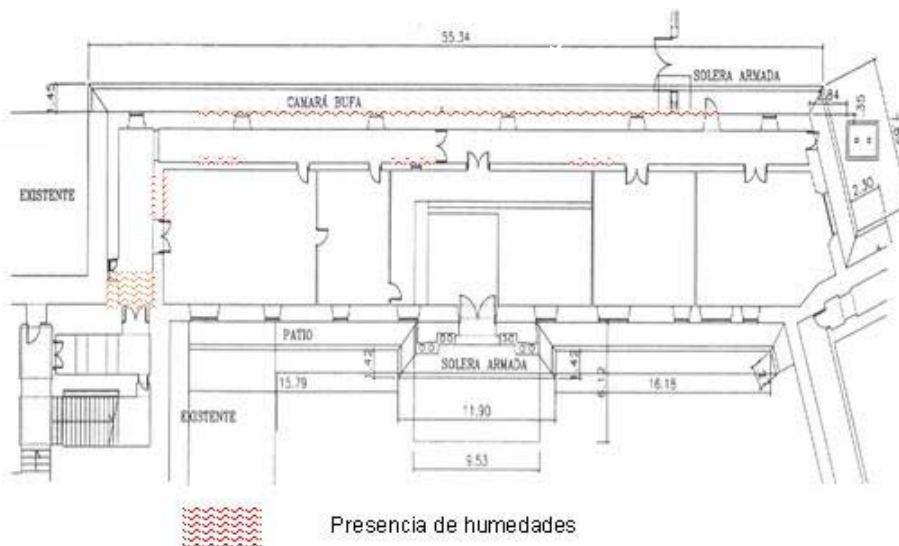
- La probabilidad de condensación parece disminuir con el aumento del tamaño de la beata

#### **4.3. EFECTO DE UNA CÁMARA BUFA MAL DIMENSIONADA.**

En este caso se trata de determinar la posible causa de aparición de una serie de humedades en un antiguo palacio, tras las obras realizadas para su adecuación para un uso distinto del que venía realizándose.

En el edificio, se han construido cámaras bufas para la aireación de la base de los muros, en un intento de evitar o eliminar la presencia de humedades de capilaridad que existían antes de la obra de rehabilitación. Sin embargo, esta medida que parece haber funcionado correctamente en otras alas del conjunto monumental, no ha sido suficiente en este muro posterior.

El croquis esquemático de humedades presentes en la planta baja, es el mostrado en la siguiente figura.

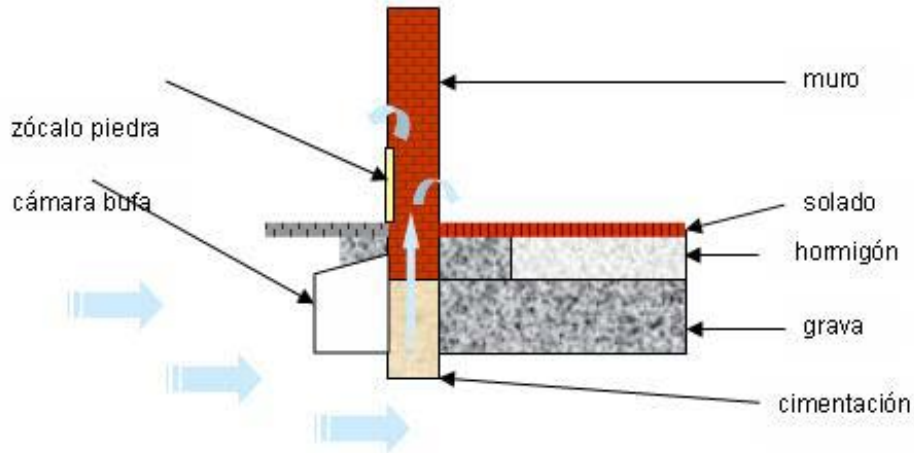


Las conclusiones obtenidas en este caso se basan únicamente en la inspección ocular de tipo general realizada y medidas no destructivas de contenido en humedad, basadas en la resistividad eléctrica del material, sin que exista un estudio específico de humedades del edificio.

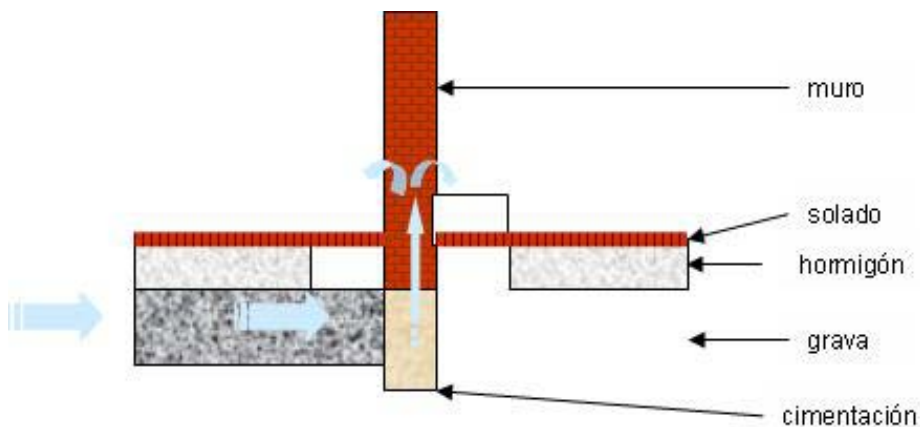
A priori, tras la visita genérica realizada y a falta de un estudio completo y específico del problema, la causa de este deficiente comportamiento o insuficiente aireación del muro, parece deberse a la baja relación entre la altura de la cámara bufa o zona aireada y el espesor del muro. Según la información facilitada, en el trasdós del muro posterior, debido a lo superficial de la cimentación y con el fin de no producir un descalce de la misma, la altura de la cámara bufa debió de ser reducida a aproximadamente 50 cm., lo cual parece insuficiente para el espesor del muro que debería desecar.

Debido a esto, la humedad procedente del terreno (nivel freático, filtraciones de aguas subterráneas o red sanitaria, etc.) se filtra por debajo de la cámara bufa ascendiendo

capilarmente por el trasdós del muro, alcanzando incluso las primeras hileras de ladrillos del trasdós, superando el zócalo de piedra (material menos permeable al agua), por detrás.



Una vez superado el muro posterior el aporte de humedad o incluso agua líquida se filtra por la capa de grava colocada debajo de la solera de hormigón, alcanzando el trasdós del siguiente muro. La cimentación de este muro sí supone una barrera al paso de humedad ya que produce un corte en la capa de grava sobre la que se asienta la losa de hormigón de la solera, lo cual evita que aparezcan manchas de humedad en el intradós. Por tanto, no se produce un proceso de succión capilar en toda la sección del muro, sino únicamente en el contacto grava/cara exterior (orientada al pasillo).

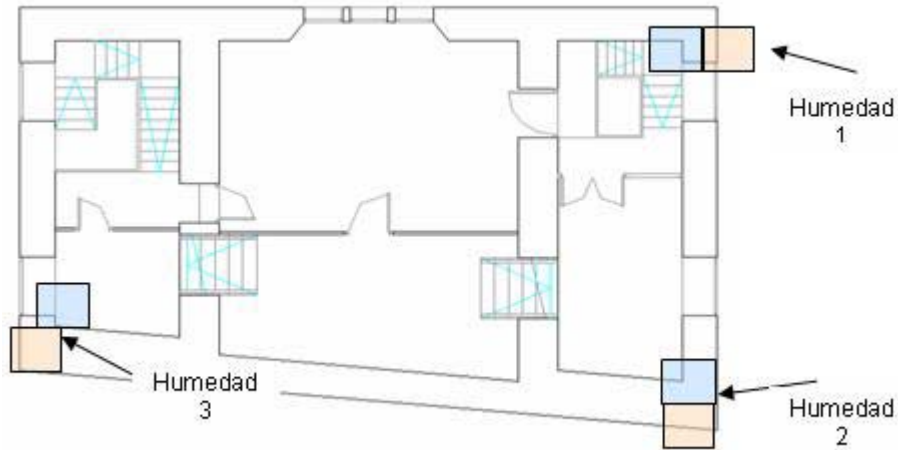


#### **4.4. PROBLEMAS DE HUMEDADES AL SUSTITUIR UNA CUBIERTA.**

Se trata de un antiguo almacén de un puerto de una ciudad andaluza, con una puerta árabe que se remonta al siglo XII, siendo actualmente un mercado central.

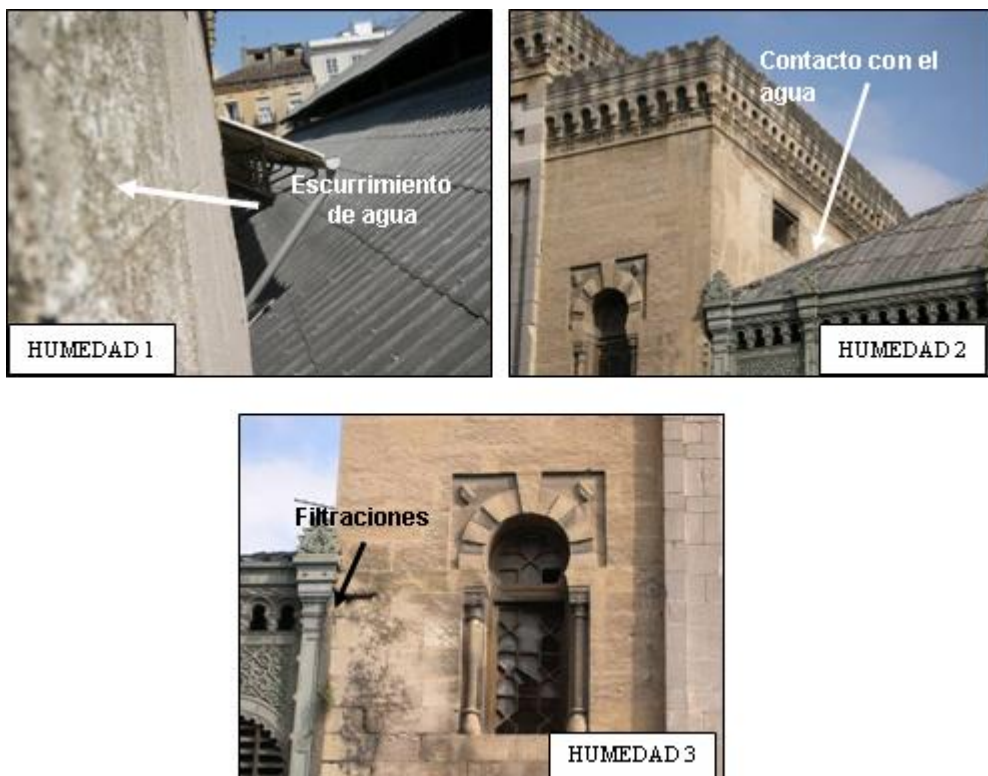
Actualmente presenta importantes problemas de humedad que parecen estar acentuándose con el paso del tiempo, teniendo además consecuencias resistentes.

Las humedades localizadas por el interior del edificio tienen su origen en filtraciones desde el exterior del monumento (fachada principal, posterior y laterales) coincidiendo fundamentalmente con los remates de la cubierta del mercado, faltando la impermeabilización de los encuentros con los muros de la torre, así como un adecuado sistema de sumideros y bajantes



Estas humedades producen la degradación de los materiales en contacto, comenzando con los menos resistentes (rejuntados) o expuestos, afectando también a los rellenos de los muros.

Una vez que estos deterioros se han producido, suponen vías de acceso al agua, acelerando los procesos degradativos.



En la siguiente fotografía fechada en 1989, se puede observar aún la cubierta cerámica de las naves laterales, en las que probablemente los encuentros con la torre estarían mejor resueltos, siendo por tanto éstas humedades y sus consiguientes efectos degradativos relativamente recientes, lo cual explica el que por el momento los daños del monumento no se encuentren en un estadio avanzado.



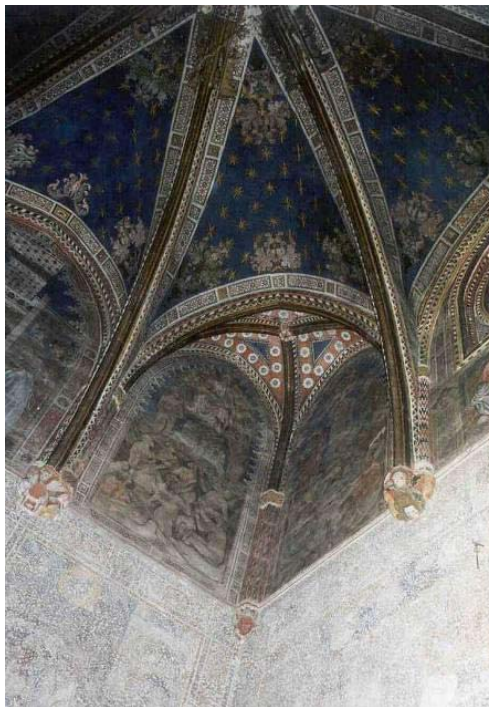
A tenor de la inspección realizada se pueden extraer las siguientes conclusiones:



- Los daños erosivos, estos tienen su origen fundamentalmente en las filtraciones de agua que se producen debido mayoritariamente a un deficiente diseño y ejecución de las cubiertas de las naves laterales, central y de la propia torre.
- Estas humedades han alterado las propiedades mecánicas de los muros, dando lugar a fuertes tensiones de tracción, superiores a la resistencia de la fábrica causando las fisuras existentes.

#### **4.5. REGISTRO DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD EN EL INTERIOR DE UN MURO.**

Este último caso práctico se basa en un estudio que tuvo lugar en una capilla perteneciente a una de las catedrales españolas más notables. Cuando se comenzó este trabajo, la capilla se encontraba muy dañada debido a la presencia de fuertes humedades que, al haber permanecido durante muchos años actuando sobre los muros, han provocado la degradación de gran parte de los frescos ornamentales pintados en el siglo XVI, que recubren los muros y la bóveda. Los muros han sido objeto de diversas intervenciones. Visualmente se aprecia que en una de ellas se repicaron los muros, hasta la altura del arranque de los arcos de las bóvedas, aplicándose un nuevo revestimiento del que actualmente no queda rastro, ya que se ha despegado y desprendido totalmente.



Debido a la presencia de estos cuantiosos daños y de la constante humedad, la capilla ha permanecido cerrada al público y al culto desde hace muchos años, no habiendo sido objeto de mantenimiento.

Cuando se planteó el presente estudio de humedades, se centró fundamentalmente en la investigación del estado y causas de humedad de la capilla. No obstante, debido a que no es una estructura aislada, estando incluida en el conjunto monumental de la catedral, se han hecho algunos controles y mediciones en otras dependencias, las cuales ayudan a interpretar las condiciones y evolución de la capilla objeto de este estudio.

En líneas generales los trabajos desarrollados fueron los siguientes:

- Levantamiento de daños.
- Registro continuo de la temperatura y humedad ambiente mediante la colocación de cuatro termohigrómetros en distintos puntos de la Catedral.
- Determinación del contenido original de humedad y comportamiento hídrico en 10 muestras pétreas.
- Seguimiento de la evolución del contenido en humedad en muros mediante la utilización de un equipo basado en la medida de la resistividad eléctrica.
- Determinación de la temperatura y humedad relativa ambiente en 13 puntos discretos.
- Seguimiento del nivel del agua en 11 pozos de la catedral.
- Petrografía de 2 muestras pétreas y análisis químico de 4 eflorescencias y 2 tomas de agua.
- Registro continuo de la temperatura y humedad en el interior de muros:

Los registros puntuales se repitieron en cada una de las 5 visitas de control realizadas, mientras que los registros continuos se mantuvieron durante todo el año que duró el estudio.

Aunque el trabajo realizado fue extenso, aquí únicamente se comentarán las medidas que se realizaron para controlar el contenido en humedad en el interior de los muros más afectados de la capilla, determinando su variación a lo largo del ciclo anual.

Para ello, en 4 zonas ubicados en 2 muros distintos de la capilla se instalaron 8 termohigrómetros data logger en orificios perfectamente sellados del exterior mediante tubos precintados con espuma de polietileno y juntas tóricas, lo que permitió conservar las condiciones de equilibrio del interior del muro en la pequeña cámara en la que se instaló cada termohigrómetro, sin tener intercambio de condiciones con el exterior.

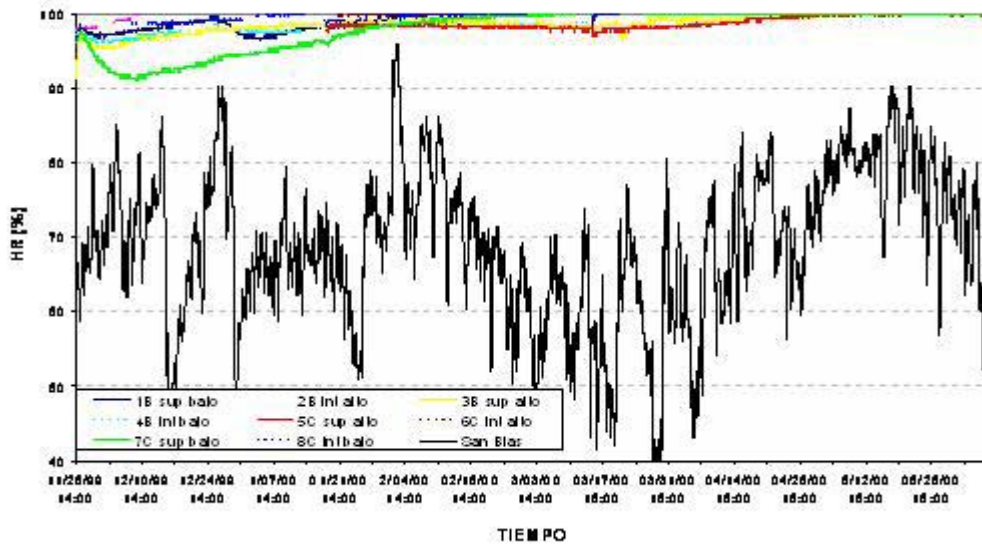
La localización de los ocho termohigrómetros registradores embebidos en los muros se hizo de forma que permitiera apreciar diferencias debidas a la ubicación en distintos muros (muros B y C), diversa profundidad (superficiales ente 10 - 13 cm. de profundidad e interiores entre 58 – 66 cm.), diferente altura (aproximadamente 60 cm. y 150 cm. del nivel del suelo).

En las siguientes figuras se muestra los registros de temperatura y humedad realizados en el interior de los muros.

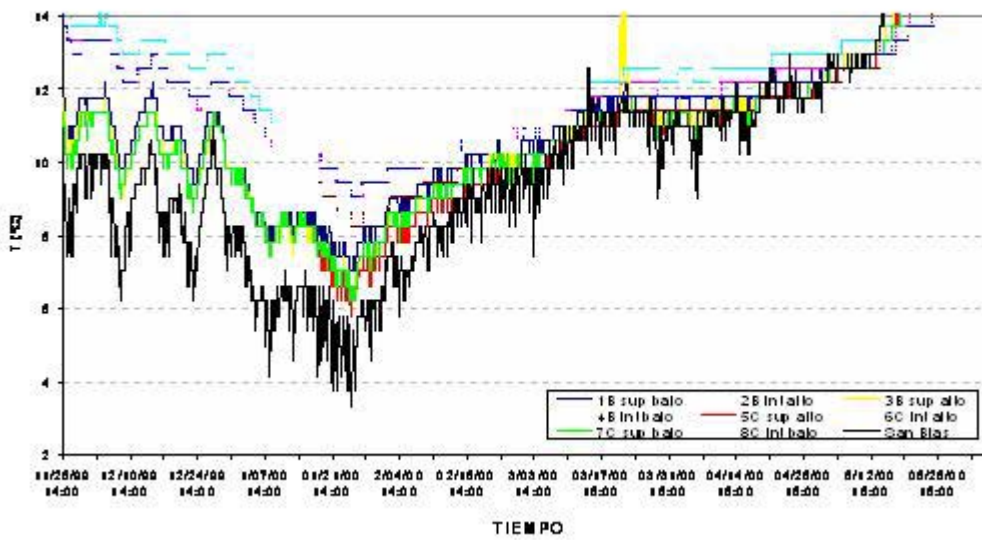
Lo más significativo es como en todos los casos se alcanza la saturación en el interior del muro.

Con el fin de detectar posibles condiciones de condensación, se ha representado también la diferencia entre la temperatura en el muro y la de rocío y como se puede observar, a partir de finales de diciembre esta diferencia se hace negativa en todos los puntos interiores del muro, dándose por tanto las condiciones para que ocurra condensación en el interior.

### INTERIOR MUROS

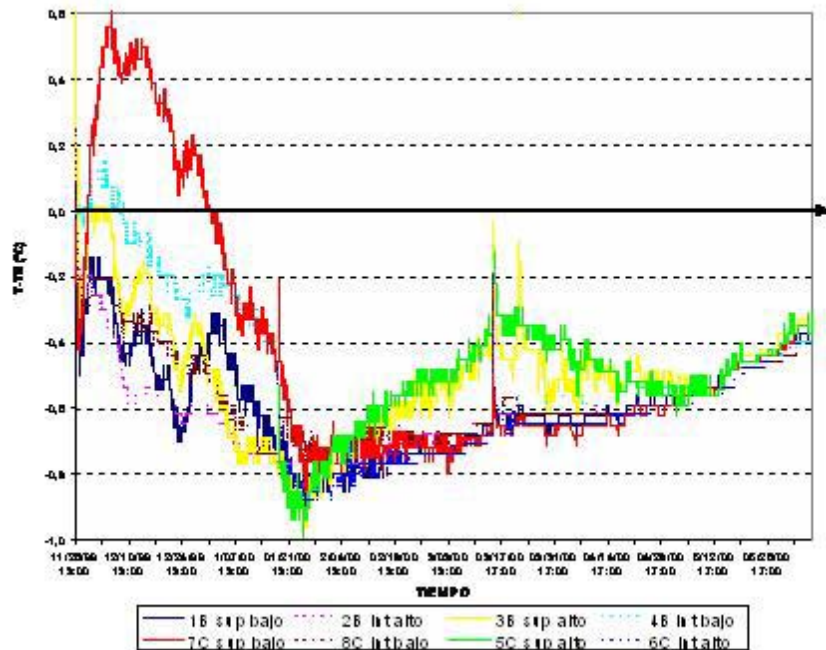


### INTERIOR MUROS





### CONDENSACIÓN EN EL INTERIOR DEL MURO



Aunque no se han realizado sondeos para determinar el nivel freático ni la composición del terreno situado bajo la capilla, no parece darse una situación de capilaridad desde el terreno. No se ha detectado diferencia de humedad entre los registros realizados en cotas altas o bajas del muro (aproximadamente 150 o 50 cm. respectivamente). Las diferencias más notables parecen darse con respecto a la profundidad de la posición de los termohigrómetros (12 ó 60 cm.), especialmente al principio del registro, aunque con el tiempo las humedades a ambas profundidades parecen tender a igualarse.

A la vista de todo el conjunto de resultados obtenidos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. La capilla se encuentra con un importante problema de humedades que ha provocado un fuerte deterioro de los frescos que recubren sus muros y bóveda, llegando a la pérdida total de los mismos en varias zonas.
2. El problema de humedad parece deberse a filtraciones de agua por los muros que limitan la capilla exteriormente (muro frente a la entrada y parte de los muros adyacentes).
3. El registro de parámetros de humedad realizado indica que en el interior de los muros más afectados se dan las condiciones de condensación, lo que hace que el material pétreo se encuentre permanentemente mojado. Se detecta un flujo de vapor de agua desde el trasdós del muro (exterior) hacia el interior de la capilla (intradós).
4. A la vista del conjunto de resultados, el problema de humedades que afecta a la capilla parece deberse fundamentalmente a una penetración de agua líquida bajo presión hidrostática, procedente de roturas en redes sanitarias o de bolsas de agua de lluvia. Circunstancialmente puede haberse producido, además, alguna rotura de redes de abastecimiento cercanas u otras causas no identificadas, que han originado la filtración de agua “a chorro”, inundando la capilla y zonas aledañas dentro de la catedral.
5. Se ha observado que en el periodo de tiempo estudiado, el nivel de los pozos

inspeccionados en la catedral permanece prácticamente constante, por lo que el aumento de la presión hidrostática no parece atribuible a un aumento del nivel freático.

6. Los análisis de aguas tomadas de 2 de los pozos parecen indicar filtraciones de aguas residuales procedentes de la red sanitaria, en las aguas freáticas.

## **5. RECOMENDACIONES**

Cuando una estructura presenta daños que ponen de manifiesto un problema de humedades, hay que abordar previamente a la reparación, un estudio que permita delimitar perfectamente la extensión, naturaleza e intensidad del proceso patológico de humedades. Una vez conocida la problemática real de la estructura, se podrá diseñar la intervención más adecuada.

Este tipo de estudio puede ser sencillo, implicando una instrumentación básica.

A la hora de diseñar cualquier tipo de intervención de rehabilitación, hay que tener muy en cuenta que dichas modificaciones tienen que estar previamente muy estudiadas, ya que deben asimilarse dentro de la estructura original, cuyos materiales, proceso constructivo, nivel de solicitaciones y envejecimiento es muy distinto.

Por tanto, el diseño de la reparación debe ser fruto de un conjunto multidisciplinar de técnicos, capaz de abordarlo desde las distintas especialidades: geotecnia, estructura y materiales.

# **MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO**

**Ignacio Marcos Rodríguez<sup>1</sup>, Rosa San Mateos Carretón<sup>2</sup>, Labein – Tecnalia<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Ingeniero Industrial*

*<sup>2</sup>Ingeniero Industrial*

*<sup>3</sup>LABEIN – TECNALIA. Unidad de Construcción y Desarrollo del Territorio*

## **1.- INTRODUCCIÓN**

Las patologías estructurales en las obras de fábrica son uno de los principales problemas en el sector de la conservación del patrimonio, ya que afectan a una parte muy importante de nuestros monumentos, y con frecuencia requieren adoptar soluciones complejas y de elevado coste.

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 con la colocación de una serie de referencias y equipos conocer como se deforman las estructuras en un periodo de tiempo, ya sea mediante instrumentación de lectura in situ o bien de lectura remota.

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.

La instrumentación y monitorización de las obras es una práctica cada vez más generalizada y sin duda técnicamente muy desarrollada, que permite no sólo detectar fallos en la estructura sino, sobre todo, conocer los movimientos de la misma en tiempo real, así como su evolución temporal.

El nivel de sofisticación alcanzado con las últimas tecnologías es notable y se detectan movimientos con una elevada precisión. Pero a la hora de interpretar los resultados obtenidos no existe bibliografía técnica especializada.

En ese aspecto LABEIN - TECNALIA está desarrollando un Proyecto incluido dentro de una Plan Nacional: “MEFAP”, MOVIMIENTOS ESTRUCTURALES EN FÁBRICAS DE PIEDRA: RECOPIACIÓN Y ESTUDIO DE CASOS REALES PARA LA REDACCIÓN DE UN TRATADO .El proyecto abarca los años 2006 y 2007 y en él se está realizando un estudio de diferentes casos analizados tanto por Labein como por otros agentes externos para elaborar un tratado que técnicos especialistas en estructuras puedan utilizar para la realización de una valoración de la estructura estudiada. El tratado analizará los movimientos que con mayor frecuencia se detectan en las obras de fábrica, tales como apertura y cierre de fisuras, variación de la inclinación en paramentos y pilas, descensos en flechas de arcos y cimentaciones, incrementos de luces en arcos y bóvedas como consecuencia de la separación entre los arranques, etc. El tratado deberá convertirse en una herramienta que facilite la interpretación de los resultados de los controles de movimientos, mediante la aportación de rangos orientativos que permitan distinguir movimientos patológicos de los que son cíclicos, o identifiquen determinados niveles de riesgo.

Entre los objetivos que se pretenden alcanzar con este Proyecto una vez finalice, se encuentran los siguientes:

1. Distinguir la naturaleza de los movimientos entre movimientos patológicos, indicativos de la degradación de la estructura y los movimientos cíclicos o estacionales propios de este tipo de estructuras.
2. Establecer los factores que originan los movimientos estructurales de carácter cíclico y cuantificar en la medida de lo posible su influencia.
3. Establecer rangos cuantitativos para los diferentes movimientos relacionados con niveles de seguridad de las estructuras.
4. Establecer umbrales de movimientos a partir de los cuales quedan justificadas determinadas intervenciones.
5. Reunir en un documento gran número de casos reales que aporten una visión global del tema.
6. Mejorar la comprensión sobre el funcionamiento de las obras de fábrica de piedra a partir de los movimientos estructurales.

## **2.- UTILIDAD DE LA TÉCNICA**

Las construcciones en mampostería de piedra siguen siendo el conjunto más numeroso en el patrimonio edificado de España. Son construcciones en piedra la mayoría de los monumentos históricos, muchos edificios de viviendas, pero también un enorme patrimonio de obra civil: puentes, muros de refuerzos, muros de contención de carreteras etc.

Por otra parte, dichas estructuras son grandes desconocidas: la mayoría de los profesionales que trabajan con ellas no tienen conocimientos suficientes para valorar a fondo su comportamiento estructural.

En las últimas décadas se está prestando especial atención a las estructuras de fábrica y los técnicos que se dedican a su estudio son conscientes de que su comportamiento es muy diferente a las estructuras habituales de hormigón y metálicas. Además no se disponen de las herramientas de cálculo tan detalladas y validadas como las existentes para las estructuras de hormigón y acero por lo que los técnicos que se dedican a la valoración de los niveles de seguridad de las estructuras de fábrica tienen que valerse de otros parámetros para su evaluación estructural.

Una de estas herramientas que permite a los técnicos especialistas en la evaluación de las estructuras de fábrica determinar los niveles de seguridad de las estructuras es el control de movimientos de las mismas. Con los resultados obtenidos del control de movimientos realizado se puede determinar el estado de “salud” con el que goza la estructura.

Con respecto a cuando se considera oportuno realizar un control de movimientos, existe una numerosa casuística en la que la información que aporta un control de movimientos es interesante:

- En estructuras que poseen daños estructurales y que tiene prevista una intervención de refuerzo o de consolidación. El hecho de conocer como se mueve la estructura en relación a sus daños puede determinar el tipo y alcance de la actuación que se estime como más conveniente. Imaginemos un edificio que posee numerosas fisuras; el criterio de intervención diferirá si las fisuras se encuentran activas o si por el contrario

no lo están. En el caso de encontrarse activas, hay que conocer cuales son las causas por las que están activas, si tiene su origen en el comportamiento térmico de los materiales o si por el contrario sobre ellas existen factores externos que inducen movimientos en la estructura que podrían originar su colapso. Si la actividad de los movimientos de la fábrica está en las diferencias térmicas que se producen en las diferentes épocas del año o si por el contrario están originadas por otros agentes.

- Control de movimientos de una estructura de fábrica sobre la que se va a realizar una obra que pueda modificar su estado de cargas o su geometría, tales como un cambio de cubierta, apertura de huecos, eliminación de fábricas adosadas no originales, etc. Pese a estudiar detenidamente la incidencia teórica de la intervención, puede resultar conveniente garantizar que el comportamiento previsto se corresponde con el real, e incluso verificando como dichas intervenciones pueden llegar a alterar el comportamiento cíclico que el edificio pudiera tener hasta entonces. En el caso de una nueva cubierta, se podría comprobar si esta ejerce empujes en la fábrica que ocasione empujes en la cabeza de los muros de forma que genere desplomes en los mismos que generen inestabilidades que pueden provocar el colapso de los muros.
- Valoración del origen de la fisuración existente, estableciendo su posible carácter estacional o por el contrario, su evolución ligada a problemas de índole patológica.
- Herramienta complementaria a otros estudios que permitan determinar los niveles de seguridad con los que cuenta la estructura al conocer como son sus movimientos y su posible correlación con modelos matemáticos u otro tipo de estudios.
- Influencia de actuaciones en el exterior del edificio, tales como excavaciones o voladuras en colindantes, variaciones del nivel freático motivadas por obra civil cercana o periodos de sequía, etc.

Independientemente del sistema de monitorización que se emplee, esta debe de colocarse una vez que se hayan seguido ciertos pasos tendentes a obtener un conocimiento previo del comportamiento de la estructura y de su posible funcionamiento. En aquellos casos en los que la monitorización obedezca a determinar un posible análisis del origen y evolución de daños existentes, con carácter previo a la colocación de las referencias y sensores, debe de procederse a efectuar una inspección y levantamiento de patologías, para definir la ubicación y el número de los puntos de medición. Cuando la campaña de medición tenga su origen en intervenciones exteriores al edificio o bien en una intervención en el mismo, además de conocer su estado patológico, se deberá de valorar previamente las posibles afecciones, a fin de seleccionar los parámetros a controlar durante el proceso de seguimiento.

### **3.- TIPOS DE MONITORIZACIONES**

En la actualidad se desarrollan controles de movimientos de estructuras de fábrica basados en dos sistemas diferentes; una de ellas es el control remoto de estructuras y otra el control de estructuras mediante técnicas convencionales denominado manual (colocación de referencias y medida de las mismas con equipos portátiles). 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.

A continuación se describen los sistemas de monitorización que habitualmente se emplean para llevar a cabo los controles de movimientos en estructuras de fábrica.

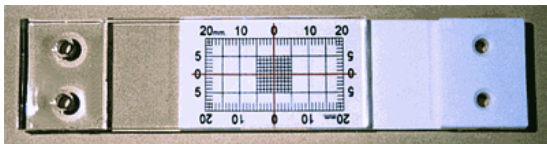
### **3.1.- Monitorización Manual**

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.

Se muestran a continuación las referencias más habituales para llevar a cabo el proceso de medición y control:

– **Testigos de fisuración.**

Los testigos de fisuración se emplean como sustitutivo de los tradicionales fisurómetros (reglas graduadas fijadas a ambos lados de las fisuras a controlar); consisten en dos dados de aluminio con un alojamiento troncocónico fijados mediante adhesivo a ambos lados de las fisuras, en los puntos de control que se establezcan. Por este motivo debe eliminarse puntualmente el revoco o el enlucido a ambos lados de la fisura en los puntos en los cuales se proceda a su instalación. Con posterioridad, y una vez endurecido el adhesivo, se procederá a la lectura de la separación entre los mismos mediante calibre adaptado de sensibilidad 0,01 mm.



*Fisurómetro convencional*



*Referencia fisuración en obra de fábrica*



*Referencia fisuración en obra de fábrica*



*Medición de referencias mediante calibre*



- **Referencias de control de desplazamientos angulares.**

Las referencias de control de desplazamientos angulares consisten en placas, habitualmente metálicas, que se fijan a los paramentos verticales objeto de estudio mediante un mortero de retracción compensada. Con posterioridad y una vez endurecido el mortero empleado como adhesivo, se procede a su lectura mediante un equipo denominado Tilt meter, con una sensibilidad de 8" de arco, con el objeto de detectar variaciones en la inclinación de los mismos. Al igual que las referencias de fisuración, requiere la eliminación de enlucidos o de revestimientos en mal estado que pudieran provocar su desprendimiento.



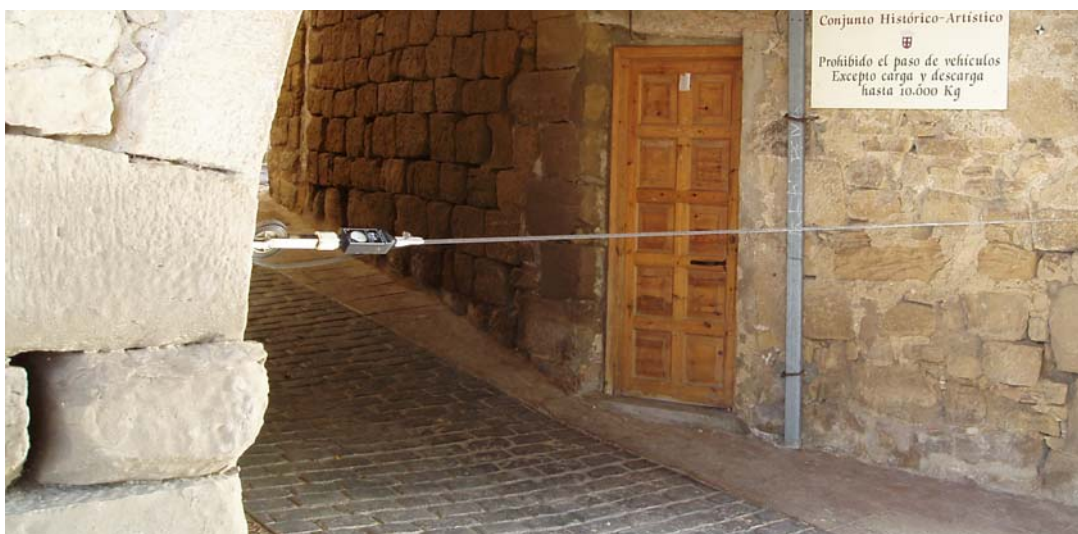
*Placa inclinométrica*



*Transductor portátil de lectura*

- **Cintas de convergencia.**

Las referencias para la medición de la variación relativa de la distancia entre muros mediante cinta métrica indeformable, son dos argollas metálicas fijadas a los paramentos a controlar mediante resinas. Una vez endurecida la resina procederá a la lectura de la distancia relativa entre los paramentos controlados mediante cinta métrica indeformable. La sensibilidad del equipo es de 0,05 mm.



*Cinta de convergencia en proceso de lectura*





*Cinta métrica indeformable: Equipo e instalación para lectura*

– **Referencias de nivelación.**

Para monitorizar los posibles movimientos verticales que pueda sufrir la estructura, se puede realizar una nivelación de precisión de varios puntos. Para ello se fijaran una serie de referencias, manteniendo al menos dos referencias en puntos considerados fijos, fuera del área de influencia de movimientos verticales.



*Referencias de nivelación*



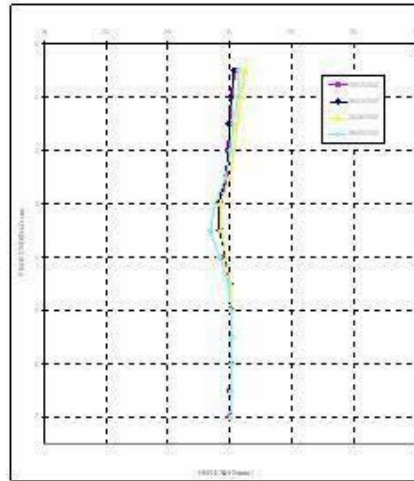
*Nivel de precisión*

– **Inclinómetros.**

Para conocer posibles movimientos en el subsuelo se instalan tubos ranurados en sondeos previamente ejecutados, con las ranuras ubicadas cada  $90^\circ$  en sección transversal. Ello permite introducir en el tubo un torpedo inclinométrico que detecta la inclinación del tubo en las dos direcciones ortogonales a diferente profundidad. 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. El equipo cuenta con una sensibilidad de  $10''$  de arco.



*Tubo ranurado y torpedo inclinométrico con electrónica de medida.*



*Lecturas de inclinómetro a largo de un periodo de medición.*

– **Condiciones ambientales.**

En los momentos de realizar las mediciones es necesario proceder al menos al registro de temperatura y humedad, para poder analizar posteriormente los datos de las lecturas en consonancia con las variaciones ambientales.

**3.2.- Monitorización remota**

Como alternativa a la monitorización manual es posible la realización de una monitorización remota. 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.

Los equipos empleados en la monitorización remota pueden agruparse en tres familias:

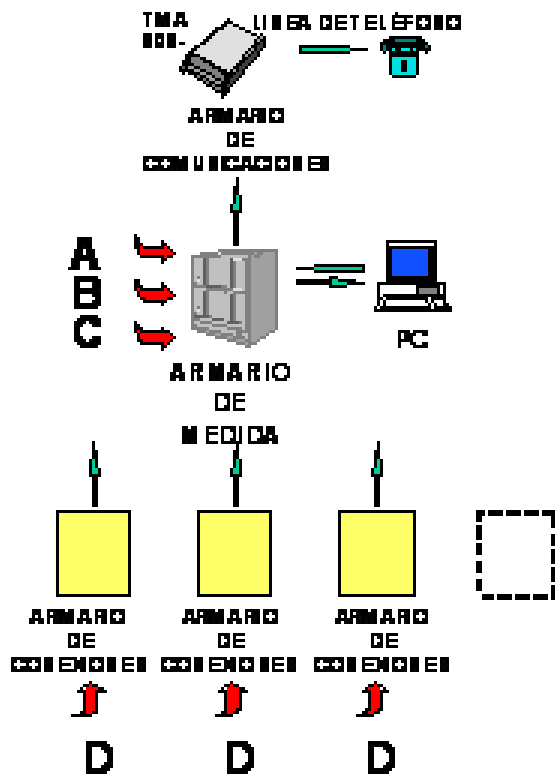
- Sensores convencionales, habituales en laboratorios, tales como draw-wire, inclinómetros, galgas extensométricas, etc. Requerirán fuente de alimentación, batería, acondicionadores de señal necesarios y equipo de adquisición de datos y control y transmisión hasta PC.
- Sensores basados en la tecnología de hilo vibrante, sistema que destaca por su estabilidad de medida a largo plazo. Requerirán también fuente de alimentación, UPS, equipo de adquisición de datos y control y transmisión hasta PC.
- Sensores de fibra óptica, basados en interferometría de baja coherencia.

En este artículo se mostrará con detalle los sensores de hilo vibrante, considerados en estos momentos como los que ofrecen una mayor ventaja en cuanto a prestaciones respecto de su coste. Esta técnica de hilo vibrante se basa en la relación existente entre la frecuencia de vibración de un hilo metálico tenso y la tracción a él aplicada. Ambos extremos del hilo metálico se fijan a los dos puntos cuyo movimiento relativo de separación o acercamiento se

quiera medir. A continuación se tensa el hilo y se induce en él una vibración, midiéndose su frecuencia.

Una posterior lectura de la frecuencia de vibración se efectúa en otras circunstancias que han podido modificar la distancia entre los extremos del hilo. Con la diferencia de las frecuencias de vibración medidas, puede calcularse el movimiento relativo entre los anclajes del hilo. Todos los sensores incorporan un medidor de temperatura que permite efectuar la compensación de la misma en la propia electrónica del sensor.

Los datos de cada sensor, se recogen periódicamente en una estación de medida instalada en el monumento, en función del período de tiempo programado para ello. Estos datos se transmiten a las instalaciones centrales por vía telefónica, de modo que se pueda disponer en todo momento de los movimientos registrados.

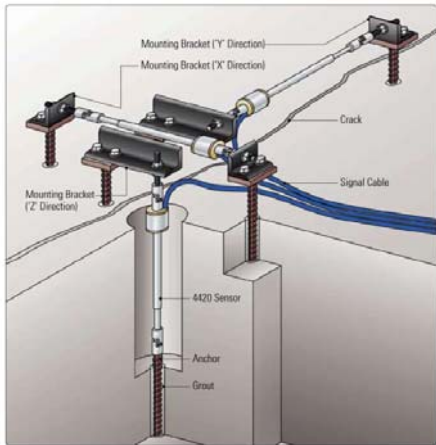


- A 8 canales para transductores de hilo vibrante
- B 8 canales para transductores con salida 0-20mA
- C 1 canal para equipo de medida de temperatura ambiente y humedad relativa
- D 16 canales para transductores de hilo vibrante

Los tipos de sensores que habitualmente se emplean para estas medidas son:

- **Extensómetros (Crackmeter).**

Se emplean para la medición de la variación de espesor de fisuras, con amplitudes de medición comprendidos entre 25 y 50, y apreciación de 0,01 mm. Se fijan mecánicamente o químicamente a ambos lados de la fisura a controlar.



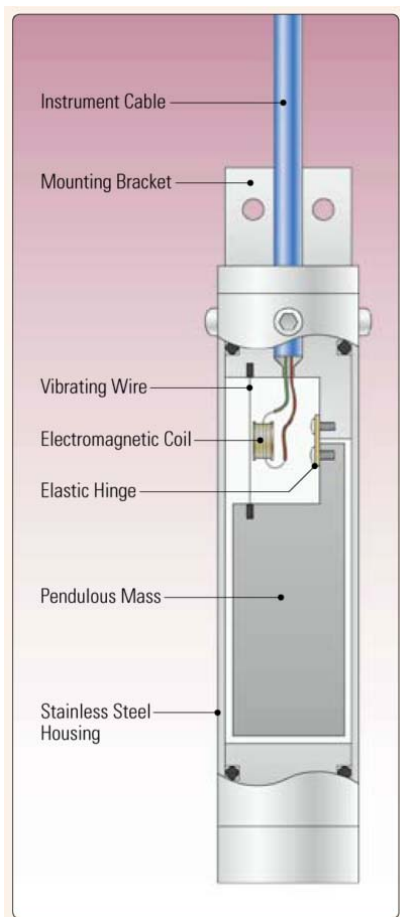
*Colocación de extensómetros en tres direcciones*



*Extensómetro de 50 mm.*

– **Clinómetros**

Se emplean para el registro de la inclinación de elementos estructurales (fundamentalmente muros y pilares). La capacidad de medida es de  $10^\circ$  en el plano de montaje seleccionado, y su apreciación es de 10 segundos. Requieren piezas específicas para su colocación



*Esquema del clinómetro*



*Ubicación de clinómetros en una pila*

– **Cintas de convergencia**

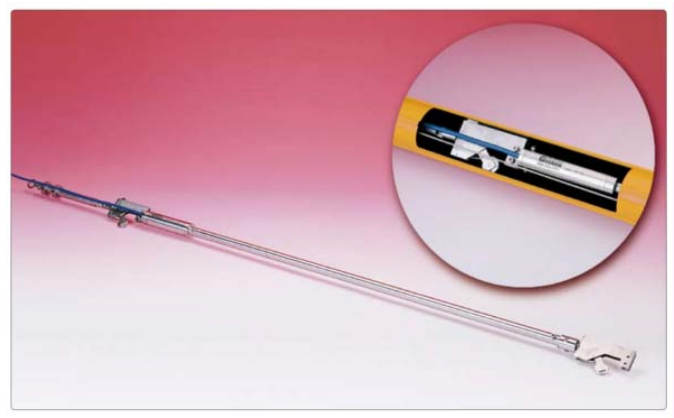
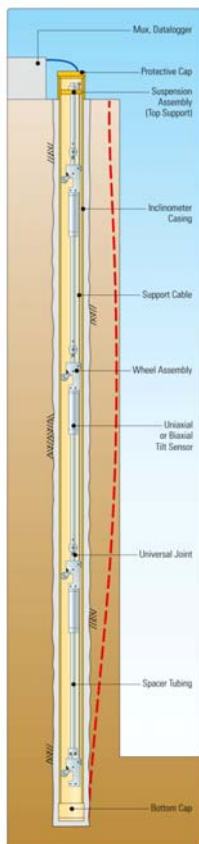


Se emplean para el registro de medida del movimiento relativo entre dos paramentos (fundamentalmente muros y pilares). La capacidad de medida al igual que los extensómetros es de 25 y 50 mm y su apreciación es 0,01 mm.



Cintas de convergencia de 50 mm.

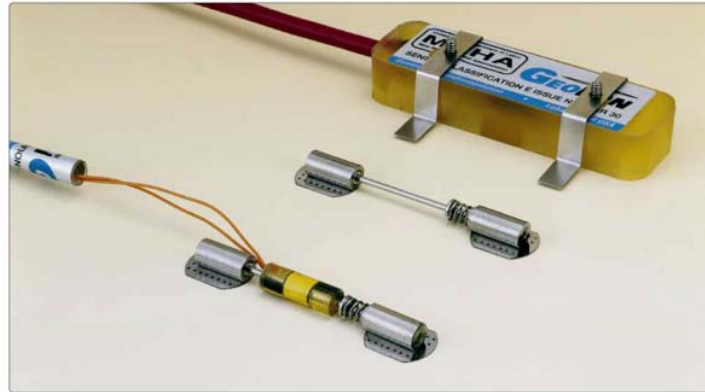
– **Inclinómetros**



De manera análoga a la información que proporciona en inclinómetro manual, puede disponerse de inclinómetros instalados de manera permanente en tubos inclinométricos, si bien al multiplicar el número de sensores, el coste puede llegar a ser prohibitivo.

– **Galgas extensométricas**

Ocasionalmente puede requerirse la colocación de galgas extensométricas, de manera análoga a las convencionales. Su rango de medida es de  $3 \cdot 10^{-3} \mu\epsilon$ .



– **Sensores de temperatura y humedad.**

En los lugares en los que se hayan instalado los instrumentos anteriormente mencionados, se llevará a cabo una medición paralela de las temperaturas, y, en los espacios interiores, de humedad. Cada sensor de los mencionados previamente lleva incorporado un termistor, cuya lectura se realiza en paralelo a la del propio sensor. Esta información servirá para distinguir los movimientos cíclicos debidos a acciones térmicas y a valorar con mayor criterio los resultados obtenidos.

#### **4.- CASOS PRACTICOS**

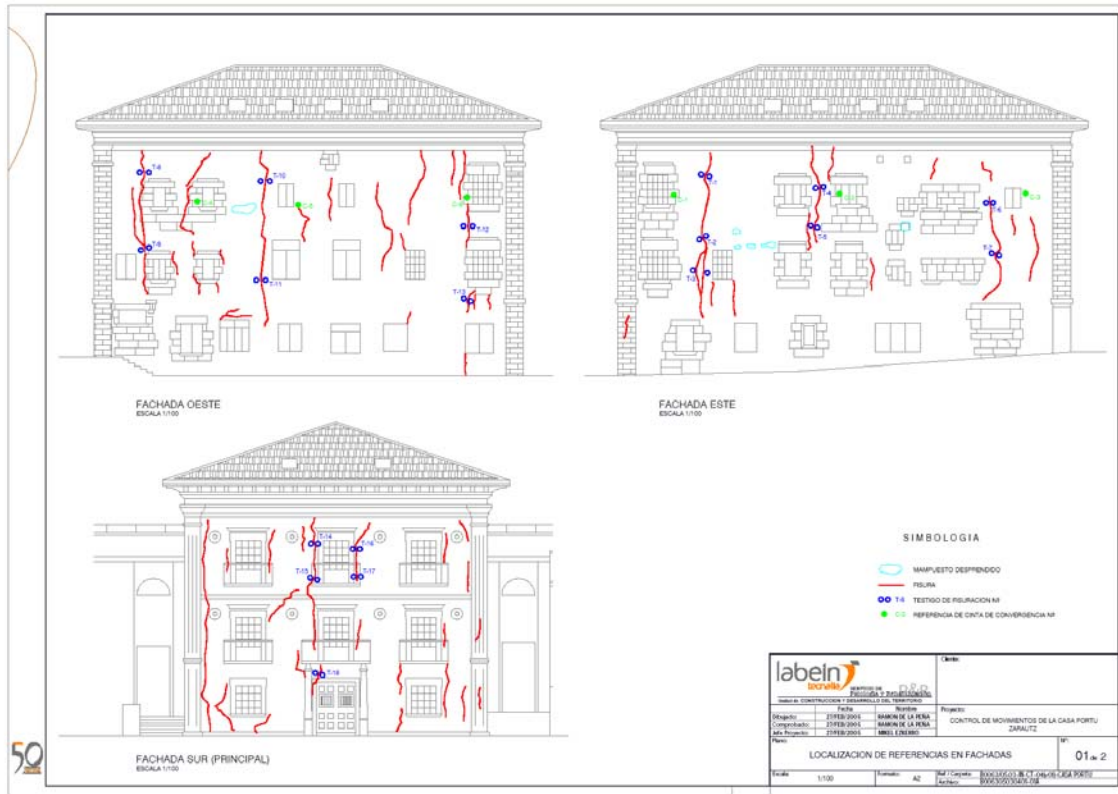
A continuación se presentan dos ejemplos prácticos de dos casos recientes de los llevados a cabo por este LABEIN-TECNALIA, uno de ellos mediante control manual y ya finalizado, mientras que el segundo se está llevando a cabo en la actualidad mediante monitorización remota. Ambos son resultado del trabajo habitual de los técnicos de LABEIN-TECNALIA en los últimos años.

##### **Monitorización Manual: CASA PORTU**

Este caso tiene su origen en las fisuras detectadas en los muros de fachada principal y fachada lateral del edificio de la Casa Portu, tratándose de un inmueble comprendido dentro de un Casco Histórico y con el máximo grado de protección debido a su carácter histórico. Hace unos años se construyó un aparcamiento subterráneo en la plaza ubicada junto a la fachada principal, lo que pudo motivar la existencia de fisuras en los muros laterales debido al posible asentamiento diferencial en la parte delantera del edificio. Con el paso del tiempo, se ha requerido conocer en mayor profundidad el comportamiento del edificio en lo referente a su fisuración, solicitándose además la posible valoración del riesgo que dichos daños pudieran implicar.

