

## EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO

I. Lombillo<sup>(1)</sup>, L. Villegas<sup>(1)</sup>, D. Silió<sup>(2)</sup>, C. Hoppe<sup>(1)</sup>, GTED-UC<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria,  
Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.  
Teléfono: 942201743, Fax: 942201747, e-mail: [ignacio.lombillo@unican.es](mailto:ignacio.lombillo@unican.es), [luis.villegas@unican.es](mailto:luis.villegas@unican.es),  
[carlos.hoppe@unican.es](mailto:carlos.hoppe@unican.es)

<sup>(2)</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria,  
Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.  
Teléfono: 942200933, Fax: 942201385, e-mail: [delfin.silio@unican.es](mailto:delfin.silio@unican.es)

<sup>(3)</sup>Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria  
Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.  
Teléfono: 942201743, Fax: 942201747, e-mail: [gted@unican.es](mailto:gted@unican.es), web: <http://grupos.unican.es/gted/>

### Resumen

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.

A este respecto se va a aportar una descripción de las últimas tecnologías y las diferentes tendencias existentes en el panorama internacional. Las técnicas a tratar serán las relacionadas con gatos planos, hole-drilling aplicado a la rehabilitación (método Donostia), técnicas dilatométricas, la endoscopia y la videoscopia, la termografía aplicada al patrimonio, la técnica radar o GPR (Ground Penetrating Radar), las técnicas basadas en la propagación directa tanto de pulso sónico como ultrasónico, la técnica de impulso-eco, y las técnicas tomográficas tanto sónicas, ultrasónicas como de radar

**Palabras clave:** Ensayos no destructivos, gatos planos, hole drilling, técnicas acústicas, termografía, georadar.

### 1 La técnica de gatos planos.

El ensayo de gatos planos (Flat Jacks en terminología anglosajona) es un método directo e in situ que requiere solamente la remoción de una porción de mortero de las juntas de una fábrica pétreo o de ladrillo, por ello que se considera un ensayo ligeramente destructivo al ser un daño temporal y fácilmente reparable después de realizar el ensayo.

Se emplea para la evaluación no destructiva de algunas propiedades mecánicas y de deformabilidad de los materiales que conforman la estructura de fábrica.

### 1.1 Antecedentes

El ensayo de gato plano proviene del campo de la mecánica de las rocas. Fue inventado por el ingeniero francés Eugene Freyssinet en 1934 y a principios de los años 80 el investigador italiano Paolo Rossi, adaptó el método para poderlo emplear en fábricas de ladrillo y mampostería.

### 1.2 Objetivos de ensayo

El objetivo de la técnica del gato plano consiste en obtener información estimativa y fiable sobre los siguientes parámetros:

- Estimación del estado tensional de compresión en una zona muy local de la estructura.
- Estimación de las características de deformabilidad (módulo de deformación y coeficiente de Poisson) de los materiales que la forman.

El ensayo queda dividido en dos fases, en la primera, se utiliza un gato plano para estimar el estado tensional de compresión en el punto elegido de la estructura; en la segunda fase, se emplean dos gatos planos con el fin de estimar las características de deformabilidad del material existente entre los dos gatos planos citados.

Existen varias normativas vigentes para la evaluación de fábricas mediante la técnica de gatos planos. En Estados Unidos fueron desarrolladas por el ASTM (American Society for Testing and Materials), siendo aprobadas en 1991, actualmente existe una actualización de las mismas (C1196-04: “Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements”; C1197-04: “Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method”). En Europa, se emplea la normativa RILEM aprobada en 1990 (RILEM LUM.D.2: “In-situ stress tests on masonry based on the flat jack”; RILEM LUM.D.3: “In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack”).

Un gato plano, en general, consiste en dos planchas de acero inoxidable soldadas a lo largo de las esquinas con uno o dos puertos de entrada y salida, que conectados a un circuito hidráulico con bomba son capaces de suscitarle una presión interna.

Se puede fabricar con diferentes formas y tamaños. Las dimensiones actuales están determinadas por su función, por la técnica empleada para preparar la hendidura y por las propiedades de la fábrica que va a ser ensayada. Una regla general para obtener resultados representativos del estado de tensión real del conjunto de la fábrica es emplear el mayor tamaño posible de gato plano. Un gato plano ideal ha de rellenar completamente la hendidura en la junta de mortero, si un gato plano no tiene la dimensión suficiente para rellenar la roza por completo, se emplean placas de relleno.