Con este fin, se diseñó un plan de mediciones de tal manera que pudiera discernirse si la fisuración correspondía a movimientos naturales del edificio, dado su grado de exposición (se trata de un edificio exento por sus tres caras) o si por el contrario dicha fisuración, independiente de su origen, mantenía una progresión relevante. En la figura siguiente se

indica la posición de las fisuras en fachada y la ubicación de algunas de las referencias empleadas en el seguimiento. Además de las mostradas, se colocaron otras por el interior del edificio, tratando de combinar cuestiones prácticas de accesibilidad con el grado de información requerido e incluso con provocar los menores daños posibles a la fachada de sillería.

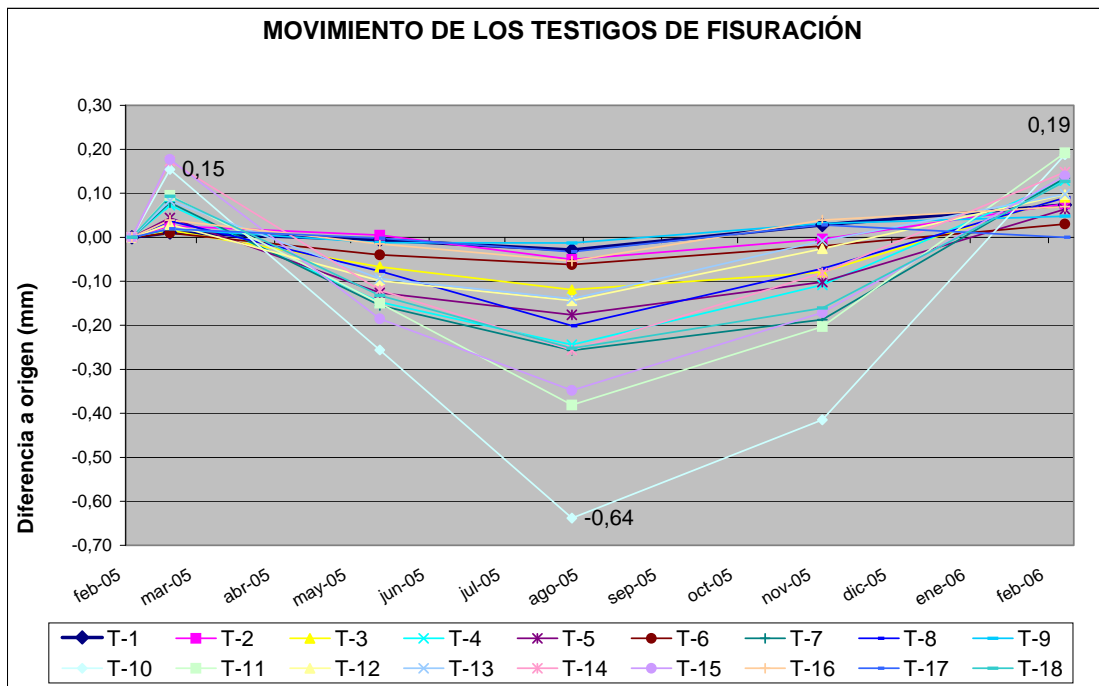
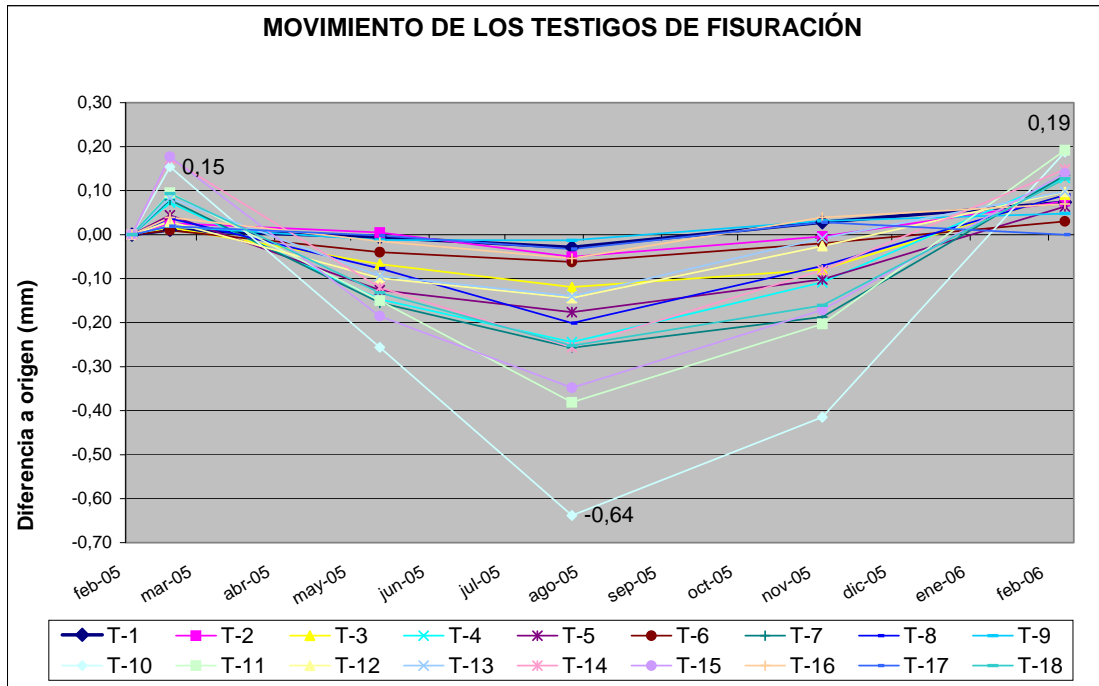


El periodo de medición estuvo comprendido entre febrero de 2005 y febrero de 2006, completando un ciclo estacional. Se llevaron a cabo un total de 6 medidas. La instrumentación colocada es la siguiente:

- 18 testigos de fisuración.
- 12 referencias para la medición mediante cintas de convergencia.
- 4 referencias de control de desplazamientos angulares mediante tilt-meter.

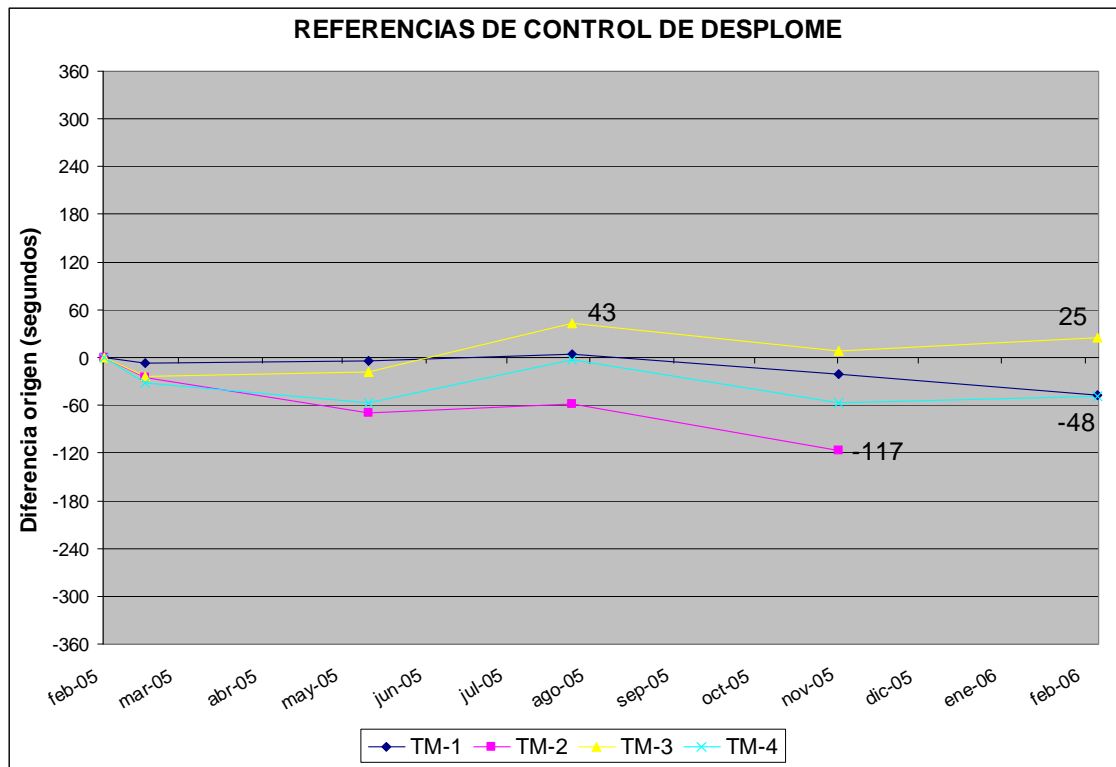
Los resultados de las medidas se reflejan en gráficos que permiten valorar mejor los resultados obtenidos.





La evolución de la anchura de todas las fisuras tiene un comportamiento homogéneo, produciéndose una apertura de las mismas en febrero, posteriormente un cierre hasta agosto y de nuevo una apertura hasta febrero. La mayor amplitud de movimiento relativo entre labios de fisura se ha obtenido en el testigo T-10, con un valor de 0,83 mm, y el mayor desplazamiento residual del año transcurrido es de 0,19 mm.

Por su parte, los movimientos registrados mediante las cintas de convergencia también tienen una evolución homogénea, produciéndose un cierre de las mismas en febrero, posteriormente una apertura hasta agosto y de nuevo un cierre hasta febrero. La mayor amplitud de movimiento relativo entre referencias se ha dado en la cinta CC 7-8, con un valor de 1,84 mm, y el mayor desplazamiento residual del año transcurrido es de 0,34 mm.

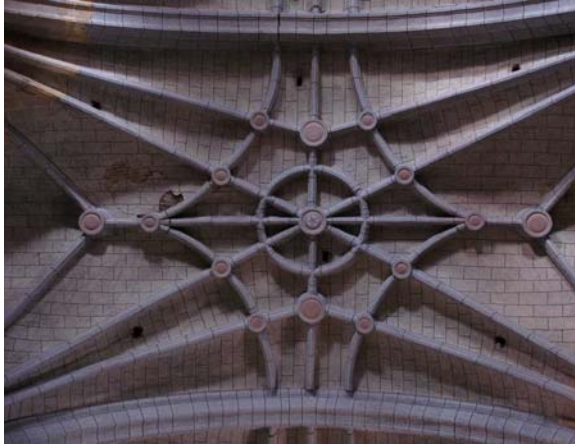


Como puede observarse en la gráfica, también los tilt-meter han experimentado una evolución en el giro homogénea, produciéndose una inclinación de los muros hacia el interior del edificio en febrero, posteriormente hacia el exterior en agosto y de nuevo hacia el interior en febrero.

La tendencia de los movimientos coincide con la evolución esperada debida a la variación de la temperatura. En un período de descenso de las temperaturas, los muros se contraen, produciéndose un aumento de la anchura de las fisuras y un acercamiento entre las referencias de las cintas de convergencia. Esto último significa una disminución de la longitud total de los muros por lo que, al permanecer fija la cimentación de los mismos, tienden a cerrarse provocando una inclinación hacia el interior del edificio. En cambio, en un período de aumento de temperaturas el muro se dilata, produciéndose por tanto el cierre de las fisuras, el alejamiento de las referencias de las cintas y la inclinación de los muros hacia el exterior.

### **Monitorización automática: Bóvedas en iglesia de San Andrés Apóstol.**

El origen de este caso se sitúa en el cambio de cubierta que se preveía realizar a corto plazo en este templo. Con carácter previo, y dadas las múltiples fisuras que presentaban algunas de las bóvedas, produciéndose incluso desórdenes en los arcos, se estimaba conveniente por parte de la propiedad y de la dirección técnica, la realización de un control mantenido en el tiempo que pudiera servir, por un lado, para valorar la posible incidencia del cambio de cubierta, y por otro, valorar la evolución futura de las fisuraciones y daños existentes.



*Bóveda*

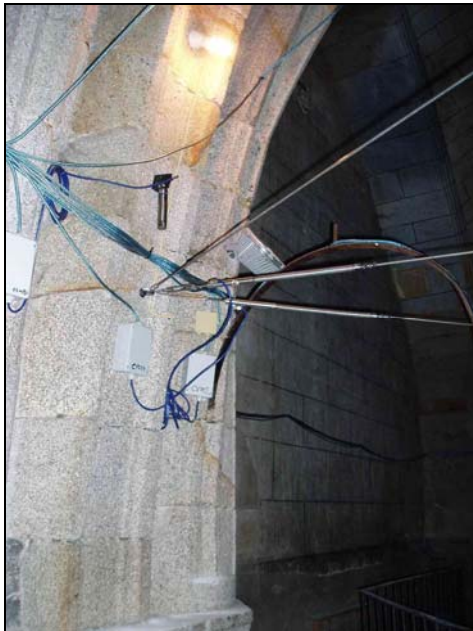


*Coro y bóveda*

De acuerdo con la dirección facultativa se procedió a definir los puntos de control para posteriormente determinar la instrumentación precisa. El número de sensores colocados son los siguientes:

- 7 extensómetros de 50 mm., de los cuales 6 están colocados en arcos de las bóvedas
- 6 cintas de convergencia localizadas en las dos primeras bóvedas, que eran las que presentaban mayores daños.
- 5 clinómetros, de los cuales 4 se sitúan en los arranques de los arcos principales y uno más sobre el muro principal de la Iglesia, motivado por la separación existente entre la plementería de la bóveda y el citado muro.

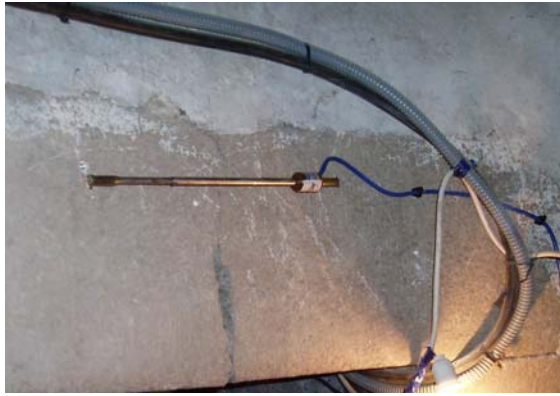
En las imágenes siguientes se muestran algunos de los sensores colocados.



*Cintas de convergencia y clinómetro*



*Extensómetros*

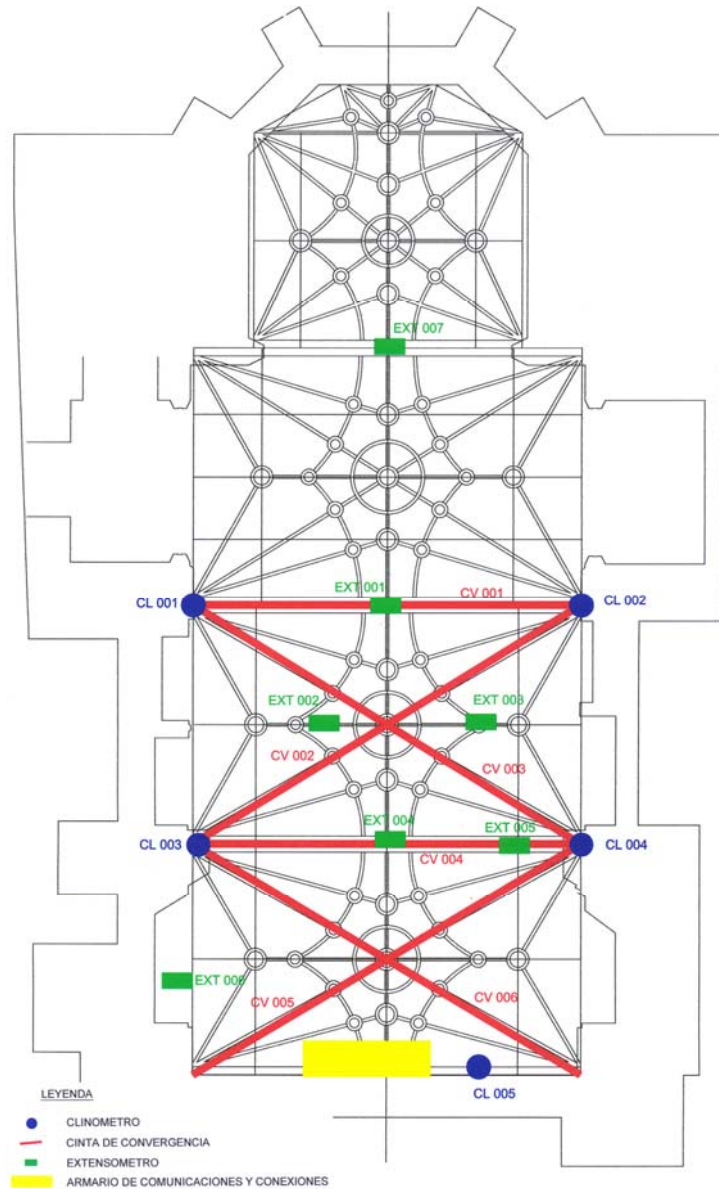


*Extensómetro*

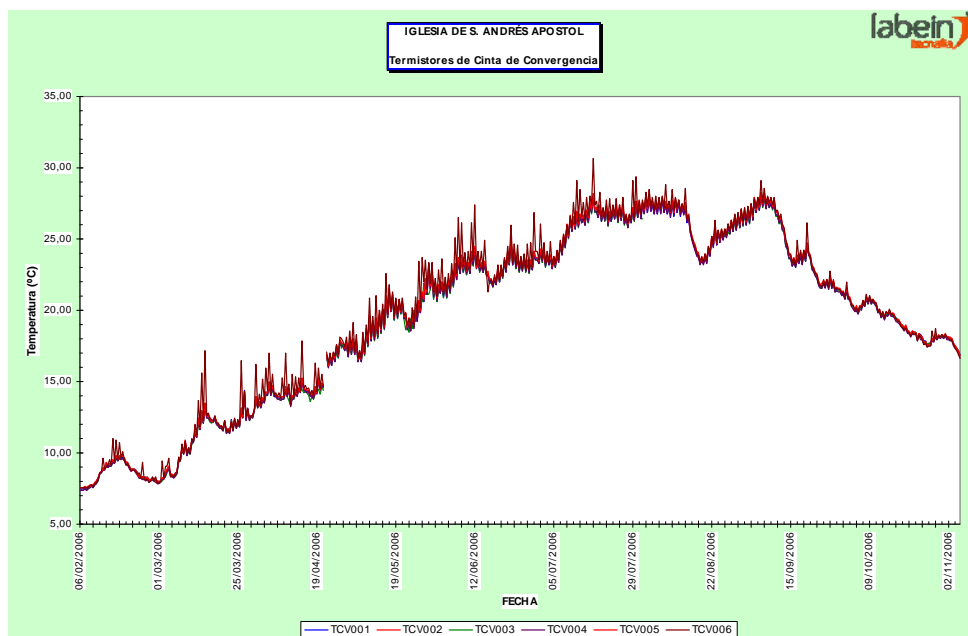


*Clinómetro*

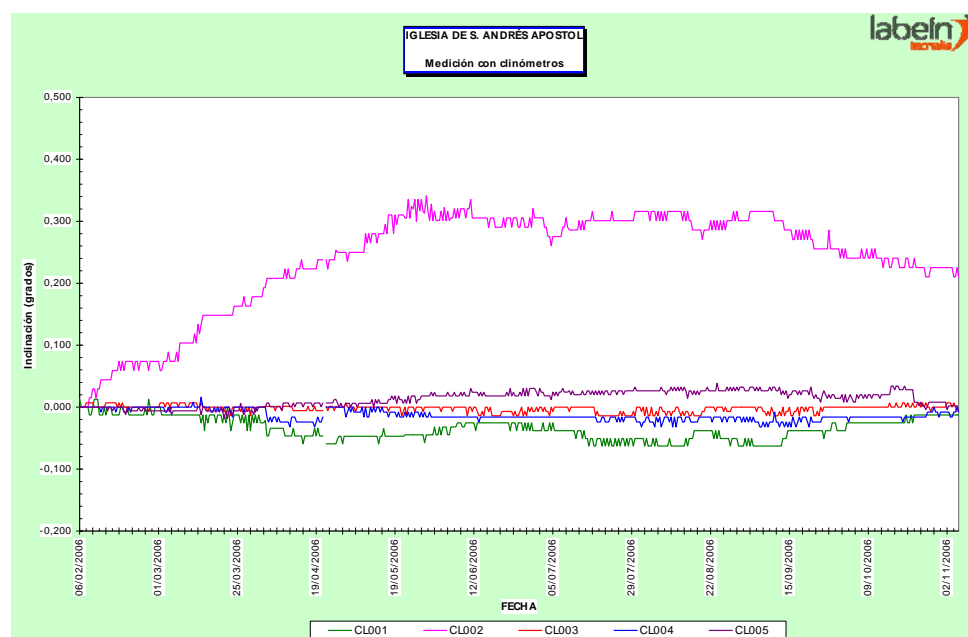
La ubicación de los sensores se indica en el gráfico siguiente, centrándose básicamente en los pies de la Iglesia, que era la zona con mayores daños.



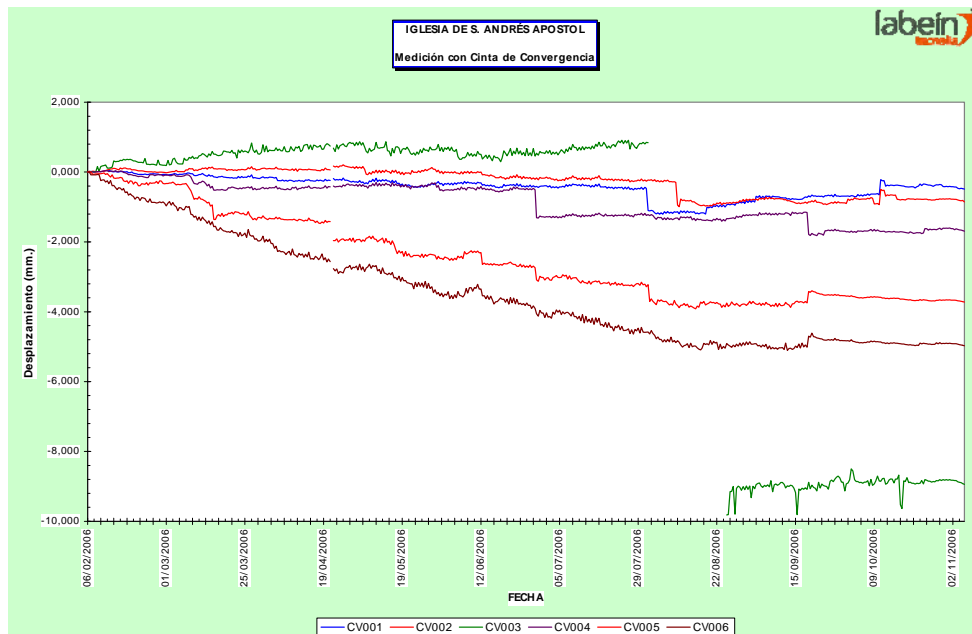
Las mediciones, cuyos gráficos se incluyen a continuación, dieron comienzo en febrero de 2006, siendo la incidencia más relevante un fallo en el sistema de adquisición de datos durante el mes de agosto de 2006. Además, se perciben saltos bruscos en las lecturas, lo que resulta imputable a situaciones anómalas de manipulación o golpeo de los equipos, pese a las precauciones adoptadas en su montaje. Se efectúan dos registros diarios. Para cada uno de los sensores se recoge, mediante el termistor que lleva incorporado, su temperatura en el momento de la medición, reflejándose la evolución de manera gráfica.



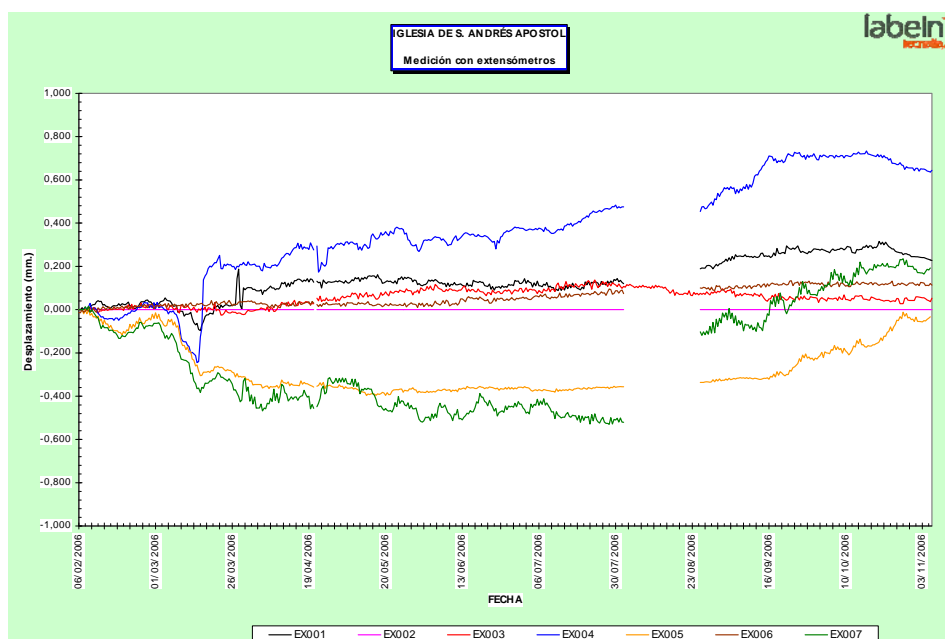
Durante la puesta en obra de la nueva cubierta, se observaron diariamente los resultados de los sensores, sin resultado aparente. Se acompañan a continuación los registros gráficos de los sensores.







La cinta de convergencia que experimenta un salto brusco no tiene correspondencia con el clinómetro que experimenta una lectura mayor. Destaca la mayor amplitud de las cintas CV005 y CV006, situadas en los pies de la Iglesia, por tratarse de la zona más expuesta a los efectos del soleamiento.



La lectura de los extensómetros permite observar que en general, aportan movimientos de pequeña magnitud. Tan solo el EX004 da unas medidas algo superiores, aunque el situado en el mismo arco (EX005) experimenta una tendencia a cerrarse. Destaca el salto experimentado por el EX002, que pudiera estar motivado por un movimiento puntual de alguno de los sillares a los cuales se encuentra fijado, en una reordenación de la fábrica. Igualmente destaca el salto dado por el EX007, ubicado en la clave del arco más próximo a la cabecera.

En el estado de las mediciones, aun es pronto para conocer cual es el efecto de los ciclos anuales en la Iglesia, si bien en este caso existen anomalías durante las mediciones que dificultarán su interpretación. En cualquier caso, se estima que las mediciones hasta el momento no aportan indicios de que los cambios introducidos en la cubierta hayan deteriorado el estado de equilibrio.

## **5.- CONCLUSIONES**

Como resumen de todo lo expuesto, pueden obtenerse algunas conclusiones:

La monitorización de movimientos en estructuras del patrimonio construido constituye una herramienta clave en la interpretación del comportamiento deformacional de la estructura, no solo por la información que aporta en sí misma, sino por su aptitud para relacionar los resultados con modelos matemáticos.

- Las magnitudes medidas tanto en monitorización manual como remota se ven claramente afectadas por las condiciones climatológicas y ambientales, así como de la ubicación física de las referencias y sensores de medida. (viento, soleamiento...). Sin embargo, cuando los movimientos tienen un origen, diferente del higrotérmico y son de elevada magnitud en comparación con estos últimos, la monitorización permite una detección temprana y el análisis de las posibles causas, pudiendo adoptarse, si fuera necesario de medidas urgentes y valorar su eficacia.
- Para discriminar posibles movimientos de origen térmico respecto de otros orígenes, el periodo de medida mínima debe de ser un año natural, siendo recomendable con carácter general la ampliación de dicho periodo de medición.
- La interpretación de los resultados requiere una valoración a lo largo del tiempo, sin resultar necesariamente determinantes valores individuales que pudieran estar motivados por incertidumbres del método de medida o por factores ajenos al mismo, tales como daños en los equipos instalados, acciones no previstas (pájaros o golpes en el caso de sensores remotos), reordenaciones localizadas de mampuestos en la fábrica, efectos locales motivados por incrementos de temperatura o humedad, etc. Adquiere notable valor la información de las tendencias generales de movimiento en la estructura.
- Valores inusualmente elevados respecto de los habituales en el edificio requerirán una indagación complementaria, pudiendo consistir esta en una nueva lectura para la confirmación. Caso de mantenerse, se adoptarían otro tipo de iniciativas, algunas relacionadas con disminución en el periodo de medida de las referencias instaladas, complementar la monitorización instalada con nuevos equipos o realización de trabajos adicionales como son inspección visual o/y ensayos complementarios.
- En las mediciones llevadas a cabo en edificio en los que se han controlado movimientos durante años sucesivos se ha observado que tras un año natural de medida, habitualmente la situación no es totalmente la misma que al inicio del control, sino que existe una pequeña amplitud de movimiento que habitualmente no es recuperable. A pesar de que no es una medida relevante en un único ejercicio, dicho fenómeno se repite en sucesivos ciclos, pudiendo generar lesiones asociados al comportamiento térmico del edificio.



- En aquellos casos en los que se vaya a proceder a una intervención en la estructura o en sus proximidades, el seguimiento de sus movimientos constituye una herramienta que aporta información valiosísima para valorar su incidencia en el patrimonio construido y permitir la adopción de medidas urgentes para garantizar su integridad estructural.

# **TECNICAS AVANZADAS DE AUSCULTACION Y DIAGNOSTICO DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS. EL PROCESO DE DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL.**

**Javier Yuste<sup>1</sup>, José Vicente Fuente<sup>2</sup>, Juan Vicente Sabate<sup>3</sup>, Vicente Albert<sup>4</sup>, Gemma Calzado<sup>5</sup>. AIDICO<sup>6</sup>**

*<sup>1</sup>Ingeniero de Caminos. Director de la Unidad Técnica de Seguridad de AIDICO.*

*<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. Departamento de Patología*

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

## **1.- INTRODUCCIÓN**

AIDICO, Instituto Tecnológico de la Construcción es una asociación sin ánimo de lucro formada por empresas del sector. Fue creado en 1990 por la Generalitat Valenciana a través del Instituto de la Mediana y Pequeña Industria Valenciana –IMPIVA- y con el apoyo de la Federación de Empresarios de la Construcción.

La finalidad de AIDICO es optimizar la capacidad de innovación, calidad y seguridad de las empresas para potenciar su competitividad en mercados nacionales e internacionales.

Para ello fomenta el desarrollo tecnológico de las empresas mediante: Proyectos de I+D+i, certificación de productos/empresas, ensayos físico-químicos de materiales de construcción, calibraciones en os equipos de medida y ensayo, fomento de la formación tecnológica de las empresas y desarrollo profesional de su personal, desarrollo de TICs e investigación, recopilación y difusión de las necesidades informativas de los empresarios.

Con una amplia infraestructura en recursos humanos altamente especializada y equipamiento, transmite a las empresas los nuevos avances tecnológicos y científicos producidos en los diferentes campos de investigación. La participación en diferentes grupos de trabajo, la colaboración con otras instituciones y el contacto diario con las distintas administraciones, convierten a AIDICO en un centro tecnológico garante de calidad, seguridad e innovación en la construcción.

En el Departamento de Diagnóstico y Patología de las Construcciones se prestan los siguientes servicios:

- Asesoramiento en Materiales y sus características
- Control y seguimiento de Construcciones mediante Instrumentación
- Evaluación de las estructuras mediante el Control de la Respuesta Dinámica ante las vibraciones
- Estudios de Integridad Estructural
- Desarrollo de estudios de Análisis, simulación Numérica y métodos de Diagnóstico
- Desarrollo de estudios especializado relacionados con la Construcción

Actualmente se trabaja en la Evaluación y Diagnóstico de construcciones del Patrimonio Histórico de la comunidad Valenciana, estudios sobre patologías y durabilidad de los materiales, patologías en estructuras,... Entre otros muchos campos de trabajo, la unidad

técnica ha participado en el Convenio de Colaboración de España con Túnez y Marruecos a través de la Agencia Española de Cooperación Internacional.

En este artículo se expone una introducción a las técnicas de monitorización y seguimiento empleadas por AIDICO para la conservación y rehabilitación de construcciones, sean elementos del Patrimonio Histórico o bien construcciones que requieran su conservación.

## **2.- CONSERVACIÓN Y REHABILITACIÓN**

Entre los múltiples aspectos que supone la conservación y rehabilitación de construcciones, uno de ellos, es indiscutiblemente la evaluación del estado de la construcción desde el punto de vista estructural, su eficiencia estática, el estado de degradación y deterioro, la evolución en el tiempo y la necesidad o no de establecer intervenciones de consolidación.

La complejidad de estas construcciones cuyos materiales y técnicas constructivas en general prácticamente han desaparecido en el uso actual, y no se tiene una “cultura técnica” generalizada en este sentido, supone que las intervenciones de rehabilitación estructural de las construcciones históricas sean una tarea difícil y peculiar alejada de lo que sería un proceso constructivo más o menos convencional.

Por otra parte los costes de mantenimiento e intervención son muy elevados y así mismo no es en absoluto computable el coste que podría suponer en algunos casos la pérdida de cualquier obra perteneciente al Patrimonio Arquitectónico e Histórico. Los recursos que pueden destinarse en este esfuerzo por la sociedad no son ilimitados y es por eso que en muchos países dotados de un patrimonio histórico elevado se destinen recursos a la investigación y puesta a punto de técnicas de investigación y diagnosis que permitan conocer con costes razonables el estado de estas obras y que permitan establecer intervenciones que sean verdaderamente necesarias y con el menor coste. Aun así en muchos casos podrán ser necesarias intervenciones costosas, por ejemplo en mejora de las condiciones sismorresistentes de obras de gran valor histórico y arquitectónico, en áreas de sismicidad acusada ya que su pérdida constituiría un daño irreparable.

En el presente artículo trataremos de exponer de forma breve, las técnicas metodológicas generales del proceso de diagnóstico estructural y de las técnicas disponibles en la actualidad empleadas en AIDICO con un juicio crítico de sus ventajas, limitaciones y estado actual en su aplicación.

Se expone también una introducción a las técnicas de monitorización y seguimiento tanto en los aspectos del diagnóstico como en el mantenimiento y vigilancia.

## **3.- ANALISIS EXPERIMENTAL. TECNICAS EMPLEADAS EN EL DIAGNÓSTICO**

En la última década se han desarrollado diversas técnicas que ayudan al conocimiento de los materiales y estructuras de fábrica típicas de construcciones históricas. Muchas de estas técnicas se estaban aplicando en otros campos, en especial algunas técnicas no destructivas muy utilizadas en la industria y la medicina. La insistencia en la puesta a punto de técnicas no destructivas viene impuesta tanto por el coste y dificultad en la extracción y obtención de muestras, como el conseguir de la mejor forma posible que las campañas de investigación sean lo menos destructivas posibles al actuar sobre materiales y elementos históricos que en muchos casos no permiten el perjuicio que supone la extracción de muestras.

Para el establecimiento de la investigación que supone todo el proceso de diagnóstico no solo se trata de identificar materiales y características mecánicas se entiende un proceso amplio de objetivos de conocimiento de todos los aspectos de la construcción.

### **3.1.- INSPECCIÓN ULTRASÓNICA**

Bien es sabido que el uso de los ultrasonidos proporciona diversa información, de distinta naturaleza según la medida, pero que se resume en la evaluación de propiedades elásticas de un elemento bajo inspección, así como la detección de heterogeneidades en el interior del mismo. Estas heterogeneidades pueden ser de diversa naturaleza como cavidades, intersticios, fracturas netas y aisladas, zonas de fisuración generalizada, y que se pueden traducir, en algunos casos, en el fallo del elemento en servicio.

Una práctica comúnmente extendida es el uso de los ultrasonidos restringido a medidas de velocidad en régimen de transmisión-recepción. En la mayoría de situaciones, gran parte de la información recibida en los transductores queda subyacente y no es explotada. Para superar esto, se utilizan equipos que permitan adquirir las señales ultrasónicas y digitalizarlas para su posterior procesamiento digital. En otras ocasiones incluso la simple medida de la velocidad de propagación debe realizarse con un conocimiento básico de propagación ultrasónica para constatar que se trata de caminos de propagación directa y de valores con la precisión requerida derivada de la longitud con la que se insonifica el material.

Los métodos de inspección, objetivo perseguido, naturaleza y dimensión de la pieza o elemento bajo inspección determinan, en cada caso, el análisis realizado mediante procesamiento digital de las señales, en lo sucesivo PDS.

Las inspecciones se han de realizar con unas frecuencias de inspección que involucra distintos niveles de resolución en la estimación del parámetro no destructivo elegido para la diagnosis del elemento según el método empleado. Debe ser utilizada una frecuencia de inspección apropiada a las características geométricas, atenuación del material y el parámetro estructural al que se quiera ser sensible. Se trata, por tanto, de una situación de compromiso.

#### **Método Transmisión-Recepción**

Cuando interese el pulso propagado de un material, deberá tenerse en cuenta, las dimensiones del mismo y su microestructura. Para distancias largas conviene atacar con bajas frecuencias, sabiendo que esto disminuye la precisión de la medida de velocidad, a través de la determinación del tiempo de vuelo.

Para distancias cortas, sucede lo contrario, ya que no hay tantos problemas para que la señal ultrasónica alcance el receptor y la precisión que se requerirá obviamente será mayor.

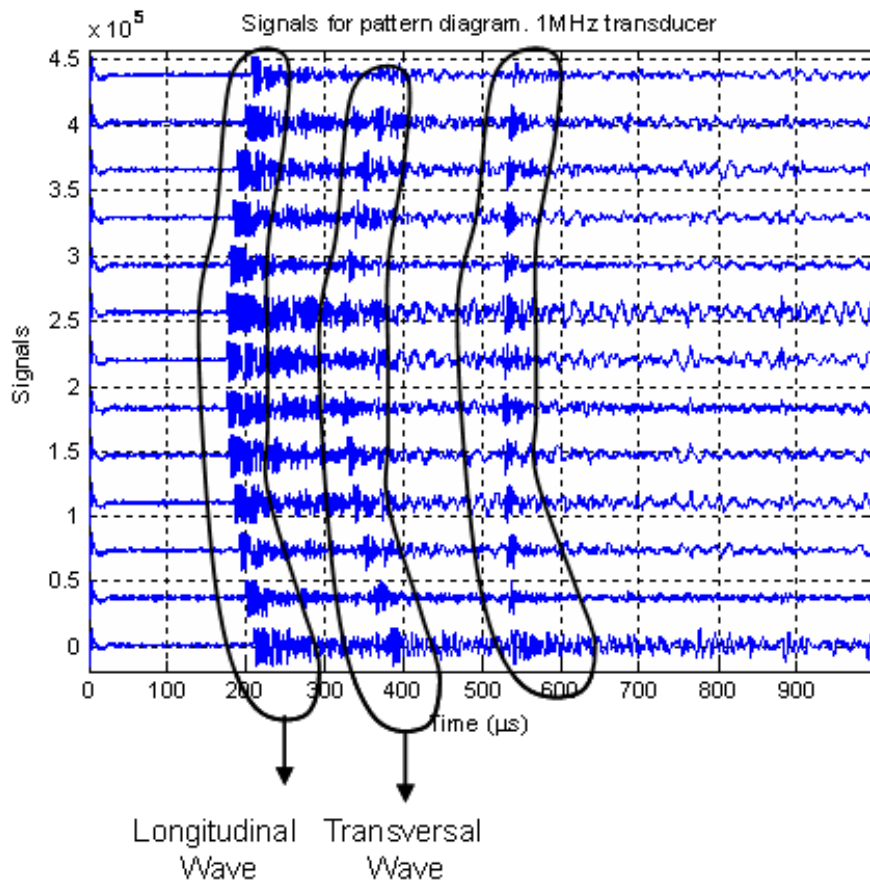


Figura 1.- Propagación de las distintas ondas en el sólido

### **Método de Pulso/Eco**

Este tipo de registros presentan un transitorio al comienzo y en el que el transductor registra gran parte de la energía que ha inyectado en el material cuando actúa como emisor.

Posteriormente a este transitorio, llega señal de backscattering procedente de la estructura porosa, cuando el tamaño de poro o de grano del material sea comparable a la longitud de onda empleada]. Esta parte del registro se puede considerar como un proceso estocástico en el que se encuentra implícita la estadística de distribución y tamaño de grano o poro.

Cuando el pulso, que se propaga por el material, se encuentra con una interfase, defecto u otro material, según la diferencia de impedancia acústica, se producirá una reflexión de este tren de pulsos en la interfase. La energía que sale en sentido opuesto y que es capaz de volver al transductor se convierte en la aparición de un cierto nivel de amplitud en el registro dando lugar a un eco, bien de un eco de fondo como procedente de un defecto.

### **3.2.- ANÁLISIS DINÁMICO ESTRUCTURAL**

El golpeo de un material implica la creación de una onda mecánica con un contenido en frecuencias que depende del material y de la duración del impacto como veremos posteriormente. La energía mecánica generada en el momento del golpeo contiene distintos tipos de ondas, que se clasifican según la naturaleza de su vibración en su propagación por el material. Las ondas P y S (primaria y secundaria) se propagan por el seno del material, mientras que las ondas de Love y Rayleigh se conocen como ondas superficiales. Cada una se propaga con una velocidad distinta, debido a esta naturaleza, para el mismo material considerado. La onda P longitudinal es la que más rápida, es la que más se utiliza ya que

suele ser un indicativo bastante válido para la determinación de la resistencias mecánicas del material.

La relación entre las velocidades de las ondas P, S y Rayleigh se utiliza para determinar las constantes elásticas dinámicas del material. Así pues, un material será mejor cuando presente valores de las constante dinámicas mayores, excepto para los coeficientes de Poisson y Lambert. El estudio comparativo de estos valores correspondientes a distintas medidas procedentes de diversas zonas también puede informar de zonas con descenso en la calidad del material.

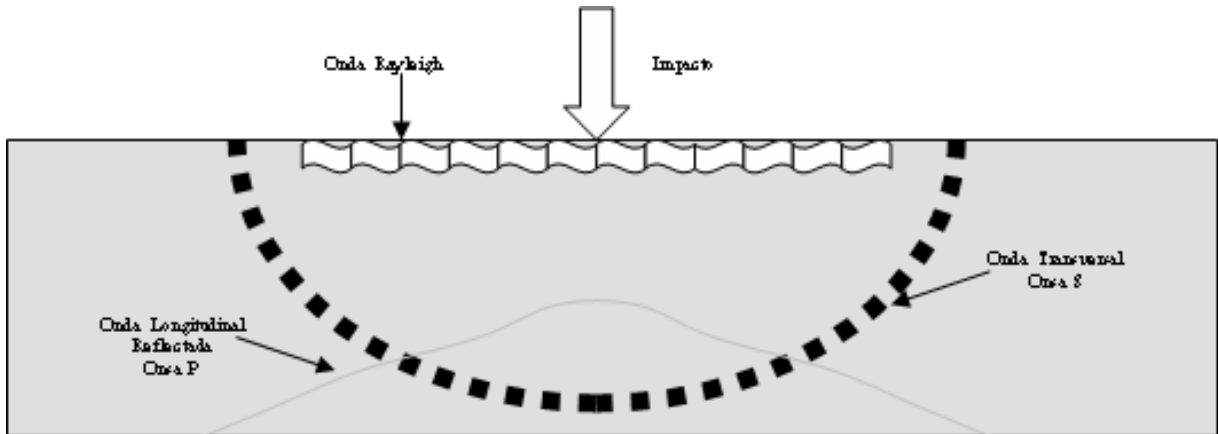


Figura 2.- Propagación de las distintas ondas en el sólido

Las velocidades de las distintas ondas están relacionadas con los módulos de elasticidad E, coeficiente de Poisson  $\nu$  y la densidad del material  $\rho$  tal y como se muestra en las ecuaciones siguientes para la velocidades y sus relaciones,

$$c_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad [1]$$

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2 \cdot (1 - 2\nu)}} \quad [2]$$

donde G representa el módulo de Rigidez,

$$\frac{c_S}{c_p} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 \cdot (1 - \nu)}}; \frac{c_r}{c_S} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad [3]$$

La propagación de estas ondas mecánicas somete a pequeñas tensiones lineales a las partículas del material por donde se propaga.

Esto permite excitar los modos propios de vibración propios de la estructura. Estos modos corresponden a la propagación predominante de una onda mecánica con una frecuencia de pulsación determinada que es posible registrar con un adecuado sistema de captación de vibraciones mecánicas [ASTM C1383-98a].

A través del cálculo por elementos finitos, se puede simular el comportamiento de materiales y elementos constructivos asignando unos parámetros elásticos e intrínsecos como la densidad, el módulo de Young, sus dimensiones y coeficiente de Poisson. Después de la experimentación se pueden comparar los resultados y analizar posibles desviaciones debidas a los elementos de contorno, propiedades intrínsecas simuladas o dimensiones. Esto puede permitir conocer las dimensiones geométricas como fondos de muros, los módulos de

elasticidad de materiales, presencia de otros materiales como armaduras y posibles defectos localizados como delaminaciones, grietas, etc.

### **3.3.- TERMOGRAFÍA INFRARROJA**

El instrumento básico para la realización de ensayos de termografía infrarroja es la cámara de infrarrojos. Ésta mide y toma imágenes de la radiación infrarroja emitida por un objeto. El hecho de que la radiación infrarroja sea función de la temperatura de la superficie del objeto permite a la cámara calcular y representar en forma de imagen dicha temperatura.

La radiación medida por la cámara no sólo depende de la temperatura del objeto, sino que también es una función de la emisividad del material que compone la superficie. Además, la radiación generada en el entorno se refleja en el objeto, siendo esta captada por la cámara junto a la emitida por el propio objeto. Finalmente, habría que tener en cuenta que la radiación procedente del objeto y la radiación reflejada se verán influidas también por la absorción de la atmósfera.

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad [4]$$

Todo lo comentado anteriormente, obliga a tener conocimiento de los valores que presentan los parámetros enumerados, para que éstos puedan ser introducidos en el programa de cálculo y poder así obtener un valor de temperatura superficial fiable.

A pesar de lo expuesto, son una mayoría las aplicaciones prácticas en las cuales con la visualización de las “imágenes térmicas” obtenidas no se pretende conocer con exactitud la temperatura de cada uno de los puntos de la superficie, sino que lo que se busca es detectar variaciones de temperatura en zonas en las que, por la naturaleza de los objetos representados, deberían presentar una temperatura uniforme. La existencia de un elemento o sustancia en un objeto homogéneo, que produzca una modificación de los procesos de difusión de calor a través de él hasta llegar a su superficie, es detectada por la cámara al observarse en la imagen de temperatura superficial zonas con valores diferentes a las existentes.

Este sería el caso, por ejemplo, de la detección de zonas de humedad en un elemento de superficie homogénea en el cual la existencia de zonas que presentan una acumulación de humedad queda representada de forma clara en la imagen por una mancha de un color diferente al resto de la superficie del objeto donde no existe esa acumulación de humedades. A continuación se muestran dos imágenes en las que se pueden observar la presencia de zonas de humedad al quedar estas resaltadas en un color azul, que representa una temperatura inferior a la de su entorno.

### **3.4.- PENETRÓMETRO DE TALADRO**

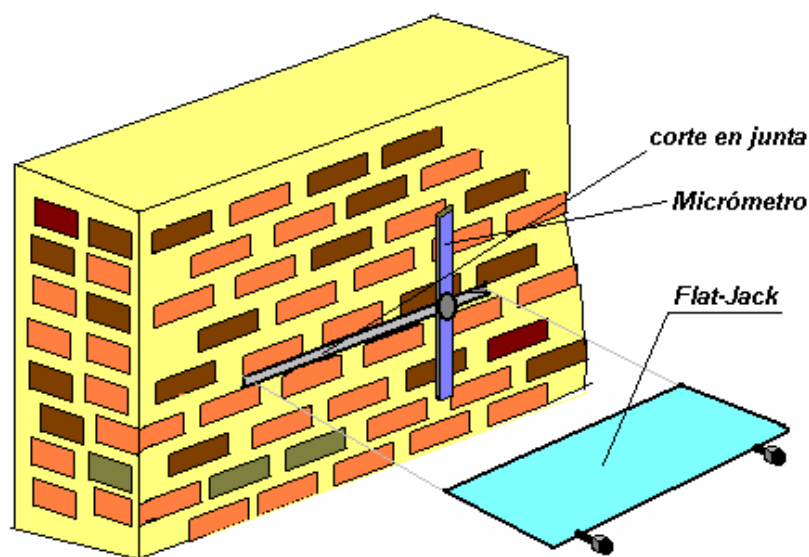
Para el comportamiento mecánico de los morteros y piedra, se empleó el penetrómetro dinámico de rotación, con el cual se obtiene la resistencia a la penetración (DRMS, drilling resistance measurement system). El microtaladro de Sint Technology tiene capacidad de variación de velocidad de penetración y de giro, con una capacidad de 40mm de penetración e inspección, empleándose brocas con punta de diamante de 5mm de diámetro. El equipo proporciona dos señales: Fuerza (F) que representa la fuerza realizada para vencer la resistencia al avance del taladro con la profundidad, y Par (T) la resistencia al giro. Los registros obtenidos fueron filtrados con procesamiento de señales para corregir los efectos de ruido debidos a macroporosidad y microconglomerados. El uso del Par permite la corrección a la abrasión debida a la naturaleza distinta dureza de los áridos.

### **3.5.- MEDIDA DE LOS ESTADOS TENSIONALES DE LAS FÁBRICAS. TÉCNICA DE GATOS PLANOS.**



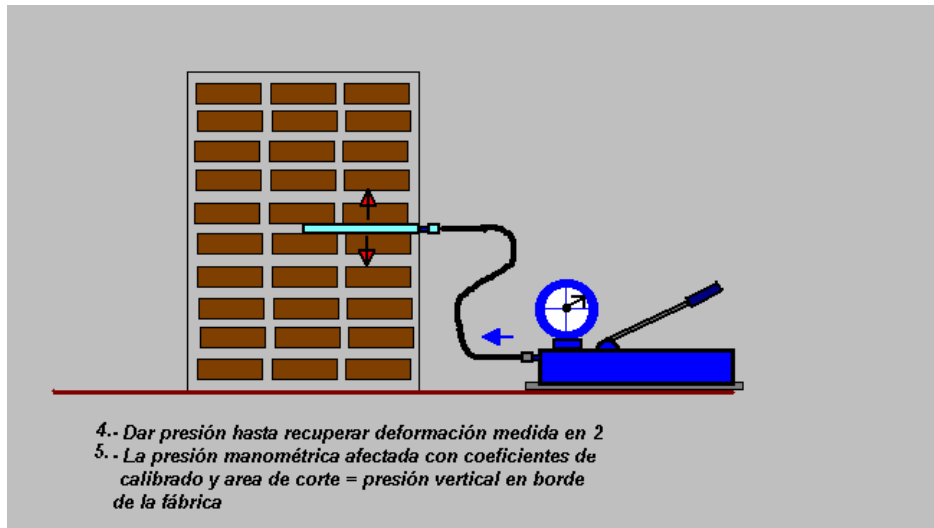
La dificultad de obtener muestras inalteradas en las fábricas de ladrillo, sillería y sobre todo en las mamposterías para realizar ensayos mecánicos de laboratorio y determinar las características resistentes y de deformabilidad de las fábricas siempre ha presentado enormes dificultades , por un lado la representatividad del ensayo por la diferencia de confinamiento entre la probeta extraída y las condiciones de confinamiento del material en las condiciones “in situ “ , y por otro lado la propia extracción de la muestra incluyendo las juntas de mortero , que se disgrega durante la extracción en la mayor parte de los casos . Esto ha motivado la puesta a punto de técnicas que permitan conocer ó al menos aproximar el estado de las sollicitaciones en puntos concretos de los paramentos murarios.

Basándose en las medidas con los gatos planos que se empleaban tradicionalmente en la mecánica de rocas, para la medida de niveles de presiones en juntas y diaclasas, se desarrolló a primeros de los ochenta la técnica de los gatos planos para las obras de fábrica por Ingenieros del ISMES de Italia.



- 1.- Efectuar ranura en junta de mortero
2. Medir microdeformación con micrómetro de precisión
3. Alojarse el gato

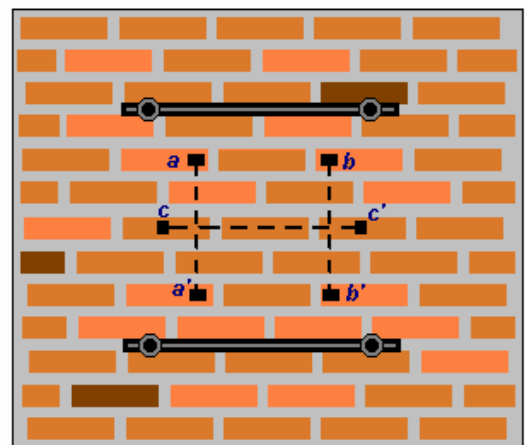
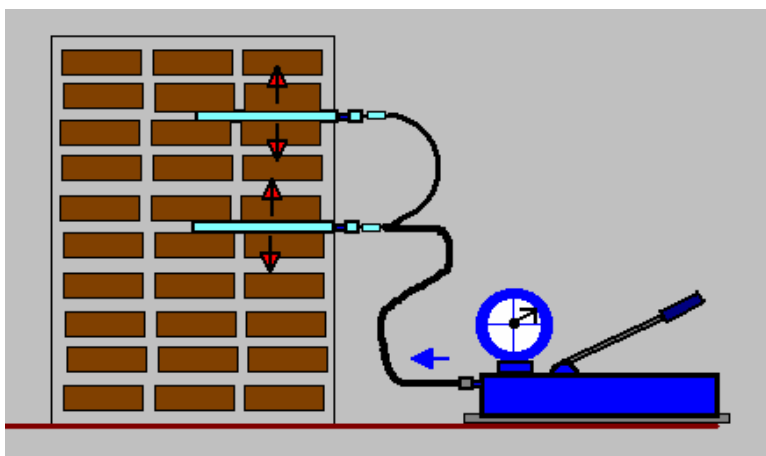
En esencia para la medida de tensiones, se produce un corte mediante medios mecánicos en la junta de mortero entre dos bloques de un muro de fábrica hasta una profundidad moderada. El relajamiento de la presión vertical hace que la llaga sufra un acortamiento que se puede medir mediante un micrómetro de precisión. Tras la medida se aloja en el interior de la ranura efectuada un gato constituido por una placa hueca plana de espesor entre 4 mm y 10 mm, la cual lleva incorporada una boquilla de entrada por la que accede un fluido desde un tubo accionado por una bomba hidráulica. Si se le va dando presión al hidráulico hasta recuperar la deformación medida, lógicamente tiene que haber una relación entre la presión manométrica del fluido y la presión vertical en el borde de la fábrica. A pesar de la sencillez el método precisa calibrados y tarados previos en laboratorio que determinan coeficientes correctores de la presión medida. Los esquemas adjuntos ilustran el proceso:



Otra forma utilizar el método para la determinación de las características de deformabilidad de la fábrica es mediante dos gatos planos alojados en dos ranuras paralelas previamente efectuadas a una distancia de unos 50 cm sensiblemente según los espesores de bloques y juntas.

Si se va dando carga a través del hidráulico y se van midiendo las deformaciones entre puntos fijos colocados entre los gatos y sobre una misma vertical perpendicular a ellos se puede ir obteniendo una relación tensión-deformación para la “probeta” de fábrica que conforman los gatos en la fábrica.

Análogamente se tiene toda la problemática de tarado del caso explicada para la medida de presión vertical. Cabe indicar que deben evaluarse los resultados con juicio crítico y siempre contrastarse con el análisis teórico.



#### **4.- APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS**

A continuación se describen ejemplos de aplicación en diferentes elementos constructivos y monumentos históricos.

##### **4.1.- Estudio del Grado de Alteración de Muros de Sillería en Torre Vella del Palau.**

La caracterización de un material por ultrasonidos se realiza mediante el cálculo de sus constantes elásticas dinámicas. Este cálculo se realiza estimando las velocidades de propagación de la onda longitudinal y transversal. La llegada de la Onda P es anterior, mientras que la Onda S o transversal es más lenta aunque presenta mayor energía.

La distinción entre estas dos ondas que se propagan por el material se puede realizar en el dominio tiempo y frecuencia. El dominio tiempo-frecuencia permite la discriminación entre ellas, siempre que se utilice un tamaño de ventana adecuado y permite resolver los tiempos de llegadas de cada onda.

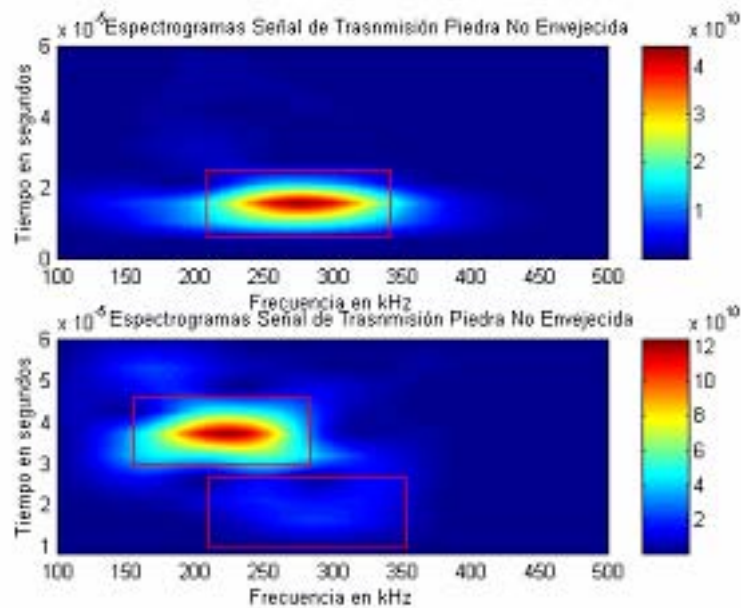


Figura 3.- Distribución Tiempo-Frecuencia para localización de ondas mecánicas transversales y longitudinales.

El estudio realizado consistió en un estudio estadístico de las constantes elásticas dinámicas de los muros de la Torre Vella del Palau, según plantas y orientaciones cardinales.



Figura 4.- Distribución Tiempo-Frecuencia para localización de ondas mecánicas transversales y longitudinales.

Se determinó que en las fachadas de la cara norte y este de la Torre presentaban unos valores globales de propagación un 10% inferior al de los otros muros. La fachada oeste no parece tener una desviación en los parámetros de velocidad de onda sónica en todas sus alturas, lo que implica que no se encuentra afectada.

Se utilizó la inspección ultrasónica por transmisión para los casos en que se tenía un solo sillar, es decir, cerca de los alfeizares y balconadas. Para el caso de las disposiciones de doble

sillar con mortero de unión se utilizó el método de impacto por transmisión y en zonas sin acceso a doble cara el método de impacto por reflexión.

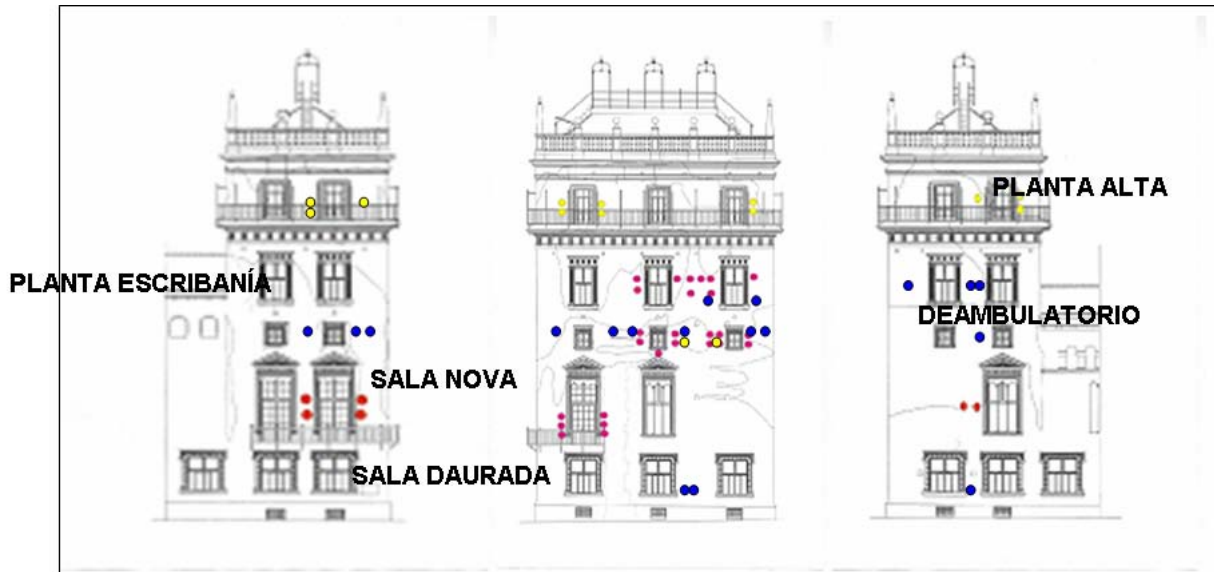


Figura 5.- Muestreo de medidas END Us y por impacto en 3 de los muros fachada de la Torre Vella.

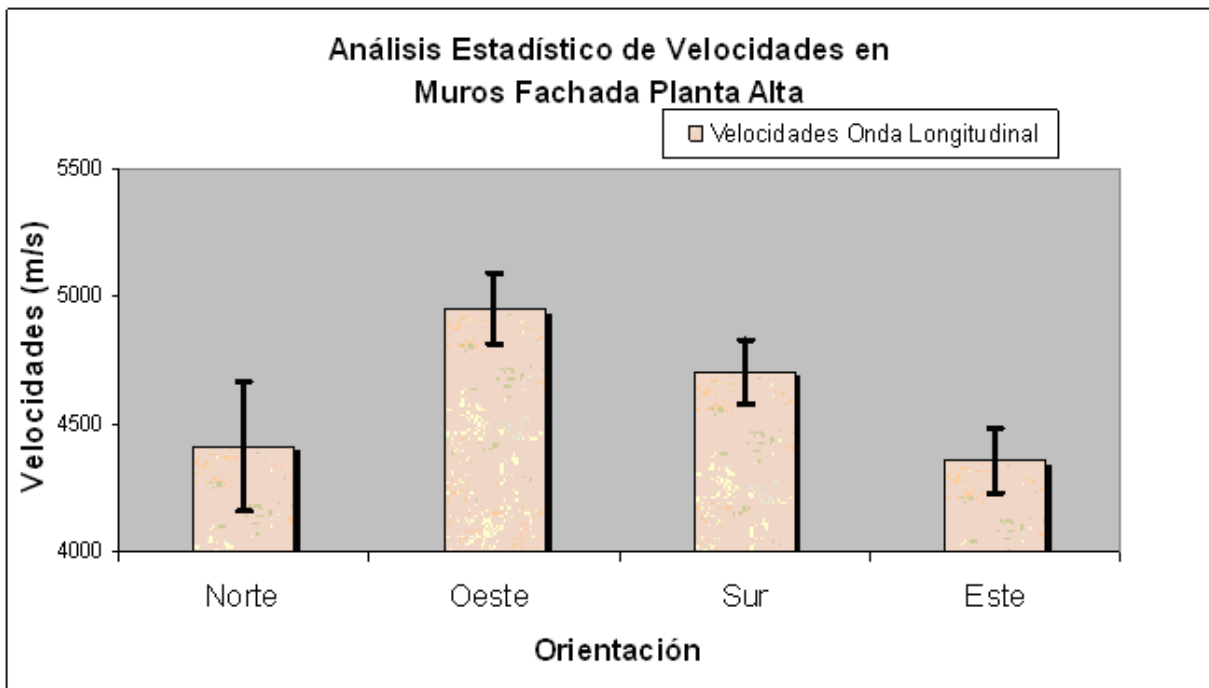


Figura 6.- Análisis estadístico de la velocidad de propagación en los muros fachada de la Torre Vella.

#### 4.2.- Estudio de grandes oquedades en base de mampostería de la Torre de Penella en Cocentaina.

Se trata de una base de mampostería de 4 x 5 metros de planta y con una altura desde 30 cm hasta 2.5 metros según zonas, a partir de la cual arranca la torre. El trabajo consistió en realizar tomografías sónicas mediante un equipo multicanal preparado para registrar vibraciones.

Las medidas se realizaron con un martillo instrumentado impactando en la orientación este y colocando 3 ó 4 sensores en la cara oeste. Esto se repitió a la inversa para comprobación de las medidas e identificar posibles caminos de propagación.

La propagación superficial por el mampuesto determinó unas velocidades de propagación de 1200-1600 m/s, que corresponden a las típicas de un mampuesto de estas características con grandes oquedades y discontinuidades en la argamasa de unión.

Las medidas realizadas determinaron que los caminos de propagación son directos en todos los casos, produciéndose un aumento por la presencia de la piedra sobre la que apoya el mampuesto en las medidas cercanas a la misma, pudiendo vislumbrar hasta donde llega el asentamiento de piedra sobre la que parte el mampuesto. Asimismo, la velocidad de onda sónica asociada a las medidas se encontró entre 900 y 1050 m/s. Estas velocidades resultaron ser mucho más bajas y con atenuaciones de la amplitud transmitida mayores, que en el caso de las medidas superficiales. Esto llevó a pensar la existencia de un relleno de grava y arenas que se confirmó posteriormente y que sirvió como información de entrada para los trabajos de rehabilitación de la torre del castillo.

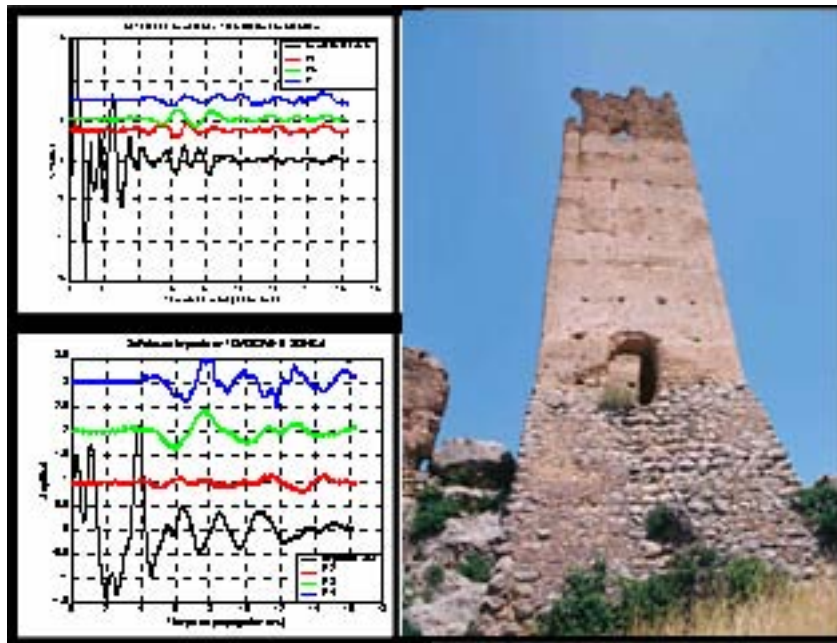


Figura 7.- Señales de Transmisión Sónica en Mampuesto e imagen de la torre del Castillo.

#### **4.3.- Tomografías sónicas en pilastras de la nave central de Iglesia de Nuestra S<sup>a</sup> de los Ángeles en Tuéjar-Valencia.**

Se trata del estudio de propagaciones de ondas sónicas y ultrasónicas en 6 pilastras de la nave central de la Iglesia. Compuesta por sillares recubiertos de escayola pintada se procedió a un estudio comparativo de los valores sónicos de propagación de cada una de las pilastras en altura. Para ello se utilizó la tomografía sónica mediante sistema multicanal de recepción de vibraciones producidas al impacto.



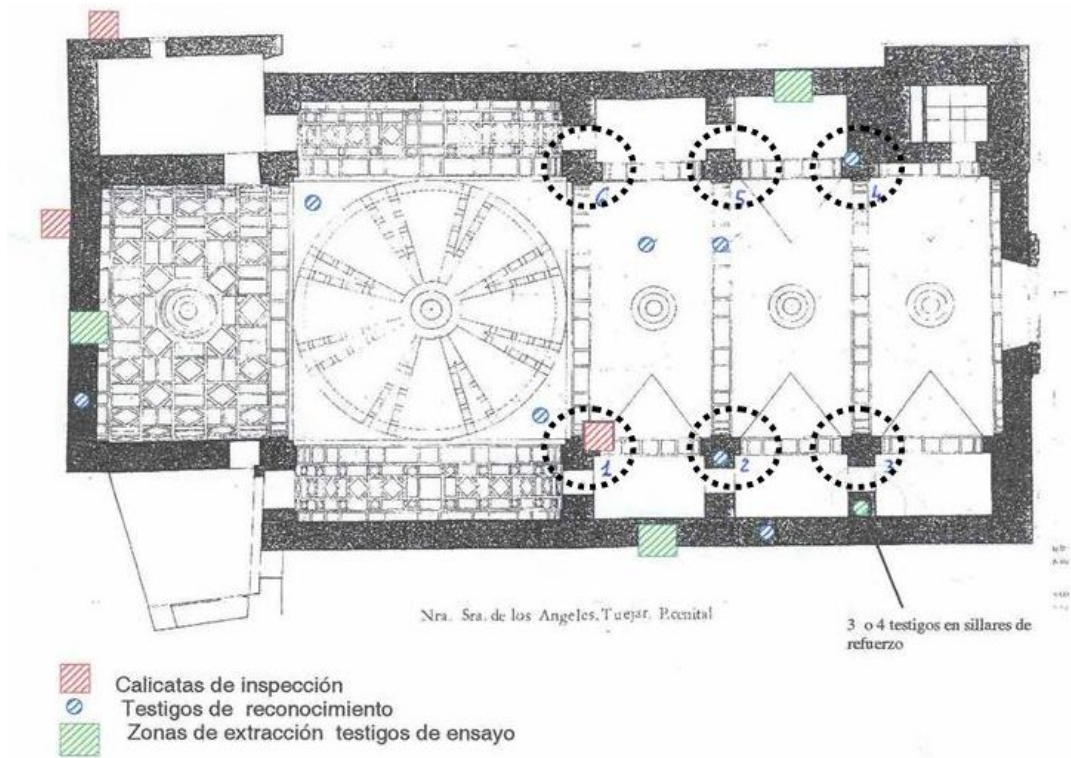


Figura 8.- Localización de catas y testigos.

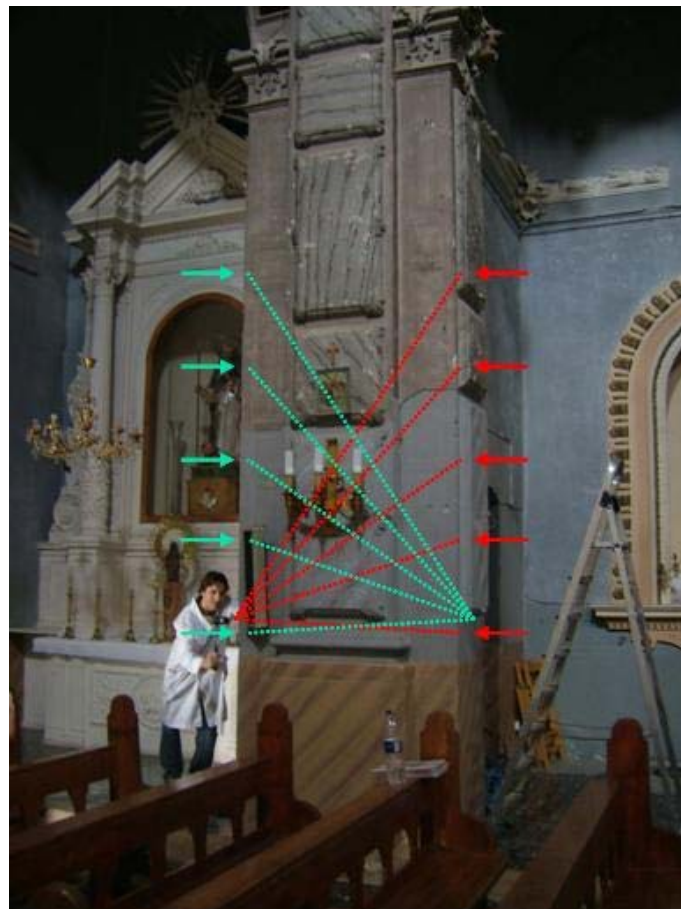


Figura 9.- Propagación Sónica en Pilastras.

Los acelerómetros registran señales en cada una de las alturas, la integración de las velocidades, frecuencias de resonancia y amplitudes relativas en cada canal, puede informarnos de cómo se disponen sillares y guarnecidos en el interior de las pilastras, así como detectar qué pilastra puede estar dando una lectura de velocidad inferior que se derive en una integridad estructural más débil. Se detectó una zona con velocidad anormalmente reducida en una orientación de propagación de una de las seis pilastras y que todas ellas presentaban una disminución de la misma en altura que se asoció a un adelgazamiento del sillar en altura frente al guarnecido de yeso.

#### **4.4.- Detección y dimensionamiento de grietas en columnas de mármol de Carrara.**

Una simple tomografía radial con ultrasonidos de alta frecuencia a diferentes alturas, permitió determinar la disposición de una grieta abierta en una columna de sección circular. La columna se halla en el claustro del patio del embajador Vich dentro del museo de Bellas Artes de la ciudad de Valencia.

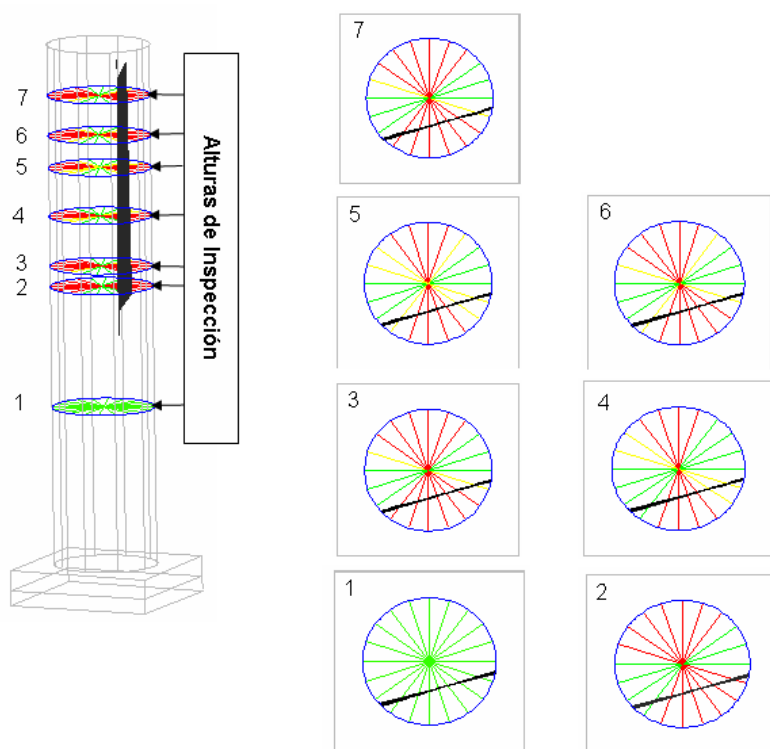


Figura 10.- Inspecciones radiales mediante ultrasonidos

Las medidas en rojo indicaban que no había señal de transmisión del emisor al receptor para la frecuencia empleada. Sin embargo, las medidas en verde correspondían a velocidades propias de un mármol de Carrara  $c = 6300$  m/s.

#### **4.5.- Análisis Dinámico Estructural en Cúpulas Góticas de Iglesia Santiago Apóstol de Orihuela – Alicante.**

El trabajo consistió en la comparación entre las pruebas dinámicas realizadas en una de las cúpulas y sus modos de vibración asociados para determinar posibles desviaciones.

El impacto se realizó desde la parte superior de la cúpula colocando los acelerómetros en los nervios en un conjunto de medidas y en la plementería para otra tanda.

Cada medida registró frecuencias de vibración máximas diferentes a partir de un análisis de la densidad espectral de potencia.

Los valores de frecuencia obtenidos en los nervios estuvieron entorno a los 20 Hz, mientras que para las medidas en plementería se encontraron frecuencias entre 11-13 Hz.



Esto confirmó la hipótesis de la existencia de una rigidez mayor en los nervios que estaban trabajando en la estructura de la cúpula.

Los valores mediante simulación por elementos finitos que se obtuvieron estuvieron en el intervalo de 11 Hz para la frecuencia fundamental.

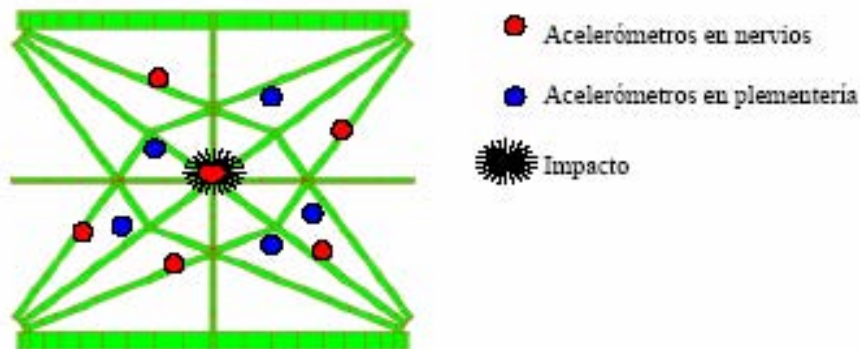


Figura 11.- Instrumentación con acelerómetros de la cúpula de la Iglesia. Puntos de medida e impacto.

#### **4.6.- Técnica del Penetrómetro de Taladro (DRMS).**

El equipo DMRS es un sistema que permite obtener una representación de la resistencia al taladro que presenta el material sometido a estudio. El equipo está constituido básicamente por un motor de taladro al que se le han acoplado dos células de carga situadas en la parte posterior del motor (force), y en la parte inferior y sujeta a esta mediante una agarradera (torque).

Este equipo permite obtener una lectura prácticamente continua de la evolución de la resistencia que presenta el material al avance del taladro. A partir de la interpretación de las gráficas de fuerza obtenidas, se pueden obtener la localización y espesor de cualquier variación estructural de tipo superficial (hasta 10 cm) que produzca un cambio de la resistencia respecto de la que presenta la matriz del material sin ninguna clase de alteración. Se localizarán por ejemplo la presencia de grietas, vetas o incluso aumentos de la resistencia debidos a procesos químicos como el de carbonatación en la superficie e interior de la piedra.



Figura 12.- Imagen del proceso del taladro.

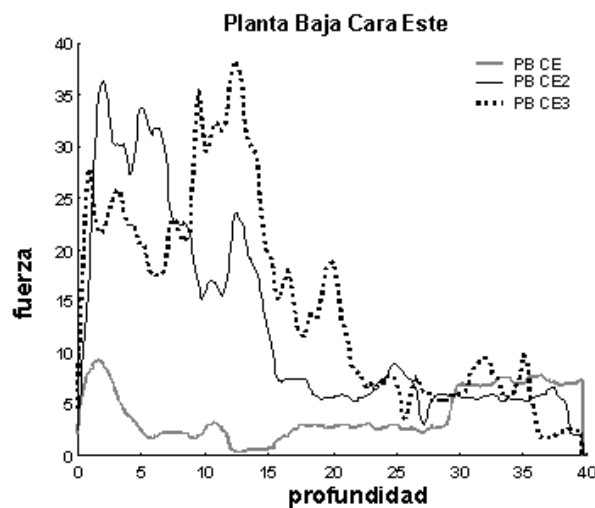


Figura 13.- Perfiles de Fuerza en Piedra para Morteros de separación.

La técnica del penetrómetro de taladro ha detectado procesos patológicos de migración de sales y carbonataciones superficiales en puntos tanto de la piedra del edificio como de los morteros de separación.

#### **4.7.- Termografía Infrarroja.**

La mayoría de las aplicaciones prácticas en las cuales con la visualización de las “imágenes térmicas” obtenidas no se pretende conocer con exactitud la temperatura de cada uno de los puntos de la superficie, sino que lo que se busca es detectar variaciones de temperatura en zonas en las que, por la naturaleza de los objetos representados, deberían presentar una temperatura uniforme. La existencia de un elemento o sustancia en un objeto homogéneo, que produzca una modificación de los procesos de difusión de calor a través de él hasta llegar a su superficie, es detectado por la cámara al observarse en la imagen de temperatura superficial zonas con valores diferentes a las existentes.

Este sería el caso, por ejemplo, de la detección de zonas de humedad en un elemento de superficie homogénea en el cual la existencia de zonas que presentan una acumulación de

humedad queda representada de forma clara en la imagen por una mancha de un color diferente al resto de la superficie del objeto donde no existe esa acumulación de humedades. A continuación se muestran dos imágenes en las que se pueden observar la presencia de zonas de humedad al quedar estas resaltadas en un color azul, que representa una temperatura inferior a la de su entorno.

Otras aplicaciones para las que la técnica de termografía infrarroja es utilizada en la construcción son las siguientes:

- Diagnóstico de edificios.

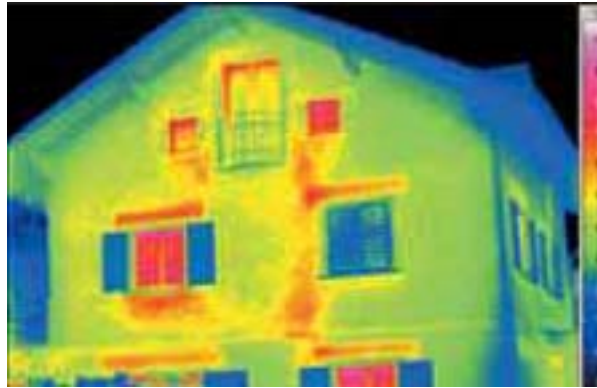


Figura 14.- Diagnóstico de edificios

- Localización de fallos en aislamiento de edificios.
- Detección de puentes térmicos en fachadas.

#### 4.8.- Auscultación mediante gatos planos de la nave central de Iglesia de Nuestra S<sup>a</sup> de los Ángeles en Tuéjar-Valencia

Las medidas realizadas se han realizado con un doble objeto:

- a) caracterizar el módulo de deformabilidad de la fábrica en sillería y en mampostería a los efectos de disponer de parámetros estimativos para modelización y verificación estática de la construcción.
- b) Estimar las presiones en algún punto significativo con objeto de disponer de una calibración del modelo estático con cargas gravitatorias

Localización de los puntos de medida

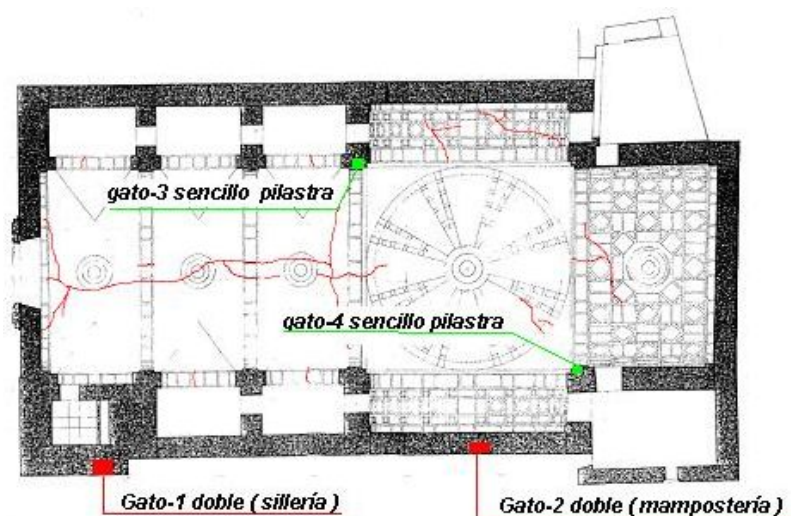


Figura 15.- Planta de localización de pruebas "in situ" mediante gatos planos

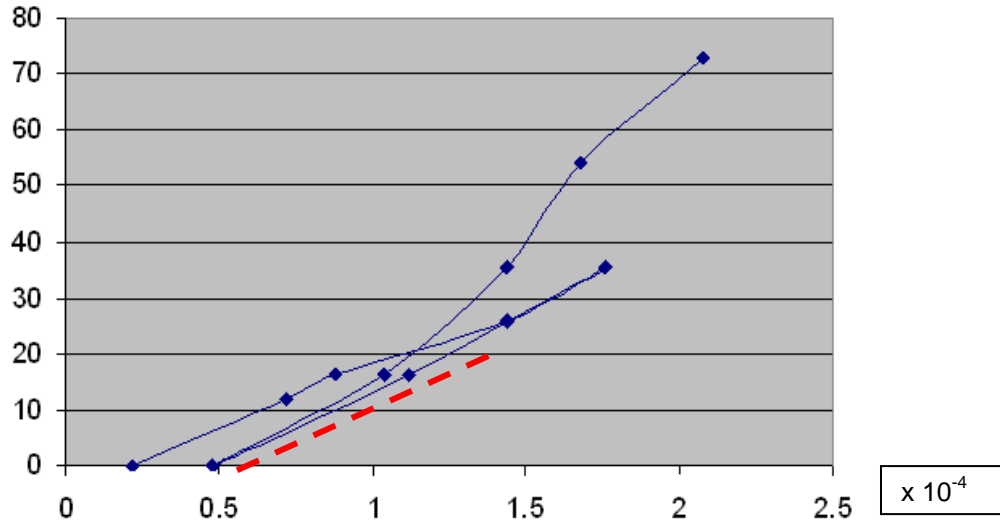
#### Resultados de las medidas con Gatos Planos



Gato 1 (prueba con doble gato plano).

Medida de las características de deformabilidad de la fábrica de la sillería de refuerzo en esquinas.

Cte. de calibración gatos,  $K_c=0.93$ . Cte. de área de corte,  $K_a= 0.99$ .



La línea a trazos en rojo ajusta prácticamente la rama de carga para bajas presiones.

Modulo de deformabilidad para cargas breves  $E= 22.000 \text{ N/mm}^2$  (experimental)

Modulo de deformabilidad para cargas duraderas  $E= 14.000 \text{ N/mm}^2$  (estimado)

El valor es elevado pero coherente, y que se trata de grandes sillares y con junta entre bloques muy delgada y la deformabilidad se acerca más al material pétreo



Figura 16.- Colocación gatos

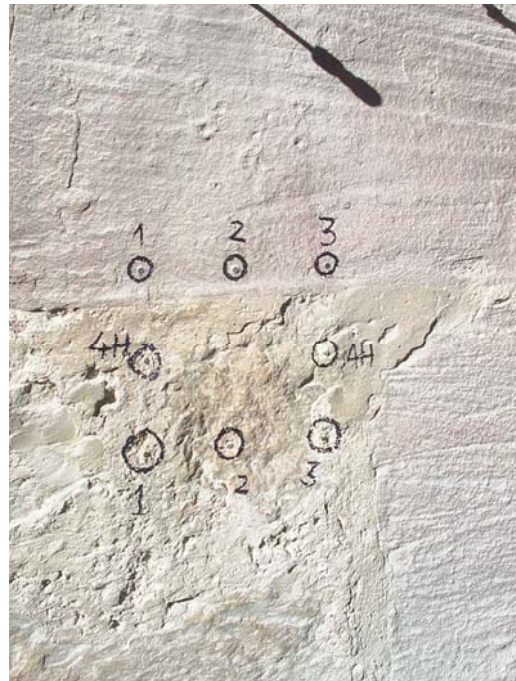


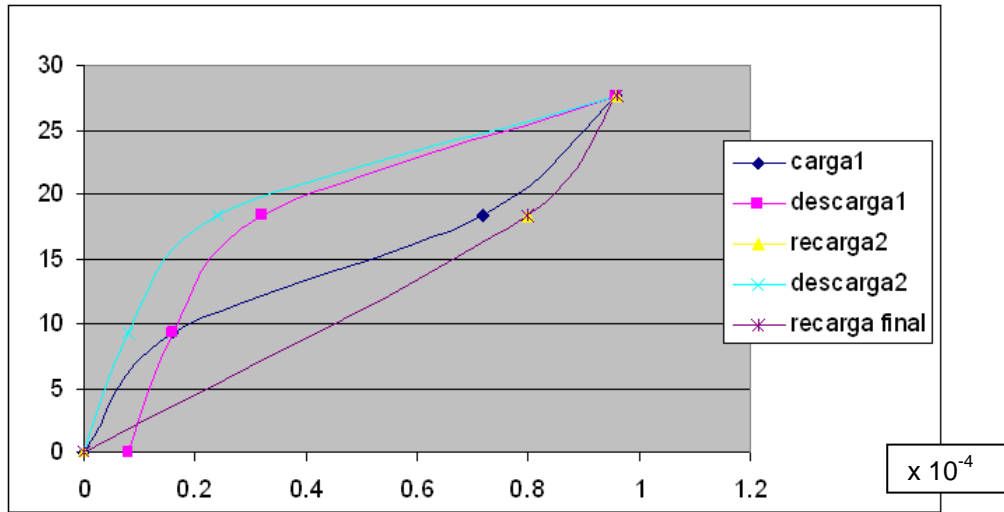
Figura 17.- Puntos de medida

Gato 2 (prueba con doble gato plano)

Medida de las características de deformabilidad de la fábrica de la mampostería.

Los resultados de los ensayos en mampostería deben evaluarse con prudencia, dada la dificultad de obtener un con tacto uniforme y un corte adecuado por la irregularidad de la fábrica.

Cte. de calibración gatos,  $K_c=0.93$ . Cte. de área de corte,  $K_a= 0.99$ .



En el gráfico se indican las distintas ramas de carga, para presiones hasta 30 bares se determina el módulo E de la rema noval de carga en el intervalo de comportamiento sensiblemente lineal.

Modulo de deformabilidad para cargas breves  $E= 16.000 \text{ N/mm}^2$  (experimental)

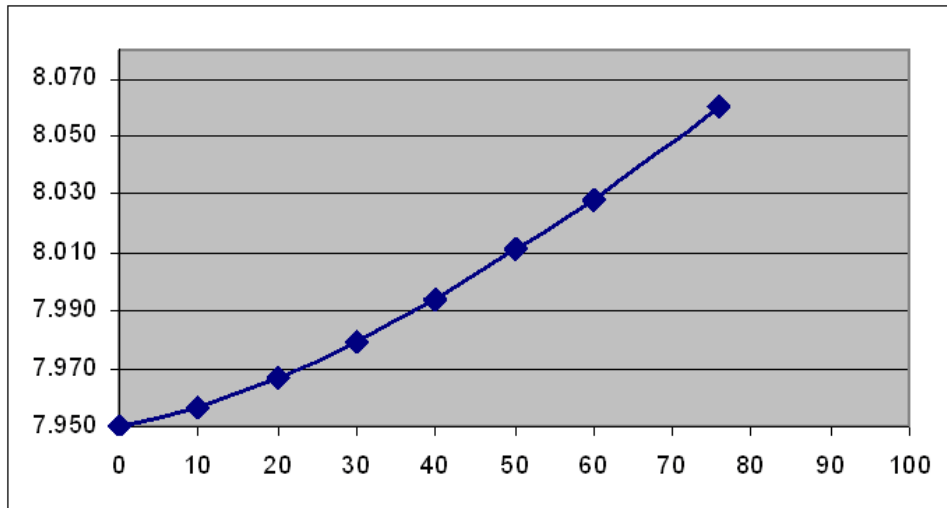
Modulo de deformabilidad para cargas duraderas  $E= 8.000 \text{ N/mm}^2$  (estimado)



Figura 18.- Colocación de doble gato en fábrica de mampostería

3.- Medida de la presión vertical en el borde de la fábrica

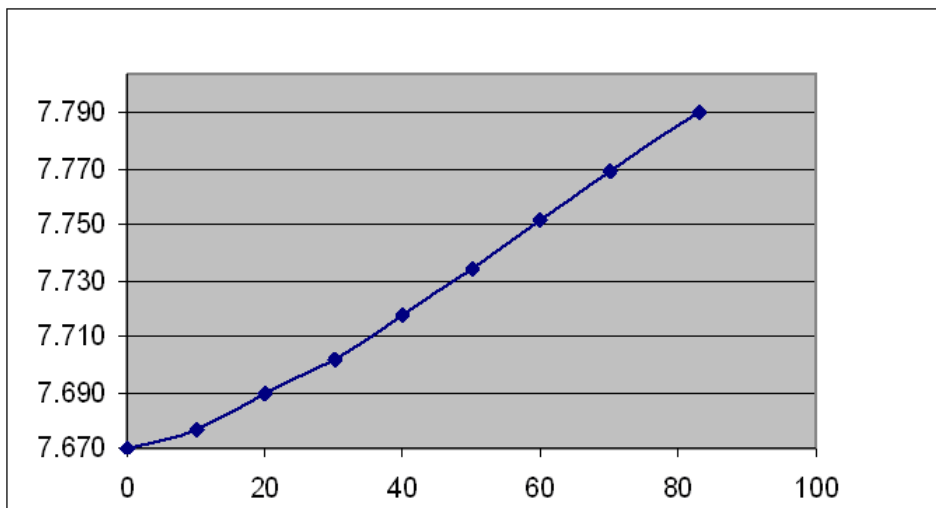
Gato 3



Lectura inicial 8.10  
 lectura final 8.18  
 recuperación 0.127

presión manométrica	75	Kt	Ka
presión corregida	48.6	0.72	0.9

Gato 4



Lectura inicial 7.790  
 lectura final 7.670  
 recuperación 0.133

presión manométrica	83	Kt	Ka
presión corregida	53.8	0.72	0.9

**5.- CONTROL Y SEGUIMIENTO DE ESTRUCTURAS. INSTRUMENTACIÓN**

**5.1.- INTRODUCCIÓN**

Desde hace poco mas de un año, AIDICO esta trabajando en una nueva línea de investigación en lo que se refiere al estudio y análisis de patologías en edificios de elevado valor histórico. Dicho estudio se basa en la medida de cuadros fisurativos con el fin de encontrar daños estructurales en edificios afectados por diversos tipos de patologías.

Cabe destacar que la importancia del presente estudio radica en la posibilidad de evaluar la necesidad y urgencia de realizar intervenciones en edificios de un elevado valor histórico y cultural. Para ello se utilizan técnicas estadísticas capaces de evaluar las correlaciones existentes entre los movimientos de la grieta y la temperatura a la que esta sometida en todo momento la estructura.

El ámbito de actuación de este estudio se centra principalmente en predecir en un tiempo razonable cual va a ser la evolución de dichas grietas tras una adecuada interpretación y evaluación de los valores registrados en la monitorización.

El objeto del presente artículo se centra en el estudio realizado en algo mas de un año en la iglesia de Vall d'Almonacid (Castellón-España).

### **5.2.- INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA**

Para realizar las mediciones en el interior de la iglesia se ha dispuesto de un avanzado sistema de adquisición de datos compuesto por 5 sensores de desplazamiento y 3 sensores de temperatura con los cuales se tienen instrumentadas las 4 grietas mas significativas de la estructura.

Dichos sensores van conectados a un adquisidor que se encarga de registrar los valores de temperatura y desplazamiento 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 19.- Instrumentación de una grieta.*

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 y su posterior visualización. Esto se lleva a cabo mediante un complejo software que permite la conexión con el adquisidor, la descarga de señales y su correcta visualización.

### **5.3.- APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS**

Una vez obtenidas las señales registradas por los sensores, se realiza el procesado de las mismas.

Mediante diferentes técnicas que pasamos a describir a continuación.

#### **Procesado estadístico de señales**

Dicho procesado consiste en la utilización de técnicas estadísticas bien conocidas como son la auto correlación y la correlación cruzadas a partir de las cuales obtenemos abundante información del contenido de las señales, como pueden ser su periodicidad, el grado de



influencia del factor temperatura en los movimientos de las fisuras, la relación que guardan los diferentes puntos de monitorización de una misma grieta, etc.

#### Estudio de la deriva lineal de las señales

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.

#### Nuevas líneas de investigación

La última línea en la que se esta trabajando en el campo de la instrumentación dentro de AIDICO consiste en la caracterización térmica interna de los materiales de construcción con la idea de obtener medidas de temperatura en las cuales tarde menos en alcanzarse el equilibrio térmico para ser capaces de predecir la evolución de las señales con mayor celeridad si cabe.

En la actualidad se han realizado diferentes simulaciones con elementos finitos y se están realizando medidas experimentales con un complejo sistema de termo resistencias para corroborar dichas simulaciones como la que se muestra a continuación.

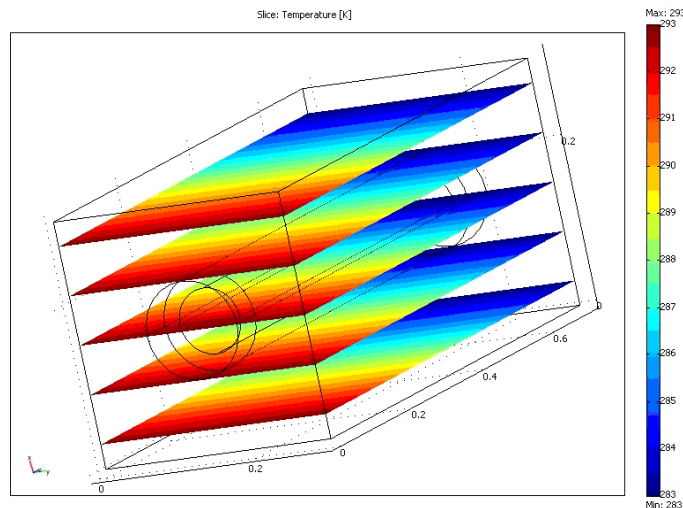


Figura 20.- Medidas experimentales mediante un sistema de termo resistencias.

### **5.4.- CONCLUSIONES**

La línea abierta por AIDICO en el ámbito de la instrumentación estructural hace algo mas de un año nos lleva a estimar el grado de gravedad de los daños a los que esta sometida cierta edificación en un tiempo razonable, lo cual cobra una vital importancia cuando se trata de patrimonio histórico-cultural donde el grado de intervención debe producir el menor impacto posible.

Cabe destacar que el ámbito que nos ocupa se enmarca en un campo como es el de la instrumentación muy joven en España, en el que no se han desarrollado sistemas de procesado de estructural que tengan en cuenta dichas señales obtenidas de la propia medición con sensores.

# **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y DEL DETERIORO BIOLÓGICO DE LA MADERA IN SITU: TÉCNICAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVAS**

**Alfonso Lozano<sup>1</sup>, Ángel Martín<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Dr. Ingeniero Industrial. Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación.*

*<sup>2</sup>Dr. Ingeniero Industrial. Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación.*

## **1.- INTRODUCCIÓN**

En general, el deterioro biológico representa la forma de daño más difícil de evaluar en madera estructural. Más aún incluso que la determinación de sus propiedades mecánicas. La causa de ello estriba en que las manifestaciones visibles no siempre son evidentes; e incluso, en ocasiones, como ocurre con los ataques de termitas, son totalmente invisibles hasta que el proceso patológico se ha desarrollado tanto que ha afectado demasiado a los elementos resistentes, produciendo lesiones de consideración e incluso su colapso.

Por otra parte, tampoco hay una relación directa, en términos cuantitativos, entre las manifestaciones observadas y el daño realmente producido.

Para complicar aún más las cosas, los puntos y zonas de la estructura a los que debería prestarse más atención y control, no son fácilmente accesibles. Tal es el caso de los apoyos sobre muros de carga, testas de vigas y viguetas, arranques de pilares, etc. En estos casos, la única opción válida obligaría al desmontaje del elemento y, en ocasiones, hasta la demolición de determinados componentes de la edificación.

Por este motivo aunque, como luego se verá, un examen visual (realizado por un técnico especialista en este material de construcción) es fundamental a la hora de evaluar la capacidad resistente y el nivel de daño en elementos resistentes de madera, no podemos confiar exclusivamente en una inspección para determinar si efectivamente la construcción está afectada por algún tipo de deterioro biológico. Y mucho menos sobre la entidad y alcance del problema.

De estas consideraciones deriva entonces la necesidad de usar otros métodos y sistemas de evaluación del estado de conservación de este tipo de estructuras, complementarias a la inspección visual, especialmente en las zonas de difícil acceso.

Algunos de estos métodos derivan directamente de otros utilizados desde hace tiempo en campos no relacionados con la edificación y la obra civil, mientras que otros son el resultado de estudios realizados específicamente para la inspección de elementos constructivos de madera.

## **2.- SINGULARIDADES Y LESIONES EN LA MADERA ESTRUCTURAL**

En general, los procesos patológicos que pueden presentar las estructuras de madera serán siempre de origen abiótico (agentes atmosféricos, fuego, agua, productos químicos y factores de crecimiento) o biótico (bacterias, hongos e insectos xilófagos)

Entre los primeros, aquellas desviaciones asociadas al crecimiento y a la estructura del árbol, se conocen como singularidades. De todas ellas (fendas, entrecasco, agallas, lupias, etc.), las más comunes figuran en la norma española UNE 56544, en donde se establece una sistemática de clasificación visual aplicable a la madera de las principales coníferas de

nuestro país (*pinus sylvestris* L.; *pinus nigra* Am.; *pinus pinaster* Ait. y *pinus radiata* D. Don), con aplicación estructural.

Se establecen así dos calidades (ME-1 y ME-2) de acuerdo con los siguientes factores:

- Singularidades anatómicas: nudos, fendas, desviación de la fibra, bolsas de resina y entrecasco, madera de reacción, madera juvenil y anillos de crecimiento.
- Singularidades de aserrado: gemas y médula.
- Alteraciones biológicas: hongos, insectos xilófagos y muérdago.
- Deformaciones: de cara, de canto, atejado y abarquillado y alabeo.

En los apartados siguientes se describirán brevemente los equipos más utilizados para determinar la presencia de las singularidades y defectos anteriores, empleando siempre métodos no destructivos.

### **3.- EXAMEN VISUAL**

A pesar de las limitaciones que conlleva, un examen visual inicial, combinado con la utilización de un xilohigrómetro, la simple percusión de martillo y la inserción de un clavo, es siempre el primer medio de evaluación que debe emplearse en la inspección de una estructura de madera, aún cuando en muchas ocasiones, tal y como ya se ha apuntado anteriormente, algunos de sus elementos no sean directamente observables o incluso inaccesibles, especialmente cuando se trata de edificios con una cierta antigüedad.

A modo de resumen se puede afirmar que, para realizar una inspección visual correcta de una estructura de madera, deberán emplearse como mínimo los siguientes equipos:

- 3.1.- Lupa naturalista (mínimo x10) o microscopio de bolsillo (x25), para analizar las muestras de madera o las especies de insectos.
- 3.2.- Punzón, el cual permite acotar la profundidad del ataque de organismos xilófagos.
- 3.3.- Martillo para prediagnosticar el estado de la madera en el interior.



Figura 1.- Xilohigrómetro

3.4.- Xilohigrómetro para la determinación del contenido de humedad. Fotografía 1. A este respecto indicar que existe una norma que proporciona un método para conocer el grado de humedad de la madera mediante higrómetros de resistencia (UNE-EN 13183-2) y que en dicha norma indica la necesidad de aplicar las correcciones necesarias de las mediciones en función de la temperatura superficial de la pieza y la especie de madera,

cuando el instrumental no disponga de un compensador automático de las lecturas. Se deduce por tanto que siempre será más sencillo elegir equipos que incluyan esta prestación.

Finalmente, respecto a la inspección visual, recordar que aunque este tipo de examen es realmente importante, no suele resultar suficiente para emitir un diagnóstico definitivo sobre el estado que presenta la estructura de madera. Para profundizar sobre el conocimiento de la verdadera capacidad resistente de elementos de madera a pie de obra y la evaluación de los defectos que presenta, en la mayoría de los casos resulta imprescindible emplear otros medios.

#### **4.- TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN INSTRUMENTALES**

En este apartado se agrupan las técnicas de instrumentación más o menos sofisticadas de tipo electrónico y mecánico. Los sistemas que aquí se describirán son de carácter no destructivo, permitiendo al mismo tiempo un registro de datos bastante objetivos a partir de medidas directas.

A pesar de ello, en muchas ocasiones, la fiabilidad de los resultados obtenidos depende tanto de cada equipo como de la experiencia y conocimientos del operador, quien decide siempre cómo y donde realizar la medida y, sobre todo, interpretar los valores recogidos en cada ensayo.

Es decir, que para el caso de la madera, las técnicas de instrumentación conllevan una componente subjetiva, aunque siempre es menos importante que si utilizásemos sólo el simple examen visual. Ningún método instrumental indica o evalúa en que medida una estructura de madera se encuentra más o menos degradada; los equipos que aquí se citan miden siempre una serie de parámetros de naturaleza física o mecánica, que suele ir ligada a otras propiedades relacionadas directamente con las propiedades resistentes y la degradación.