### 1.3 Descripción del ensayo

El ensayo con gato plano se lleva a cabo en dos fases. En primer lugar se determina el estado tensional a compresión de la fábrica y en la segunda, las características de deformabilidad.

El ensayo se lleva a cabo teniendo en cuenta las siguientes indicaciones:

- Deberían realizarse varios ensayos (entre 3 y 5) en cada área de interés para obtener una muestra estadísticamente significativa
- Se deberán evitar los lugares de concentración de tensión, como cambios en la sección transversal y la periferia de huecos existentes

No es necesario y a menudo no es posible poner en carga todo el grosor de la pared, dado los grandes espesores que pueden alcanzar los muros de fábrica antiguos. No obstante, en todos los casos ha de ser

ensayada al menos una de las hojas de la fábrica. Los resultados obtenidos se refieren solamente a la hoja que ha sido ensayada.

### 1.3.1 Estimación in situ del estado tensional a compresión

Este ensayo está basado en el principio de liberación parcial de tensiones. Implica la eliminación local de tensiones, seguida de una restitución controlada del nivel de tensiones eliminado (Figura 1).

Inicialmente se colocan sobre la estructura unas bases verticales de medida midiéndose la distancia  $d_i$  entre puntos por medio de un extensómetro. A continuación, se realiza un corte normal entre los dos puntos mencionados empleando una sierra con disco de diamante u otro útil de corte adecuado. Debido al reajuste tensional, la distancia  $d$  existente entre dichos puntos será menor que la inicial:  $d < d_i$ . Con posterioridad se coloca un gato plano en el corte realizado, conectándose a una bomba hidráulica para, seguidamente, incrementar gradualmente la presión en el gato (Figura 2) hasta que se recupera la distancia original existente entre los puntos de medida  $d = d_i$ .

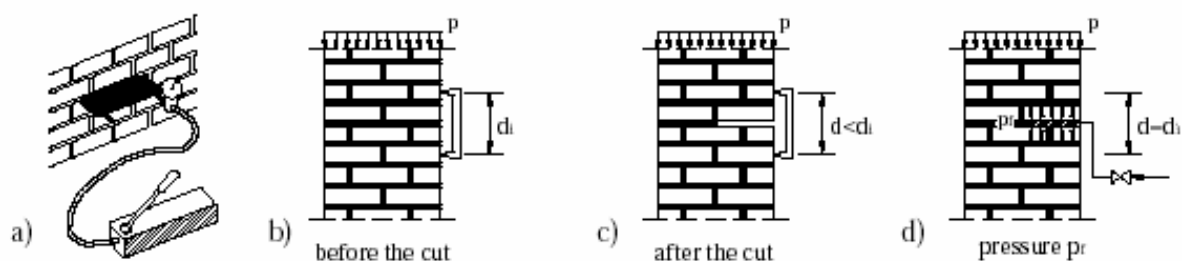


Figura 1 - Fases del ensayo de la medida del estado de tensión. [3]

En este punto la presión en el interior del gato plano ( $p_i$ ) puede relacionarse con el estado tensional preexistente en la dirección normal al plano de corte ( $p$ ). Dicho estado tensional en un punto de la estructura se calcula según la expresión:

$$\sigma = p \cdot K_m \cdot K_a \quad (1)$$

donde:

- $p$ : Presión comunicada al gato plano por la bomba hidráulica, en  $\text{Kp/cm}^2$ ,
- $K_m$ : Constante adimensional propia de cada gato plano
- $K_a$ : Relación entre el área del gato plano y el área media del corte realizado en la estructura ( $K_a < 1$ ).

Los gatos planos están diseñados para suministrar una presión a la fábrica donde son ensayados, linealmente dependiente de la presión hidráulica interna. Dicha dependencia se explicita mediante la constante adimensional  $K_m$  determinada durante el proceso de calibración, función de las propiedades geométricas del gato plano y de su rigidez. Dicha constante siempre es menor que la unidad ( $K_m < 1$ ) pues por la rigidez inherente al dispositivo parte de la presión interna es absorbida por el propio gato plano y por ende no es transmitida a la fábrica circundante.

En gatos planos nuevos, el coeficiente de calibración  $K_m$  viene proporcionado por el fabricante. Si bien debido al uso repetido, los gatos planos sufren un ablandamiento que exige sean recalibrados después de 4 ó 5 ensayos o con menor frecuencia si existen deformaciones excesivas. Los gatos planos deberían ser restituidos a su espesor después de cada ensayo para asegurar que el factor de calibración permanece inalterado.