De modo general, las técnicas de inspección no destructiva, para el caso de madera, se agrupan en:

- Sistemas mecánicos.
- Sistemas acústicos.
- Sistemas electromagnéticos.
- Sistemas nucleares.

Sin embargo, para trabajar a pie de obra, la mayoría se engloban dentro de los dos primeros grupos. Los dispositivos más empleados y los que mejores resultados obtienen describirán a continuación.

#### **5.- SISTEMAS MECÁNICOS**

Basan principalmente su funcionamiento en la aplicación o introducción de elementos mecánicos en el componente de madera.

##### **5.1.- PENETRÓMETROS O DENSITÓMETROS**

Estos equipos miden la dureza superficial del elemento de manera similar al funcionamiento del esclerómetro o martillo Schmidt para el caso de hormigón. De todos ellos, el más conocido es el Pilodyn (fotografía 2). Se trata de un instrumento que acciona un émbolo de  $\varnothing$  2 - 2,5 mm de diámetro mediante un resorte calibrado, introduciendo el vástago con una energía de 6 N.m (J). La penetración medida en milímetros está inversamente relacionada con la densidad de la madera, lo cual lo hace una herramienta bastante útil para estudiar esta característica en árboles vivos.



*Figura 2.- Penetrómetro "Pilodyn"*

Sin embargo, para el caso de madera estructural, a excepción de la aplicación en viguetas y correas, estos equipos no suelen alcanzar resultados suficientemente fiables, debido fundamentalmente a la poca profundidad de la inspección, especialmente si se compara con las importantes secciones que presentan en general las escuadrías y las singularidades que existen en pilares y vigas.

### **5.2.- EXTRACTOR DE TORNILLOS**

Se trata de una técnica de ensayo relativamente extendido en Estados Unidos y algunos países del este como Hungría, pero poco utilizada en España por el momento. El aparato registra la resistencia al arranque de un tornillo de  $\varnothing$  4 mm y 18 mm de longitud, previamente introducido en un taladro de  $\varnothing$  2.7 mm. Esta variable está ligada a la densidad y al módulo elástico de la madera, pero únicamente en piezas de pequeña sección y libres de defectos. Sin embargo, la poca penetración del tornillo, de sólo 2 cm, ofrece una información muy localizada de la pieza y difícil de extrapolar a madera estructural o a grandes escuadrías.

En el caso de detección de daños, este sistema permite ciertos resultados, siempre y cuando se trate de defectos existentes sólo hasta una profundidad máxima de 3 cm.

### **5.3.- RESISTÓGRAFO**



*Figura 3.- Resistógrafo IML*

La utilización del resistógrafo como técnica de análisis no destructiva se aplica desde hace algunos años en la inspección de la madera para localizar secciones degradadas. Su ámbito de aplicación se extiende al campo de la valoración del arbolado, de madera aserrada de uso estructural, madera laminada e incluso de paneles y tableros.

El equipo evalúa la resistencia que la madera opone a la penetración de una aguja de acero de  $\varnothing$  1,5 mm y 2 metros de longitud máxima, que gira a velocidad constante. Fotografía 3.

El valor de la resistencia del taladro es medido a través de la potencia del motor, que posteriormente se interpreta en términos de variación de densidad. 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. Su forma y dimensiones permiten que la aguja penetre con facilidad en las piezas de madera con ángulos de  $90^\circ$  y  $45^\circ$ . El registro de datos se realiza gráficamente a través de una memoria y una pequeña impresora acoplada al equipo, que reproduce los perfiles resistográficos a escala 1:1 mientras se realiza el ensayo. Figura 4. Se relaciona entonces la fuerza ejercida por unidad de longitud de penetración. Así pues es posible conocer el estado de la madera durante la inspección, prácticamente en tiempo real.

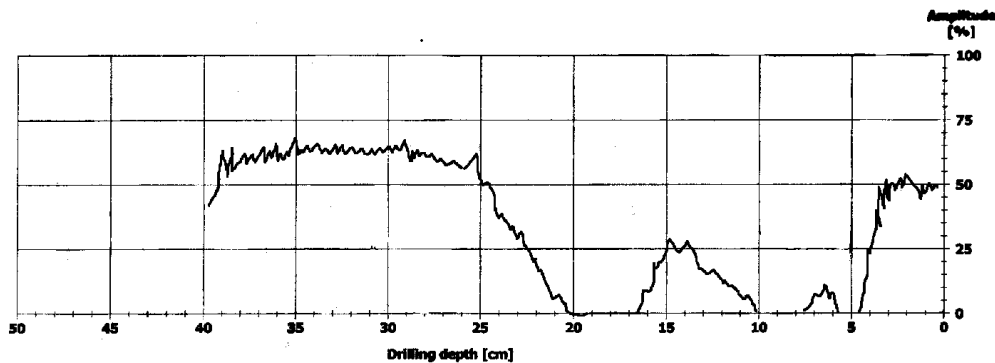


Figura 4.- Perfil resistográfico

Dependiendo de la especie, los perfiles resistográficos alcanzan tal precisión que son capaces de mostrar el ancho de los anillos de crecimiento con diferentes densidades y las variaciones de resistencia entre la madera de verano y la de primavera. La distancia entre dichos anillos, para una misma sección, varía en función del ángulo con el que penetra la aguja.

Por otra parte, cuando la madera presenta un ataque por hongos, fendas, etc, la resistencia a la penetración disminuye significativamente, hasta un nivel constante y cuando presenta un ataque por insectos, la resistencia disminuye de manera puntual a medida que el resistógrafo atraviesa las galerías producidas por ellos o sus larvas.

Lógicamente, la medición obtenida tiene carácter local, y por ello es necesario realizar varias perforaciones en un mismo elemento de madera para poder detectar los daños existentes en su interior.

La utilización de este equipo ha sido avalada por diversos estudios en laboratorio y de campo, considerándose una herramienta válida la inspección de estructuras de madera y para la obtención de los valores de resistencia y densidad de la misma. Las gráficas obtenidas nos dan una correlación lineal entre los valores de densidad y de resistencia, según la fórmula establecida por F. Rinn. Los valores medios de los perfiles resistográficos se correlacionan con suficiente fidelidad con la densidad de la madera seca. Incluso este mismo estudio afirma que existe una buena correspondencia cuantitativa y cualitativa entre los gráficos de densidad del resistógrafo y de los rayos X bajo ciertas condiciones.

El ángulo entre el recorrido de la aguja y el borde del anillo determina la típica apariencia de las estructuras de los anillos del árbol en los perfiles resistográficos. Con una penetración



perpendicular a los anillos, éstos se presentan claros y evidentes. Y lo mismo sucede cuando se dispone de adaptadores para ángulos de 45°. Sin embargo, para ángulos menores, en los que la aguja penetra tangencialmente a los anillos, los valores de densidad suelen ser bajos y no mostrar diferencias reconocibles.

Como consecuencia, los perfiles resistográficos no muestran variaciones significativas y permanecen en el nivel de valores inferior. Por ello, la interpretación de estos perfiles oblicuos puede llevar a la errónea conclusión de identificarlos como pudriciones. Sin embargo, cuando se alcanza cierta experiencia, es posible distinguir estos efectos de la pudrición comprobando los niveles de los perfiles. Si existe pudrición en una determinada zona del elemento, el nivel del perfil estará por debajo del nivel del perfil en las zonas de madera de primavera de los anillos sanos.

En resumen, la utilización del resistógrafo en las inspecciones de estructuras de madera, como es nuestro caso, con ángulos de penetración comprendidos entre 45° y 90°, permiten obtener una valiosa información acerca del estado y naturaleza de los elementos ocultos y de difícil acceso por métodos de inspección no destructivos.

Lógicamente, tanto con este equipo como con los dos anteriores es importante disponer de una buena base de datos para comparar las lecturas recogidas en cada inspección. Diversas universidades europeas trabajan sobre este tema, habiéndose conseguido ya avances significativos.

#### **5.4.- TALADRO**

Conocido técnicamente como Simple Drill Testing, este sencillo procedimiento evalúa el estado que presenta la escuadría de madera a través de la simple inspección visual del serrín que extrae la broca de un taladro eléctrico o berbiquí aplicado al elemento de madera. Fotografía 5.



*Figura 5.- Ejecución del “Simple Drill Testing”*

Como resulta evidente, este método únicamente permite deducir el nivel de ataque de los organismos xilófagos o las singularidades, pero no aporta ninguna información sobre las características mecánicas de la sección.

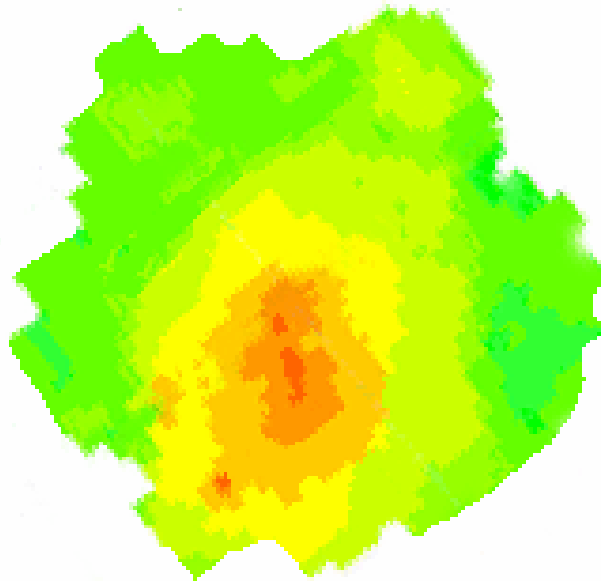
#### **6.- SISTEMAS ACÚSTICOS**

Tanto si emplean impulsos sónicos como ultrasónicos, el funcionamiento es idéntico: un emisor envía una señal que, al atravesar la sección de la pieza, permite determinar las singularidades y defectos que presenta e incluso, dependiendo del equipo, la clase resistente.

### **6.1.- SISTEMAS SÓNICOS**

Dentro de este grupo existen varios tipos, dependiendo fundamentalmente del número de sensores empleados. En todos los casos, los resultados de los ensayos evalúan la presencia o ausencia de defectos en la sección.

- 6.1.1.- Percusión con martillo. Técnica conocida, de funcionamiento sencillo y que permite obtener resultados inmediatos. Su inconveniente radica en la importante componente subjetiva del ensayo (duración del impacto, fuerza aplicada e interpretación de resultados), por lo que únicamente será una herramienta útil cuando se emplea por personal especializado en estos equipos y con conocimientos del comportamiento de la madera como elemento estructural.
- 6.1.2.- Tomografía sónica. Estos dispositivos actúan de manera similar a un TAC médico, en el que en lugar de rayos X se emplean impulsos de sonido, aunque aplicados a una sección transversal de la sección (por ello sólo se obtienen registros gráficos en 2D). La precisión del ensayo depende del número de transductores empleados, por lo que deberían utilizarse 8 sensores como mínimo. Todos ellos se conectan entre sí y a una unidad central, que recoge los ecos recibidos por cada palpador al golpear sucesivamente cada una de las cabezas instaladas en cada sensor. Terminada la serie completa de golpes, la unidad central procesa la información, y asigna a cada punto de la sección del árbol un color en función de la velocidad de transmisión de la onda que atraviesa el punto. Se consigue así una representación gráfica plana de la sección de la escuadría, incluyendo los defectos y singularidades de la misma. Fotografía 6. El principal problema de este sistema aplicado a la madera estructural radica en la lentitud del procedimiento y en la imposibilidad de utilizarlo para estudiar la sección longitudinal, testas de las vigas, etc. De ahí que fundamentalmente se emplee en el estudio de defectos puntuales o en árboles vivos.



*Figura 6.- Ejemplo de resultado de tomografía sónica*

### **6.2.- SISTEMAS ULTRASÓNICOS**

Al igual que sucedía con los densitómetros, también en este caso la naturaleza del ensayo es similar a los equipos de ultrasonidos empleados para analizar elementos de hormigón: se basan en la relación existente entre la velocidad de propagación de una onda progresiva a través de un medio homogéneo e isótropo, y las constantes elásticas del material, que a su vez están ligadas con la resistencia y el estado del mismo. Para ello se disponen dos palpadores idénticos en posición enfrentada, de manera que uno actúa como el emisor de un haz ultrasónico que es recogido por el otro. La medición del tiempo empleado en recorrer la longitud de la pieza, permitirá deducir la velocidad de propagación.

Sin embargo, mientras que en el caso de hormigón los resultados son suficientemente fiables y la metodología de actuación sencilla, en el caso de la madera se presenta un problema cuando se trata de inspecciones “in situ”, ya que la propagación del impulso ultrasónico debe hacerse en la dirección de las fibras de la madera; es decir, si se tratase de un pilar, por ejemplo, los resultados más fiables exigirían desmontar el elemento para situar los palpadores en la base y en la cabeza del pie derecho. Y lo mismo sucedería con las vigas y viguetas, en donde sería necesario acoplar los palpadores en las testas de cada nervio.

Aunque no siempre se cumple, las mediciones directa e indirecta cara-cara arrojan, en la mayor parte de los casos, velocidades menores y con una variación de resultados ligeramente mayor. Sin embargo, como consecuencia, los valores suelen estar del lado de la seguridad. Como contrapartida, indicar que los resultados sólo son realmente fiables en una profundidad de varios centímetros, pero no en la totalidad de la sección.

Además, en el caso de determinación de la resistencia a rotura, ésta se produce casi siempre por la presencia de un fallo localizado (nudo, gema, etc) en el material, por lo que el módulo de rotura pierde interés.

Por todo ello, hasta hace poco tiempo, este tipo de técnicas era más empleadas en laboratorio, donde la manipulación de las piezas es mucho más sencilla. Sin embargo, en los últimos años se han alcanzado mejoras sustanciales tanto el conocimiento de los equipos como en la precisión de los mismos lo que, unido a la experiencia adquirida, han permitido desarrollar instrumentos que indican, con bastante aproximación, incluso la clase resistente del componente de madera.

Además, los problemas que se planteaban antiguamente con el acoplamiento de los palpadores ya han sido resueltos, utilizándose sensores de sección cónica que ni siquiera requieren gel en el acoplamiento.

### **6.3.- DETECTORES DE TERMITAS**

Dentro de este grupo pueden incluirse también una serie de instrumentos que, mediante emisiones acústicas, permiten detectar la actividad de las termitas dentro de las secciones de madera. Sin embargo, hasta la fecha los resultados no son del todo satisfactorios, especialmente cuando el ataque no es todavía demasiado virulento.

### **7.- OTRAS TÉCNICAS NO APLICABLES A PIE DE OBRA**

Finalmente mencionar que existen otra serie de equipos basados en técnicas electromagnéticas, nucleares, etc que consiguen buenos resultados en lo que respecta a la evaluación del daño en secciones de madera. Sin embargo, bien por la dificultad de manipulación (sistemas nucleares) como por la necesidad de apeo y desmontaje de la sección (georradar, termografía, etc), su aplicación a pie de obra no está suficientemente desarrollada hasta el momento.

### **8.- BIBLIOGRAFÍA**

1. Brunete, M et al *Inspection techniques for ancient wooden structures*. Florencia, 1999.
2. Fragnelli, G. *Valutazione comparata de alcune tecniche strumentali nella dianostica delle strutture lignee*. Torino. Torino, 1998.
3. Álvarez, L. et al *Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares de madera*. I Jornadas de Investigación en Construcción. Madrid, 2005.
4. Esteban, M. *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*. Tesis doctoral ETSIMM, 2005.
5. Hermoso, E. et al *Evaluación de la capacidad resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos*. 10º Congreso Nacional de END, 2003.
6. Arriaga, F. et al *Intervención en estructuras de madera*. AITIM. Madrid, 2002.
7. García. L. et al *La madera y su tecnología*. AITIM. Madrid, 2002.
8. Hermoso, E. *Jornada de aplicación de técnicas especiales de END en la construcción*. AEND. Gijón, 2005.

# **LA ENDOSCOPIA COMO TECNICA COMPLEMENTARIA EN LAS LABORES DE INSPECCION VISUAL**

**Jesús Díez Hernández<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Ingeniero Industrial, Jefe de Servicio de Patología y Rehabilitación, Unidad de Construcción y Desarrollo del Territorio, LABEIN - TECNALIA*

## **1.- DEFINICIONES**

Véanse en primer lugar unas definiciones tal como las recogen prestigiosos diccionarios y enciclopedias. ¿Por qué?. Porque hay un pequeño lío con las terminologías, endoscopia, boroscopia, flexoscopia, etc.

ENDOSCOPIO. (De endo- y -scopia). m. Aparato destinado a practicar la endoscopia.

ENDOSCOPIA. (De endo- y -scopia). f. Med. Técnica de exploración visual de una cavidad o conducto del organismo. Med. Esta exploración.

Endoscopia, procedimiento para visualizar estructuras u órganos internos mediante un endoscopio. Es muy útil en el diagnóstico y tratamiento de los procesos que afectan al tracto gastrointestinal. El endoscopio es un instrumento de 8 a 10 mm. de diámetro que emplea tecnología de fibra óptica y contiene cerca de 20.000 fibras de cuarzo. El tubo del endoscopio está formado por distintos sistemas: fibras ópticas de iluminación; fibras ópticas de visión; tubo de bombeo de gas (aire) o de irrigación (suero salino) para distender la cavidad a explorar, y tubo de instrumental (por él se introducen instrumentos diseñados, en especial, para cortar, pinzar coagular o bisturí eléctrico); también existe la posibilidad de fibras ópticas para láser. Para la obtención de imágenes de la región corporal que se explora, el endoscopio emite una señal luminosa que, tras iluminar el objeto, es recogida por el haz de fibras ópticas. La imagen se recoge en la lente que maneja el especialista. No se producen distorsiones de la imagen ya que la alineación de las fibras se mantiene a lo largo del tubo. La punta del endoscopio puede girarse 180° y contiene mecanismos para limpiar las lentes o los tejidos a explorar. En un principio, la endoscopia era sólo un medio de diagnóstico. En la actualidad se pueden realizar intervenciones como biopsias, terapia con láser u otras técnicas mediante el instrumental acoplado al endoscopio.

Esta definición no nos dice mucho. Parece que la ciencia médica nos gana aquí.

Veamos otra, que al menos, sí recoge nuestras inquietudes.

ENDOSCOPIO n. m. 1. Med. Aparato destinado a iluminar y hacer visible el interior de una cavidad del cuerpo, para facilitar su examen. -2. Tecnol. Endoscopio industrial, aparato destinado a la observación de cavidades de construcciones o de máquinas. -Arm. Dispositivo óptico de examen del interior del alma de un cañón.

ENDOSCOPIA n. f. 1. Med. Conjunto de los métodos de examen que consisten en introducir un tubo óptico, dotado de un sistema de iluminación, en las cavidades del cuerpo para examinarlas. -2. Tecnol. Examen del interior de las cavidades de máquinas y de construcciones. -ENCICL. Med. El dispositivo de iluminación comprendía en su origen una pequeña bombilla colocada cerca del objetivo; en la actualidad se utiliza una potente bombilla exterior, cuyos rayos son filtrados (luz fría) y después canalizados hasta el objetivo por medio de redes de fibras ópticas flexibles. Los órganos accesibles son numerosos:

larínge, tráquea. Algunos endoscopios comprenden dispositivos asociados que permiten la ablación de cuerpos extraños, pequeñas intervenciones e incluso verdaderas operaciones.

Concretando, la endoscopia consiste en la observación indirecta del interior de algo, a través de una perforación practicada o existente en ese algo, y que permite inspeccionarlo visualmente. En algunos casos y con equipos más específicos permite igualmente actuar sobre ello, medir, retirar muestras, etc.

## **2.- UTILIDAD DE LA TECNICA**

La principal ventaja de la endoscopia reside en que permite acceder a puntos no visibles de forma natural y en que proporciona diagnósticos visuales y objetivos en lugar de meras suposiciones. Esto pone al alcance del observador competente un cuadro con el que formarse un juicio rápido y certero.



*La endoscopia es, pues, una herramienta central a la hora de tomar decisiones y reducir al mínimo las incertidumbres de la inspección.*

Los endoscopios proporcionan imágenes de áreas no reconocibles a simple vista. Permiten 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.

Por lo tanto, la endoscopia ofrece excelentes posibilidades para el examen no agresivo concebido como complemento de los métodos de exploración convencionales o como "instrumento de decisión". Los endoscopios son fáciles de manejar y ahorran tiempo y dinero. El campo de aplicación de la endoscopia técnica en sus diversas aplicaciones crece continuamente, ayudado por la sofisticación y prestaciones crecientes de los aparatos disponibles.

Es de esperar que en el futuro la endoscopia se convierta en un sistema de examen generalizado en otros muchos campos de aplicación.

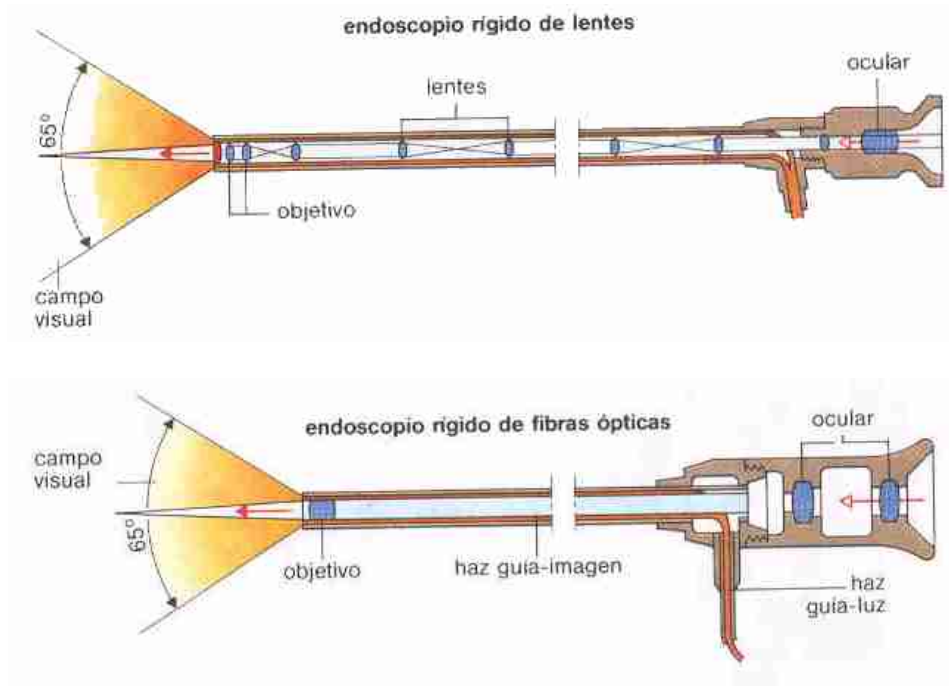
## **3.- TIPOS DE ENDOSCOPIOS**

Hay dos tipos de endoscopios: los endoscopios rígidos, llamados también boroscopios, y los endoscopios flexibles llamados flexoscopios.

### **3.1.-ENDOSCOPIOS RIGIDOS – EL BOROSCOPIO**

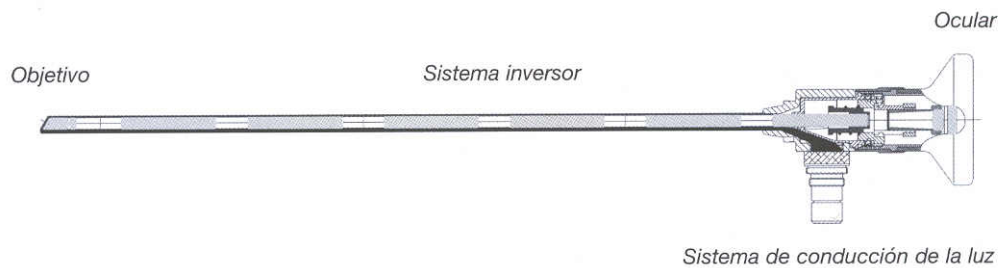
Dentro de los Boroscopios hay también dos tipos: de lentes o de fibras ópticas.





En los endoscopios rígidos de lentes, el objetivo transmite las imágenes al ocular, a través del cual el observador efectúa el examen visual.

El endoscopio se compone, básicamente, de un sistema óptico, de un mecanismo que sujeta dicho sistema protegiéndolo de agresiones externas, así como de un sistema de conducción de luz que sirve para iluminar la cavidad observada.



*El sistema óptico consta de: objetivo, sistema inversor y ocular. El objetivo proyecta una imagen real hasta el primer plano intermedio, desde donde es transmitida posteriormente en varias fases por el sistema inversor al último plano intermedio. Aquí el ocular proyecta una imagen virtual, que puede ser observada con la vista relajada o bien reproducida en un nuevo plano por el objetivo de la cámara.*

El diámetro de los boroscopios, es decir, de los endoscopios rígidos, oscila entre 1,9 mm. y 10 mm. utilizando sistemas de lentes. Para aplicaciones especiales existen instrumentos con una longitud de trabajo que puede alcanzar 1,5 metros o más.

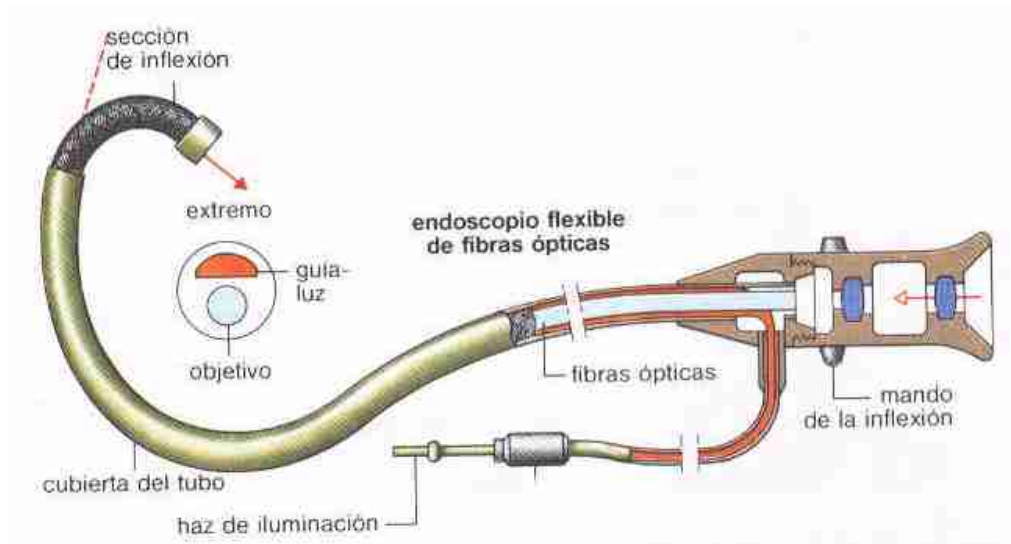


*Diversos modelos de Boroscopios.*

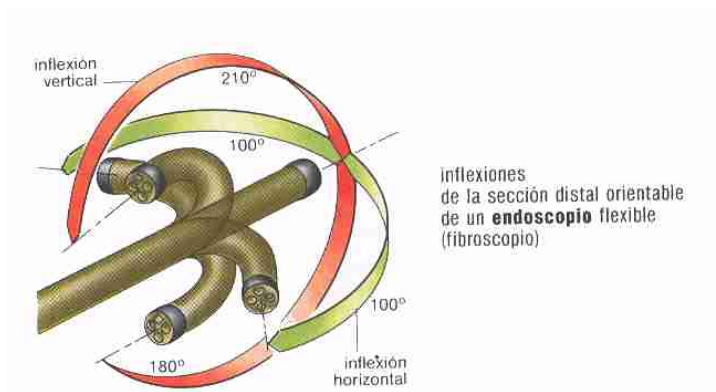
Las características de los Boroscopios de fibras ópticas son equivalentes a la de los Flexoscopios que veremos a continuación.

### **3.2.- ENDOSCOPIOS FLEXIBLES – EL FLEXOSCOPIO**

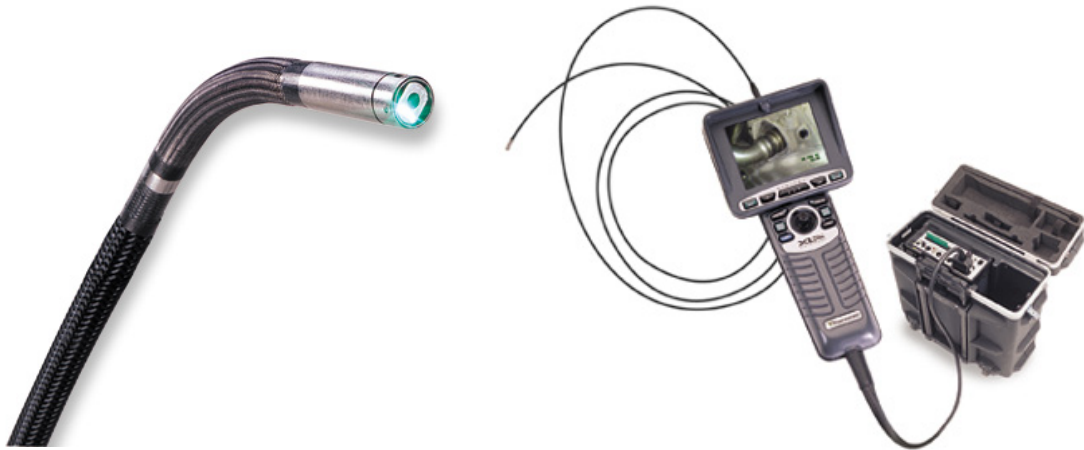
Cuando el acceso al espacio a examinar es sinuoso, se utilizan endoscopios flexibles, los "flexoscopios".



Igual que en los endoscopios rígidos, también aquí es necesario que el objetivo transmita las imágenes al ocular, a través del cual el observador efectúa el examen visual.



Entre ambos extremos se instala un "tubo", que ha de ser flexible para poder acceder al área de estudio y que al mismo tiempo sirva para transmitir la imagen.



*Modelo comercial de endoscopio flexible con captación de imágenes. (Cortesía de Everest VIT – Panatec)*

Como es lógico, dentro de este tubo flexible no puede instalarse un sistema de lentes. Por eso se utiliza un principio óptico distinto para la transmisión de imágenes.

El "tubo" contiene un sistema de transmisión de imágenes mediante delgadas fibras de vidrio. A través de éstas se transmite la imagen del objetivo al ocular.

Dependiendo del tipo de fibras empleado, el haz de fibras, también denominado "haz transmisor de imágenes", puede constar de más de 100.000 fibras individuales. El diámetro de cada fibra es muy inferior al de un cabello humano.

Las fibras se componen de dos tipos de vidrio, un núcleo de vidrio y una delgada corteza de vidrio que lo recubre. Dado que la corteza presenta un índice de refracción inferior al del núcleo, todos los rayos de luz son reflejados totalmente en esta "área limítrofe". Ello hace posible la transmisión de las imágenes a través de puntos de imagen individuales.



*Equipo de endoscopia de LABEIN-TECNALIA.*

*Marca EVEREST IMAGING, de manguera flexible de 3 metros de longitud con extremo dirigible en todas las direcciones mediante joystick y con ópticas intercambiables. Equipado con monitor en color de 5" y equipo de adquisición de imágenes para posterior tratamiento digital o impresión en papel.*

La resolución de la imagen de un endoscopio flexible y, por fin, el grado de apreciación de los detalles del área examinada, depende del número, de la densidad y de la calidad de las fibras que componen el haz transmisor de imágenes.

Las imágenes obtenidas con los endoscopios flexibles aparecen ligeramente reticuladas en el ocular. La retícula es consecuencia de la estructura del haz transmisor de imágenes.

Puesto que cada fibra sólo transmite un punto de la imagen, es preciso reunir muchas fibras en un haz, que posee estructura horizontal y vertical. De esta manera se hace visible en el ocular la imagen, compuesta por los puntos de imagen obtenidos de cada una de las fibras. La agrupación precisa del haz transmisor de imágenes es la clave para obtener una imagen de calidad y con valor informativo. Las fibras que se rompen aparecen reflejadas en el ocular en forma de puntos negros.

Pese a la compleja estructura del haz transmisor de imágenes, los aparatos de uso industrial existentes son resistentes y resultan apropiados para el uso cotidiano.

El haz transmisor de imágenes está protegido de agresiones externas por capas flexibles de metal y de plástico. A no ser que se le aplique una violencia mecánica extrema, el haz transmisor de imágenes puede ser utilizado durante años en duras condiciones de trabajo.



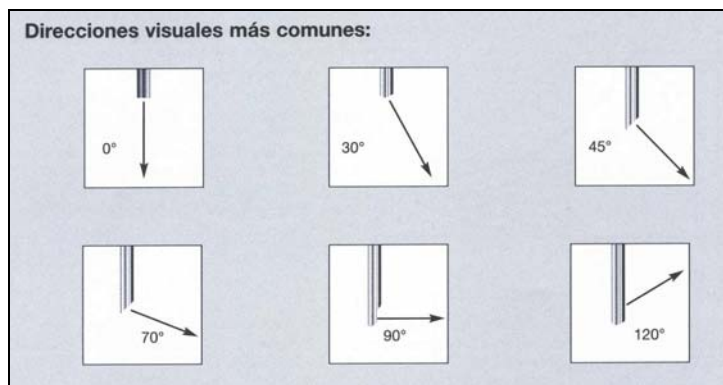
*Representación esquemática de la transmisión de una imagen a través de un haz de fibras de vidrio agrupadas.*

Veamos ahora un par de conceptos importantes.

### **Concepto: Dirección visual**

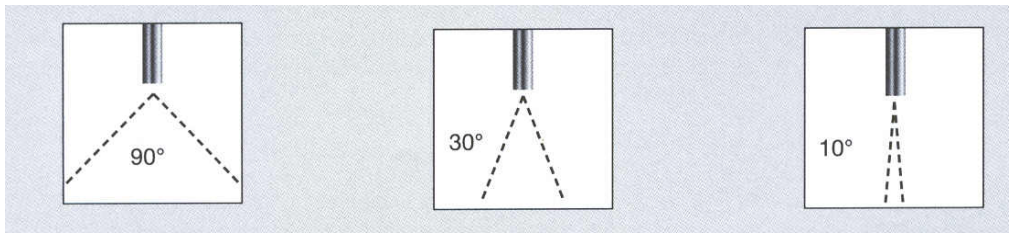
Los endoscopios funcionan con distintas direcciones visuales y están disponibles con distintos ángulos de imagen o ángulos de visión. Según la estructura óptica del mismo podremos dar "la vuelta a la esquina" e incluso mirar hacia atrás.

La dirección visual señala el ángulo, visto desde el tubo de inserción del endoscopio, con el que el usuario observa el espacio examinado.



### **Concepto: Ángulo de imagen (también denominado ángulo de visión o ángulo de abertura)**

Otro factor que la dirección visual determina es el ángulo de imagen: mide el fragmento visible de la imagen y también se expresa en grados. Este valor determina si el telescopio utilizado posee gran angular, si es un instrumento normal o si se trata de un tele-instrumento.



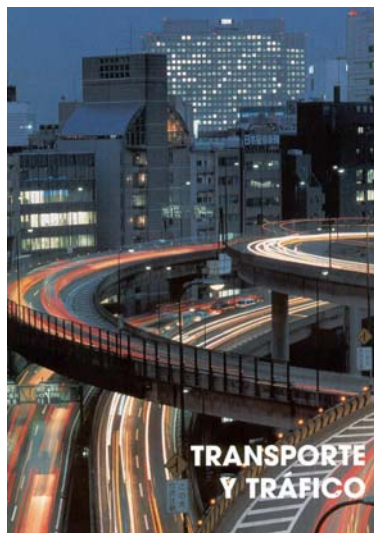
Los distintos ángulos de imagen representados constituyen meros ejemplos y no pretenden ser categóricos.

#### **4.- APLICACIONES**

Como aplicaciones mas frecuentes cabe citar las siguientes:



En un principio, la endoscopia era sólo un medio de diagnóstico. Los órganos accesibles son numerosos: laringe, tráquea, bronquios, esófago, estómago, duodeno, colon, recto, vesícula, peritoneo, pleura. En la actualidad se pueden realizar intervenciones como biopsias, ablación de cuerpos extraños, terapia con láser, pequeñas intervenciones e incluso verdaderas operaciones u otras técnicas mediante el instrumental acoplado al endoscopio.



La endoscopia técnica es en la actualidad una herramienta de uso generalizado en la inspección de automóviles y vehículos para el transporte público. Los principales trabajos en este campo se realizan en motores, transmisión y carrocería. También se disponen de equipos para aplicaciones especiales como funiculares o vehículos de transporte histórico.





Los aviones y helicópteros han de ser inspeccionados periódicamente. El examen detallado de los propulsores se realiza con ayuda de la endoscopia, un procedimiento de cuya necesidad hace tiempo que nadie duda en este terreno.



Las instalaciones de la industria energética y las centrales eléctricas han de someterse regularmente a controles, a mantenimiento y, en la fase de construcción, a verificaciones especialmente rigurosas a fin de cumplir con las correspondientes normas de seguridad. En este terreno los desmontajes a gran escala van asociados a costes extremos, puesto que suelen implicar el paro de toda la instalación. Dada la especial importancia que revisten las tuberías y sus soldaduras, se recurre a la endoscopia para poder someterlas a una inspección visual.



Existen equipos que ofrecen soluciones para el trabajo en ambientes agresivos, térmicos, químicos e incluso bajo el agua. Los endoscopios garantizan una calidad óptima de la imagen, incluso en las condiciones de utilización más adversas.



El sector de la construcción ha de afrontar numerosas tareas relacionadas con la garantía de calidad, con la estabilidad de los edificios, con el estudio de construcciones del patrimonio histórico, con la composición de los materiales de construcción, con la comprobación y control de construcciones de hormigón, etc.

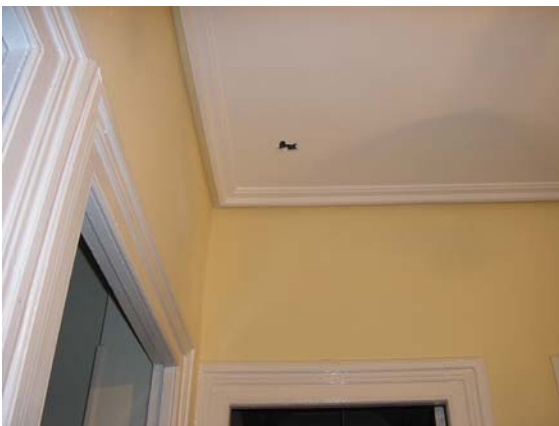
Por ello la técnica de la endoscopia es de gran utilidad en este campo y los suministradores de equipos ponen a nuestra disposición una combinación de endoscopios rígidos y flexibles, así como el equipo adecuado de iluminación y documentación conformes a las necesidades de cada caso.

## **5.- EJEMPLOS PRACTICOS**

A continuación se presentan una serie de ejemplos prácticos de aplicación de la técnica de la endoscopia. Dichos ejemplos son resultado del trabajo del día a día de los técnicos de LABEIN-TECNALIA en los últimos años.

Sirvan como muestra de las amplias posibilidades que ofrecen este tipo de equipos.

### **Inspección en viviendas con estructura de madera.**



A través de pequeños orificios en falso techo y en tarima, se accede a los elementos estructurales de madera y a ver sus apoyos en los muros de carga.

### **Inspección del interior de muros en edificios históricos. Iglesia de Marquínez**





*Endoscopia realizada en perforación del Testigo T1 donde se aprecia el relleno entre dos hojas del muro.*



*Endoscopia realizada en perforación del Testigo T2 en el forjado del coro, donde se distingue el mortero con fragmentos cerámicos.*

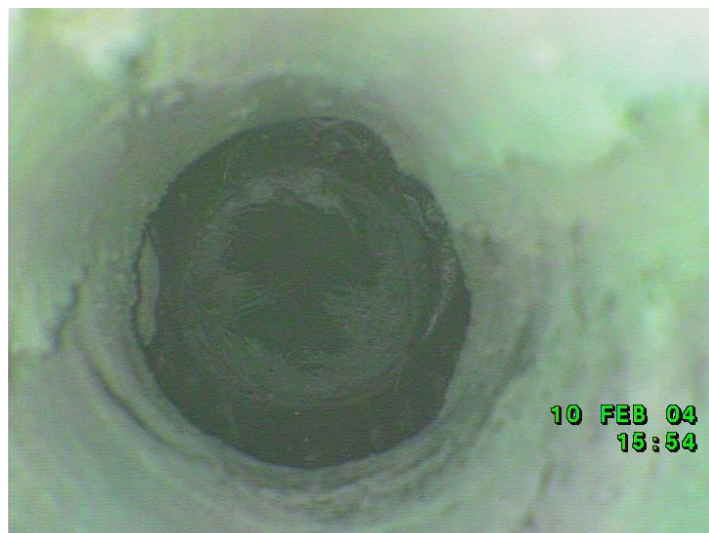


*Endoscopia realizada en perforación del Testigo T3, donde se observa el relleno entre diferentes hojas del muro.*

### **Inspección en trasdós de muros y cámaras bufas.**



*Proceso de realización de la endoscopia E-1 en la planta sótano -1.*

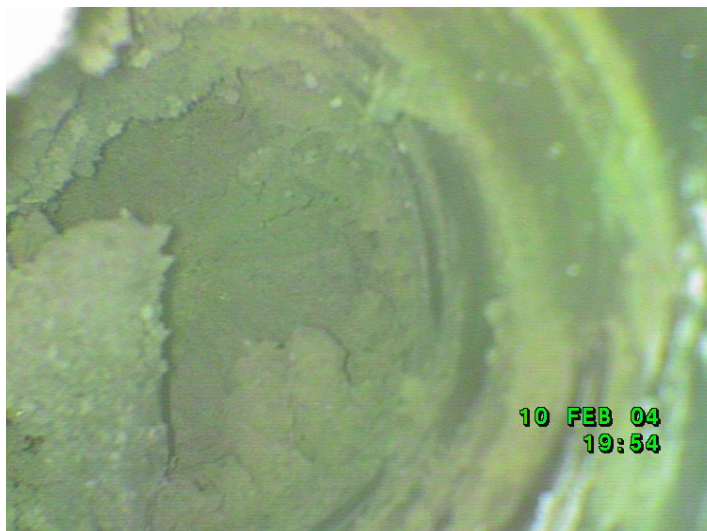


*Detalle de la tela asfáltica existente tras el muro de sótano de espesor de hormigón aproximado de 48 cm.*





*Vista del relleno heterogéneo (gravas y materiales varios) existente entre el muro de sótano y el "cajón" prefabricado del túnel.*

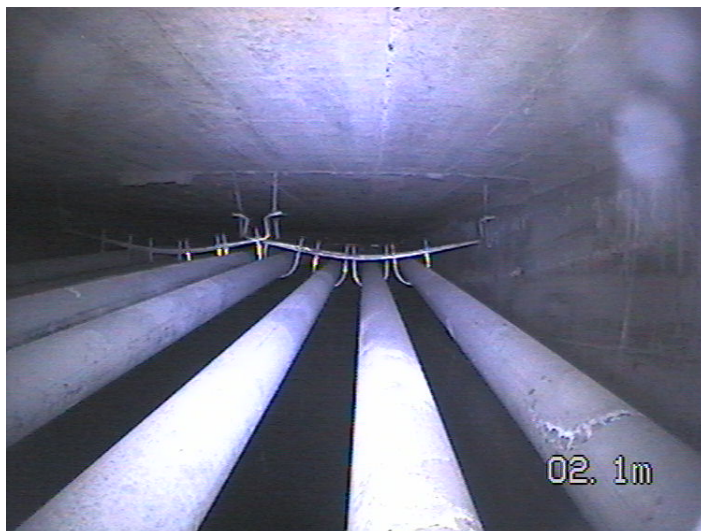


*Vista del relleno o tierras existentes entre el muro de sótano y el "cajón" prefabricado del túnel. En el lateral derecho se puede observar la tela asfáltica existente en la cara exterior del muro de sótano.*

### **Búsqueda de humedades e infiltraciones.**



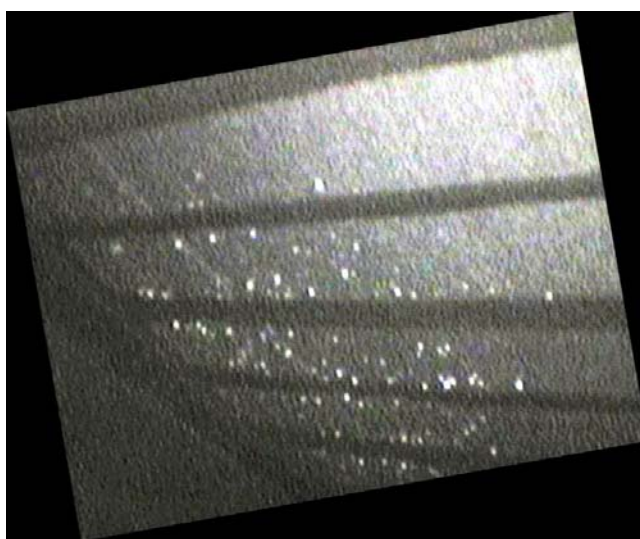
*Situación de la inspección mediante endoscopio bajo el jardín del nº 30*



*Inspección del muro Sur extremo Oeste, bajo el jardín del n° 32. Galerías de tubos. No se observan humedades*



*Agua en la cara inferior del forjado de techo de la cámara situada bajo el jardín del n° 30*



*Agua en la cara inferior del forjado de techo de la cámara que soporta el jardín del n° 32*

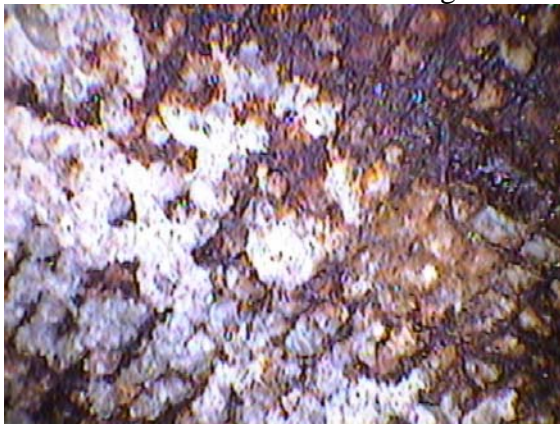




*Detalle de una infiltración de agua a la cámara situada bajo el nº 32 a través del forjado de techo que soporta el jardín*

**Inspección de interiores de elementos estructurales: Monumento de la Virgen de Orduña.**

**Localización:** Planta segunda a unos 50 cm. del suelo de esa planta.



Detalle de la tela metálica de la pared exterior, en avanzado estado de corrosión.



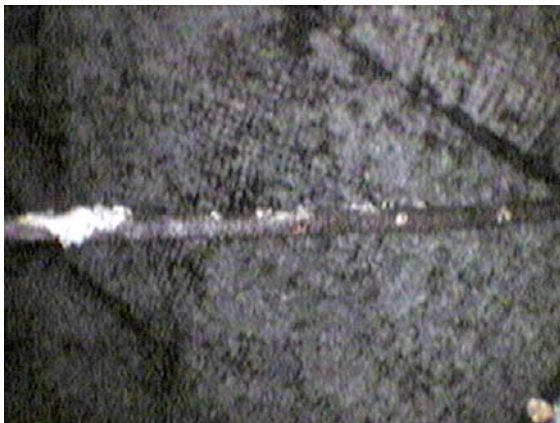
Detalle de armadura que une ambas paredes en avanzado estado de corrosión



Pared de salida al mirador con tela metálica y armadura horizontal con corrosión



Parte inicial de armadura que une ambas paredes (desde pared exterior)



Parte intermedia de armadura que une ambas paredes



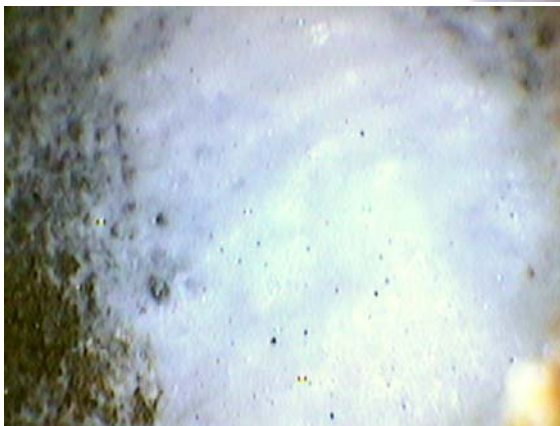
Parte final de armadura que une ambas paredes (pared interior). Se observa que al llegar a la pared interior la armadura se arquea.



**Localización:** Planta segunda a unos 50 cm. del suelo en pared izquierda de la salida al mirador



Orificio de entrada.



Sales en pared exterior



Armadura que une ambas paredes.



Detalle de armadura seccionada en pared interior



Cámara de aire entre las dos paredes con tela metálica en ambas paredes y armadura vertical al fondo



Hueco entre paredes con armadura horizontal



Armaduras que conectan ambas paredes



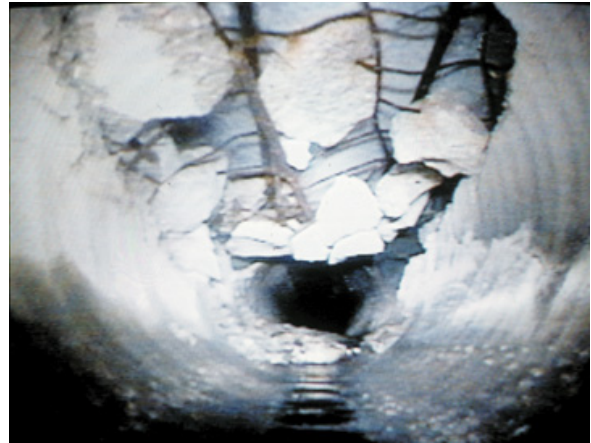
Tela metálica en pared exterior



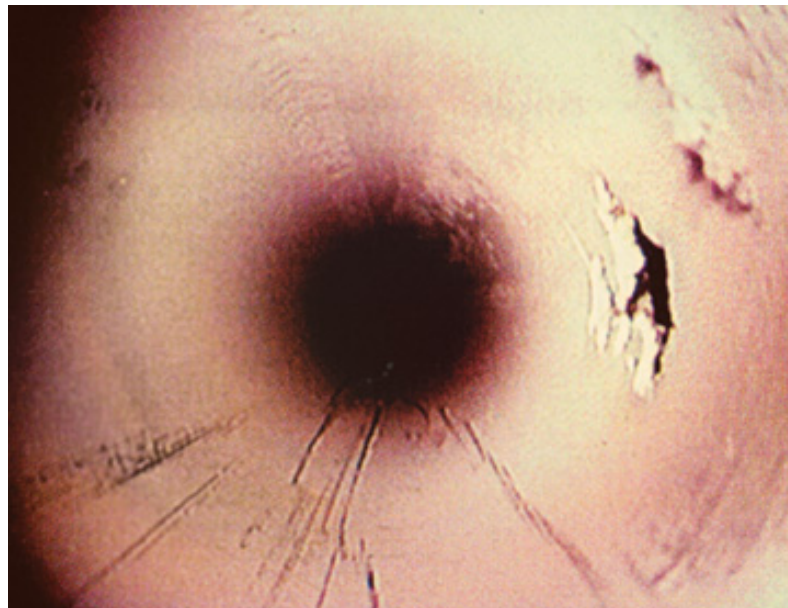


Hueco entre paredes con armadura horizontal

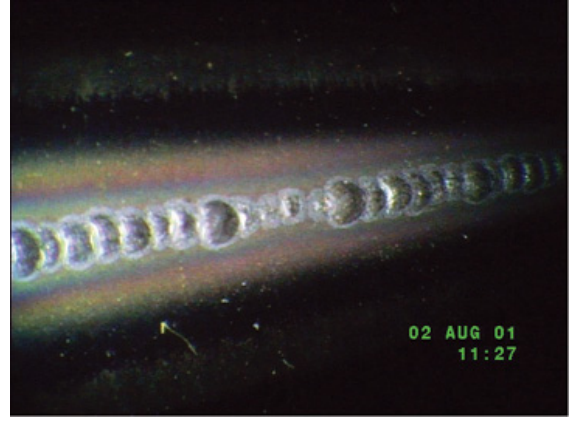
**Otras imágenes de endoscopias. (Cortesía de Everest VIT – Panatec)**



*Daños en el interior de tuberías de hormigón.*



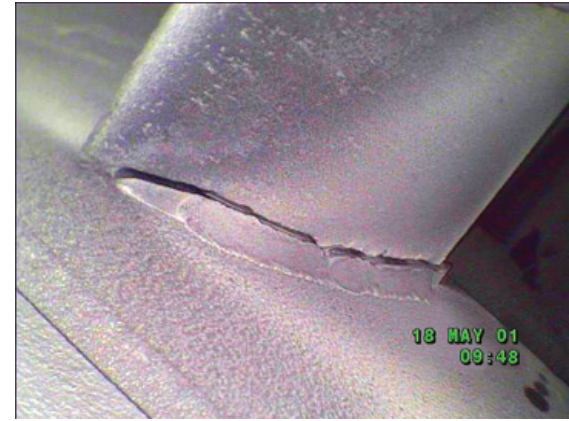
*Interior de una tubería de un condensador.*



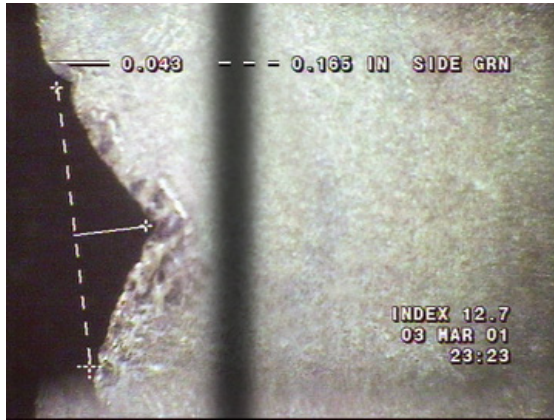
*Soldaduras.*



*Tornillo olvidado dentro de una tubería.*



*Detalle de fisura.*



*Medición de daño con equipos de endoscopia de última generación.*

# **APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFIA AXIAL COMPUTERIZADA EN INGENIERIA CIVIL**

**José Antonio Martínez Martínez<sup>1</sup>, Pedro Miguel Bravo Díez<sup>2</sup>, Departamento de Ingeniería Civil<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.*

*<sup>2</sup>Dr. Ingeniero Industrial*

*<sup>3</sup>Universidad de Burgos*

## **1.- INTRODUCCIÓN**

La Tomografía Axial Computerizada (TAC) consiste en una técnica de diagnóstico que permite conocer la composición interna de un determinado cuerpo material. Su origen se debe al Dr. británico Godfrey Hounsfield en la década de los 70, y se aplicó para conocer el cuerpo humano por el “interior” evaluándolo desde el “exterior”. Hasta entonces la investigación sobre el cuerpo humano, analizado desde su exterior, se circunscribía básicamente a las placas radiográficas. Alrededor de 1972, el Dr. Hounsfield (Premio Nobel en Fisiología o Medicina en 1979 por “el desarrollo de la tomografía asistida por computadoras”) observó que cuando los rayos X atravesaban el cuerpo humano recogían información de todos los puntos por los que pasaba el haz, presentando un comportamiento diferente según la composición y estructura de los materiales que atravesaba. A la técnica de obtener esa información y reconstruirla para presentarla de forma claramente entendible se la denominó Tomografía Axial Computerizada (TAC). Podríamos, por lo tanto definir la TAC como la técnica empleada para la reconstrucción con la ayuda de un ordenador de un plano tomográfico de un objeto cualquiera, entre los que podemos considerar el propio cuerpo humano.

A su vez la palabra “tomografía” viene del griego tomos que significa corte o sección y grafía que significa representación gráfica. Por lo tanto tomografía equivale a la obtención de imágenes de cortes o secciones de algún objeto.

La palabra “axial” significa que todos los planos de cortes o “tomos” tendrán la característica común de ser perpendiculares a un mismo eje.

La palabra “computerizada” indica que la técnica de procesado de imágenes será realizada mediante la ayuda de un ordenador.

## **2.- PRINCIPIOS DE LA TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTERIZADA.-**

Respecto a la técnica, la tomografía axial se obtiene mediante el movimiento combinado del tubo de rayos X donde un haz plano de rayos X gira hacia un lado mientras la placa radiográfica se mueve hacia el lado contrario. De esta forma se capta la imagen en un plano concreto, permaneciendo el resto del volumen, o sea la información de planos paralelos, no visible. En una radiografía convencional se obtendría exclusivamente una única imagen. En la TAC, por cada plano que se analiza, se obtienen multitud de imágenes, que procesadas por un ordenador permiten obtener una imagen final que representa un corte del objeto como si fuera una rodaja. Si repetimos el procedimiento a lo largo del eje de referencia obtenemos multitud de rodajas o cortes del mismo, que pueden ser también procesados de forma conjunta para obtener representaciones en tres dimensiones.



En cualquier procedimiento basado en la técnica de los scanners se repiten una serie de partes que podemos resumir en las siguientes:

- sistema de generación de datos
- sistema de adquisición de datos
- sistema de procesado de datos, reconstrucción de la imagen y visualización

Veamos con más detalle cada una de estas partes:

1. Sistema de generación de datos: Al igual que en otras técnicas, como por ejemplo, en la radiología convencional, es necesario un generador de energía de alto voltaje, para obtener la energía necesaria, y un tubo de rayos X que produce la radiación necesaria. El aparato de TAC generador de energía emite un haz muy fino de rayos X. Este haz incide sobre el objeto que se estudia y parte de la radiación del haz lo atraviesa. La radiación que no ha sido absorbida por el objeto, en forma de espectro, es recogida por los detectores. La energía percibida por éstos recibe el nombre de "radiación atenuada". Esta energía es captada por unos detectores
2. Sistema de adquisición de datos (DAS): Reciben la señal eléctrica que le envían los detectores y la convierten en formato digital, enviándola a su vez a un ordenador. Este proceso se repite en cada plano de análisis y dentro de cada plano para un número elevado de direcciones separadas todas un determinado ángulo.
3. Procesado de los datos: A partir de todos esos datos, en cada plano, y de todos los planos, mediante algoritmos matemáticos adecuados, y con ayuda informática se reconstruye la información obteniendo salidas gráficas claramente entendibles. Esos algoritmos de reconstrucción de imágenes tridimensionales a partir de planos paralelos bidimensionales se conocían ya desde principios del siglo pasado, pues fueron desarrollados, en 1917, por el físico alemán J. Radon.

En la reconstrucción la unidad básica para esta síntesis es el volumen del elemento. Cada corte estudiado está compuesto por un número determinado de elementos de volumen, los cuales tienen diferentes tipos de absorción. La representación de cada unidad de volumen en un sistema de representación plana como es una pantalla de ordenador recibe el nombre de pixels. Aunque el pixel que aparece en la imagen de la pantalla es bidimensional, realmente representa un volumen, dependiente del espesor de la rebanada. A esta unidad de volumen se le llama voxel.

Otro concepto importante en la regeneración de imágenes es el concepto de "amplitud de ventana". Este concepto hace referencia al rango de densidades de materia que son visibles. Generalmente se suelen considerar por referencia a la densidad del agua.

### **3.- USOS DE LA TAC.-**

El TAC, o la TAC, según nos refiramos al aparato o a la técnica consiste en un procedimiento de diagnóstico empleado desde su origen en el estudio de enfermedades del cuerpo humano, especialmente en la detección de tumores y en el estudio de su alcance, progresión y cura. Precisamente por este uso originario los TACs han sido fijos, grandes y lentos. Todos los avances de los TAC en las últimas décadas han estado dirigidos, por una parte, a aumentar la velocidad de obtención de datos para disminuir el tiempo de estancia del paciente dentro del



aparato, y por otra hacia las mejoras en los sistemas informáticos de procesado de la información.

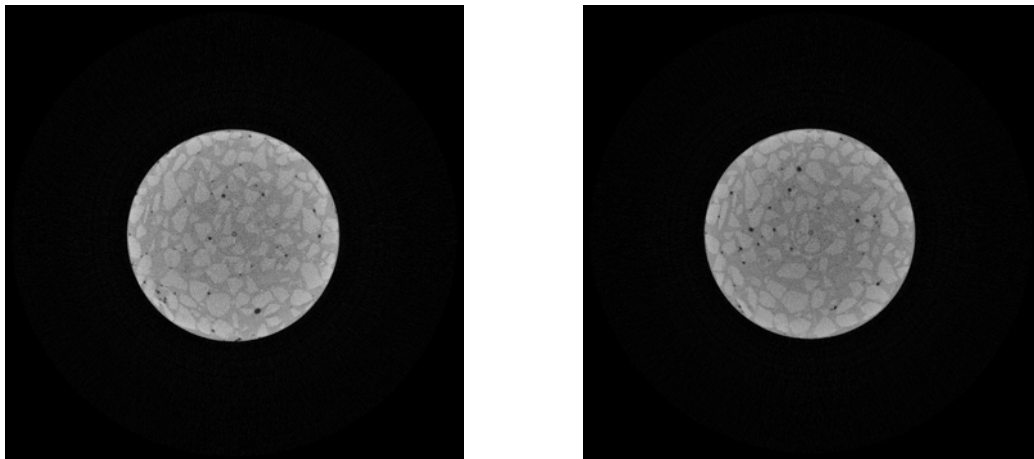
Dentro de los usos para medicina éstos son de lo más variados: TAC de tórax, de corazón, de cerebro, de columna, para la detección del cáncer de mama, cuantificación de la osteoporosis, estudio general del sistema músculo-esquelético, etc.

La denominación del TAC en lengua inglesa recibe el nombre de CAT (Computerized Axial Tomography). Es prácticamente imposible encontrar referencias bibliográficas al uso del TAC, o del CAT, que no sean de aplicación en medicina, sin embargo es conocida que la inspección por Rayos X es utilizada desde hace tiempo en la inspección de piezas y uniones en la industria aeroespacial y de la automoción, a pesar de que no se disponen, como ya se ha mencionado, de apenas referencias escritas sobre el tema.

En estos momentos se están realizando investigaciones sobre el estudio de la evolución humana a partir de muestras de huesos encontrados en yacimientos, y se están empezando a encontrar nuevos usos a esta técnica en otros campos entre los que podemos citar la ingeniería.

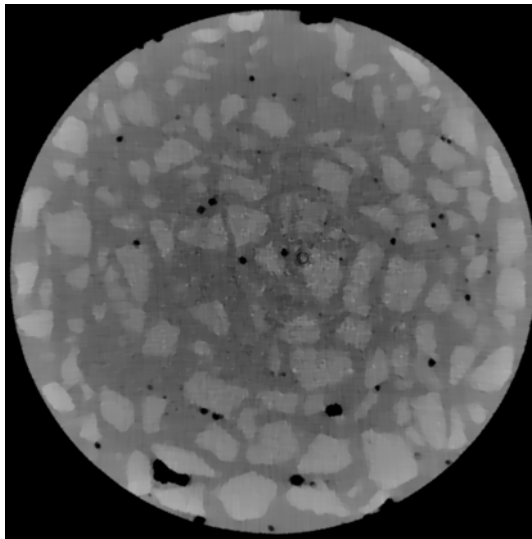
#### **4.- USO DE LA TAC EN APLICACIONES DE INGENIERÍA CIVIL.-**

Para poder estudiar aplicaciones nuevas a la técnica TAC en otros campos como la ingeniería ha sido necesario poder disponer de un aparato de aplicación industrial como el que se dispone en la Universidad de Burgos. Durante el último año se han realizado pruebas tipo en diferentes materiales como madera, acero, hormigón, etc. En el campo del hormigón se han realizado estudios sobre probetas recién fabricadas, probetas sometidas a diferentes estados tensionales, y probetas fisuradas. El objeto de estos primeros análisis es principalmente el poner a punto los procedimientos de evaluación e interpretación de resultados. Entre otras variables hay que determinar el espesor de corte de la rebanada. El resultado inicial del diagnóstico es un conjunto de imágenes de diferentes planos paralelos, separados escasos milímetros. A continuación se indica una salida típica de resultados.

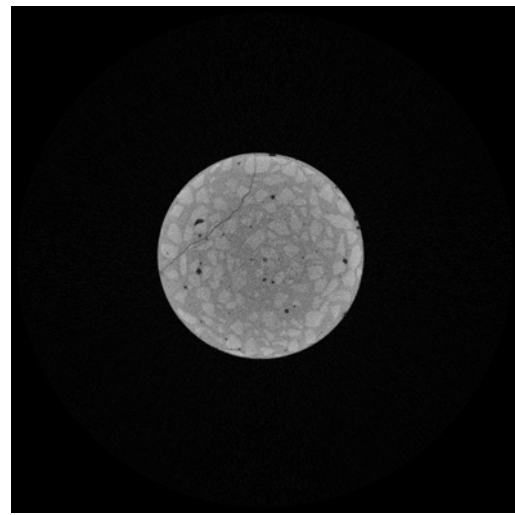
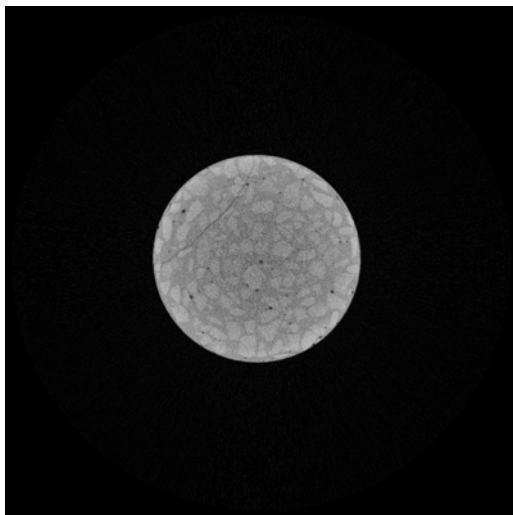


Como se puede apreciar, es posible distinguir variables como uniformidad en la distribución de áridos, porosidad interna, fracturas en los áridos, etc.

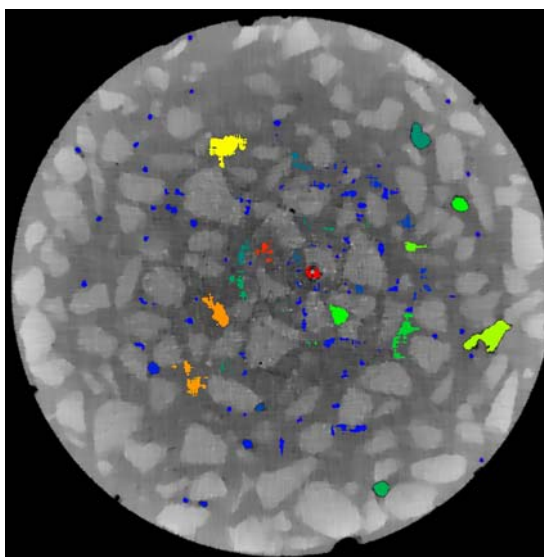
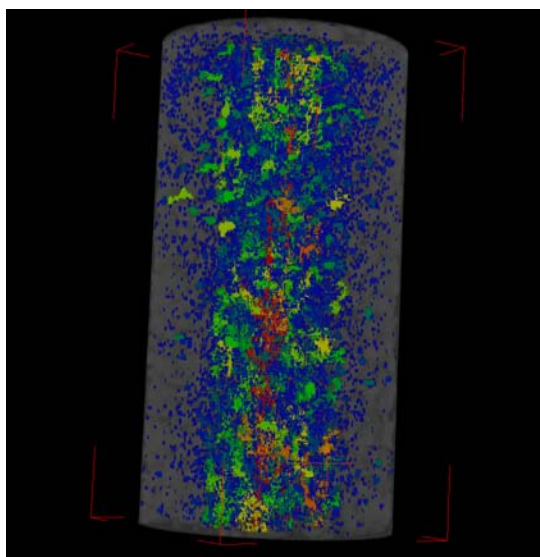
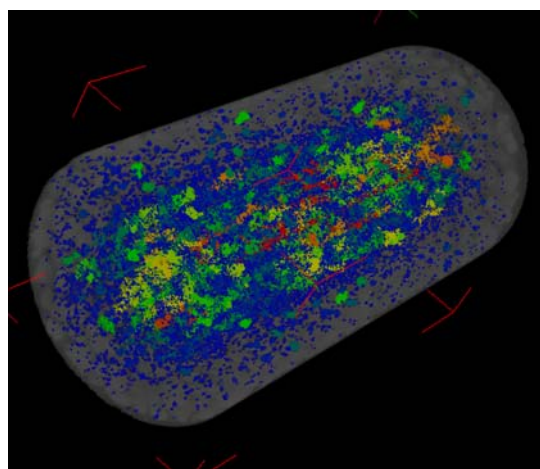
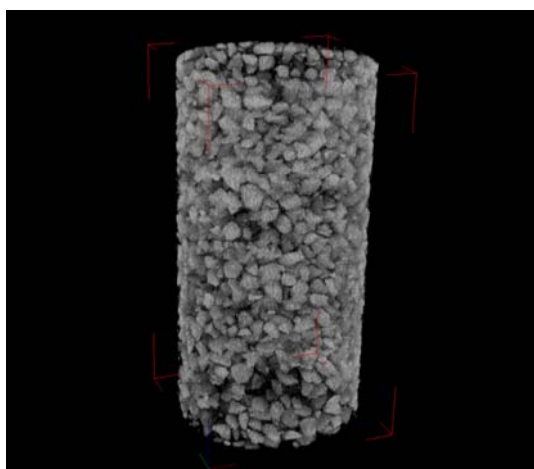
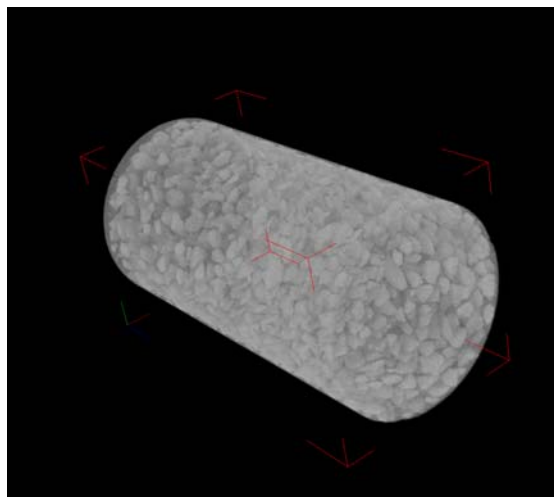
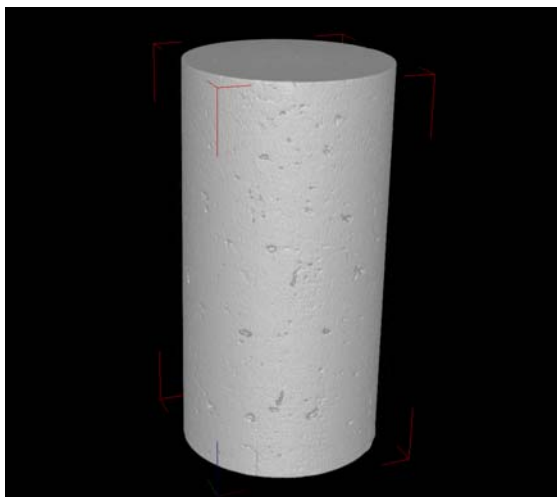
En la siguiente imagen es posible observar una porosidad elevada, a pesar de tratarse de poros no conectados, y también una deficiente distribución de los áridos.



En las imágenes siguientes podemos apreciar el inicio de una fisura que cruza el hormigón de lado a lado.



Una de las ventajas ya enunciadas de la TAC es precisamente el procesado de la información de todos los planos para constituir imágenes en tres dimensiones. A partir de las imágenes bidimensionales se pueden reconstruir virtualmente las piezas enteras y realizar filtros sobre la información disponible. Se indican a continuación seis imágenes que proporcionan una idea de las posibilidades de la técnica. La primera indica una visualización con contorno opaco. La segunda permite intuir la composición interna de la pieza con su matriz de áridos y pasta. La tercera ha realizado un filtrado de densidades eliminando la pasta y dejando exclusivamente el árido.



Análisis más elaborados de la información permitirían evaluar el volumen global de poros, el volumen total de árido, el volumen total de pasta, la distribución de otros elementos internos como armaduras o fibras, e incluso determinar recubrimientos de armadura.

## **5.- EL EQUIPO TAC DE LA UNIVERSIDAD DE BURGOS.-**

El equipo de tomografía axial computerizada (TAC) del que dispone la Universidad de Burgos, es el primer TAC de uso industrial instalado en España. Es un equipo de rayos X (Instalación de 2ª Categoría) que consta de un tubo Yxlon de 225 Kv/30mA. Físicamente se encuentra ubicado en una cabina metálica diseñada como construcción sándwich acero-plomo-acero, de forma que operando con una radiación máxima de 225Kv/30mA dentro de la cabina, la dosis máxima de radiación a una distancia de 100 mm de la superficie externa de la cabina no exceda de  $2.5\mu\text{Sv/h}$ . Esta cabina esta realizada en monobloque con todo el equipo incorporado.



Una de las limitaciones del TAC reside en el tamaño máximo de la muestra a ensayar, que en estos momentos estaría entre los 30 centímetros de dimensión en planta a los 60 cm. de dimensión en altura.

## **6.- CONCLUSIONES.-**

En los apartados anteriores se ha presentado una técnica que aunque conocida desde hace muchos años no se había aplicado fuera del mundo de la medicina. Entre sus ventajas se encuentra la de ser una técnica no destructiva, siempre que el tamaño de la muestra a ensayar pueda ser acogida dentro de la cabina de ensayo, y la desventaja de su hoy aún elevado coste. Se está empezando a trabajar también con elementos portátiles que puedan ser trasladables hasta el lugar de la muestra a ensayar. y que pueden proporcionar nuevas posibilidades de aplicación.

## **7.- BIBLIOGRAFÍA.-**

Tomografía Computerizada. J. González Rico, J. A. Vara del Campo, J. C. Vázquez Luna. Paraninfo S.A.

Manual de Tomografía Computerizada. Fco Javier Guerrero Bravo, Carlos Padrón Pérez Bartri. Comunicación S. L.

# LA TÉCNICA DEL GEORADAR EN LA REHABILITACIÓN

Luis M<sup>a</sup> García<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático Escuela Universitaria. Universidad de Burgos

## 1.- LA TÉCNICA DEL GEORADAR

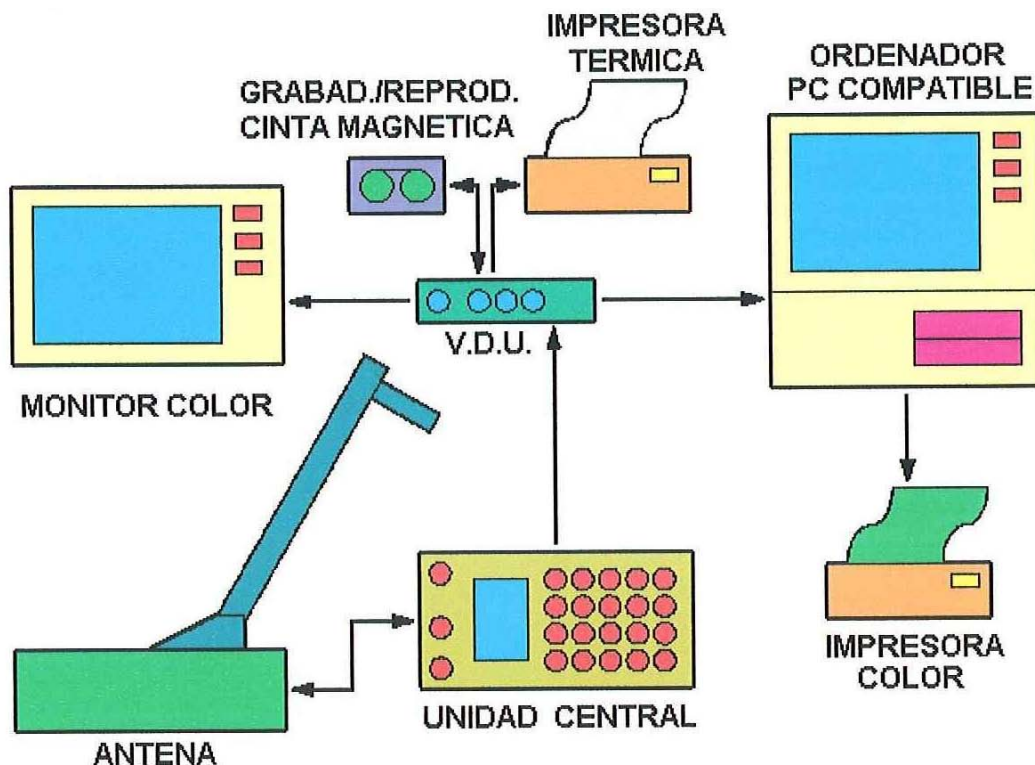
Dentro del campo de los ensayos geofísicos no destructivos para el reconocimiento del subsuelo, sin duda la técnica del georadar tiene un lugar muy concreto y útil en la investigación del terreno.

Esta técnica es de las pocas que no precisa de perforar ni agujerear en el terreno a reconocer, incluso sin llegar a tocar la superficie a explorar, situando el equipo a escasos centímetros, pueden obtenerse datos del primer metro del subsuelo (es el caso de auscultación de firmes de carreteras y capas de balasto en ferrocarriles).

La rapidez de ejecución de los ensayos con georadar y economía son otras ventajas a considerar en los reconocimientos del subsuelo. Quizá por estas características sea una técnica a considerar en las rehabilitaciones de todo tipo de edificio monumental u ordinario, en lo referente al reconocimiento de los terrenos de apoyo, soleras, canalizaciones, elementos enterrados y trasdosados de muros.

## 2.- EL GEORADAR

Los equipos de georadar se basan en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (1-10 ns), en una banda de frecuencias entre 100 MHz y 1 GHz.



*Equipo de georadar (Cedex)*

Los impulsos son dirigidos, a través de una antena, hacia el subsuelo, donde se ven afectados por los cambios de propiedades del medio, fundamentalmente en lo que se refiere a las características de permitividad eléctrica relativa. La onda se refleja en el interior del terreno y

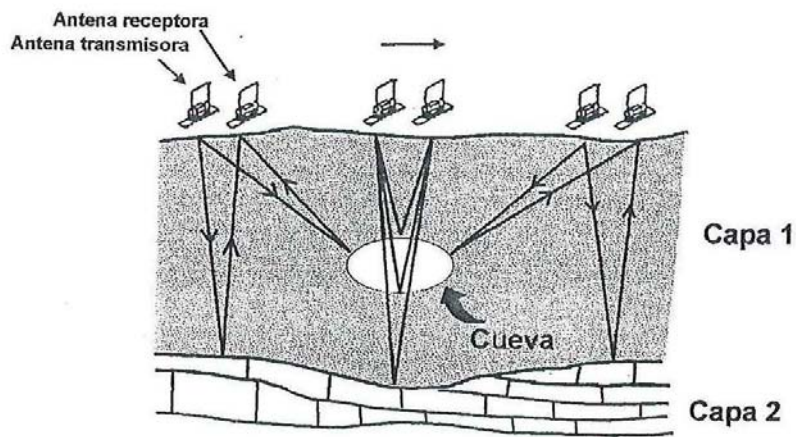


al ser detectada en superficie proporciona información de los cambios de permitividad, los cuales permiten identificar y/o estimar propiedades geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del subsuelo, así como cualquier elemento enterrado. La señal reflejada se amplifica, transforma al espectro de la audio-frecuencia, registra, procesa e imprime.

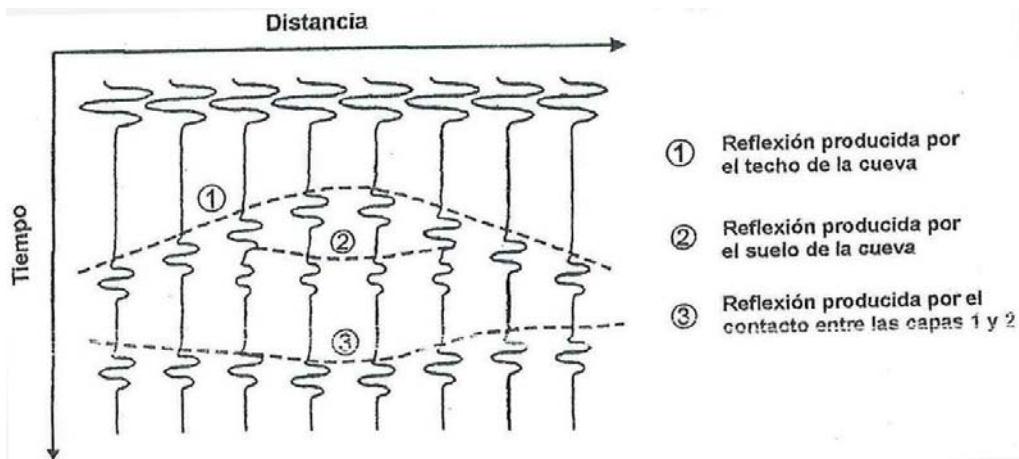
Los equipos de georadar producen perfiles continuos de alta resolución similares a los obtenidos por métodos de sísmica de reflexión. Las ventajas principales son la rapidez de toma de datos, versatilidad en cuanto a la disposición del sistema para intercambiar antenas de diferentes frecuencias y su carácter no destructivo.

La principal desventaja radica en la excesiva atenuación de los impulsos emitidos al atravesar terrenos muy arcillosos y terrenos con elevados porcentajes de humedad, es decir materiales más conductores; estas circunstancias limitan la penetración y recepción de la señal reflejada.

El método de trabajo mas usual es el denominado "perfiles de reflexión", consistente en desplazar las antenas sobre el objetivo manteniendo fija la distancia entre ambas, lo que permite obtener una sección en la que se representan tiempos dobles en ordenadas y distancia horizontal en abscisas.



*Modelo del terreno y reflexiones de la señal Georadar*



*Respuesta teórica del modelo anterior*

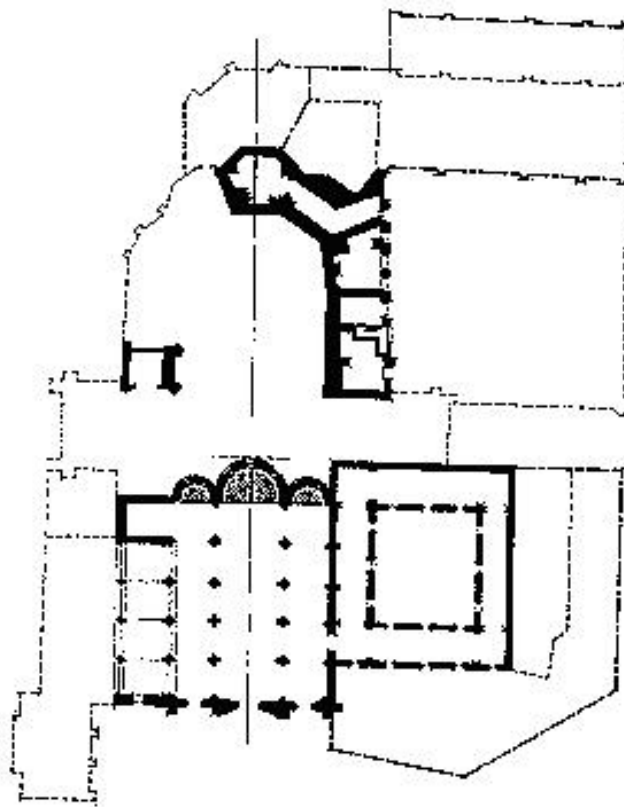
### **3.- APLICACIÓN EN LA CATEDRAL DE BURGOS**

#### **3.1.- LA ANTIGUA CATEDRAL ROMÁNICA. PLANTA Y DIMENSIONES**

Muy poco se ha escrito sobre esta obra primitiva, únicamente el arquitecto burgalés Marcos Rico la ha abordado con cierto rigor; no le falta conocimiento de la actual catedral gótica ya que ha estado dedicado a ella como arquitecto director durante 20 años. En sus investigaciones llega a la conclusión de una catedral románica con la misma planta que la nueva gótica, exceptuando las posteriores ampliaciones del claustro y capillas perimetrales. Sitúa la cabecera primitiva en el mismo lugar que la actual, (punto B indicado en la figura adjunta).

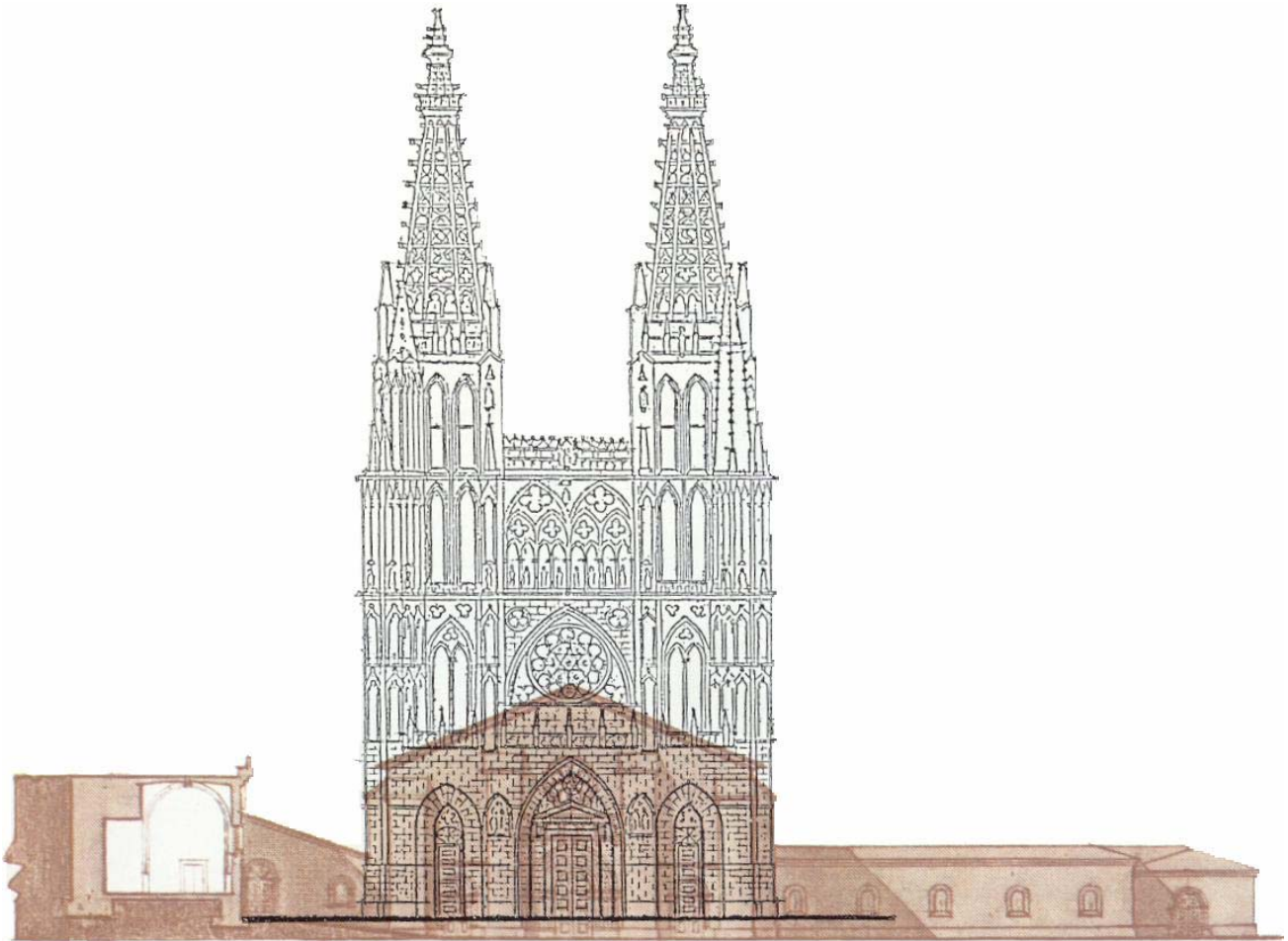
Por otro lado autores tan reconocidos como, Martínez Sanz, Luciano Huidobro, E. Lambert, ó H. Karge, coinciden en una catedral antigua pequeña y en nada comparable a la actual. Todos ellos apuntan que la primitiva fachada principal románica (oeste) se situaba en el mismo lugar que la actual, y que la cabecera no llegaba más allá del crucero de la gótica (punto A de la figura); es decir su nave principal tendría una longitud mitad de la que ahora podemos contemplar. En ningún caso estas aseveraciones están bien documentadas, es posible que estas hipótesis procedan de la lectura de la primera y rigurosa “Historia del templo catedral de Burgos” de Martínez Sanz (1866).

Esta última hipótesis, de un edificio más pequeño, daría lugar a un conjunto catedralicio un tanto desproporcionado; debido a que el claustro sería casi tan grande como la propia iglesia, como puede comprobarse en la figura adjunta (cuadrado en trazo grueso en la parte inferior derecha).



*Hipótesis sobre la situación de la cabecera románica (punto A y punto B).  
(En punteado planta de la catedral gótica). (según Marcos Rico)*

En la siguiente figura se refleja, superpuesta a la nueva catedral gótica, la reconstrucción de lo que pudo haber sido el anterior edificio románico. Esta recreación tomada de Marcos Rico, de su libro La Catedral de Burgos, es prácticamente coincidente, en cuanto a la anchura de la antigua catedral románica, con la reconstrucción de la planta que nosotros planteamos como resultado de nuestras investigaciones.



*Reconstrucción alzado de catedral románica con su claustro viejo.  
(según Marcos Rico)*

### **3.2.- RECONOCIMIENTOS E INVESTIGACIONES REALIZADAS**

En nuestras investigaciones del subsuelo de la Catedral de Burgos, dirigidas fundamentalmente al conocimiento de los aspectos geológicos-geotécnicos e hidrogeológicos, hemos utilizado para el reconocimiento del terreno, en el interior del templo, la técnica geofísica del georadar. Técnica no destructiva consistente en la emisión, desde superficie, de pulsos electromagnéticos de alta frecuencia que se propagan en profundidad a través del medio a estudiar, y se reflejan hacia la superficie cuando en su recorrido encuentran discontinuidades en parámetros físicos del medio.

La profundidad investigada mediante el georadar es función de la frecuencia de la señal electromagnética emitida. Cuanto más baja sea la frecuencia mayor es la profundidad investigada y menor la resolución. En nuestro caso hemos repetido todas las medidas con tres frecuencias (110 MHz, 225 MHz y 450 MHz), con el fin de poder combinar resolución y

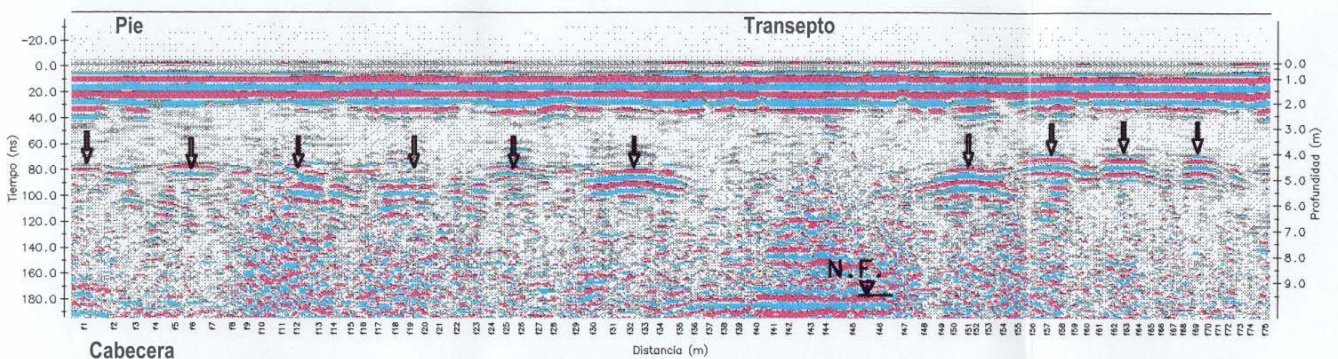


penetración. El sistema utilizado para la toma de datos ha sido el modelo Pulse-EKKO-1000A.

Los perfiles realizados en el interior del templo se corresponden con los ejes longitudinales de las naves laterales, central y transepto. Los resultados obtenidos en cada perfil (radargrama), en cuanto a las anomalías detectadas, son básicamente los mismos para las tres frecuencias. El mayor nivel de información se consiguió al operar con 110 y 225 MHz.

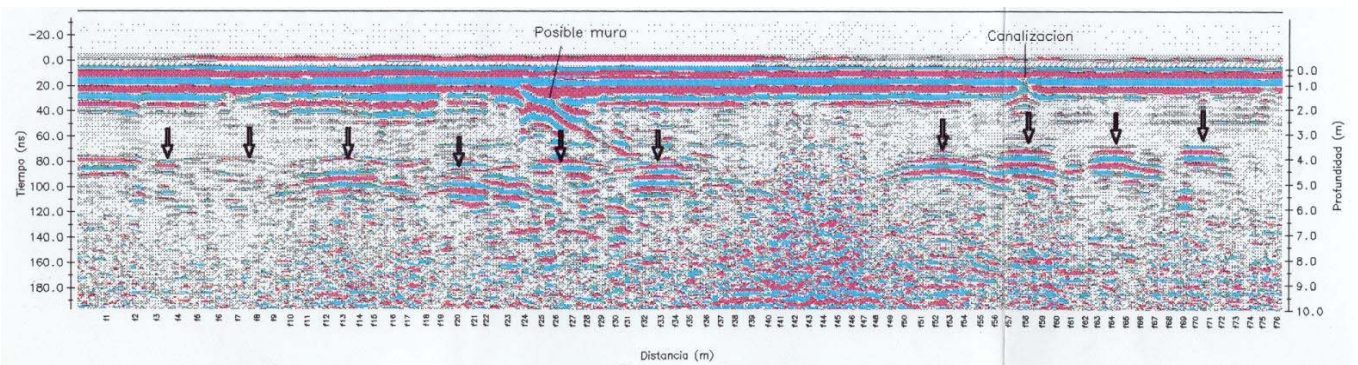
En los perfiles de las naves laterales aparecen anomalías (ver figuras de perfiles), entre 3,5 y 4 m de profundidad, que sin duda indican estructuras discontinuas enterradas. Nuestra interpretación es que se trata de los antiguos muros, que constituían la cimentación de la anterior catedral románica.

Todos los perfiles obtenidos, para cada una de las frecuencias utilizadas, en las dos naves laterales, muestran una distribución espacial regular de los accidentes puntuales del subsuelo. En la nave central y transversal no aparecen estas anomalías.



*Perfiles longitudinales en naves laterales de la Catedral (radargrama)*

*a) Nave lateral izquierda*



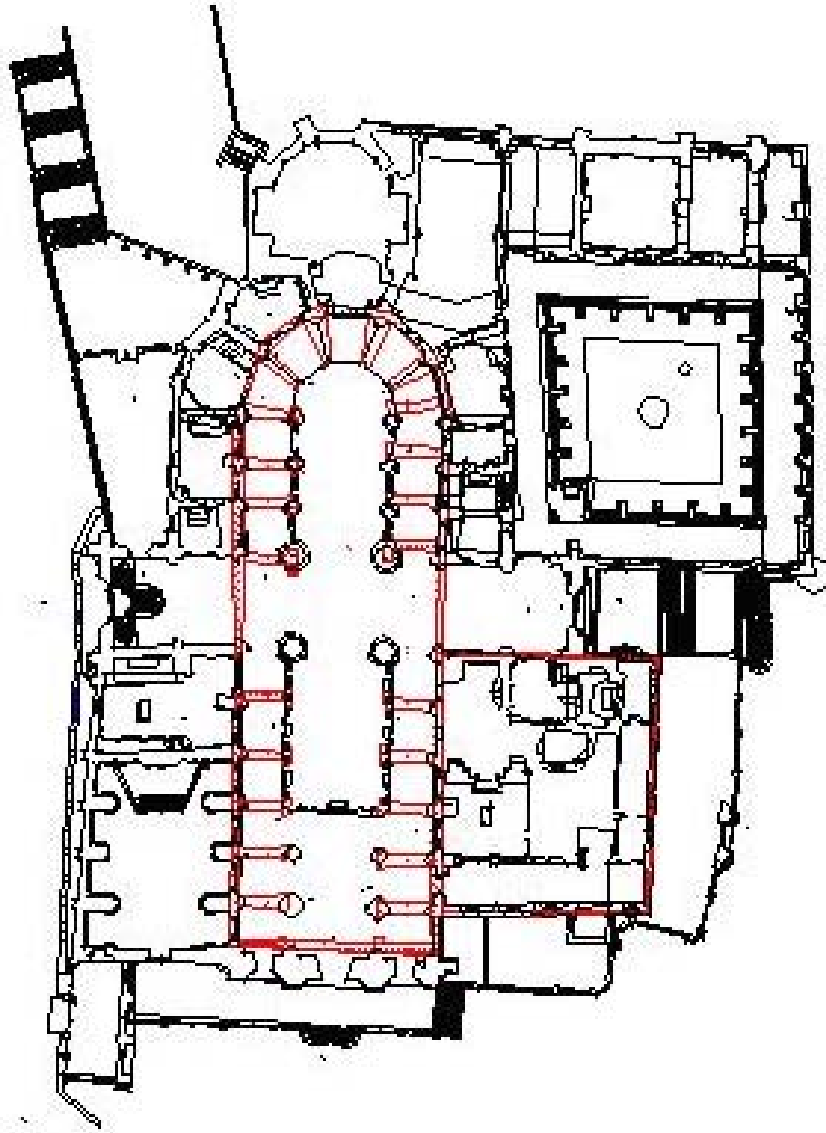
*Perfiles longitudinales en naves laterales de la Catedral (radargrama)*

*b) Nave lateral derecha*

La distribución espacial de estos muros nos lleva a la hipótesis de una catedral anterior tan larga como la actual; de una única nave central apoyada en contrafuertes que sirven de acomodo a las capillas laterales, como puede apreciarse en la planta superpuesta de la siguiente figura. Con esta reconstrucción, los restos detectados corresponden a los cimientos de los contrafuertes o muros divisorios de las capillas.

Ejemplos de este tipo de arquitectura los encontramos en numerosas iglesias góticas catalanas como: la de San Francisco (Barcelona), Santa Catalina (Barcelona, desaparecida), Monasterio

de Pedralbes (Barcelona), Santa M<sup>a</sup> de Montblanc, convento de San Francisco en Palma de Mallorca, etc.



*Planta hipotética de la antigua catedral románica y su claustro (trazo rojo)  
En trazo negro el actual conjunto catedralicio. (según García Castillo)*

Aunque no conozcamos con precisión la profundidad relativa de las múltiples capillas románicas, su planta sería poco distinta de la que diseñamos, ya que

1. No serán más entrantes hacia el eje del templo, pues como es habitual la nave principal tiene más luz que fondo las capillas.
2. No penetrarían hacia los lados, puesto que estos quedan limitados por la iglesia de Santiago de la Fuente y el Claustro Viejo.
3. La simetría en el piecero exige la disposición dibujada.

El diseño, si no es como se interpreta en nuestra figura, ha de ser muy parecido.

Esta hipótesis habrá que contrastarla con las excavaciones arqueológicas oportunas, único procedimiento, hoy por hoy, para aseverar lo supuesto anteriormente. Tampoco puede descartarse la posibilidad de que se trate de huecos o criptas subterráneas.

# **INTRODUCCIÓN A LA TERMOGRAFÍA DE EDIFICIOS**

**Ángel Padilla<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ALAVA INGENIEROS S.A.

## **1 INVESTIGACIONES DE CAMPO TÍPICAS**

### **1.1 DIRECTRICES**

Como se indicará en las siguientes secciones, hay varias directrices generales que los usuarios deberán tener en cuenta al practicar inspecciones termográficas de edificios.

En esta sección se resumen dichas directrices.

#### **1.1.1 DIRECTRICES GENERALES**

La emisividad de la mayoría de los materiales de construcción se sitúa entre 0,85 y 0,95; por tanto, se puede considerar que establecer el valor de emisividad de la cámara en 0,90 es un buen punto de partida.

A fin de tomar una decisión para acciones posteriores, nunca se debe considerar suficiente sólo una inspección con infrarrojos. Es preciso siempre comprobar las sospechas y conclusiones mediante otros métodos, como los planos de construcción, medidores de humedad, registros de humedad y temperatura, pruebas de restos de gases, etc.

Cambie el nivel y el campo para afinar térmicamente la imagen de infrarrojos y mostrar más detalles. Las siguientes figuras muestran la diferencia entre una imagen de infrarrojos no afinada térmicamente y una que sí lo está.

#### **1.1.2 DIRECTRICES PARA LA DETECCIÓN DE HUMEDAD, MOHO Y DAÑOS POR AGUA**

Los defectos de construcción relacionados con daños por humedad y agua puede que sólo aparezcan al aplicar calor a la superficie, por ejemplo, por acción del sol.

La presencia de agua cambia la conductividad térmica y la masa térmica de los materiales de construcción. También puede cambiar la temperatura superficial de los materiales debido al enfriamiento por evaporación. La conductividad térmica es la capacidad de un material para conducir el calor. Por su parte, la masa térmica es la capacidad para almacenar calor.

La inspección infrarroja no detecta directamente la presencia de moho. Sin embargo, se puede utilizar para encontrar la humedad en la que podría desarrollarse, o se ha desarrollado ya. El moho requiere temperaturas de entre +4–+38 °C (+40–+100 °F), nutrientes y humedad para crecer. Niveles de humedad superiores al 50 % pueden ser suficientes como para que crezca moho.

#### **1.1.3 DIRECTRICES PARA LA DETECCIÓN DE INFILTRACIONES DE AIRE Y DEFICIENCIAS DE AISLAMIENTO**



Para realizar mediciones muy ajustadas con la cámara, mida la temperatura e introduzca ese valor en la cámara.

Se recomienda que haya una diferencia de presión entre el exterior y el interior de la estructura del edificio. De esta forma se facilita el análisis de las imágenes de infrarrojos y se revelan deficiencias que no serían visibles de otra forma. Aun cuando se recomienda una presión de entre 10 y 50 Pa, puede ser aceptable llevar a cabo la inspección con una presión negativa menor. Para ello, cierre todas las ventanas, puertas y conductos de ventilación y ponga en marcha el extractor de la cocina durante un tiempo hasta alcanzar una presión negativa de 5–10 Pa (sólo se aplica a domicilios residenciales).

Se recomienda una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de 10–15 °C (18–27 °F). Se pueden llevar a cabo las inspecciones con una diferencia térmica menor, pero esto provocaría que el análisis de las imágenes de infrarrojos fuera más complicado.

Evite la luz directa del sol en la parte de la estructura del edificio –por ejemplo una fachada– que se vaya a inspeccionar desde dentro. La luz del sol calentaría la fachada, lo que igualaría la temperatura del interior y ocultaría las deficiencias de la estructura.

La primavera, con temperaturas nocturnas bajas ( $\pm 0$  °C [-32 °F]) y diarias altas (+14 °C [+57 °F]) es una época especialmente arriesgada.

## **1.2 ACERCA DE LA DETECCIÓN DE HUMEDAD**

La humedad en la estructura de un edificio puede provenir de varias fuentes distintas, por ejemplo:

- Fugas externas, como inundaciones, escapes de bocas de incendios, etc.
- Fugas internas, como tuberías de agua, tuberías de desagüe, etc.
- Condensación, que no es más que humedad del aire transformada en agua líquida por la condensación en superficies frías.
- Humedad de construcción, que es cualquier tipo de humedad presente en los materiales de construcción antes de erigir la estructura del edificio.
- Agua remanente tras la extinción de incendios.

Dado que se trata de un método de detección no destructivo, el uso de cámaras con infrarrojos tiene una serie de ventajas sobre otros métodos, y también alguna desventaja:

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Es rápido.</li><li>▪ Es un método de investigación no intrusivo.</li><li>▪ No requiere el traslado de los ocupantes.</li><li>▪ Da como resultado una presentación visual clarificadora de los hallazgos.</li><li>▪ Confirma los puntos de fallo y las rutas de migración de humedad.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Sólo detecta las diferencias de temperatura superficial y no puede atravesar los muros.</li><li>▪ No detecta daños bajo la superficie, como por ejemplo, el moho o daños estructurales.</li></ul>

## **1.3 DETECCIÓN DE HUMEDAD 1: TEJADOS COMERCIALES DE POCA INCLINACIÓN**

### **1.3.1 INFORMACIÓN GENERAL**

Los tejados comerciales de poca inclinación son el tipo de tejado más utilizado para edificios industriales, como almacenes, naves industriales, tiendas de maquinaria, etc. Su principal ventaja sobre los tejados inclinados es su menor coste de materiales y construcción. No obstante, dado su diseño, que impide que el hielo o la nieve caigan por sí mismos –como en la mayoría de los tejados inclinados- deben construirse muy fuertes para soportar el peso acumulado del propio tejado y de los agentes climatológicos como la nieve, el hielo o la lluvia.

Si bien es recomendable poseer conocimientos básicos sobre la construcción de este tipo de tejados al llevar a cabo una inspección termográfica, no es necesario un conocimiento profesional. Existen gran número de principios de diseño distintos para los tejados comerciales de poca inclinación –tanto de materiales como de diseño- y sería imposible para la persona que va a realizar la inspección infrarroja conocerlos todos. Si se precisa información adicional sobre un tejado en concreto, normalmente el arquitecto o el contratista del edificio podrán aportar la información relevante.

Las causas más comunes de fallos en tejados se muestran en la siguiente tabla (tomada de la revista SPIE Thermosense Proceedings Vol. 371 [1982], p. 177).

Causa	%
Mano de obra deficiente	47.6
Tránsito en el tejado	2.6
Diseño no adecuado	16.7
Humedad retenida	7.8
Materiales	8.0
Antigüedad y desgaste	8.4

Entre las ubicaciones potenciales de las filtraciones están:

- Los tapajuntas
- Los sumideros
- Los entrantes
- Las juntas
- Las cubiertas transparentes

### **1.3.2 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD**

Es recomendable que haya al menos dos personas en el tejado, preferiblemente tres o más.

Se debe inspeccionar la parte inferior del tejado para comprobar la integridad estructural antes de caminar sobre él.

Se debe evitar pisar las cubiertas transparentes, comunes en tejados aislados con grava o betún.

Se debe llevar un teléfono móvil o una radio para casos de emergencia.

Se debe informar a la policía local y a los servicios de seguridad del local antes de llevar a cabo estudios de tejados por la noche.

#### **1.3.4 COMENTARIOS SOBRE LAS IMÁGENES DE INFRARROJOS**

¿Cómo puede hallar aislamiento húmedo bajo la superficie del tejado? Si la superficie está seca, incluida la grava o gravilla, en un día soleado se calentará todo el tejado.

A primeras horas de la tarde, si el cielo está despejado, el tejado empezará a enfriarse por radiación. Dada su mayor capacidad térmica, el aislamiento húmedo permanecerá caliente durante más tiempo que el seco, y esto será visible en la imagen de infrarrojos (observe las fotos de abajo). Esta técnica es especialmente efectiva en tejados con aislamiento absorbente –como fibra de madera, fibra de vidrio o tierra diatomácea- en los que los patrones térmicos guardan una correlación casi perfecta con la humedad.

Las inspecciones infrarrojas de tejados con aislamientos no absorbentes, comunes en muchos sistemas de una lámina, suelen ser más difíciles de diagnosticar debido a que sus patrones son más difusos.

#### **1.3.2 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD**

Es recomendable que haya al menos dos personas en el tejado, preferiblemente tres o más.

Se debe inspeccionar la parte inferior del tejado para comprobar la integridad estructural antes de caminar sobre él.

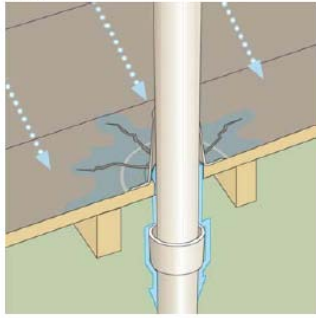
Se debe evitar pisar las cubiertas transparentes, comunes en tejados aislados con grava o betún.

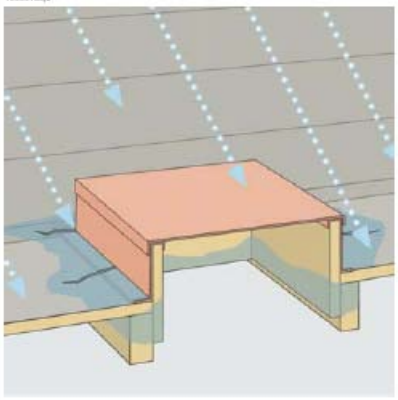
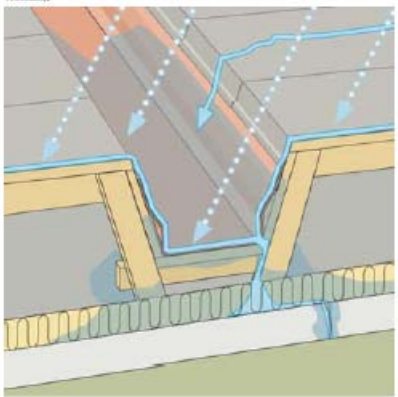
Se debe llevar un teléfono móvil o una radio para casos de emergencia.

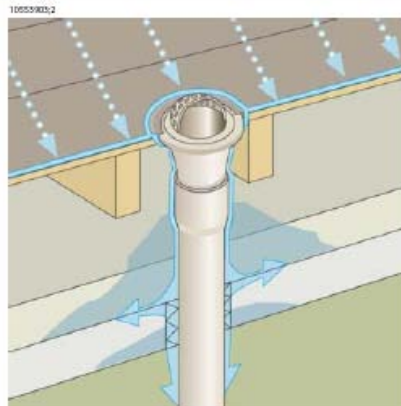
Se debe informar a la policía local y a los servicios de seguridad del local antes de llevar a cabo estudios de tejados por la noche.

#### **1.3.3 COMENTARIOS SOBRE ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN**

En esta sección se muestran algunos ejemplos típicos de problemas de humedad en tejados comerciales de poca inclinación:

Esquema de la estructura	Comentario
<p data-bbox="462 226 503 235">10553601,2</p> 	<p data-bbox="792 226 1092 304">Sellado inadecuado de la membrana del tejado alrededor de los conductos de ventilación y drenaje, lo que provoca filtraciones locales a su alrededor.</p>

Esquema de la estructura	Comentario
<p data-bbox="381 632 422 640">10553701,2</p> 	<p data-bbox="792 632 1174 678">La membrana del tejado no está sellada de forma adecuada alrededor de la trampilla de acceso.</p>
<p data-bbox="381 1056 422 1064">10553801,2</p> 	<p data-bbox="792 1056 1174 1171">Los canales de drenaje están colocados demasiado altos y con demasiada poca inclinación. Cuando llueve, queda agua en el canal de drenaje, lo que puede provocar filtraciones locales alrededor del canal.</p>

Esquema de la estructura	Comentario
	<p>Sellado inadecuado entre la membrana y la cornisa del tejado, lo que puede provocar filtraciones locales alrededor de la cornisa.</p>

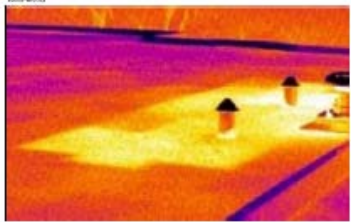
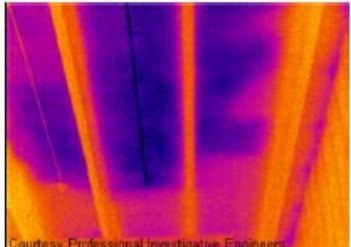
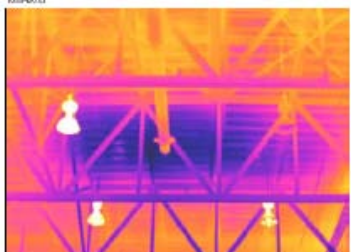
### **1.3.4 COMENTARIOS SOBRE LAS IMÁGENES DE INFRARROJOS**

¿Cómo puede hallar aislamiento húmedo bajo la superficie del tejado? Si la superficie está seca, incluida la grava o gravilla, en un día soleado se calentará todo el tejado.

A primeras horas de la tarde, si el cielo está despejado, el tejado empezará a enfriarse por radiación. Dada su mayor capacidad térmica, el aislamiento húmedo permanecerá caliente durante más tiempo que el seco, y esto será visible en la imagen de infrarrojos (observe las fotos de abajo). Esta técnica es especialmente efectiva en tejados con aislamiento absorbente –como fibra de madera, fibra de vidrio o tierra diatomácea- en los que los patrones térmicos guardan una correlación casi perfecta con la humedad.

Las inspecciones infrarrojas de tejados con aislamientos no absorbentes, comunes en muchos sistemas de una lámina, suelen ser más difíciles de diagnosticar debido a que sus patrones son más difusos.

En esta sección se muestran algunas imágenes infrarrojas típicas de problemas de humedad en tejados comerciales de poca inclinación:

Imagen de infrarrojos	Comentario
	<p>Detección de humedad en un tejado, registrada por la tarde.</p> <p>Dado que el material de construcción afectado por la humedad tiene una masa térmica superior, su temperatura disminuye más lentamente que en las áreas circundantes.</p>
 <p>Courtesy Professional Investigative Engineers</p>	<p>Componentes de techado y aislamiento dañados por agua, identificados mediante un análisis de infrarrojos desde debajo del tejado alzado de una terraza estructural de cemento.</p> <p>Las áreas afectadas están más frescas que las circundantes en buenas condiciones debido al efecto conductivo o a la capacidad térmica.</p>
	<p>Investigación realizada de día en un tejado comercial de poca inclinación con alzado.</p> <p>Las áreas afectadas están más frescas que las circundantes secas, debido al efecto conductivo o a la capacidad térmica.</p>

## **1.4 DETECCIÓN DE HUMEDAD 2: FACHADAS COMERCIALES Y RESIDENCIALES**

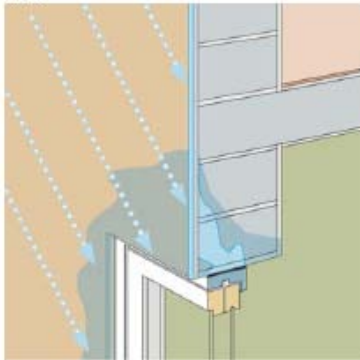
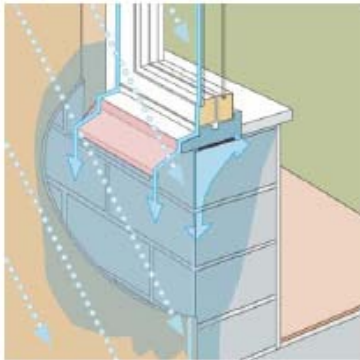
### **1.4.1 INFORMACIÓN GENERAL**

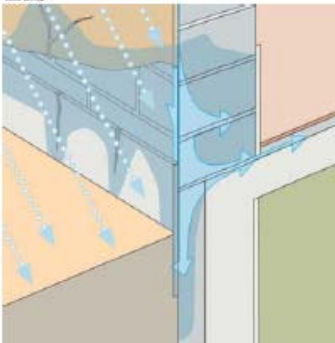
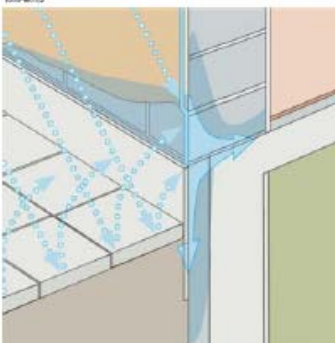
La termografía ha demostrado tener un valor incalculable a la hora de evaluar filtraciones de humedad en fachadas de edificios residenciales y comerciales. Poder ofrecer una ilustración física de las rutas de migración de la humedad resulta más concluyente y es más económico que extrapolar las ubicaciones de pruebas de mediciones de humedad.

### **1.4.2 COMENTARIOS SOBRE ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN**

En esta sección se muestran algunos ejemplos típicos de problemas de humedad en fachadas comerciales y residenciales:

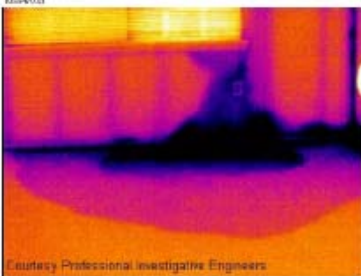



Esquema de la estructura	Comentario
 <p>1002-48132</p>	<p>La lluvia intensa penetra en la fachada debido a que la base de las juntas no está bien acabada. La humedad se acumula en la mampostería de la parte superior de la ventana.</p>
 <p>1002-48133</p>	<p>La lluvia intensa golpea la ventana en ángulo. La mayor parte se desliza por el tapajuntas del alféizar, pero algo de agua consigue llegar a la mampostería situada en la conjunción del enlucido con los tapajuntas.</p>

Esquema de la estructura	Comentario
 <p>1002-48134</p>	<p>La lluvia golpea la fachada en ángulo y penetra en el enlucido a través de grietas. A partir de ahí, el agua sigue por el interior del enlucido y puede producir erosión por escarcha.</p>
 <p>1002-48135</p>	<p>La lluvia salpica en la fachada y penetra en el enlucido y la mampostería por absorción, pudiendo llegar a producir erosión por escarcha.</p>

### **1.4.3 COMENTARIOS SOBRE LAS IMÁGENES DE INFRARROJOS**

En esta sección se muestran algunas imágenes de infrarrojos típicas de problemas de humedad en fachadas comerciales y residenciales:

Imagen de infrarrojos	Comentario
 <p data-bbox="418 737 683 758">Courtesy Professional Investigative Engineers</p>	Un revestimiento de piedra mal terminado y sellado al marco de la ventana y la ausencia de tapajuntas ha dado como resultado filtraciones de humedad en la cavidad del muro y el interior de la vivienda.
 <p data-bbox="418 1039 732 1060">Courtesy Professional Investigative Engineers</p>	Migración de humedad en un muro de mampostería por conducción capilar y componentes de acabado interior debido a un drenaje y una pendiente inadecuados de la fachada con revestimiento exterior de vinilo en un complejo de apartamentos.

### **1.5 DETECCIÓN DE HUMEDAD 3: PISOS Y BALCONES**

#### **1.5.1 INFORMACIÓN GENERAL**

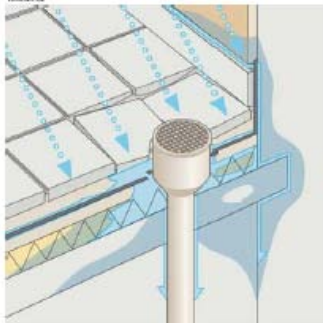
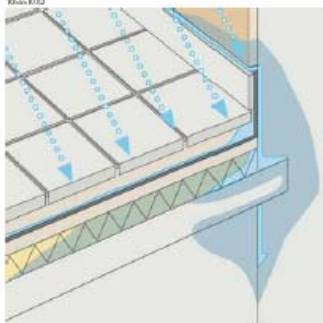
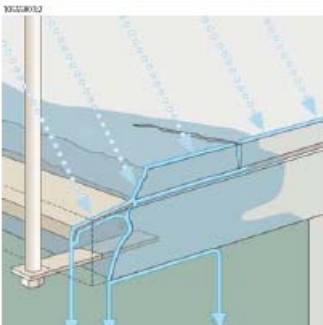
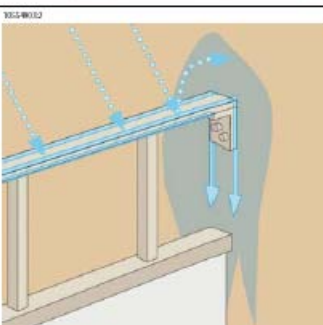
Aun cuando hay diferencias de diseño, materiales y construcción, los pisos –pisos de plazas, patios, etc.– sufren los mismos problemas de humedad y filtraciones que los tejados comerciales de poca inclinación. Unos tapajuntas incorrectos, membranas selladas de forma no adecuada o un drenaje insuficiente pueden producir daños sustanciales en las siguientes estructuras de construcción.

Los balcones, aunque de menor tamaño, requieren el mismo cuidado en el diseño, la elección de materiales y la mano de obra que cualquier otra estructura del edificio.

Dado que los balcones suelen estar sujetos sólo por un lado, si la humedad produjera la corrosión de los puntales o los refuerzos de cemento, se podrían producir problemas y situaciones de peligro.

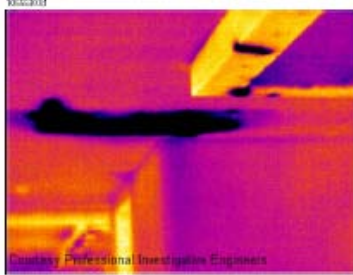
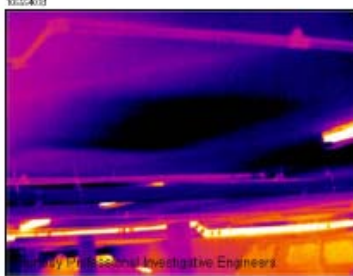
#### **1.5.2 COMENTARIOS SOBRE ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN**

En esta sección se muestran algunos ejemplos típicos de problemas de humedad en pisos y balcones:

Esquema de la estructura	Comentario
	<p>Sellado inadecuado del pavimento y de la membrana con el desagüe del tejado, lo que produce filtraciones cuando llueve.</p>
	<p>No hay tapajuntas en las juntas entre la pared y el suelo, lo que provoca que la lluvia penetre en el cemento y el aislamiento.</p>
Esquema de la estructura	Comentario
	<p>Ha penetrado agua en el cemento debido al tamaño inadecuado del salpicadero, lo que ha producido la desintegración del cemento y la corrosión de los refuerzos.</p> <p>⚠ ¡RIESGO DE SEGURIDAD!</p>
	<p>El agua ha penetrado en el enlucido y en la mampostería subyacente en el punto en el que el pasamanos se sujeta al muro.</p> <p>⚠ ¡RIESGO DE SEGURIDAD!</p>

### **1.5.3 COMENTARIOS SOBRE LAS IMÁGENES DE INFRARROJOS**

En esta sección se muestran algunas imágenes de infrarrojos típicas de problemas de humedad en pisos y balcones:

Imagen de infrarrojos	Comentario
 <p data-bbox="418 562 768 573">Custody Professional Investigative Engineers</p>	<p data-bbox="784 289 1140 562">Unos tapajuntas inadecuados en las juntas entre el balcón y el muro, así como la ausencia de sistema de drenaje en el perímetro, han producido intrusión de humedad en la estructura de soporte de madera del pasillo o abalconado exterior de un ático.</p>
 <p data-bbox="418 856 768 867">Custody Professional Investigative Engineers</p>	<p data-bbox="784 583 1140 856">La ausencia de un plano o medio de drenaje de cemento en la estructura del piso de aparcamiento subterráneo ha provocado la acumulación de agua entre el piso de cemento estructural y la superficie de la plaza.</p>

## **1.6 DETECCIÓN DE HUMEDAD 4: ROTURAS Y FUGAS DE TUBERÍAS**

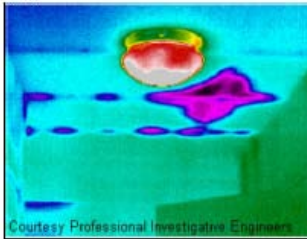
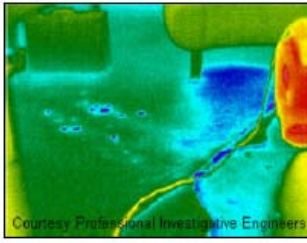
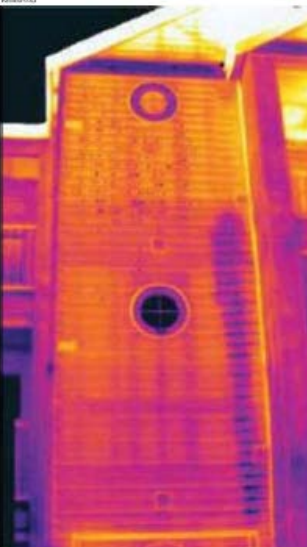
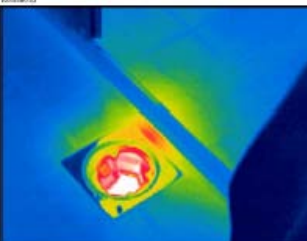
### **1.6.1 INFORMACIÓN GENERAL**

El agua de las fugas de tuberías produce a menudo daños graves en la estructura de los edificios. Las fugas leves pueden resultar difíciles de detectar, pero pueden –tras varios años- penetrar en los muros estructurales y en los cimientos hasta el punto de causar daños irreparables en la estructura del edificio.

El uso de la termografía de edificios en una etapa temprana, cuando se sospecha que hay roturas o fugas, puede producir grandes ahorros de materiales y trabajo.

### **1.6.2 COMENTARIOS SOBRE LAS IMÁGENES DE INFRARROJOS**

En esta sección se muestran imágenes de infrarrojos típicas de fugas y roturas de tuberías:

Imagen de infrarrojos	Comentario
 <p data-bbox="461 449 753 470">Courtesy Professional Investigative Engineers</p>	<p data-bbox="789 224 1091 285">Trazas de migración de humedad por los canales de las vigas de acero del interior del techo en una casa unifamiliar en la que se ha roto una tubería.</p>
 <p data-bbox="461 714 753 735">Courtesy Professional Investigative Engineers</p>	<p data-bbox="789 487 1091 583">Se ha descubierto que el agua proveniente de una fuga en una tubería ha llegado más lejos de lo que el contratista anticipó durante las labores de rehabilitación al recortar la moqueta e instalar deshumidificadores.</p>
Imagen de infrarrojos	Comentario
	<p data-bbox="789 789 1091 886">La imagen de infrarrojos de este apartamento de 3 plantas con lateral de vinilo muestra claramente la ruta de una fuga seria proveniente de una lavadora del tercer piso, que está completamente oculta en el muro.</p>
	<p data-bbox="789 1358 1091 1398">Fuga de agua debida al sellado inadecuado entre el drenaje del suelo y las baldosas.</p>

## **1.7 FILTRACIONES DE AIRE**

### **1.7.1 INFORMACIÓN GENERAL**

Debido a la presión del viento sobre un edificio, las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior, y el hecho de que la mayoría de los edificios utilizan dispositivos terminales de tubos de escape para extraer el aire usado del edificio, es previsible encontrar una presión negativa de 2–5 Pa. Cuando esta presión negativa provoca que aire frío entre en la estructura del edificio debido a deficiencias de aislamiento o sellado de construcción, tenemos lo que se denomina filtración de aire. Es previsible hallar filtraciones de aire en las uniones y juntas de la estructura del edificio.

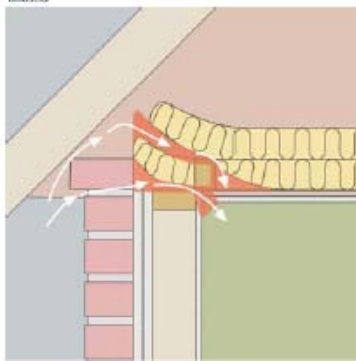
Dado que las filtraciones de aire crean un flujo de aire frío hacia una habitación, por ejemplo, se puede producir un deterioro sustancial del clima interior. Los residentes suelen detectar incluso flujos de aire de sólo 0,15 m/s (0,49 pies/s), pero estos flujos pueden ser difíciles de detectar mediante dispositivos de medición ordinarios.

En las imágenes de infrarrojos, las filtraciones de aire se pueden identificar por su patrón de rayos típico, que emana del punto de salida de la estructura del edificio; por ejemplo, de detrás de los rodapiés. Es más, las áreas con filtraciones de aire suelen tener una temperatura menor que las áreas en las que sólo hay deficiencias de aislamiento.

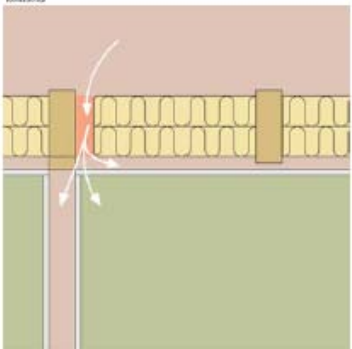
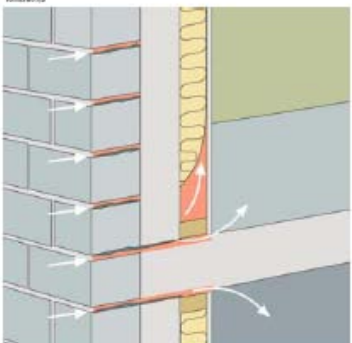
Esto se debe al factor de refresco del flujo de aire.

### **1.7.2 COMENTARIOS SOBRE ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN**

En esta sección se muestran algunos ejemplos típicos de detalles de estructuras de edificios en las que se pueden producir filtraciones de aire.

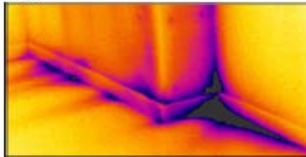
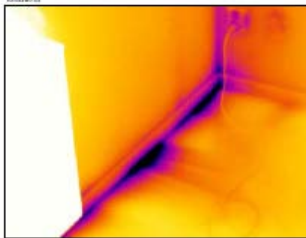
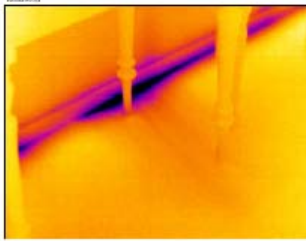
Esquema de la estructura	Comentario
	<p>Deficiencias de aislamiento en los aleros de una casa de ladrillo debido a paneles de aislamiento de fibra de vidrio instalados incorrectamente.</p> <p>Las filtraciones de aire entran en la habitación desde detrás de la cornisa.</p>



Esquema de la estructura	Comentario
	<p>Deficiencias de aislamiento en un piso intermedio debido a paneles de aislamiento de fibra de vidrio instalados incorrectamente.</p> <p>Las filtraciones de aire entran en la habitación desde detrás de la cornisa.</p>
	<p>Filtración de aire en el hueco de mantenimiento sobre el suelo de cemento debido a grietas en el muro de ladrillos de la fachada.</p> <p>Las filtraciones de aire entran en la habitación por debajo de los rodapiés.</p>

### **1.7.3 COMENTARIOS SOBRE LAS IMÁGENES DE INFRARROJOS**

En esta sección se muestran algunas imágenes de infrarrojos típicas de detalles de estructuras de edificios en las que se pueden producir filtraciones de aire.

Imagen de infrarrojos	Comentario
	Filtración de aire por los rodapiés. Fijese en el patrón de rayos típico.
	Filtración de aire por los rodapiés. Fijese en el patrón de rayos típico. El área blanca de la izquierda es un radiador.
	Filtración de aire por los rodapiés. Fijese en el patrón de rayos típico.

## **1.8 DEFICIENCIAS DE AISLAMIENTO**

### **1.8.1 INFORMACIÓN GENERAL**

Las deficiencias de aislamiento no siempre producen filtraciones de aire. Si los paneles de aislamiento de fibra de vidrio no se han instalado correctamente, se formarán bolsas de aire en la estructura del edificio. Dado que estas bolsas de aire tienen una conductividad térmica distinta que las áreas en las que se ha colocado el aislamiento correctamente, se podrán detectar durante la inspección del edificio mediante termografía.

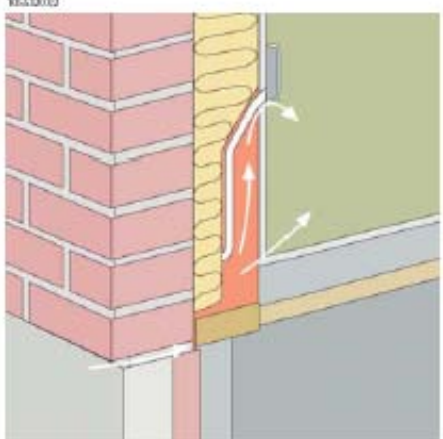
Como regla general, las áreas con deficiencias de aislamiento suelen tener temperaturas más altas que las que sólo tienen una filtración de aire.

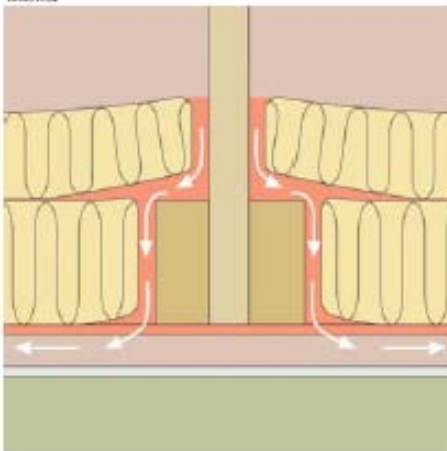
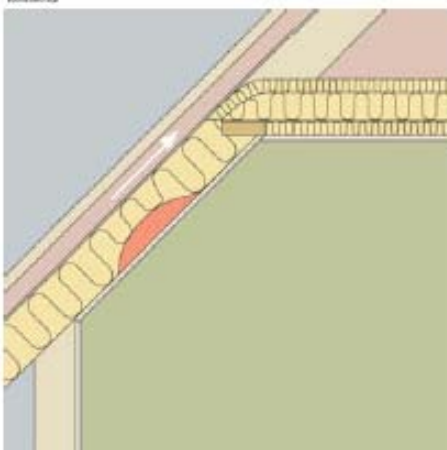
Al llevar a cabo inspecciones de edificios mediante termografía para detectar deficiencias de aislamiento, preste atención a las siguientes partes de la estructura, que pueden tener el aspecto de deficiencias de aislamiento en la imagen de infrarrojos:

- vigas, pilares, cabrios y viguetas de madera
- vigas y viguetas de acero
- tuberías de agua de muros, techos y suelos
- instalaciones eléctricas en muros, techos y suelos (como bajantes principales, cañerías, etc.)
- columnas de cemento en muros con entramados de madera
- conductos de ventilación y de aire

### 1.8.2 COMENTARIOS SOBRE ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN

En esta sección se muestran algunos ejemplos típicos de detalles de estructuras de edificios con deficiencias de aislamiento.

Esquema de la estructura	Comentario
	<p>Deficiencias de aislamiento (y filtración de aire) debidas a la instalación incorrecta de la capa de aislamiento alrededor de la red de suministro eléctrica.</p> <p>Este tipo de deficiencia de aislamiento aparecerá en una imagen de infrarrojos como áreas oscuras.</p>

Esquema de la estructura	Comentario
 <p>Diagrama de un ático que muestra una viga de madera central con aislamiento de fibra de vidrio a ambos lados. Se indica que el aire fresco se filtra en la estructura y enfría el interior del techo.</p>	<p>Deficiencias de aislamiento debido a la instalación incorrecta de las capas de aislamiento alrededor de la viga del suelo de un ático. El aire fresco se filtra en la estructura y enfría el interior del techo. Este tipo de deficiencia de aislamiento aparecerá en una imagen de infrarrojos como áreas oscuras.</p>
 <p>Diagrama de un techo inclinado que muestra una bolsa de aire formada por una instalación incorrecta de las capas de aislamiento.</p>	<p>Deficiencias de aislamiento debidas a la instalación incorrecta de capas de aislamiento que forman una bolsa de aire en la parte exterior de un techo inclinado. Este tipo de deficiencia de aislamiento aparecerá en una imagen de infrarrojos como áreas oscuras.</p>

### **1.8.3 COMENTARIOS SOBRE LAS IMÁGENES DE INFRARROJOS**

En esta sección se muestran imágenes de infrarrojos típicas de deficiencias de aislamiento:

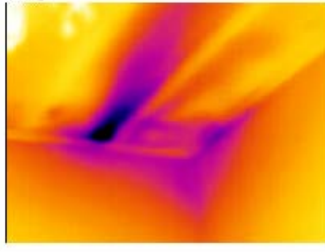
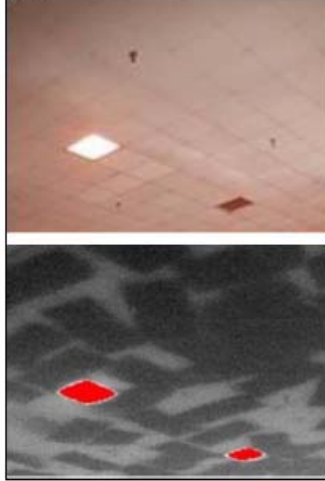
Imagen de infrarrojos	Comentario
	<p>Deficiencias de aislamiento en una estructura de piso intermedio. Esta deficiencia puede ser debida a que falten capas de aislamiento o a que se hayan instalado mal (formando bolsas de aire).</p>
	<p>Capas de fibra de vidrio instaladas incorrectamente en un doble techo.</p>

Imagen de infrarrojos	Comentario
	<p>Deficiencias de aislamiento en una estructura de piso intermedio. Esta deficiencia puede ser debida a que falten capas de aislamiento o a que se hayan instalado mal (formando bolsas de aire).</p>

# **SAYME: Una arquitectura distribuida de sensores inalámbricos para recoger y procesar información de entornos no controlados**

**David Santo<sup>1</sup>, Jesús Ibáñez<sup>2</sup>, Alfonso Murat<sup>3</sup>, Marta Alonso<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Universidad de Málaga*

<sup>2</sup> *Universidad de Cantabria*

<sup>3</sup> *INNOVA CONSULTING*

## **RESUMEN:**

En este artículo presentaremos nuestra propuesta de una arquitectura distribuida de sensores inalámbricos, que emplean el protocolo ZigBee para su comunicación. El objeto de esta arquitectura es realizar obtenciones masivas de datos ambientales en entornos no controlados y cambiantes, en los que puede ser posible incluso la manipulación no autorizada de los sensores. Estos datos son codificados y encolados en formato incremental, y enviados a través de GPRS a un servidor ubicado en unas oficinas seguras y controladas que reconstruyen el estado del entorno y lo almacena en una base de datos compatibles SQL sobre la que se podrán realizar consultas arbitrariamente complejas por aplicaciones de valor añadido.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La monitorización ambiental de entornos no controlados es un problema de gran interés en la actualidad para la ciencia y la industria [1,2]: tiene aplicaciones evidentes [3], incluyendo algunas tan útiles como el control no destructivo y la conservación de monumentos históricos y el patrimonio histórico construido [4], redes de sensores para detectar agentes radioactivos o contaminantes [5,6], obtención de datos de alto valor ecológico, científico o técnico en entornos donde es complejo o peligroso que los humanos tomen adecuadamente los datos [7,8], el control policial de zonas fronterizas en las que no sea posible tener visibilidad como para tener vigilancias efectivas -por ejemplo, bosques fronterizos- [8], el control del transportes de palés en cargueros [9], y aplicaciones militares en control de áreas propias y espionaje de áreas enemigas [9], entre otras muchas aplicaciones.

Para esto se han desarrollado distintas plataformas de redes de sensores distribuidas, tales como la arquitectura WiseNET [10], la IrisNet [11], las distintas implementaciones de la tecnología Mota - como puedan ser las Mica- [13], tecnología empleada por el ejército estadounidense en entornos de guerra real con éxito; y sistemas operativos como TinyOS [14], empleados en la tecnología Mota dentro de cada uno de las motas.

## **2. LOS PROBLEMAS DE LAS REDES DE SENSORES DISTRIBUIDAS**

A pesar de su innegable utilidad, sin embargo, esta monitorización de entornos mediante redes de sensores se enfrenta a una serie de problemas de compleja resolución; de entre los cuales, destacamos los siguientes problemas:

- El sistema de sensores ha de tener un coste mínimo por unidad. Una red de sensores puede involucrar decenas, o incluso cientos de dispositivos sensores; y un coste alto por unidad hace inviable una aplicación práctica en un entorno no controlado de una red de sensores por los costes tanto de implantación de la red como de sustitución: un sensor se puede convertir en sí en objeto de vandalismo o robo, y si los sensores son demasiado caros este problema puede bi ser asumible a largo plazo. Algunas redes, tales como Mota, aunque en origen son baratas, su coste en España es prohibitivo e imposibilita su



uso real en aplicaciones tales como las redes de sensores distribuidas en espacios públicos.

- El sistema de sensores ha de tener un coste mínimo de mantenimiento. La parte más grande de un sistema de sensores mal diseñado puede incluso llegar a ser el costo total de propiedad causado por la mano de obra: el hecho de tener que pasear a un operario todos los días por el entorno cambiando constantemente baterías hace que muchos sistemas sean, de entrada, inviables en la práctica. Este punto tiene gran relación con el punto siguiente: el consumo de cada elemento sensor.
- El sistema de sensores ha de tener un consumo mínimo, ya que con frecuencia la mayor parte de los sensores no pueden estar conectados directamente a la energía eléctrica y la sustitución de estas puede ser compleja por la ubicación del sensor, cara, o no asumible. Además, la autonomía del sistema de sensores ante operación sin energía eléctrica es crítica en entornos de seguridad y control policial, en aplicaciones militares, en aplicaciones en entornos abiertos, aplicaciones industriales donde una operación errónea por parte de los humanos puede dar objeto a responsabilidad civil o incluso penal; y, por regla general, en cualquier aplicación donde el suministro principal de energía puede no estar disponible, o incluso ser objeto de algún tipo de sabotaje. Por ello, todo el sistema de sensores debe operar con baterías, y su autonomía debe ser suficiente como para poder operar con toda la funcionalidad activa durante el tiempo suficiente como para que sea posible restituir el suministro en caso de que exista la posibilidad en algunos elementos de autorecargarse las baterías. Además, los sensores deben estar dotados de mecanismos que aseguren que el incremento del coste total de propiedad causado por el recambio de dichas baterías no inhabilite la solución como práctica en entornos reales. Este problema es en sí tan grave e importante que hay numerosos estudios sobre este tema en la actualidad [15,16,17,18,10].
- Por regla general, el sistema debe ser robusto ante inclemencias del tiempo y vandalismos. Debe ser tolerante a fallos de los sensores, y de sus distintos miembros. Una unidad dañada debe ser reemplazada fácilmente y por poco coste. Además, realizar daño a una unidad sensora debe ser difícil, y el daño a una unidad sensora no debe paralizar la actividad de la red de sensores.
- En muchos entornos, no es económicamente viable el tendido de cables a los sensores - por ejemplo, en entornos abiertos, o en entornos naturales-. También puede ser que ni sea razonable realizar un tendido de cables para las comunicaciones, como pueda ser el caso de las aplicaciones militares -bastaría con “cortar el cable” para inhabilitar el sistema de sensores- o de la conservación del patrimonio histórico construido: en un edificio histórico de gran valor arquitectónico y artístico no podemos abrir rebolas para ocultar los cables por razones evidentes, y tampoco podemos poner canaletas o dejar los cables a la vista, ya que destruiríamos el impacto visual artístico del edificio. Por ello, la comunicación entre sensores debe ser inalámbrica.
- Esto, a su vez, nos genera otro problema: el sistema de transmisión de datos debe ser robusto, y libre de interferencias.

Hay otros problemas adicionales abiertos en el estado de la ciencia, tales como el almacenamiento de la gran cantidad de datos que producen los sensores durante su operativa constante: un almacenamiento local al sensor es sensible a llenarse, por la gran cantidad de datos generados por los sistemas de sensores y las graves limitaciones de tamaño y de autonomía de los sistemas sensores; e imposibilita un cómodo procesamiento masivo de dichos datos en un tiempo razonable. Dicho de otro modo, no podemos poner un disco duro de dos centenares de gigabytes a cada sensor, por razones de coste, de espacio y de tamaño. Por otro lado, el almacenamiento centralizado local al sistema sensor presenta graves problemas para el procesamiento de datos, así como un punto vulnerable: en entornos donde hay posibilidad de sabotaje, o los sensores detectan algo que pueda

ser constitutivo de responsabilidad civil o penal, podemos tener absoluta seguridad de que se saboteará el lugar físico de la red de sensores donde esté el almacén centralizado de datos. Finalmente, en el caso de almacenemos los datos en un disco duro remoto al lugar de los sensores, los problemas estarán relacionados con el ancho de canal de la comunicación entre la red de sensores distribuidos y el servidor remoto, por el consumo eléctrico de dicho enlace y, finalmente, también por la posibilidad de que dicho enlace sea sabotado. Este es un problema que cada tecnología de sensores resuelve de forma distinta según sus restricciones de diseño.

### **3. LA ARQUITECTURA SAYME**

La arquitectura SAYME -Sistema de Adquisición y Monitorización Estructural- ha sido desarrollada por la consultoría de ingeniería INNOVA CONSULTING, conjuntamente con investigadores del Grupo de Tratamiento Avanzado de Señal de la Universidad de Cantabria y un profesor de la Universidad de Málaga, como parte de un proyecto tecnológico y científico financiado íntegramente por INNOVA CONSULTING consistente en el desarrollo de un sistema de redes de sensores distribuido para maquinaria industrial y de construcción. Sin embargo, los excelentes resultados del sistema SAYME permiten su aplicación también para cualquier aplicación genérica de redes de sensores distribuidas en entornos no controlados donde sea imprescindible una plataforma robusta y estable; especialmente en entornos abiertos y no controlados, como pueda ser la monitorización de edificios del patrimonio histórico.

Los sensores pueden ser sensores de bajo costo, o cualquier sensor específico según las necesidades del problema, ya que el sistema SAYME no establece ningún tipo de restricción respecto a la tecnología de los sensores, pudiendo instalarse la sensórica que se considere necesaria. Cada sensor se interconecta con un módulo sensor. El módulo sensor contiene un microcontrolador de bajo consumo responsable de leer los datos del sensor y transmitirlos por un protocolo inalámbrico a una estación central, encargada de la gestión de los datos. El módulo sensor del sistema SAYME tiene un consumo extremadamente bajo, que le asegura un grado de autonomía no inferior a los seis meses de operación continuada sin cableado ni mantenimiento.

El sistema SAYME añade poca circuitería a un sensor: apenas un microcontrolador para leer los datos del sensor y para transmitir adecuadamente los datos a la unidad central, así como la circuitería necesaria para realizar los ajustes de impedancia y las adaptaciones necesarias para conectar un microcontrolador con el sensor. Esto hace que el sistema SAYME no encarece en gran medida el coste del módulo sensor SAYME respecto al del sensor que tiene conectado en sí, y mantiene bajo el coste del equipo físico sensor-módulo sensor, lo que es muy importante tanto cuando hay que desplegar gran cantidad de sensores, como cuando hay una posibilidad de que por sabotaje o vandalismo sea necesario reemplazar los módulos sensores.

Los módulos sensores se interconectan con la estación central a través del protocolo inalámbrico ZigBee [19]. Este protocolo ya ha demostrado su excelencia en aplicaciones similares a aquella para la que lo empleamos en SAYME, ya que ZigBee es el protocolo de intercomunicación inalámbrico empleado por sistemas de redes de sensores tales como la arquitectura Mota [13], empleada tanto en aplicaciones de redes de sensores militares por el gobierno de los Estados Unidos de América como en aplicaciones civiles de redes de sensores en entornos no controlados. ZigBee es un sistema de comunicaciones robusto, eficiente y con un consumo de energía extremadamente bajo. Sobre el protocolo ZigBee se construye el protocolo de SAYME, que es el encargado de que la estación central disponga de el estado global de la red de sensores en todo momento.

Los datos obtenidos de los sensores son preprocesados y almacenados en formato incremental, en una memoria flash, por la estación central. La estación central será la encargada de recibir, preprocesar y almacenar o enviar los datos.

La estación central puede conectarse a energía eléctrica estándar, en cuyo caso carga las baterías y opera con un mecanismo de consumo normal. Sin embargo, en caso de que caiga la energía

eléctrica, mediante optimizaciones es capaz de operar durante al menos medio año sin necesidad de conexión externa a corriente; manteniendo las funcionalidades incluso con batería interna. Obtiene esta autonomía gracias a que está implementada con varios microcontroladores Texas Instruments y Microchip en sus ediciones de bajo consumo, donde cada microcontrolador desempeña una misión concreta, en lugar de emplear un PC industrial que no sería capaz de operar tanto tiempo apenas empleando una batería.

Estos datos en memoria flash en la estación central tienen los mecanismos de redundancia y paridad necesarios para asegurar que aún en caso de sabotaje, daño parcial de la memoria flash o caída de la energía por agotamiento de la batería de la estación central el histórico de lo que ha pasado puede ser recuperado y se puede interpretar correctamente cuales de los datos de la memoria flash han sido enviado, cuales no, cuales están correctamente grabados y cuales eran los que se estaban grabando en el momento de la caída de la estación central, minimizando la pérdida de datos a aquel que se estaba grabando en la memoria flash en el mismo instante de la caída de la estación central. Para ello incorpora snapshots del estado del sistema dentro de los datos almacenados en la memoria flash, así como un mecanismo transaccional de almacenaje de los datos que permite su recuperación sin pérdida incluso ante fallos de batería interna o sabotaje.

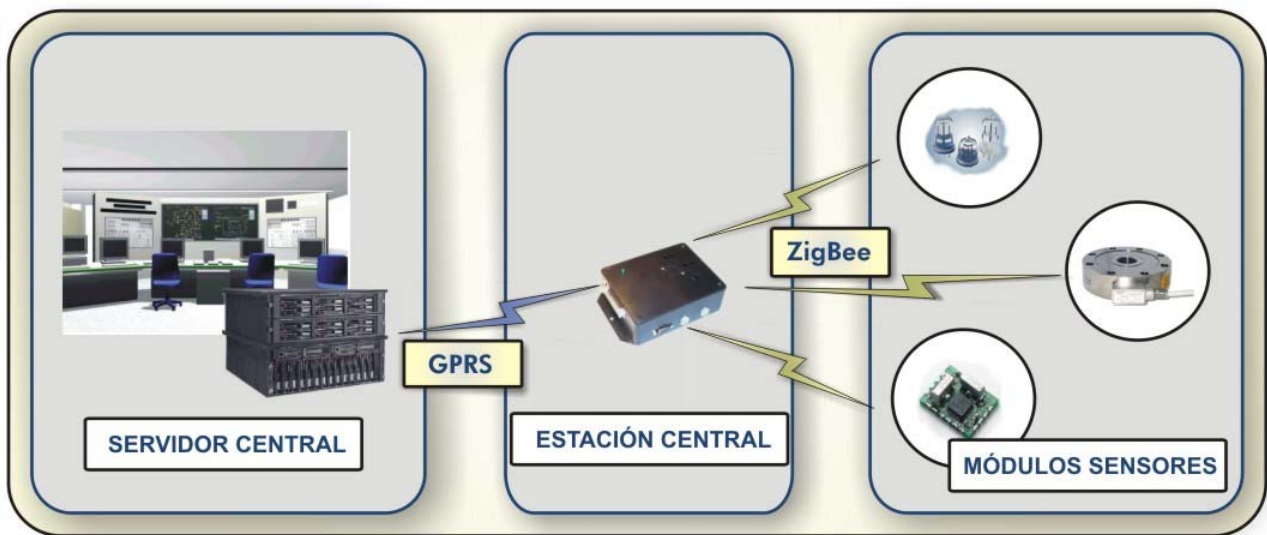
El almacenaje definitivo de los datos en la arquitectura SAYME es realizado en un servidor remoto centralizado. Según la memoria flash pasa determinado porcentaje de ocupación, el controlador central se conecta al servidor de almacén de datos a través de GPRS. Esta conexión es mínima en el tiempo dado que el mayor consumo de todo el sistema SAYME corresponde al modem GPRS, aunque este modem ya sea uno de bajo consumo. Durante la conexión, se mandan los datos pendientes desde la última conexión hasta el instante actual, en formato incremental comprimido. El sistema SAYME es capaz de detectar qué datos se han enviado, reiniciar la transmisión por donde se quedó la última transmisión interrumpida, y descartar de la memoria flash los datos ya enviados, asegurando así que se aprovecha al máximo su capacidad. Un microcontrolador en la estación central se encarga de la compresión y de la transmisión a través de GPRS, además de recomprimir la memoria flash en caso de conexión interrumpida.

Si la batería anda escasa, el microcontrolador reduce la frecuencia de las transmisiones subiendo el umbral de uso de la memoria flash antes de hacer el envío, y notifica el problema al ordenador central. En caso que la batería baje a niveles críticos, la estación central puede dejar de realizar transmisiones al servidor central hasta que disponga de más energía, permitiendo llegar al año de autonomía completa a la estación central. Es importante que destaquemos que la estación central puede retirar la energía de subsistemas completos cuando no se usan para minimizar el desperdicio de energía eléctrica.

Los datos también pueden ser enviados por parte de la estación central al servidor en caso de que se genere una secuencia de eventos que la estación central considere crítica; siendo un criterio adicional y complementario al llenado de un porcentaje de la memoria flash.

Finalmente, el servidor central es una máquina con Linux, y los datos se reconstruyen desde formato incremental a formato absoluto, almacenándose en una base de datos compatible SQL - PostgreSQL- para permitir las consultas y la operativa de forma cómoda a aplicaciones de valor añadido. El servidor central se interconecta con las estaciones centrales a través de varios modems GPRS, que permiten recibir concurrentemente varias llamadas, y gestiona el mecanismo de autenticación con las estaciones centrales. El mecanismo de autenticación es controlado por un microcontrolador en el lado de la estación central.

Podemos encontrar en el gráfico adjunto la representación de la arquitectura SAYME a nivel de bloques funcionales y sus comunicaciones.



#### **4. CONCLUSIÓN**

La arquitectura SAYME es nuestra propuesta de una arquitectura de redes de sensores capaz de operar en entornos abiertos no controlados, como pueda ser la monitorización de construcciones que formen parte del patrimonio histórico. Es una arquitectura eficiente, flexible y robusta; y cuya implementación es barata -mucho más que su competidora, los sensores Mica-, no intrusiva y permite la sensorización no destructiva sobre cualquier entorno, controlado o no controlado; lo que la hace idónea para gran cantidad de aplicaciones.

Los sensores tienen gran autonomía y un incremento mínimo de coste por arquitectura SAYME. Una estación central, que puede estar conectada a la red eléctrica, pero que también tiene una gran autonomía en caso de caída de la energía, permite el almacén temporal de los datos y el envío al servidor central para su procesamiento.

Los datos son almacenados de tal forma que es verificable si han sufrido daños, por lo que la memoria flash de un sistema destruido por sabotaje o vandalismo sería recuperable, y sería verificable qué partes de la información son correctas; lo que sería crítico para la emisión de un informe pericial o forense sobre los datos capturados y no enviados, y sobre lo que ocurrió en el entorno monitorizado inmediatamente antes del sabotaje del sistema sensor.

En el servidor central podemos tener aplicaciones de valor añadido que se encarguen de la gestión de los datos, del control de estos, y de la visualización y toma de decisiones sobre los datos capturados. Para ello, las aplicaciones de valor añadido pueden preguntar con SQL por el estado de los sensores sobre una base de datos estándar, con lo que el desarrollo de aplicaciones de redes de sensores empleando SAYME no requiere de conocimientos complejos de adquirir, y es fácilmente integrable en aplicaciones y sistemas ya existentes.

#### **5. BIBLIOGRAFÍA:**

[1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci: "Wireless Sensor Networks: A Survey" *IEEE Computer*, vol. 38, no. 4, pages 393-422, Mar 2002

[2] C. Chong, S. Kumar: "Sensor networks: Evolution, opportunities and challenges", *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247 -- 1256, 2003

[3] Jane K. Hart, Kirk Martinez, Ong Royan: "Sensor network applications" *IEEE Computer*, vol 37, No.8, Agosto 2004

- [4] L. Binda, C. Poggi, G. Mirabella Roberti, R. Tongini Folli: "On site investigation and monitoring of the "Torrazzo" of Cremona" *Proceedings Unesco-Icomos Archi 2000 International Congress, 2001, disponible on-line*
- [5] Sean M. Brennan, Angela Mielke, David C. Torney, Arthur B. Maccabe: "Radiation Detection With distributed sensor networks" *IEEE Computer*, volumen 37, Número 8, Agosto 2004
- [6] Robert J. Nemzek, Jared S. Dreicer, David C. Torney, Tony T. Warnock: "Distributed Sensor Networks for Detection of Mobile Radioactive Sources" *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol 51. no.4 2004
- [7] K. A. Delin, R. P. Harvey, N.A. Chabot, S. P. Jackson, Mike Adams, D.W. Johnson, J.T. Britton: "Sensor Web in Antarctica: Developing an intelligent, autonomous platform for locating biological flourishes. in cryogenic environments" *34th Lunar and Planetary Science Conference, 17-21 Marzo 2003, Houston*
- [8] David Culler, Deborah Estrin, Mani Srivastava: "Overview of sensor networks", *IEEE Computer*, vol 37, No.8, Agosto 2004
- [9] David E. Culler, Hans Mulder: "Smart Sensors to Network the World" *Scientific American*, Junio 2004
- [10] Christian C. Enz, Amre El Hoiydi, Jean-Dominique Decotignie, Vicent Peiris: "WiseNET: an ultralow-power wireless sensor network solution" *IEEE Computer*, volumen 37, Numero 8, Agosto 2004
- [11] Phillip B. Gibbons, Brad Karp, Yan Ke, Suman Nath, and Srinivasan Sesha: "IrisNet: An Architecture for a World-Wide Sensor Web", *IEEE Pervasive Computing*, 2(4) pages. 22-33, Octubre/Diciembre 2003.
- [12] Jason L. Hill, David E. Culler: "Mica: a wireless platform for deeply embedded networks" *IEEE Micro*, vol 22 num 6 pages 12-24 Noviembre/Diciembre 2002
- [13] Crossbow: "Mica 2 Wireless Measurement System Datasheet" 2004, document part number 6020-0042-04, <http://www.xbow.com>
- [14] David E. Culler: "The emergence of networking abstractions and tecniques in TinyOS" *Proceedings of the first USENIX/ACM Symposium on Networked System Design and Implementation. USENIX, 2004*
- [15] Ken Christensen, Bruce Nordman, Rich Brown: "Power Management in Networked Devices" *IEEE Computer*, vol 37, No.8, Agosto 2004
- [16] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. d. S. Jr., D. Patel, S. Roundy,: "PicoRadio Supports Ad-Hoc-Low Power Wireless Networking" *IEEE Computer*, julio 2002 pp. 42-48
- [17] G. Asada, M. Dong, T. Lin, F. Newberg, G. Pottie, H. Marcy, W. Kaiser: "Wireless integrated network sensors: Low-power systems on a chip". *Communications of the ACM archive; volume 43, Issue 5 (Mayo 2000), pp: 51 - 58*
- [18] Anantha Chandrakasan, Rex Min, Manish Bhardwaj, Seong-Hwan Cho, Alice Wang: "Power Aware Wireless Microsensor Systems" *proceedings European Solid-State Circuits Conference Univ. of Blogna, 2002, pp. 47-54*

[19] ZigBee Alliance: "ZigBee Specification" 2004, document part number 053474r06,  
<http://www.zigbee.org/>



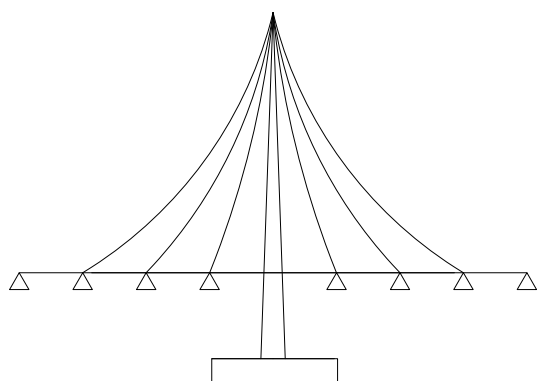
# LA INSTRUMENTACIÓN EN POSICIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS NO LINEALES. PASARELA EN HARO.

Germán Gutiérrez<sup>1</sup>, LABEST-UC<sup>2</sup>

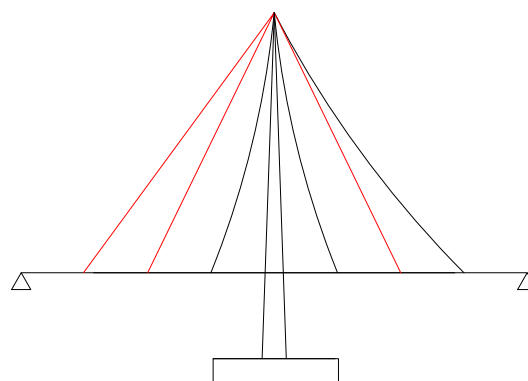
<sup>1</sup> Dr. Ing. de Caminos, C. y P. Prof. Titular de la UC. Responsable de LABEST-UC.

<sup>2</sup> LABEST-UC: Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

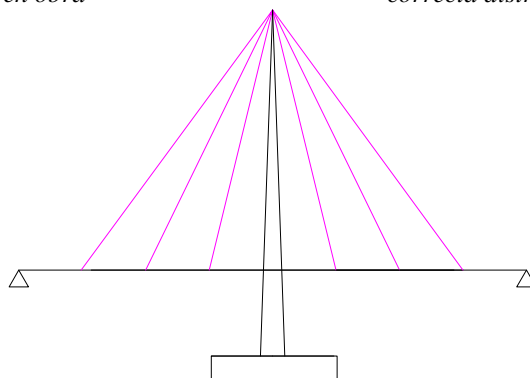
Sabido es que las estructuras suspendidas de cables se pueden discretizar como estructuras apoyadas en apoyos elásticos. El análisis a realizar en este tipo de estructuras es del tipo no-lineal en el que la geometría influye grandemente en los esfuerzos. Los programas actuales de cálculo contemplan opciones para abordar el análisis de este tipo de estructuras. Ahora bien este cálculo se basa en imponer unas condiciones de contorno iniciales que pueden, o no, coincidir con las realmente existentes en la obra una vez ejecutada y puesta en su emplazamiento final.



*Disposición inicial de los cables: necesidad de una correcta puesta en obra*



*Proceso de posicionamiento de los cables para correcta distribución de los esfuerzos*



*Estructura con los cables trabajando a los esfuerzos adecuados*

En una estructura suspendida, si la geometría no es la exacta del proyecto es decir cables de longitud prevista, apoyos en la posición exacta de proyecto, los esfuerzos calculados pueden diferir notablemente de los realmente existentes. Cobra especial importancia el esfuerzo de los elementos de suspensión (cables o barras) llegando el caso extremo de encontrarse cables sin ninguna sollicitación y otros absorbiendo la no cooperación de los anteriores pudiendo llegar a estar sometidos a cargas muy superiores a la prevista con el riesgo de colapso de los mismos.

Se ve la importancia de una puesta en obra exquisita para un funcionamiento óptimo de este tipo de estructuras.



*Pasarela en Haro (La Rioja), vista general*

La extensometría, o mejor dicho la instrumentación tiene la finalidad de lograr el objetivo de un buen posicionamiento para un correcto funcionamiento de estas estructuras. Mediante esta técnica podemos saber el estado tensional, a partir de una posición de cualquier punto de nuestra estructura.



*Vista general del mástil, elemento portante diseñado para absorber los diferentes esfuerzos transmitidos por los tirantes*



*Disposición de los diferentes tirantes a lo largo del tablero*

Mediante unas bandas extensométricas convenientemente dispuestas y mediante su lectura con los equipos correspondientes, puede controlarse el proceso en tanto que tendremos información de todo lo que esta sucediendo a nuestra estructura a nivel de tensiones.

Esta técnica de medición nos va a servir de apoyo para realizar un correcto posicionamiento de este tipo de estructuras. Valga como ejemplo el posicionamiento de una pasarela en Haro proyectada por D. Guillermo Capellán, y de la cuál se han ido introduciendo sistemáticamente algunas fotografías.



*Detalle de la unión de uno de los tirantes con el tablero.*



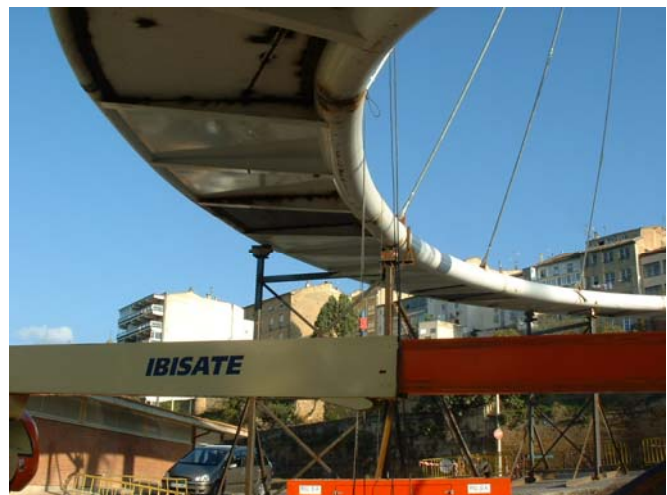
*Apoyo de un extremo del tablero sobre el estribo*

Esta pasarela es de forma helicoidal con planta en espiral. La misma estará suspendida de un mástil central mediante 10 barras de acero y unidas al borde tubular del tablero mediante articulaciones. Estas barras tienen un sistema de enchufes que permiten acortamientos o alargamientos de las mismas.

El tablero sale en voladizo del tubo. Unas barras, las cuales también se instrumentaron, ancladas a la cimentación funcionaban como elementos de arriostamiento del mástil ante solicitaciones horizontales.



*Detalle del proceso de posicionamiento geométrico mediante acortamientos o alargamientos de los enchufes con que se dotan los cables*



*Vista general del tablero durante el proceso de posicionamiento de la estructura*

La pasarela se dispuso en unos caballetes metálicos en una posición ligeramente superior a la de proyecto. Con objeto de poder bajarla hasta la posición de proyecto y consiguientemente



lograr la puesta en carga de los tirantes se dispusieron unos gatos hidráulicos en su posición extendida.

Una vez dispuestos todos los tirantes, los gatos son recogidos con lo que baja el tablero de la pasarela, entrando en cargas los mismos. Debido a pequeños (o grandes) errores en la construcción tanto del tablero como en la longitud de los tirantes, nadie nos asegura que estos tengan la tensión de cálculo.

Para asegurar que los tirantes tenían el esfuerzo correcto, o en su caso para saber si es necesario realizar las correcciones oportunas, se utilizó la técnica de extensometría. Para ello se dispusieron unos sistemas de medición en los tirantes, en este caso se utilizaron bandas extensométricas unidireccionales con compensación de temperatura.

Un sistema de captura de datos, totalmente computerizado, nos informa en todo momento del estado tensional de los puntos instrumentados indicando, en el caso de los tirantes, si estos soportan el esfuerzo de proyecto.

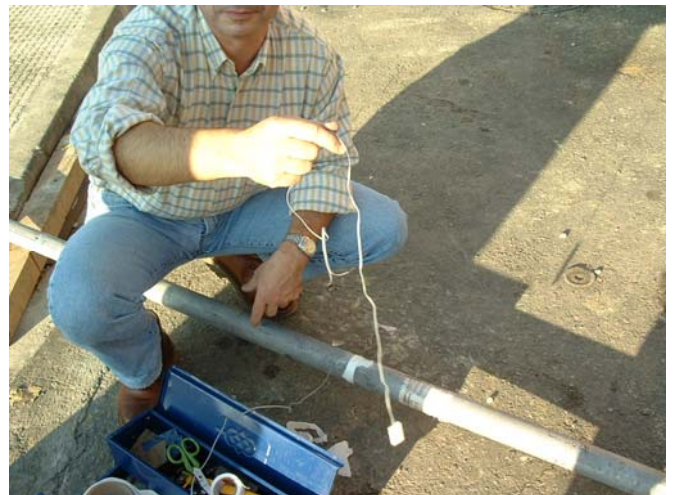
Con objeto de que los tirantes reciban, una vez bajada la estructura, una carga lo mas cercana posible a la de cálculo, mediante métodos topográficos se calculan aproximadamente las catenarias y longitudes de los mismos.

A continuación se procede de una maniobra muy simple para realizar un correcto posicionamiento de toda la pasarela y que nos asegura los valores correctos de solicitaciones en cada uno de los tirantes así como de la barra de retenida. Estas operaciones se resumen a continuación.

- Se bajan los gatos hidráulicos hasta una posición en que nos aseguremos en que la estructura esta completamente en el aire únicamente soportada por los tirantes.



*Descenso de los gatos hidráulicos hasta que la estructura que de en el aire*



*Detalla de un dispositivo de medición, bandas extensométricas unidireccionales con compensación de temperatura*

- Se observan las mediciones realizadas por los aparatos colocados en los tirantes que nos indicarán el valor de la tensión en el tirante y obviamente el valor de su carga.
- Con los resultados obtenidos, que obviamente diferirán de los teóricos calculados se analizan los mismos. Si el valor es superior al esperado es que el tirante es demasiado corto y si es inferior demasiado largo.

- Se iza de nuevo la estructura, mediante los gatos hidráulicos, hasta que el esfuerzo en los cables sea nulo.



*Detalle de las medidas realizadas*



*Fin del posicionamiento después de proceder a diversas fases de acortamiento o alargamiento de los cables*

- Se acortan o se alargan convenientemente los diferentes tirantes, mediante los enchufes que existen en los mismos, teniendo en cuenta que una variación en la longitud de uno de los cables no solo afecta a un incremento o disminución de la carga en el mismo sino también en el resto de los tirantes.
- Se vuelve a realizar la maniobra desde el principio hasta que se consiga, con suficiente aproximación, que el valor de la carga en todos y cada uno de los cables es el previsto por el Proyectista.

Con técnicas análogas a la descrita en la puesta en carga en esta pasarela y mediante una instrumentación adecuada se puede saber que ocurre en ciertas partes de edificios cuando se hace una intervención en parte de él con objeto de una rehabilitación como pudiera ser eliminación de ciertos elementos, por ejemplo pilares, forjados completos, etc., para una utilización más racional del edificio.

Se observa que puede ser una herramienta que nos de más seguridad en este tipo de operaciones que por naturaleza conllevan un riesgo inherente asociado con el comportamiento de la estructura en la que se va a intervenir.

# **CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA PRECISA DEL PATRIMONIO CON LÁSER ESCÁNER 3D**

**Vicente Bayarri<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Ing. en Geodesia y Cartografía. GIM Geomatics, S.L.*

## **RESUMEN:**

Tradicionalmente la realidad tridimensional se ha representado mediante sistemas bidimensionales. La nueva etapa que se abre en la ingeniería con la introducción del láser-escáner, con el que es posible capturar en tan solo unos pocos minutos información de millones de puntos con coordenadas en el espacio, hace que sea posible pasar al mundo tridimensional diseños, planificaciones, documentaciones que faciliten la visualización y comprensión de zonas complicadas, interiores y exteriores, tomar medidas, consultar objetos, etc. todo ello enfocado a la conservación del parque de edificios y de infraestructuras, alcanzando especial relevancia en aquellas que forman parte del patrimonio histórico artístico, industrial o natural.

## **1.- INTRODUCCIÓN**

Los escáneres 3D son instrumentos métricos de alta precisión que permiten la medición de los puntos de un objeto en sistemas de coordenadas 3D. Son una herramienta de gran potencia para la ingeniería además de por su precisión, por la rapidez en la captura de los datos y la no necesidad de contactar con el elemento a escanear, puesto que se emplea un haz de luz láser que se propaga por el medio; siendo posible unir diferentes escaneos en un mismo proyecto.

En el interior del escáner, un espejo hace un barrido rápido y sistemático con el pulso del láser sobre el área elegida, registrando la distancia al mismo y su respuesta radiométrica.

El láser 3D utiliza una tecnología de escaneo que captura la forma física de los objetos reduciendo los costes ingenieriles, mejorando la documentación e información de construcciones ya ejecutadas, y aportando un valor añadido y perspectiva a la integración entre la documentación y la información del estado del elemento en un instante determinado.

El láser escáner 3D presenta una serie de ventajas sobre otras tecnologías empleadas tradicionalmente:

- Es posible generar gran cantidad de mediciones tomadas de manera rápida y muy precisa.
- Método de toma de datos NO intrusivo, esto es, no necesita de contacto material ni montajes o andamios permitiendo medir a una distancia considerable.
- Sistema de medición respetuoso con el medio.





*Figura 1: Sistema de medición del Láser Escáner 3D*

## **2.- LA INGENIERÍA INVERSA**

La ingeniería inversa, en su acepción más general, es un proceso de recuperación del diseño, con el fin de comprender los secretos de su proyectación y fabricación, en especial si se trata de un producto de la competencia. El típico ejemplo de esto se produce cuando un avión de guerra cae en territorio enemigo y es examinado para copiar su tecnología.

Consiste en obtener la geometría completa de un elemento real, sin necesidad de sus planos técnicos. Se trata de adaptarlo a los sistemas CAD/CAM/CAE para que, una vez integrada en estos sistemas, se consiga un rendimiento en todas las operaciones que se derivan: modelado, mecanizado y análisis. Es también un proceso que permite hacer duplicados de objetos, sin la ayuda de su documentación técnica (especificaciones de diseño y fabricación). El objeto en cuestión puede tener una extensión desde milimétrica hasta de centenares de metros.

Los ámbitos de aplicación abarcan desde dominios tecnológicos como productos industriales, procesos organizativos de la empresa, elaboración de software, bases de datos etc, hasta dominios científicos como la biología, la química, etc. y otros más ingenieriles, que en este caso son los que nos ocupan, como la arquitectura, arqueología, minería, ingeniería civil, topografía.

### **2.1.- FASES DE LA INGENIERÍA INVERSA**

#### **2.1.1.- CAPTURA DE DATOS**

En el contexto de la ingeniería civil y de la edificación, el orden de magnitud de los elementos a escanear varía entre unos pocos metros hasta varios cientos de metros.

En primer lugar, hay que realizar una elección adecuada del láser a emplear, ya que en el mercado existe una gran variedad de láseres-escáner 3D que permiten trabajar dentro de tolerancia en diversas escalas.

Dentro de los diferentes modelos existentes cabe destacar los tipo LIDAR (Light Detection And Ranging) bien aéreos, que son operacionales entre los 20 km y los 50 m, o terrestres, entre 1 km y los 2m. Otro tipo de láser son los de fase, ideales para escalas pequeñas; los modelos de exterior trabajan en el rango de distancias comprendido entre los 80 y 1 m; mientras que los de interior entre los 20-40 m y 1 cm.

Todos los instrumentos anteriores entregan los siguientes datos:

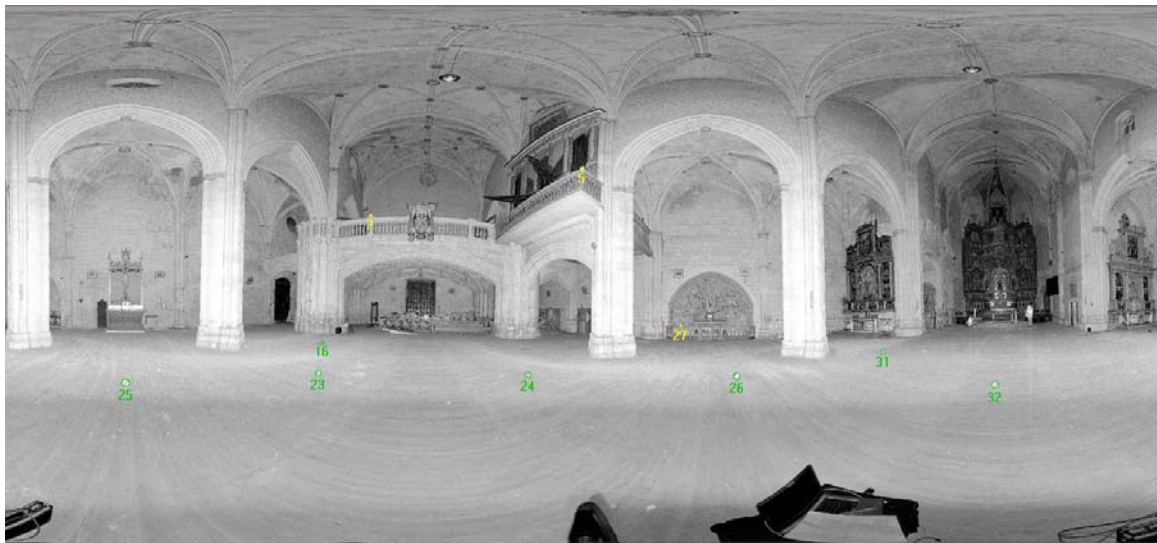
Posición y rotación del instrumento

Coordenadas espaciales: valor XYZ

Intensidad: valor de reflectancia de los materiales

Color: valor RGB aquellos que incorporan cámaras digitales calibradas

Conocidas las prestaciones del láser, es posible llevar a cabo una planificación previa en gabinete, además de considerar otros posibles problemas como los trámites administrativos y de gestión. Son múltiples los casos donde no es posible realizar el levantamiento en los horarios que más conviene, en las mejores posiciones de escaneo por problemas con vecinos, tráfico, etc., las condiciones climáticas (frío, calor extremo, lluvia, etc.) hacen que las jornadas sean imposibles de cumplir.



*Figura 2: Nube de puntos de los 360°*

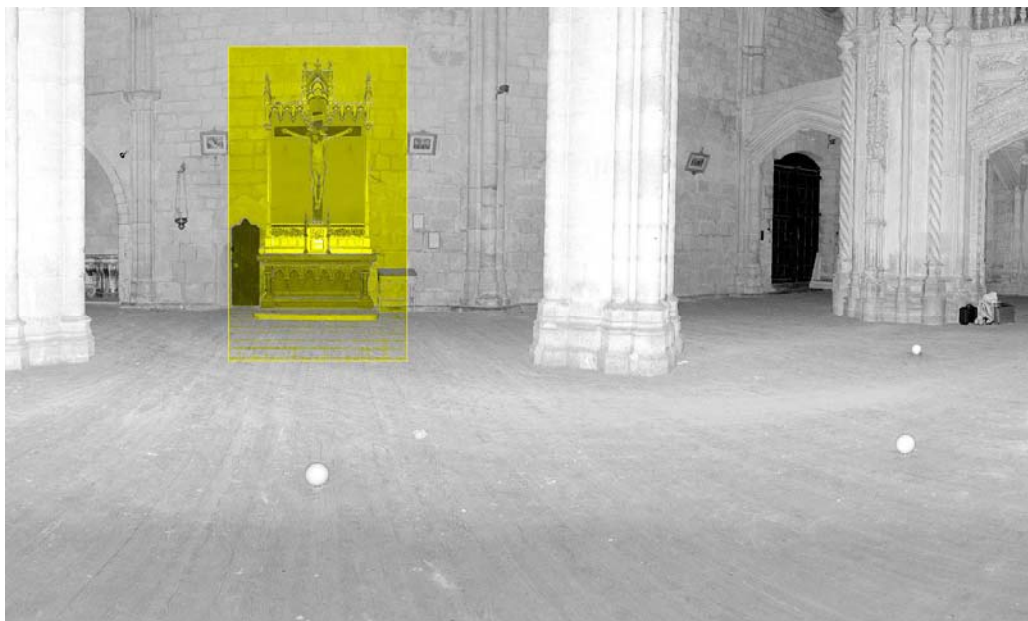
### **2.1.2.- PROCESADO**

En esta etapa la información recogida en campo pasa una serie de procesos con el objeto de filtrar y unir la información en un único modelo:

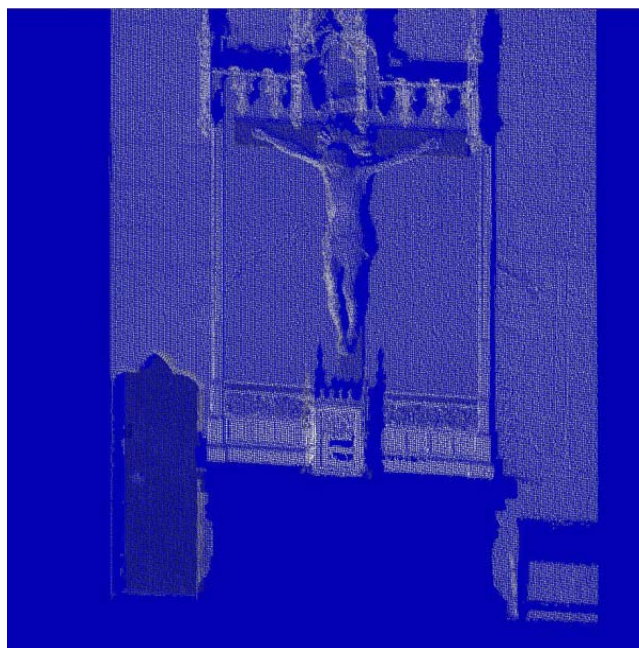
**Limpieza:** eliminar toda aquella información que no se desea, ya sea de forma manual, asistida o automática.

**Registro:** encontrar la posición y rotación del instrumento para cada barrido en un sistema de coordenadas específico. Esto se puede hacer a través de puntos de control.

**Optimización del modelo:** creación de un modelo homogéneo. El modelo se estructura y divide en partes para facilitar su manejo y comprensión.



*Figura 3: Selección de elemento en nube de puntos*



*Figura 4: Nube de puntos del elemento seleccionado*

El resultado es una superficie que aproxima la nube de puntos anterior, mediante filtración, triangulación, transformación, etc.

### **2.1.3.- OBTENCIÓN DE UN MODELO SÓLIDO**

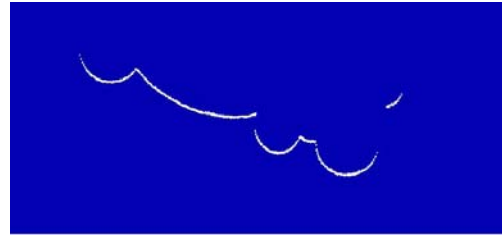
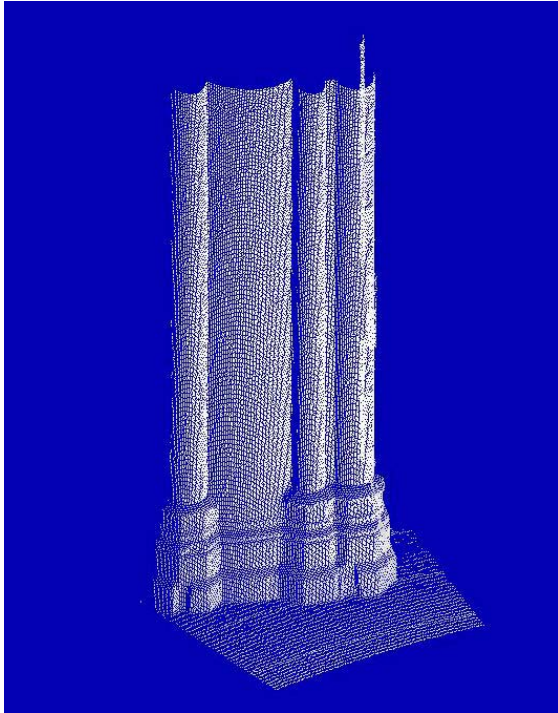
El tratamiento de la nube de puntos no estructurada permite la obtención de las características geométricas que definen el modelo. El proceso posterior vendrá impuesto por las necesidades del trabajo. Así, puede que sea suficiente extraer geometrías elementales, o ninguna geometría, o se pueda necesitar un modelo tridimensional completo.

Se unen las distintas superficies para conseguir un volumen y se le indica al sistema que parte es externa e interna en el mismo. El resultado es un modelo tridimensional al que se le pueden hacer cortes y secciones de todo tipo, operaciones booleanas de unión, intersección y diferencia, cálculos de peso, de momentos de inercia, etc.



#### **2.1.4.- EXPLOTACIÓN Y EXPORTACIÓN DEL MODELO.**

Extraer información 2D y 3D del modelo generado es un proceso fundamental. Es posible extraer información del modelo en función de los formatos que se necesiten, dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar (IGES, STEP, ACIS SAT, VRML, DXF, etc.).



*Figura 5: Nube de puntos de pila y sección del mismo.*

### **3.- LA FOTOGRAMETRÍA: SENSORES PASIVOS VS SENSORES ACTIVOS**

#### **3.1.- FOTOGRAMETRÍA POR SENSORES PASIVOS**

Diferentes fechas se emplean para datar el origen de la fotogrametría clásica, pero se puede decir que nació en el año 1759 cuando J.H. Lambert acuñó los conceptos de fotometría y perspectivas libres. Es por esto que se la considera una técnica contrastada y de confianza para la reconstrucción de un objeto 3D.

Las ventajas que presenta esta técnica frente a otras son su facilidad de uso, fácil transporte del sistema de medición, es posible contar con imágenes analógicas y digitales y existe gran disponibilidad de software de modelado y procesado.

Las mayores ventajas de la fotogrametría son que es necesario calibrar la cámara, el tiempo necesario para realizar las mediciones (semi-automático), la resolución de las imágenes.

#### **3.2.- FOTOGRAMETRÍA POR SENSORES ACTIVOS**

El láser escáner 3D salió al mercado comercial para las escalas que nos ocupan hacia 1998. Se puede considerar como una alternativa prometedora para gran cantidad de aplicaciones de medición y modelado.

Las ventajas que presenta esta tecnología frente a lo anteriormente descrito radican en la rápida adquisición de una gran cantidad de datos 3D, captura de registros de intensidad (valores en gris) y color (imágenes digitales), y la alta precisión métrica de los datos.

Es posible obtener con tiempo y personal de campo reducidos, conjuntos de datos ricos, minimizando la necesidad de acceso a áreas restringidas, y la necesidad de visitas “extras” a campo.

Las mayores desventajas son el costoso manejo de los datos, registro, modelado, bordes y ruido.

### **3.3.- COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS**

Para alcanzar a conocer los recursos invertidos en la creación de un modelado completo (adquisición de los datos/imágenes, procesado, modelado, texturizado), se ha realizado un levantamiento fotogramétrico clásico y mediante láser escáner 3D de la Ermita de San Juan, situada en Noja (Cantabria). La escala de trabajo se fijó en 1/50.

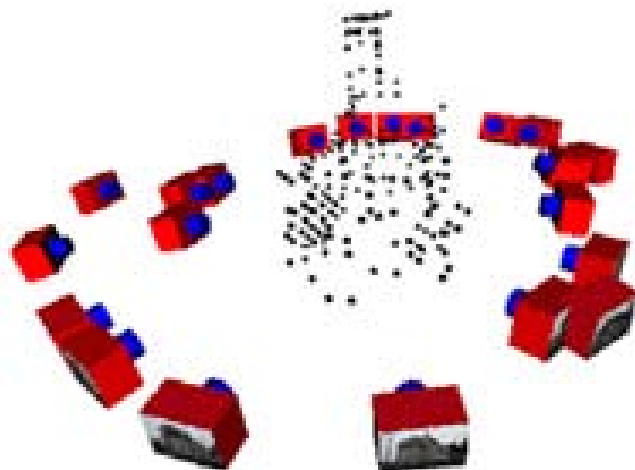
#### **3.3.1.- LEVANTAMIENTO POR SENSORES PASIVOS.**

Se emplearon un total de 22 imágenes, y 29 puntos de apoyo que fueron capturados en campo, empleando una estación de medición sin prisma.



*Figura 6: Imágenes usadas en el proceso de levantamiento por métodos pasivos.*

Se ha restituído el modelo y generados las vistas.



*Figura 7: Posición de las tomas empleadas y localización de los puntos de apoyo*

A partir de dicho modelo, se obtuvieron las vistas en 2D de la ermita.

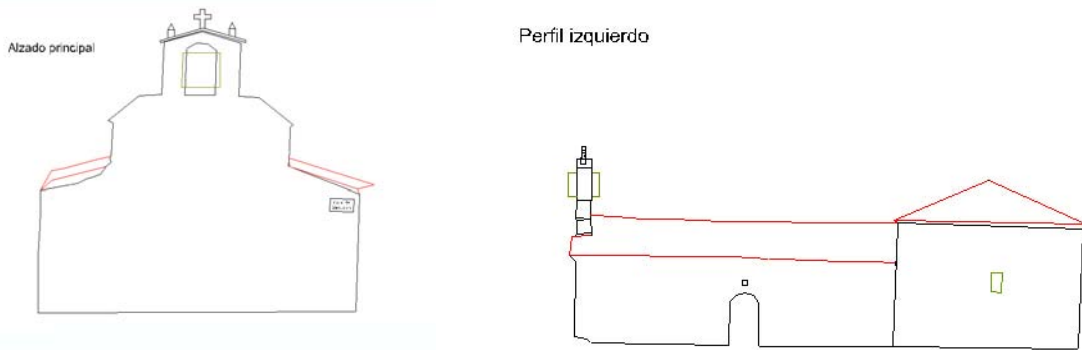


Figura 8: Vistas en alzado y lateral derecha obtenidas por fotogrametría.

### **3.3.2.- LEVANTAMIENTO POR SENSORES ACTIVOS.**

Para el levantamiento en campo por sensores activos, fueron necesarias 2 horas de trabajo con el láser escáner 3D, en la que se capturaron más de 30.000.000 de puntos en un total de 14 escaneos.

### **3.3.3.- COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS**

La diferencia de tiempos necesaria para el modelado completo en cada uno de los casos ha sido:

Fotogrametría: 11 horas en las que se han empleado 22 imágenes y 29 puntos de control

Láser escáner 3D: 6 horas en total y 30.000.000 puntos del modelo.

### **3.4.- CONCLUSIONES:**

El punto fuerte de la fotogrametría es la extracción de bordes en 3D, mediante estereoscopía; mientras que el punto fuerte del láser escáner 3D es la generación de superficies 3D de detalle

Ambos presentan el mismo problema concerniente al modelado del objeto completo: carencias de datos en las cubiertas o en las esquinas inferiores.

Las fotogrametría por sensores pasivos y por sensores activos no son competidoras, puesto que son bastante complementarias.

Es posible obtener muy buenos resultados combinando ambos métodos.

En los dos casos, la parte del modelado es todavía la más problemática y la que más tiempo lleva.

## **4.- EL LÁSER ESCÁNER 3D**

### **4.1.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.**

Si se realizara una comparación con respecto a los métodos topográficos tradicionales, se estima que para llevar a cabo un trabajo suele ser necesario un 65% menos de horas de personal que empleando métodos tradicionales. Además se supone un 50% menos de costes de equipos y trabajo frente a los métodos clásicos.

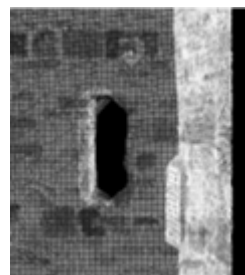
Se pasa de planos 3D tradicionales a modelos CAD 3D. Además se reduce la posibilidad de visitas a campo – reducción de los costes de movilización.



Especificaciones técnicas	
Rango de Medida	76 m
Resolución	17 Bit Rango
Frecuencia de Medida	120 kHz
Error Lineal	$\leq 3$ mm a 10 m y 84% reflexión
Potencia del Láser (CW, media)	10,5 mW
Longitud de onda	785 nm
Clasificación del Láser	3R (DIN EN 60825-1)
Seguridad Visual intrínseca	$> 1,5$ m @ 8000 puntos resolución en 360°
Divergencia del Rayo	0,2 mrad (0,012 grados)
Diámetro del rayo (a la salida)	3 mm, circular
Plano Vertical de trabajo	320°
Plano horizontal de trabajo	360°
Resolución Vertical	0,011° (32.000 3D-Pixeles en 360°)
Resolución Horizontal	0,00076° (470.000 3D-Pixel en 360°)

#### **4.2.- PECULIARIDADES DEL TRABAJO CON LÁSER ESCÁNER**

Una peculiaridad de los datos del láser escáner 3D, es que el instrumento tiene una resolución angular mínima, con la que se calculan las nubes de puntos. Es por esto, que si se capturan las tomas a mucha distancia aparece un ruido tipo “ripple” en los bordes a lo largo de los datos 3D. A pesar de que las imágenes no son de alta resolución, los bordes y las esquinas son claramente visibles e identificables.



*Figura 9: Imagen de la fachada, nube de puntos en la que se aprecia el ruido tipo “ripple” y foto de la misma zona.*

## **5.- APLICACIONES**

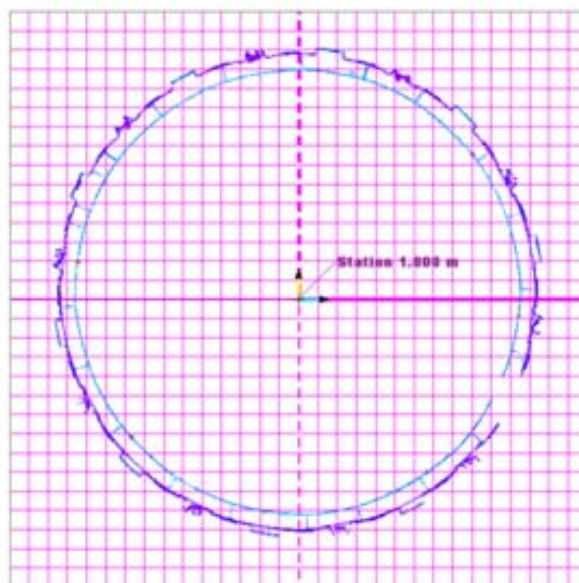
### **5.1.- ESCANEADO DE CÚPULAS**

Propósito:

Obtención de secciones 2D en AutoCAD

Cuadro de rendimientos:

	L. E. 3D	Mét. Conv.
Tiempo de Campo	2 horas	6 días
Personal de Campo	1	2
Tiempo Oficina	2 horas	2 días
Personal de Oficina	1	1
Otros costes		Andamiaje



*Figura 10: Nube de puntos y sección de la bóveda.*

## 5.2.- ESCANEADO DE FACHADAS

Propósito:

Obtención del alzado 2D en Autocad

Obtención de secciones 2D en AutoCAD



Figura 11: Imagen de la iglesia, nube de puntos y modelo restituido.

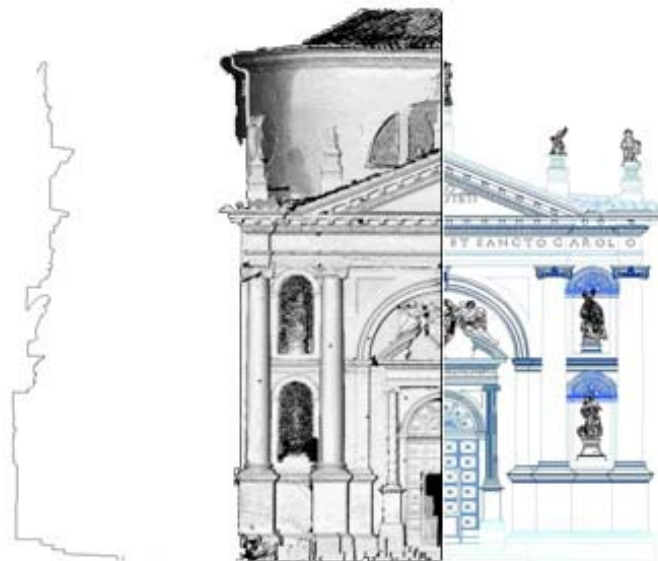


Figura 12: Composición nube de puntos-modelo restituido y plano de desplomes.

	L. E. 3D	Mét. Conv.
Tiempo de Campo	2 horas	2 días
Personal de Campo	1	2
Tiempo Oficina	4 días	5 días
Personal de Oficina	1	1
Otros costes		Andamiaje

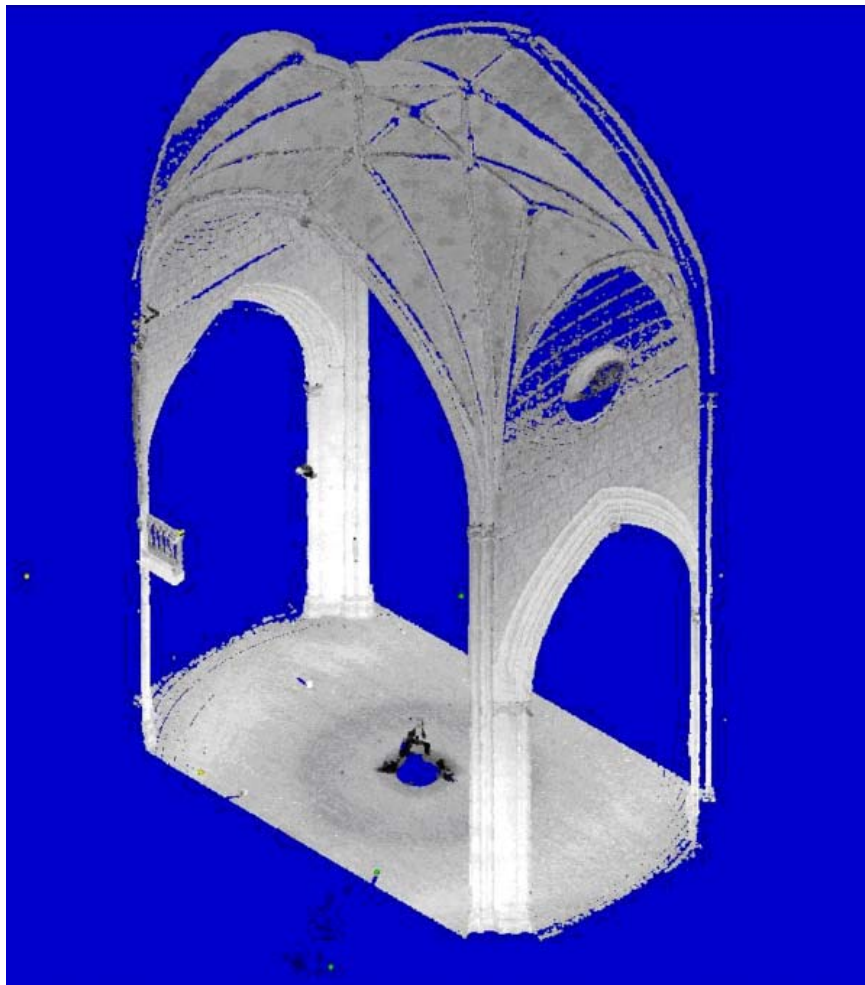
### **5.3.- ESCANEEO DE INTERIORES.**

Propósito:

- Caracterización métrica de la bóveda
- Vistas y secciones en 2D
- Modelo sólido

Cuadro de rendimientos:

	L. E. 3D
Tiempo de Campo	2 horas
Personal de Campo	1
Tiempo Oficina	2 horas
Personal de Oficina	1



*Figura 13:Nube de puntos del interior.*



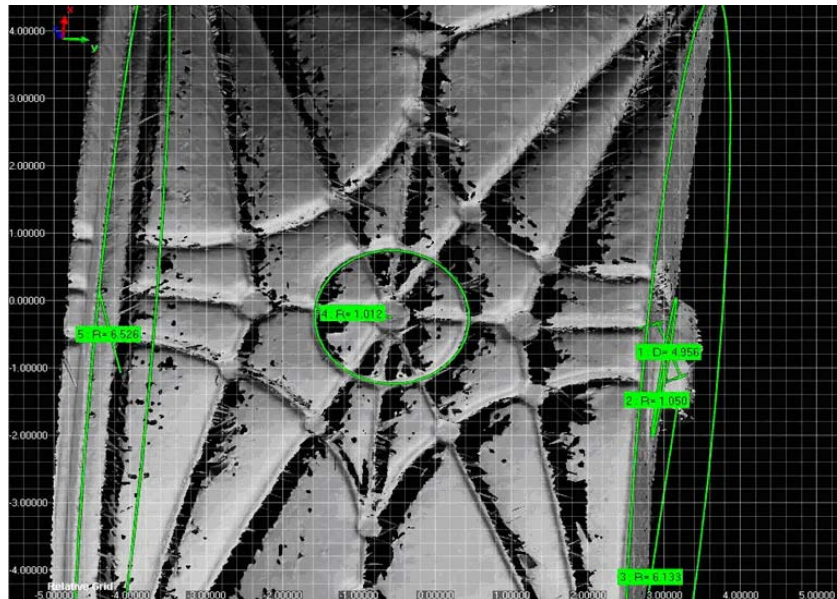


Figura 14: Mediciones en nube de puntos.

#### **5.4.- ESCANEADO CON COLOR**

También es posible añadir texturas sobre los puntos triangulados en 3D o sobre los modelos sólidos. Dicha información es capturada por una cámara de fotos colocada en excéntrico sobre el aparato.

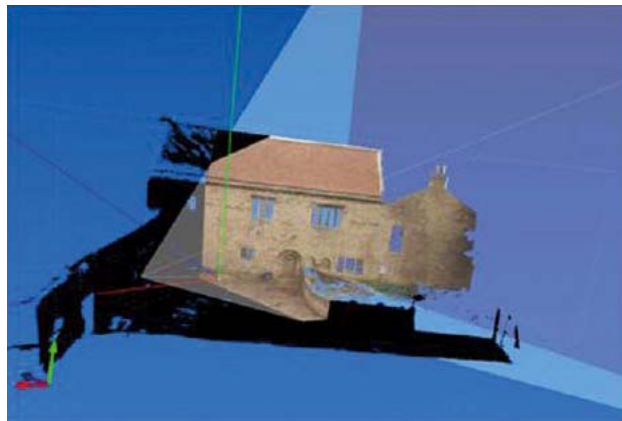


Figura 15: Imágenes de la cámara de fotos re proyectadas en un modelo 3D

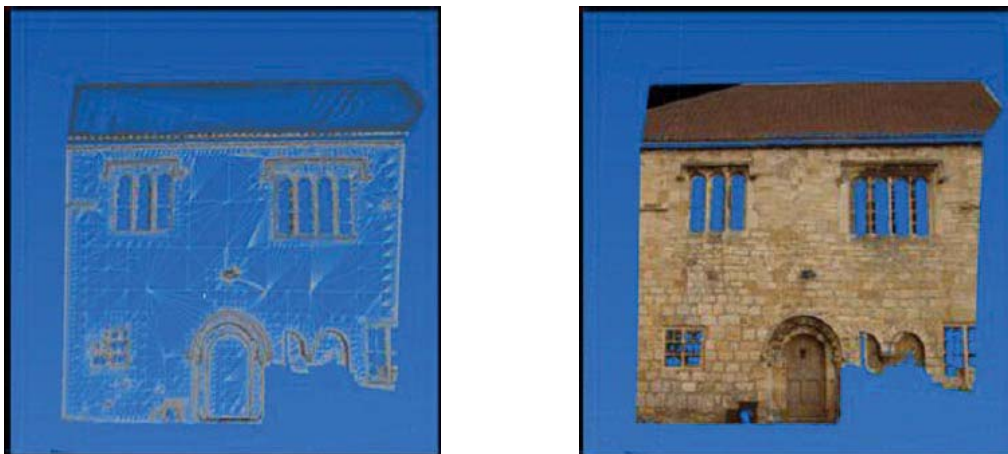
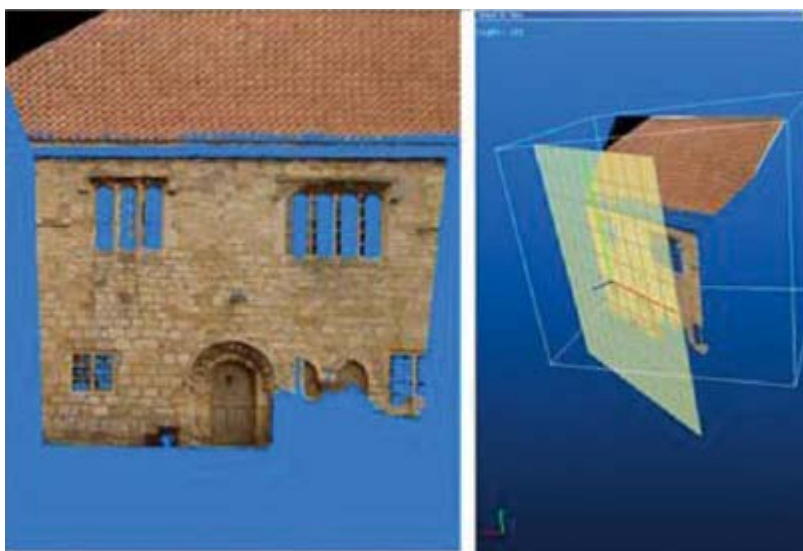


Figura 16: Proceso de creación de una superficie 3D con texturas



*Figura 17: Generación de una ortoimagen (ortofoto) real, a partir de un plano de comparación.*

## **6.- EL I+D DE GIM GEOMATICS.**

En GIM Geomatics, estamos desarrollando una nueva línea de I+D consistente en el estudio de patologías, humedades y estado de salud de la obra civil y patrimonio en definitiva, asociando información temática proveniente de Sensores en excéntrico a los registros métricos del láser escáner 3D, abriendo un amplio abanico de posibilidades en arqueología, arquitectura, mediciones industriales, mediciones de ingeniería civil, modelado de objetos complejos, etc que pueden ser de gran utilidad para gestionar correctamente cualquier acción sobre el patrimonio.

### **6.1.- PROBLEMA:**

El láser escáner 3D es un instrumento de medición, basado en un láser de barrido, que permite obtener distancias desde el instrumento a cada punto de la escena elegida con una precisión de unos pocos milímetros en función de la reflectividad del punto. Sin embargo, la mayor desventaja del láser es la falta de información sobre la textura del objeto; existen modelos que únicamente permiten registrar un tono de gris por cada punto, obteniendo de este modo una imagen en blanco y negro, tal y como aparece en las figura 11. Los modelos más recientes integran cámaras digitales que permiten realizar una toma y asignar a cada punto medido por el láser un nivel de color, como los que se pueden apreciar en las figuras 13, 14 y 15; obteniéndose así una escena fotorrealística que es hasta donde las marcas comerciales ofrecen en la actualidad.

### **6.2.- SOLUCIÓN:**

Los sensores multiespectrales y térmicos han venido empleándose esporádicamente debido al coste de adquisición de los datos, la dificultad de la captura y el procesado de los mismos; aunque siempre se han obtenido resultados más que satisfactorios. Existen múltiples estudios que evalúan la aplicación de clasificaciones espectrales, texturales y térmicas en patrimonio histórico e industrial, para identificar los materiales superficiales, humedades y las patologías asociadas al mismo, concluyendo que es posible identificar y reconocer con mayor grado de detalle los diferentes elementos que aparecen sobre los objetos a estudio.

La línea de I + D de GIM Geomatics consiste en implementar a los mejores instrumentos de medición para elementos de tamaño medio de los que se dispone hoy en día, datos temáticos



obtenidos mediante sensores multispectrales (ultravioletas, infrarrojos o térmicos), para el estudio de patologías, humedades, salud de los elementos, geológicos, temperaturas, etc.

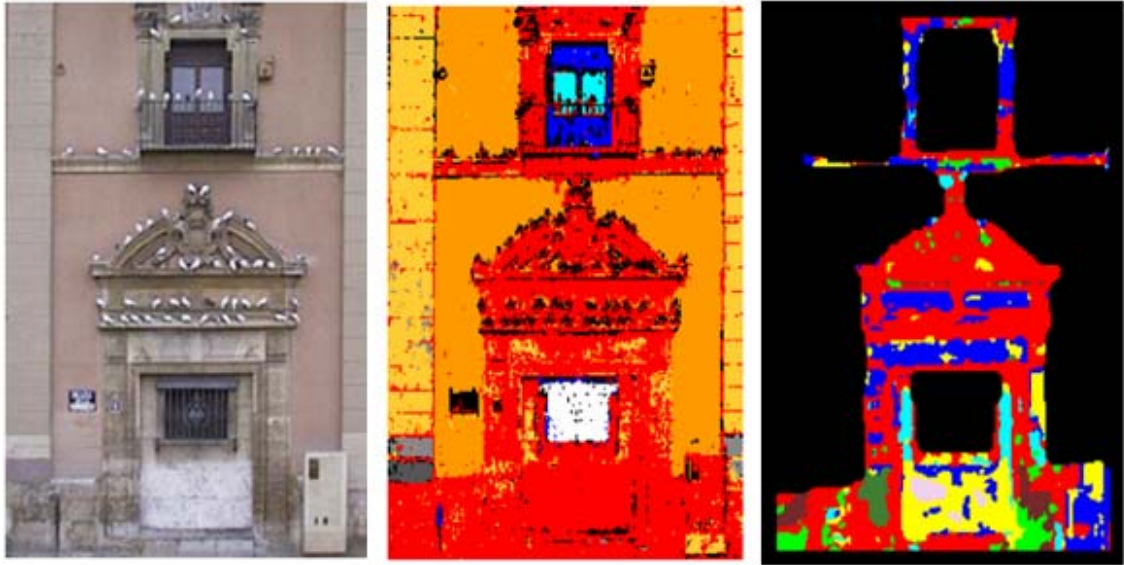


Figura 16: Fachada, clasificación no supervisada e imagen segmentada (Lerma J.L. –Ruiz L.A.)

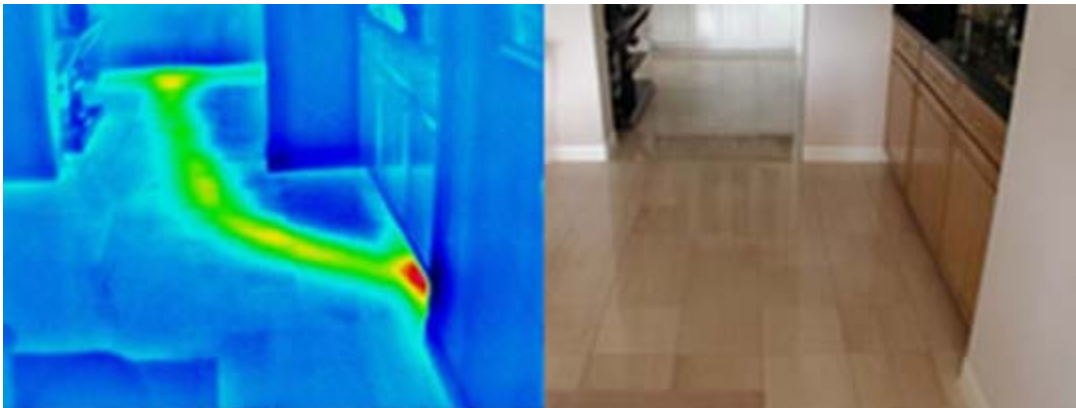


Figura 17: Análisis de canalizaciones del subsuelo.

## **7.- BIBLIOGRAFÍA**

- [1] *Remote sensing of plant stress for environmental and agricultural applications*, G. A. Capelle, J. A. Di Benedetto, C. L. Hudson, S. A. Jones, Special Technologies Lab. *International Journal of Remote Sensing*
- [2] *Multi-spectral change detection*, T. Peli, M. Young, K. Ellis, Atlantic Aerospace Electronics Corp. *International Journal of Remote Sensing*
- [3] *Combining linear and nonlinear processes for multispectral material and detection/identification*, T. Peli, M. Young, K. Ellis, Atlantic Aerospace Electronics Corp. *International Journal of Remote Sensing*
- [4] *Mineral reflectances extracted from SFSI imagery in Nevada*, R. A. Neville, K. Staenz, Canada Ctr. for Remote Sensing (Canada). *International Journal of Remote Sensing*

- [5] *Grain size and inorganic sediments estimation from airborne hyperspectral data (CASI)*, E. Castillo, V. Bayarri. ICTIS 2005. Tetuán Marruecos.
- [6] *A New Approach on Grain Size Estimation from Airborne Hyperspectral Data*. V. Bayarri, E. Castillo, R. Ferrer. Aceptada por World Scientific and Engineering Academy Society para el congreso de Madrid 2006.
- [7] *Análisis de fachadas de edificios históricos mediante métodos espectrales y de texturas*. J.L. Lerma, L.A. Ruiz Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría Universidad Politécnica de Valencia
- [8] *Multiband versus multispectral supervised classification of architectural images*. J.L. Lerma
- [9] *Chemical detection using the airborne thermal infrared imaging spectrometer (TIRIS)*, N. Gat, S. Subramanian, M. Sheffield, Opto-Knowledge Systems, Inc.; J. Barhen, Oak Ridge National Lab.
- [10] *Forstner, W. A Feature Based correspondence Algorithm for Image Matching. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 26*

# **LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA**

**Rodolfo Rodríguez Juárez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Director Técnico de la Asociación Nacional de Ensayos No Destructivos - AEND*

## **1.- ¿QUE SON LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS?**

Se entiende por ensayo no destructivo (END) la prueba que, mediante la medición de alguna propiedad física, proporciona información acerca del objeto ensayado sin que éste experimente ningún deterioro, tanto durante como al finalizar el ensayo. Por tanto, los END son aplicables en cualquier fase del proceso productivo, incluso durante toda la vida útil del componente o pieza a ensayar. De esta forma, en contra de lo que sucede con los ensayos destructivos, en los que sólo es posible inspeccionar una muestra de un lote determinado (muestreo), con los END se puede ensayar la totalidad de la producción, con lo que se aumentan la seguridad, la calidad y la fiabilidad del producto.

El trabajo del operador de END es similar a la actividad del médico con respecto a su paciente, debe:

- descubrir el origen de una discontinuidad, como el doctor para la enfermedad,
- examinar la pieza sin lesión, como el doctor para el paciente,
- escribir un informe, como la prescripción del doctor, en base al cual se decidirá si hay que mantener la pieza en servicio tal como está, repararla o sustituirla o eliminar algunos componentes.

El especialista de END debe interpretar los resultados de pruebas específicas con respecto a los criterios establecidos en la relación con el propósito de la pieza, para que durante su uso no se produzca un fallo. Él debe utilizar los métodos específicos elegidos y adaptados al tipo de discontinuidad buscada según la naturaleza, el proceso productivo y la geometría de la pieza.

Todo esto obliga a realizar un proceso de interpretación de los resultados obtenidos a partir de las indicaciones suministradas, que para cada uno de los métodos es propia y específica en relación con:

- Los principios físicos e instrumentación del método
- El material ensayado
- El proceso de fabricación

Consecuentemente, la aplicación de un método de ensayo a un problema nuevo exige una puesta a punto previa, en la que el experto llegue a establecer claramente la relación existente entre las indicaciones y el efecto que las produce, así como su significado tecnológico.

La puesta a punto requiere un periodo de tiempo en el que, con la ayuda de ensayos destructivos, de comportamiento de muestras frente al método de ensayo y ocasionalmente del análisis de fallos ocurridos, se llegue a establecer con seguridad la citada correlación.

## **2.- ¿POR QUE SON IMPORTANTES LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS?**

Los Ensayos no Destructivos son necesarios -más aún, imprescindibles- para asegurarse del estado de la calidad de gran cantidad de cosas con las que convivimos o que utilizamos cotidianamente: trenes, automóviles, aviones, plantas industriales (petroquímicas, térmicas, nucleares), estructuras de edificación, etc... De hecho, cuesta imaginar cómo sin ellos resolver algunos problemas, por ejemplo:

¿Qué espesor tiene una botella de butano?

¿Es estanco el depósito que contiene el propano de la comunidad de vecinos?

¿Cómo averiguar si existe agua condensada en el ala de un avión o si están en buen estado las llantas del tren de aterrizaje?

¿De qué forma saber si existe una grieta en la vasija de un reactor nuclear o cuál es su tamaño?

¿Es auténtica esta obra de arte; hay posibilidad de restaurarla; la madera del retablo está exenta de xilófagos?

En fin, es tan largo el listado de los casos que, puestos a pensar, se pueden resolver, que sirva la anterior enumeración como muestra.

En general, los END sirven para medir, caracterizar y poner de manifiesto discontinuidades en los materiales:

- Miden de forma indirecta lo que no puede ser medido de otra forma.
- Permiten, en muchos casos y previa puesta a punto, caracterizar el estado y naturaleza de los materiales, detectando variaciones locales de alguna propiedad física intrínseca al material.
- Ponen de manifiesto la presencia de heterogeneidades, establecen su tamaño, forma, situación y naturaleza y, de acuerdo con criterios de aceptación establecidos por la ingeniería del proyecto y recogidos en una especificación, determinan la bondad de aquello que está sometido a ensayo.

### **3.- ¿COMO SE REALIZA LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS?**

En la aplicación de cualquier END es necesario seguir una serie de etapas:

- **Elección del método y las técnicas adecuadas de ensayo.** Para realizar una buena elección hay que tener presente la naturaleza del material, su estado estructural y forma del producto, así como conocer el tipo de heterogeneidades que se pretenden detectar. También hay que contar con las limitaciones que cada método tiene y elegir aquel que mejor se adecue al nivel de sensibilidad requerido.
- **Obtención de las indicaciones.** Se trata de realizar las operaciones necesarias para obtener una indicación que es propia de cada método y está supeditada a la naturaleza, morfología (esférica, cilíndrica, laminar, puntual, agrupada), situación (superficial, subsuperficial o interna), orientación y tamaño de las discontinuidades que se pretende detectar.
- **Interpretación de la indicación.** Una vez obtenida la indicación, es preciso interpretarla, es decir, establecer la correlación entre la indicación observada con la propia naturaleza, morfología, situación, orientación y tamaño de la discontinuidad que la produce. Asimismo, habrá que realizar una evaluación, que consiste en determinar si la pieza es aceptable o rechazable.

### **4.- ¿CUANTOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS HAY?**

Todos ellos están basados en principios físicos es decir, se fundamentan en la determinación de alguna propiedad física del material o de su variación local, y de su aplicación se obtienen los resultados necesarios para establecer un diagnóstico del estado de la calidad del objeto inspeccionado. Dichos resultados no se muestran de forma absoluta, sino que lo hacen con un lenguaje indirecto, lo que obliga a interpretarlos a partir de las indicaciones propias de cada método y en relación con los principios físicos en que están basados, naturaleza del material

y procesos de fabricación. Para ello, la formación con la que cuenten los profesionales que los apliquen es decisiva.

MÉTODO	FENÓMENO FÍSICO
Inspección visual (VT)	Luz visible
Líquidos penetrantes (PT)	Capilaridad
Partículas magnéticas (MT)	Campo magnético
Corrientes inducidas (ET)	Corriente eléctrica
Radiografía industrial (RT)	Ondas electromagnéticas
Ultrasonidos (UT)	Ondas elásticas

A los métodos y aplicaciones clásicas se les van uniendo otros nuevos día a día, así como se incorporan diferentes avances tecnológicos a los ya existentes. Todo ello hace que el panorama de los END esté evolucionando y se haga cada vez más necesario un mayor conocimiento específico.

#### **4.1.- INSPECCIÓN VISUAL**

Es el método más empleado, aunque en muchas ocasiones no se es consciente de ello. Se considera inspección visual (VT) al examen de objetos realizados a simple vista o con ayuda de instrumentos ópticos sencillos.

La inspección visual permite resolver multitud de problemas en diversidad de campos industriales, en relación con otros END, juega un papel de primera magnitud, al utilizarse para adquirir visualmente la información proporcionada por otros métodos o bien al ejercerse antes de someter el material a otro ensayo, lo que permite rechazar directamente objetos evidentemente defectuosos e identificar irregularidades no significativas que pueden dar lugar a falsas indicaciones.

El estudio de la inspección visual implica un buen conocimiento de:

- El ojo y los mecanismos de visión
- Psicología de la visión, sobre todo en lo referente a la fatiga
- Iluminación, su medida y su evaluación en función del trabajo de inspección a realizar
- Teoría de la percepción e identificación del color
- Medios auxiliares de inspección (lupas, endoscopios)
- Medios artificiales de visión (sistemas de TV) y análisis de imagen

Es aplicación característica de la inspección visual determinar el estado de cosas tales como la condición superficial, la alineación de superficies acopladas, la protección de las piezas, el grado de acabado de un cordón de soldadura, evidencia de fugas y otros.

INSPECCIÓN VISUAL	
VENTAJAS	LIMITACIONES
Es muy accesible Relativamente sencillo Aplicable a cualquier material Permite la localización precisa de discontinuidades	Sólo detecta discontinuidades superficiales Requiere operadores bien entrenados No permite determinar la profundidad de la discontinuidad

#### **4.2.- LÍQUIDOS PENETRANTES**

El ensayo por líquidos penetrantes (PT) se define como el ensayo no destructivo basado en un sistema que comprende un penetrante, un método de eliminación del exceso de penetrante

y un revelador, que proporciona indicaciones visibles de las discontinuidades abiertas a la superficie.

Está basado en la utilización de un líquido de unas determinadas características físico-químicas, que le hace capaz de penetrar capilaridad en discontinuidades abiertas a la superficie, de forma que, al limpiar el exceso de líquido superficial, quede solamente el introducido en las grietas, para posteriormente, ayudado casi siempre por la acción de un agente capaz de absorber el penetrante, denominado revelador, salir y señalar sobre la superficie las zonas en las que existen discontinuidades. En la figura 1 se muestra una secuencia de operaciones típica de este método.

El campo de aplicación de los líquidos penetrantes se extiende a cualquier tipo de industria de fabricación o de mantenimiento en la que sea necesario detectar discontinuidades superficiales en materiales metálicos o no metálicos, con la única condición de que la superficie no sea porosa.

LÍQUIDOS PENETRANTES	
VENTAJAS	LIMITACIONES
Rápido Fácil de aplicar Muy sensible Muy portátil Aplicable a cualquier material, excepto los muy porosos	Sólo detecta discontinuidades superficiales Existe riesgo de contaminación No permite determinar la profundidad de la discontinuidad

El objeto del ensayo por líquidos penetrantes es la detección de discontinuidades abiertas a la superficie de las piezas por la introducción del líquido penetrante en las mismas. Es importante determinar los factores que influyen en la penetración del líquido en dichas discontinuidades; los principales son:

- La existencia de obstrucciones mecánicas de cualquier tipo (pues impiden físicamente la entrada del penetrante o varían la configuración de la discontinuidad reduciendo sus dimensiones)
- Los recubrimientos y contaminantes superficiales
- La configuración geométrica de la discontinuidad
- La tensión superficial del líquido penetrante
- Los aditivos y contaminantes en el propio líquido penetrante
- La temperatura de la pieza a ensayar y la del penetrante
- La presión atmosférica en el lugar donde se realiza el ensayo
- La rugosidad del interior de la discontinuidad



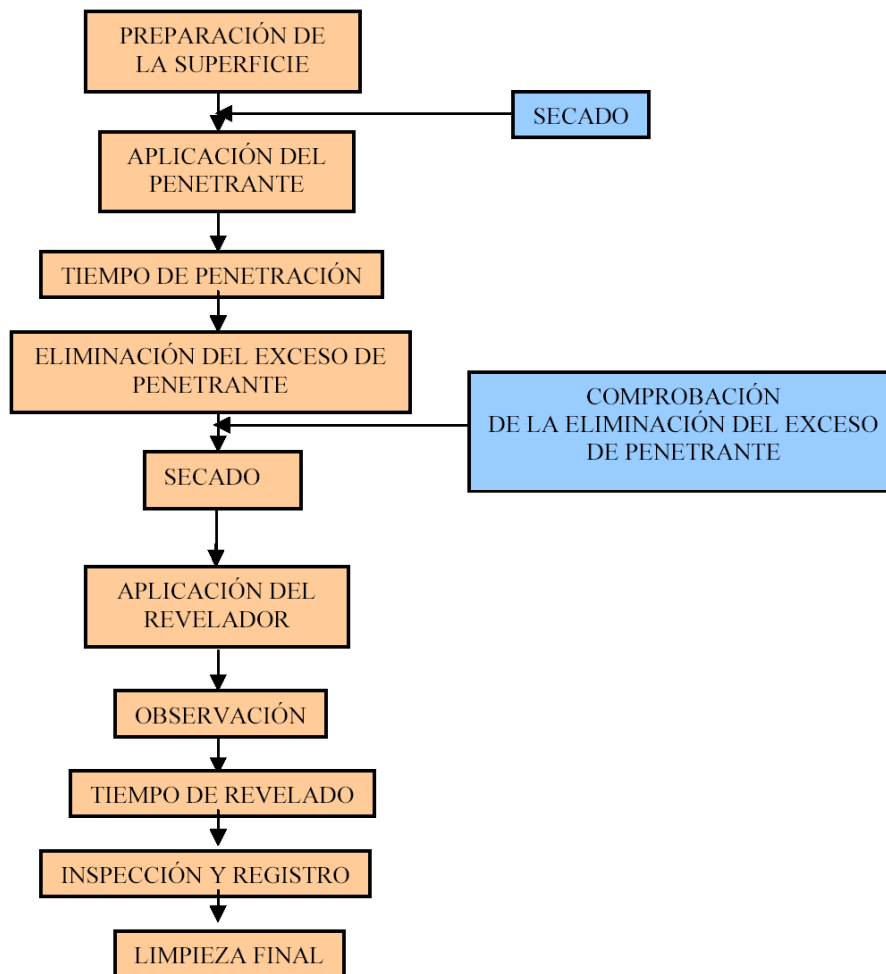


Figura 1. Secuencia de operaciones

### **4.3.- PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

El ensayo por partículas magnéticas (MT) se basa en las variaciones que producen las discontinuidades superficiales o subsuperficiales en un campo magnético creado de forma temporal en un material ferromagnético. Estas variaciones producen unos campos de fuga de forma que si una pieza se coloca formando parte de un circuito electromagnético y se pulveriza con finas partículas de hierro, se producen acumulaciones en algunas zonas que son precisamente en donde existen discontinuidades, como si formasen un puente metálico para suplir la falta de material. El ensayo por partículas consiste en lo siguiente:

- Cuando una pieza de material ferromagnético se somete a la acción de un campo magnético, las discontinuidades presentes en el material distorsionan las líneas de fuerza.
- Si la discontinuidad está abierta a la superficie, algunas líneas salen de la pieza formando un campo magnético de fuga.
- Al aplicar partículas magnéticas sobre la superficie, algunas serán capturadas por los campos de fuga y formarán indicaciones que dibujarán el trazado superficial de la discontinuidad.
- Si el plano de la discontinuidad es paralelo a las líneas de fuerza, no se producirá el campo de fuga y no habrá formación de indicación.

El ensayo por partículas magnéticas es un método de detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales magnetizables (materiales ferromagnéticos que son fuertemente atraídos por un imán, tales como el hierro, níquel, cobalto, etc.). Resulta ser uno de los métodos de END más rápido, económico y de mayor sensibilidad para este tipo de discontinuidades. En la figura 2 se muestra una secuencia de operaciones típica de este método.

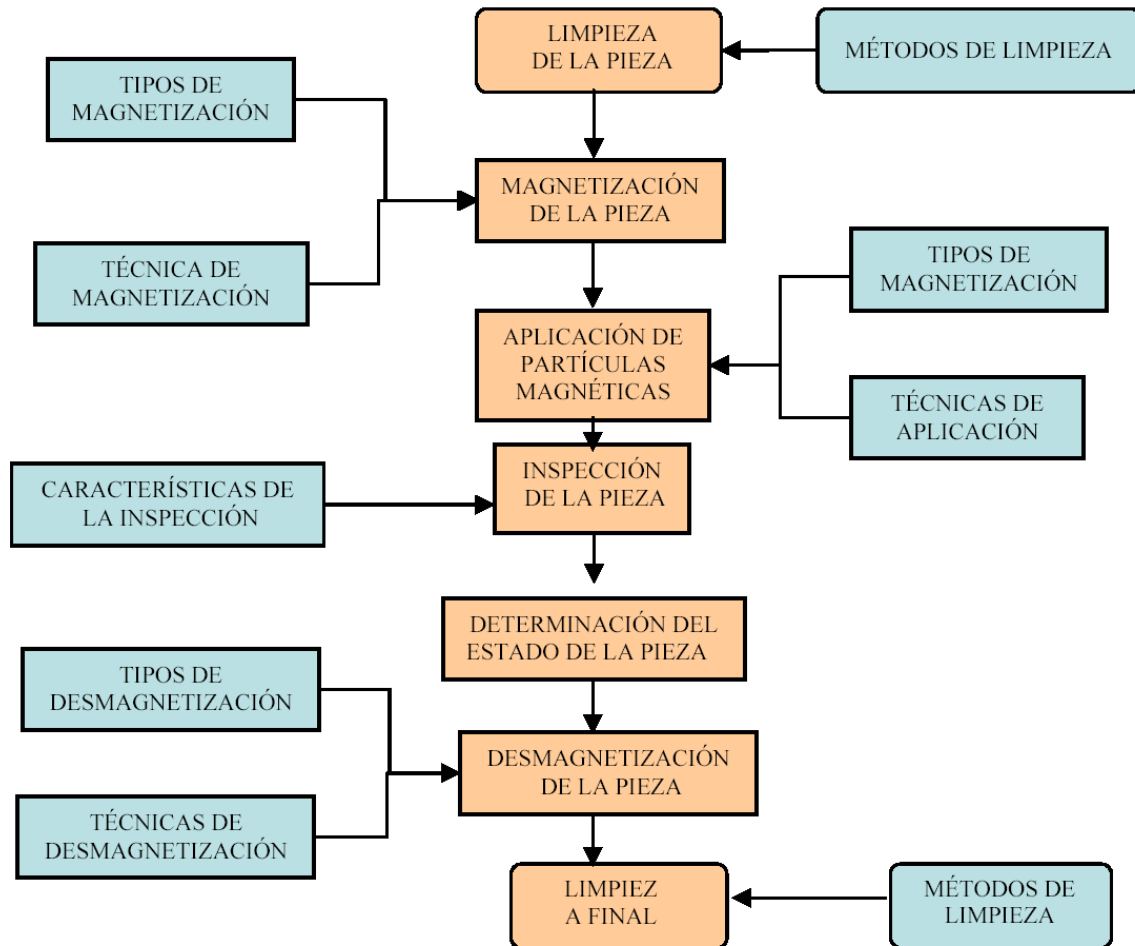


Figura 2. Diagrama del proceso de partículas magnéticas

Pueden aplicarse a materias primas como palanquillas, barras, perfiles; durante procesos de conformación, mecanizado, tratamientos térmicos y electrodeposición; y en componentes terminados, para detectar discontinuidades producidas en procesos de fabricación o inducidas durante el servicio.

PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	
VENTAJAS	LIMITACIONES
Rápido	Sólo se puede aplicar en materiales ferromagnéticos
Fácil de aplicar	Sólo detecta discontinuidades superficiales y subsuperficiales
Muy sensible	Existen riesgos de contaminación
Muy portátil	Existe magnetismo remanente
Determina con precisión la longitud de la discontinuidad	No permite determinar la profundidad de la discontinuidad

El campo de aplicación es cada día mayor y, en estos momentos, abarca desde la inspección de soldaduras en depósitos y recipientes a presión hasta la de piezas en bruto o mecanizadas de las industrias metalúrgicas, y resulta imprescindible en piezas de alta seguridad de las industrias del automóvil (válvulas, bielas, manguetas, piñones, etc.), naval (cigüeñales,

válvulas, dientes de engranaje), aeronáutica (ejes de turbina, trenes de aterrizaje, bielas), ferroviaria (ejes, ruedas) construcción (estructura metálica).

#### **4.4.- CORRIENTES INDUCIDAS**

Cuando una corriente variable actúa en la proximidad de un material conductor, origina en éste una corriente inducida que se distribuye según sea su naturaleza, espesor, homogeneidad y será capaz de reinducir en un conductor próximo una nueva corriente, cuyas características dependen de la corriente primitiva y de los parámetros del material anteriormente aludidos.

CORRIENTES INDUCIDAS	
VENTAJAS	LIMITACIONES
Alta sensibilidad	Sólo detecta discontinuidades superficiales y subsuperficiales
Muy versátil	Sólo es aplicable a materiales conductores de la electricidad
Fácil interpretación	Hay una mezcla de muchas variables
Elevada portabilidad	Difícil de aplicar en materiales ferromagnéticos
No necesita acoplante	
Alta velocidad de inspección	

Los equipos de ensayo de corrientes inducidas (ET) consisten en generadores de impulsos eléctricos de la frecuencia adecuada, a los que se conectan básicamente una bobina para inducir corriente en el material. La corriente inducida por el material es amplificada y se puede representar en un osciloscopio o en una pantalla digital. Generalmente la bobina va montada en una sola unidad, conocida como palpador. El ensayo se realiza aplicando el palpador sobre el material, formando parte de otros conjuntos que introducen en el interior de tubos (bobinas internas) o bien es la pieza de examen la que introduce en el interior de la bobina (bobinas externas). En cualquier caso, el ensayo requiere patrones de características conocidas para comparar la respuesta.

El ensayo por corrientes inducidas es aplicable a cualquier material conductor y permite unas velocidades de control muy elevadas al realizarse éste sin contacto.

Las aplicaciones son muy numerosas, entre ellas:

- Medida de conductividades eléctricas en los materiales
- Caracterización de metales y aleaciones
- Medida de espesor de recubrimientos metálicos sobre base metálica
- Medida de espesor de recubrimientos no metálicos sobre base metálica
- Medida de espesor de recubrimientos metálicos sobre base no metálica
- Medida de la profundidad de grietas detectadas por otros métodos
- Comprobación del estado de tratamiento
- Medida de espesor de capas de tratamientos térmicos
- Clasificación de materiales sin recurrir a análisis químicos
- Selección de chatarra
- Detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales

#### **4.5.- RADIOGRAFÍA**

Consiste en imprimir sobre una película fotosensible la sombra producida por las irregularidades externas e internas de un objeto. Para la producción de dicha sombra se

requiere la utilización de tres elementos: fuente, objeto y película, cuya disposición no puede dejarse al azar y debe ser tal que el objeto se encuentre entre la fuente y la película.

Se basa, por tanto, el método radiográfico (RT) en las propiedades que ciertas radiaciones electromagnéticas, denominadas radiaciones ionizantes o penetrantes, poseen, entre otras:

- Son capaces de atravesar objetos opacos a la luz visible
- Son capaces de inducir reacciones químicas en materiales fotosensibles
- Se propagan en línea recta
- Ionizan los gases
- Dañan la materia viva

Las fuentes utilizadas en radiografía industrial son los equipos de rayos X y los isótopos radiactivos ( $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , etc.), que emiten ondas electromagnéticas inferiores a 10 nm de longitud de onda.

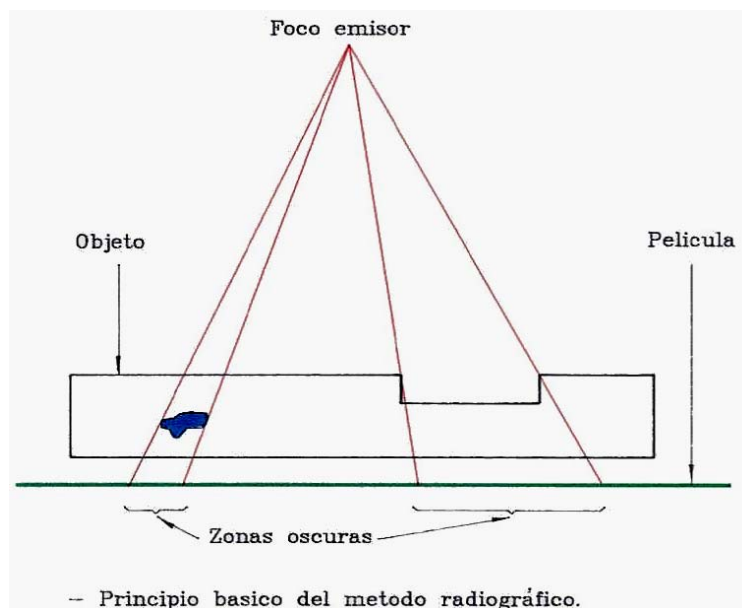


Figura 3. Principio del método de radiografía

Las películas son emulsiones de material fotosensible sobre acetatos transparentes, que se impresionan por la acción de la radiación y necesitan de un procesado (revelado y fijado) para, a través de él, hacer visible la imagen que había sido impresionada.

Los objetos a radiografiar son aquellos que deben ser inspeccionados y se colocan íntimamente pegados a la película. El espesor a atravesar y su naturaleza, así como el tipo y tamaño de la discontinuidad a detectar, determinan la técnica concreta de inspección.

Existen diversas variaciones de este método, entre las que cabe destacar:

- La fluoroscopia, en donde la imagen se produce en una pantalla de sales que emiten luz en función de la radiación que reciben y, una vez amplificada por un intensificador, es posible verlas en tiempo real en un monitor de TV.
- La radiografía digital, que sigue las mismas técnicas de la radiografía convencional, cambiando el soporte donde se produce la imagen, en este caso, unos captadores electrónicos que son excitados por la acción de la radiación y que se descargan para después ser reutilizados multitud de veces. La imagen es almacenada en un soporte

digital y puede ser tratada mediante el software adecuado, pudiendo incluso ser transmitida por correo electrónico, lo que posibilita la evaluación a distancia.

La radiografía es susceptible de ser aplicada a cualquier tipo de material (metales, cerámicas, telas, plásticos, materiales compuestos, etc) y puede emplearse en la detección de discontinuidades, verificación de montajes, comprobaciones de estado interno y demás.

RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	
VENTAJAS	LIMITACIONES
Aporta un documento Interpretación relativamente fácil Poco sujeta a la influencia del operador Aplicable a cualquier material Muy sensible a discontinuidades tridimensionales Numerosas técnicas especiales	Necesita acceso por ambos lados No es adecuada para detectar discontinuidades planas Existen riesgos de irradiación Dificultad en grandes espesores Alta inversión en equipos y seguridad

#### **4.6.- ULTRASONIDOS**

El método se basa en la propagación de ondas acústicas de la misma naturaleza que el sonido pero cuya frecuencia está más allá de las posibilidades del oído humano, por encima de de 20 kHz.

El ensayo de ultrasonidos (UT) consiste en introducir dentro del material a ensayar una onda elástica y esperar su rebote, bien en la pared posterior de la pieza o bien en las caras de alguna de las discontinuidades internas que actúan como reflectores. El análisis de estas indicaciones, conocidas como ecos, proporciona la información necesaria para establecer dónde está situada la discontinuidad y cuál es su tamaño.

También es un ensayo que necesita piezas patrones con las que realizar una serie de ajustes y, de este modo, poder establecer conclusiones.

ULTRASONIDOS	
VENTAJAS	LIMITACIONES
Alto poder de penetración Alta sensibilidad Precisión en la determinación de la posición del reflector Sólo requiere acceso por una superficie Respuesta instantánea Automatizable Inspecciona todo el volumen No entraña riesgos para las personas Elevada portabilidad	Requiere operadores expertos Exige amplios conocimientos sobre las técnicas de ensayo Dificil de aplicar en piezas rugosas, de poco espesor o irregulares Dificultad para detectar discontinuidades próximas a la superficie Necesita medio de acoplamiento Exige bloques de referencia

La representación típica de un ensayo por ultrasonidos es la señal que se produce en una pantalla de rayos catódicos (fig 4) en donde la base de tiempos, línea horizontal situada en la parte inferior de la pantalla, proporciona información acerca de la distancia a la que se ha producido el rebote, y la amplitud o altura de la señal brinda información acerca de la presión acústica devuelta.

El equipamiento convencional del ensayo consiste en un equipo con representación en pantalla tal y como se ha descrito, al que se conecta un palpador. Dicho equipo emite un impulso eclético que excita al transductor, generalmente piezoeléctrico, contenido en el palpador, el cual, acoplado al material a inspeccionar por medio de un acoplante (gel, aceite, pasta celulósica, etc.), transmite una señal acústica generada en el transductor por conversión de energía eléctrica en mecánica.

Cuando la onda es devuelta, llega hasta el transductor, que esta vez convertirá la energía mecánica en eléctrica y, pasando a través del amplificador del equipo, se representará en la pantalla.

Actualmente existen equipos que permiten otros tipos de representaciones que se aproximan a la imagen real de la pieza inspeccionada.

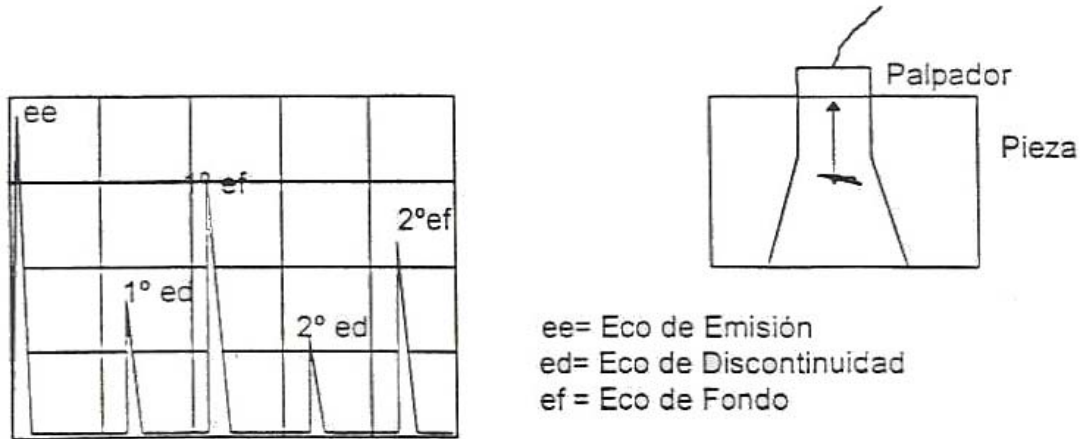


Figura 4. Fundamento del ensayo mediante ultrasonidos

En general, el método de ultrasonidos puede realizarse sobre cualquier material (metal, plástico, madera, vidrio, cerámica, etc.), sin embargo, cada material requiere frecuencias distintas, que tienen relación con la sensibilidad del ensayo (discontinuidad más pequeña detectable) y con las características del material. Así, un material muy atenuante requerirá frecuencias bajas mientras que otro de grano fino podrá ser inspeccionado con frecuencias más altas.

Por medio de los ultrasonidos se pueden realizar:

- Ensayos metrológicos; tales como la medida de espesores en recipientes a presión, cascos de buques, etc.
- Caracterización de materiales al existir una correlación entre la velocidad de propagación de los ultrasonidos y el módulo de elasticidad.
- Detección de discontinuidades tanto superficiales como en el interior del material.

#### **4.7.- TERMOGRAFÍA INFRARROJA**

La termografía utiliza la transmisión de calor por radiación como variable relacionada con la temperatura, por lo que no es necesario contacto físico con el elemento a ensayar ni un tiempo de estabilización de temperaturas, lo que permite la realización de medidas en situaciones donde no sería posible realizarlas con termómetros convencionales.

Actualmente permite la obtención en tiempo real de imágenes térmicas que representan en colores la distribución de temperaturas de los objetos ensayados.

Los sistemas de termografía están diseñados para captar la emisiones infrarrojas entre 3 y 13  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. Se apoyan en que todos los cuerpos emiten radiación infrarroja y es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura superficial del objeto (Ley de Stefan-Boltzmann).

Los factores que afectan a la medida son:

- Emisividad
- Temperatura ambiente



- Distancia
- Humedad relativa
- Temperatura atmosférica

La termografía es aplicable a la detección de calentamiento en equipos y de cortocircuitos, la determinación de fugas caloríficas en aislamientos, la localización de circuitos de calefacción, de agua caliente, la detección de humedades, la cuantificación de pérdidas energéticas, el análisis de funcionamiento de intercambiadores de calor, la medición de niveles en depósitos, el análisis de motores o el control de eficiencia de los sistemas de descongelación.

#### **4.8.- EMISIÓN ACÚSTICA**

Es una onda transitoria que se propaga en un medio elástico con frecuencias superiores al rango de las audibles y que genera, dentro del material, una rápida liberación de energía. Esta onda es observada únicamente mientras la energía está siendo liberada y se detecta mediante sensores piezoeléctricos especiales de alta sensibilidad.

El flujo de energía es generado por el propio material que está sometido a ensayo, por lo que este método es útil para la inspección en tiempo real de fenómenos tales como la formación de microfisuras, el crecimiento de grietas, etc.

Depende de la redistribución de tensiones dentro de la pieza, por tanto, es un ensayo dinámico que requiere que los componentes estructurales estén sometidos a esfuerzos, ya sean propios del sistema en servicio, los ocasionados durante el proceso de fabricación o las cargas periódicas.

Es posible localizar la fuente utilizando varios sensores simultáneamente y usando algoritmos de triangulación.

#### **5.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Existe la costumbre de comparar unos métodos con otros y considerar unos mejores que otros, o hablar de ventajas e inconvenientes de unos sobre otros cuando lo correcto sería decir que todos los métodos tienen unas aplicaciones específicas con sus limitaciones y ventajas, y que unos son complemento de otros, siendo responsabilidad del técnico de ensayos no destructivos saber qué método o combinación de ellos es aconsejable en cada momento.

Cuando dos o más métodos pueden aplicarse a un mismo problema, se dice que son concurrentes o redundantes. Cuando dan información parcial y es necesario el empleo de varios de ellos para dar la solución, se dice que son complementarios.

El empleo de métodos concurrentes aumenta la seguridad de la inspección, mientras que la utilización de complementarios amplía el espectro de discontinuidades detectables.

#### **6.- ¿QUE ES LA AEND?**

La Asociación Española de Ensayos No Destructivos, en lo sucesivo AEND, es una Asociación de carácter civil, de duración indefinida, sin ánimo de lucro y con personalidad jurídica propia, que reúne a las distintas personas naturales y jurídicas relacionadas con los Ensayos No Destructivos.

Fue constituida el día 27 de Septiembre de 1.988, en Asamblea celebrada durante los actos del VI Congreso en Vigo del CEND, e inscrita en el Registro de Asociaciones el 25 de Enero de 1.989 una vez realizados los trámites exigidos por la Ley.

El 23 de Diciembre de 1.997 CERTIAEND (Órgano de Certificación de la AEND), fue acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), para la certificación de personal en Ensayos No Destructivos conforme a la Norma UNE EN-473:1993.

## **6.1.- ORGANIZACIÓN**

La AEND para el desarrollo de sus actividades se distribuye en Comités Autonómicos, en la actualidad cuenta con los siguientes: Asturias, Norte, Cataluña, Aragón, Comunidad Valenciana, Murcia, Andalucía y Centro.

Miembros Colectivos	Miembros Individuales	Miembros Asociados	Miembros de Honor	Miembros Distinguidos
Organizaciones Empresariales	Personas Físicas	Estudiantes y jubilados	A consideración de la Junta Rectora	A propuesta del Comité Autonómico con aprobación de la Junta Rectora

Los órganos de representación y gobierno de la AEND son:

**Asamblea General.** Es la máxima autoridad de la Asociación. Sus acuerdos, estatutariamente adoptados, son obligatorios para todos los miembros. Está integrada por los miembros individuales y los representantes de los miembros colectivos de la AEND.

**La Junta Rectora.** Es por delegación y representación de la Asamblea General, el Órgano ejecutivo de la AEND. Está constituida por 35 vocales. Sus miembros efectúan sus funciones sin remuneración alguna.

**La Comisión de Dirección** estará formada por el presidente de la AEND, los Vicepresidentes y Secretario General, los cuales son elegidos por la Junta Rectora y ratificados por la Asamblea General.

## **6.2.- OBJETIVOS**

El ámbito de actuación de la AEND es todo el territorio nacional español, y tiene como fines y objetivos fundamentales:

- Promover y facilitar la implantación de técnicas para la gestión y mejora de los Ensayos no Destructivos en las industrias y servicios públicos y privados.
- Promover el perfeccionamiento profesional y la formación permanente de sus miembros en el ámbito de los Ensayos No Destructivos.
- Promover y facilitar la enseñanza de dichas técnicas a todos los niveles y para toda clase de entidades públicas y privadas.
- Fomentar a los niveles necesarios la formación adiestramiento y cualificación del personal que interviene en actividades relacionadas de alguna forma con los Ensayos No Destructivos.
- Promover la investigación en los distintos métodos de Ensayos No Destructivos.
- Certificar personal en Ensayos No Destructivos a través de su órgano de certificación CERTIAEND.
- Colaborar en la presentación de las normas y especificaciones correspondientes a su especialidad con los organismos nacionales e internacionales adecuados.
- Promocionar, organizar y patrocinar reuniones de comités de trabajo, conferencias, congresos, coloquios, exposiciones y otras actividades en las que se discutan, estudien

o publiquen trabajos técnicos o científicos relacionados con los Ensayos No Destructivos o aquellos otros que estén en armonía con ellos, así como colaborar con las actividades de otros organismos para difundir el conocimiento y desarrollo de los END.

- Asesorar a los miembros que lo soliciten en cuestiones relacionadas con los Ensayos no Destructivos.
- Prestar la asistencia técnica e intelectual que se le solicite en materia o temas de Ensayos No Destructivos.
- Cooperar con la Administración Pública y con otras Entidades públicas o privadas en todo lo referente al fomento de los END y transmitir a las mismas los problemas que se plantean en relación a éstos en cada circunstancia.
- Recopilar y seleccionar la información relativa a la ciencia y técnica de los END y sus fines para su difusión general y de los miembros en particular.

Al objeto de cumplir los objetivos y misión encomendada la AEND realiza una serie de actividades que se exponen a continuación:

### **DIFUSIÓN**

Elaboración y distribución de publicaciones propias que a continuación se listan:

- BOLETÍN DE LA AEND, PUBLICACIÓN SEMESTRAL
- HOJA DE INFORMACIÓN ELCTRONICA. INFOAEND
- CERTIFICACIÓN DEL PERSONAL DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. SELECCIÓN DE PREGUNTAS EXAMEN GENERAL
  - TOMO I. ( RADIOLOGÍA INDUSTRIAL, ULTRASONIDOS, CORRIENTES INDUCIDAS)
  - TOMO II. (PARTÍCULAS MAGNÉTICAS, LÍQUIDOS PENETRANTES, ENSAYO DE FUGAS, INSPECCIÓN VISUAL)
- LÍQUIDOS PENETRANTES NIVEL 2
- PARTÍCULAS MAGNÉTICAS NIVEL 2
- CORRIENTES INDUCIDAS NIVEL 2
- ULTRASONIDOS NIVEL 2

### **Organización de jornadas y congresos:**

Entre las actividades de difusión de la AEND y una de las más importantes es la celebración de Congresos cada cuatro años dentro de todo el ámbito nacional, encargándose, de su organización el comité correspondiente y decidiéndose en cada Congreso cual será la sede del siguiente.

A lo largo de los más de treinta años de vida de la AEND (inicialmente como comité de la AECC) se han celebrado una serie de actos públicos y congresos entre los que merecen señalarse como más destacables:

- I Jornadas Nacionales de END - Madrid, marzo 1.972
- II Jornadas Nacionales de END - Bilbao, junio 1.975
- III Jornadas Nacionales de END - Barcelona, octubre 1.979 (posteriormente a las III Jornadas, se decidió cambiar su denominación por la de Congreso)

- 4º Congreso Español de END - Alicante, octubre 1.982
- 5º Congreso Español y I Iberoamericano de END - Sevilla, octubre 1.985
- 6º Congreso Español y I Ibérico de END - Vigo, septiembre de 1.988
- 7º Congreso Español y I Pirenaico de END - Zaragoza, noviembre 1.991
- 8º Congreso Español de END - Madrid, junio de 1.995
- 9º Congreso Nacional de END - Vitoria en mayo de 1.999
- 8th ECNDT ( European Conference of Non Destructive Testing) – Barcelona, junio de 2.002
- 10º Congreso Nacional de END. – Cartagena, junio de 2003
- Jornadas sobre aplicaciones de técnicas especiales de ensayos no destructivos en la construcción, caracterización y evaluación de los daños producidos por xilófagos en estructuras de madera en edificación. – Gijón, Murcia, Valladolid, diciembre 2005
- 11º Congreso Español de END. – Gijón, julio de 2006

### **6.3.- RELACIONES EXTERNAS E INTERNACIONALES**

#### **Colaboración con asociaciones y organismos certificadores**

La AEND participa activamente en diversos foros internacionales:

- Miembros de la Asociación Española para la Calidad, AEC.
- Miembro de la Asociación Española de Normalización, AENOR.
- Miembro de pleno derecho de la EFNDT (European Federation of Non Destructive Testing) que agrupa a las asociaciones de END de 27 países europeos. Tiene un representante en el Comité de Dirección.
- Miembro observador de ISO (International Standardization Organization)
- Miembros del CEN (Comité Europeo de Normalización)
- Acuerdo de cooperación profesional con la ASNT (American Society for Non Destructive Testing)
- Acuerdo de reconocimiento mutuo de la certificación con la COFREND (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs)
- Acuerdo de cooperación con la asociación Rusa de Ensayos no destructivos (RSNTTD)

Actualmente está participando en diversos proyectos internacionales:

- European Training Programme for Qualification of NDT Personnel, dentro del Programa Leonardo Da Vinci. Forman parte de este proyecto España, Alemania, Francia y Reino Unido, siendo la promotora España.
- “Long Range Ultrasonic Condition Monitoring - LRUCM”, promovido por el Instituto Británico de Soldadura (TWI): La AEND participa en tres áreas del mismo.

### **6.4.- CERTIFICACIÓN**

El profesional de END tiene una peculiaridad en comparación con otros profesionales y es que la propia naturaleza de los ensayos hace que el operador forme, en cierto modo, parte de los mismos, siendo, en muchos casos, definitoria su pericia.

Esta situación particular de los END, tan sensibles en su aplicación a la capacidad de quien los aplica, y el vacío de enseñanzas regladas en cualquiera de sus grados, no contando, por tanto, con titulaciones que avalen los conocimientos de los profesionales, ha obligado al desarrollo de un sistema de certificación de personal que se estructura en tres niveles de cualificación.

Esta situación no es única en España y, por esta razón, cuenta internacionalmente con una normativa que regula las condiciones y requisitos necesarios que ha de cumplir el especialista en el desempeño de su función y que esencialmente son: formación específica y experiencia práctica, condiciones ineludibles y previas para poder tener opción a ser examinados.

Ya desde hace tiempo, conscientes de la situación descrita, empezaron a aparecer normas que determinaban los requisitos de obtención de la certificación, de forma voluntaria y aceptada por el cliente. En la actualidad, las existentes son muchas, con diferentes matices: certificación por ente independiente, certificación sectorial, certificación de ámbito muy reducido, etc., pero todas ellas obedecen a una misma filosofía, la necesidad de una cualificación para realizar END, siendo la certificación solamente fedataria de esta cualificación.

El Comité Español de END del cual surgió la Asociación Española de Ensayos No Destructivos, inició en 1971 las actividades de certificación de personal.

El 23 de Diciembre de 1.997 CERTIAEND (Órgano de Certificación de la AEND), fue acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), para la certificación de personal en Ensayos No Destructivos conforme a la norma UNE EN-473

Desde 1997, una vez que se publicó la norma UNE EN 473, se crea dentro de la AEND el Organismo Independiente de Certificación, CERTIAEND. Dicho organismo obtiene la acreditación de ENAC bajo los requerimientos de la norma EN 45013, hoy en día sustituida por la EN ISO 17024.

CERTIAEND es la primera entidad de certificación de personas acreditada en España por ENAC, cuenta por tanto con el reconocimiento de al European Acreditación (EA), así mismo cuenta con el acuerdo de reconocimiento mutuo de la Federación Europea de Ensayos No Destructivos (EFNDT) de este modo, la certificación otorgada es valida en todos los países de la Unión Europea.

CERTIAEND es el Organismo Notificado para dar cumplimiento a la Directiva Europea de Recipientes a Presión en lo relacionado a la certificación del personal que realiza los END.

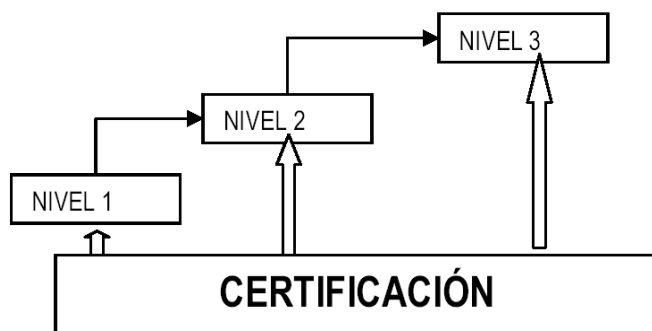
## **BENEFICIOS**

La certificación de este modo aporta benéficos tanto para la empresa como para los trabajadores, proporcionando:

- valor añadido a la organización
- aumento y uniformidad de la cualificación
- ahorro de costes,
- compromiso con un código de conducta,
- confianza por el reconocimiento de la marca,

Actualmente se están certificando siete métodos de Ensayos en tres niveles de cualificación y cuatro sectores de actividad.

La certificación emitida se organiza en tres niveles de cualificación, siete métodos, cuatro sectores y varias aplicaciones limitadas:



AGUDEZA VISUAL Y APRECIACIÓN DEL COLOR  
EXPERIENCIA  
FORMACIÓN ESPECÍFICA

## **MÉTODOS**

Ultrasonidos

Radiografía

Líquidos Penetrantes

Partículas Magnéticas

Corrientes Inducidas

Inspección Visual

Ensayo de Fugas

## **SECTORES**

Materiales Metálicos (modelados, forjados, hechurados)

Materiales No Metálicos (hormigón, cerámicas, etc)

Aeronáutico

Soldadura

## **APLICACIONES LIMITADAS**

Interpretación radiográfica

Medición de espesores mediante ultrasonidos

Inspección ultrasónica por puntos

Inspección automática por ultrasonidos

Inspección por corrientes inducidas de productos semielaborados

Inspección por corrientes inducidas de tubos de generador de vapor y cambiadores de calor

## **VALIDACIÓN E INTERCOMPARACIÓN**

La AEND se configura como una entidad independiente de cualquier interés predominante, de este modo es una organización idónea para prestar los servicios de VALIDACIÓN e INTERCOMPARACIÓN.

La validación de un procedimiento de ensayo, es la verificación que cubre los objetivos de inspección propuestos, es decir, a través de las soluciones adoptadas es capaz de detectar las discontinuidades postuladas.



Para ello es necesario verificar los objetivos propuestos, las justificaciones técnicas y realizar pruebas sobre maquetas con discontinuidades conocidas y con discontinuidades ocultas.

Actualmente se está desarrollando una asistencia técnica para UNESA, consistente en la validación de procedimientos de inspección mediante END aplicables a diferentes componentes de centrales nucleares españolas.

La intercomparación trata de que diferentes laboratorios realicen ensayos sobre probetas con discontinuidades esenciales ocultas, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos.

Es una herramienta privilegiada para evaluar la competencia técnica de los laboratorios. La participación en intercomparaciones viene fijada por la norma ISO 17025, que han de cumplir los laboratorios acreditados para que evalúen la calidad técnica de los ensayos que realizan.

## **NORMALIZACIÓN**

La AEND participa como miembro de pleno derecho en el Comité Técnico de Normalización Europeo CEN/TC 138, con representación en los diferentes grupos de trabajo y ostentando la secretaría y presidencia de uno de los grupos de trabajo, el WG 5 “Partículas Magnéticas”.

Este comité elabora las normas de terminología, equipos y principios generales de los métodos de Ensayos no Destructivos, así como de los diversos principios de cualificación y certificación de personal que realiza Ensayos No Destructivos.

Ostenta así mismo, la presidencia y secretaría del Comité Técnico de Normalización, CTN 130 de AENOR que se responsabiliza de la preparación de las normas Nacionales de Ensayos No Destructivos. También participa en el Comité de Normalización de ISO TC 135.

### **6.5.- FORMACIÓN**

El conjunto de habilidades necesarias para un profesional de ensayos no destructivos pueden adquirirse de diversas formas: por estudio, por entrenamiento y, sobre todo, por experiencia. Es claro que ésta no es transmisible y su adquisición requiere tiempo; ahora bien, si no existe una base de conocimientos y no se poseen unos hábitos de trabajo estructurados orgánicamente bajo la mano de una dirección experta, puede convertirse la experiencia, en muchos casos, en un acumular recetas y vicios difíciles de eliminar, siendo luego complicada la adaptación a problemas distintos de los conocidos, por poco que éstos difieran.

Las destrezas, conocimientos y habilidades requeridas para el desempeño de sus funciones no se adquieren mediante la formación académica reglada. Esto hace necesaria la existencia de cursos específicos y centros donde éstos se impartan.

Si bien la Asociación había realizado acciones formativas con anterioridad, es en 2001 cuando se inician de forma regular las actividades de formación.

La AEND promueve un amplio programa estable de formación en Ensayos no Destructivos y se mantiene en la investigación permanente de nuevos productos de formación a través de la progresiva adaptación a las necesidades de nuestros clientes, adaptando los temarios y sus horarios y las modalidades de impartición.

Los cursos que imparte la AEND cumplen con los requisitos necesarios establecidos por la norma europea EN 473 de certificación de personal que realiza Ensayos No Destructivos y siguen las recomendaciones elaboradas por el Internacional Comité for Non Destructive Testing (ICNDT WH 15-85), así como, los recogidos en el Technical Report del CEN ISO/TR 25107.

### **Calendario Permanente de Cursos:**

Se mantiene un calendario de cursos en los diferentes métodos de END (Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas, Inspección Visual, Corrientes Inducidas, Radiología Industrial, Ultrasonidos) y para diferentes niveles de cualificación. Este tipo de cursos que se imparte en nuestras instalaciones, puede realizarse bajo pedido en el domicilio del cliente, adaptándose a horarios y jornadas.

La AEND es pionera en la impartición de curso semipresenciales que facilitan a los alumnos la adquisición de conocimientos cuando tiene problemas de compatibilidad de fechas lugares u horarios. De este modo las partes teóricas se realizan a distancia debiendo realizar las prácticas y la validación de conocimientos de forma presencial. También existen cursos autorizados encaminados a la preparación para la certificación principalmente de nivel 3.

Dentro de las actividades de formación se desarrollan programas a media según las especificaciones del cliente para la aplicación específica de los END en distintas áreas

#### **Formación Continua:**

La AEND participa en la formación y perfeccionamiento de personas en activo a través de los diferentes programas FORCEM, colaborando con organizaciones patronales como CONFEMETAL, SERCOBE, etc.

#### **6.6.- COMITÉ NACIONAL AEROESPACIAL DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (CNAEND)**

Dentro de la AEND actúa como órgano de referencia para la Industria Aeroespacial Nacional y como tal puede abordar cualquier actividad relacionada con los Ensayos no Destructivos de acuerdo a la norma EN 4179.

CNAEND se crea a iniciativa de Dirección General de Aviación Civil por una mayoría significativa de las empresas Aeroespaciales españolas con objeto de cumplir con la normativa requerida (COMMISSION REGULATION (EC) No 2042/2003 of 20 November 2003 on the continuing airworthiness of aircraft and aeronautical products, parts and appliances, and on the approval of organisations and personnel involved in these tasks), que incluye la necesidad de cumplir con la EN4179