En relación a la constante  $K_a$ , los puntos de contacto pueden obtenerse situando entre el gato plano y la superficie de las placas de relleno de la roza un calco (lámina de papel carbonoso) dispuesto entre dos láminas de papel ordinario. El papel es marcado en los lugares de contacto, contrariamente a lo que

ocurre en los sitios de no contacto. De esta forma puede obtenerse el factor  $K_a$  como la relación entre la zona de contacto y el área del gato plano por mera geometría.

### 1.3.2 Determinación de las características de deformabilidad

En este ensayo se realizan dos cortes normales a la superficie de la estructura de estudio a una distancia entre ellos, en general, de 40-50 cm. Previamente se sitúan unas bases verticales de medida, de la forma más simétrica posible sobre la fábrica, dentro de la zona comprendida entre los futuros cortes, a una distancia determinada mediante extensómetro.

A continuación se realizan dos cortes paralelos para insertar los gatos planos, en este ensayo se emplearán preferentemente gatos planos de tipo rectangular o semirectangular, ya que el gato plano semicircular no aplica estados de tensiones uniformes. Estos cortes producen el aislamiento de la parte del muro de fábrica existente entre las rozas constituyendo una “probeta” in situ que se considera liberada de cargas.

Una vez introducidos los gatos planos en los cortes (Figura 3), se comunican pequeños escalones de presión mediante bomba hidráulica, se tomará lectura de la distancia entre puntos de referencia  $d_i$  ( $d_i < d$ ) para cada escalón de presión  $i$ .



Figura 2 - Ensayo de gato plano simple



Figura 3 - Ensayo de gato plano doble

Mediante incrementos graduales de la presión puede determinarse la relación entre tensión y deformación. También pueden simularse ciclos de carga-descarga.

El valor estimado de la tensión, en la zona delimitada por los gatos planos, para cada estado de presión  $i$  se calcula de la misma forma, ecuación (1) que en el ensayo de tensión in situ aludido con anterioridad. Para cada escalón de presión  $i$  corresponderá una deformación que se calcula mediante la expresión:

$$\varepsilon_i = (d - d_i) \cdot K_e \quad (2)$$

donde:

- $\varepsilon_i$ : Deformación correspondiente al estado de presión del escalón  $i$ .
- $d$ : Distancia inicial existente entre los puntos de referencia.
- $d_i$ : Distancia entre puntos de referencia para el escalón de presión  $i$ .
- $K_e$ : Constante de deformación del extensómetro.

Estimada la presión y deformación para cada uno de los escalones de presión  $i$ , se puede dibujar la gráfica tensión-deformación que permite estimar el módulo de elasticidad tangente en el origen para cada uno de los escalones de presión  $i$ , según la ecuación:

$$E_{ti} = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (3)$$

donde:

- $\sigma_i$ : Tensión correspondiente al estado de presión  $i$  (Kp/cm<sup>2</sup>).
- $\varepsilon_i$ : Deformación correspondiente para el estado de presión  $i$ .

En el mismo ensayo se puede estimar el coeficiente de Poisson colocando horizontalmente puntos de medida a una distancia inicial  $D$  conocida y aplicando unos escalones de presión determinados.

## 2 Técnica hole drilling

La técnica de ensayo fue puesta a punto por el Prof. Santiago Sánchez-Beitia y bautizada como método Donostia.

El método propuesto se enmarca en el campo de los Ensayos No Destructivos (NDT) o Casi No Destructivos (Minor Destructive Testing) para cuantificar las tensiones reales de servicio a la que están sometidas las fábricas pétreas y de ladrillo como elementos portantes en construcciones del Patrimonio Arquitectónico.

### 2.1 Fundamentos

La técnica, adaptada de la descrita en la Norma ASTM E837-99: "Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method", se basa en la medida de las deformaciones captadas por 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 pétreas y de ladrillo puesto que las dimensiones empleadas en este caso son al menos treinta veces mayores que las descritas en dicho documento. Consecuentemente, en la actualidad la técnica Hole Drilling propuesta no dispone de instrumento normativo estándar alguno para su ejecución. 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.

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 ( $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$ ) registradas en tres direcciones (Figura 4). En la figura siguiente se observa la disposición convencional de tres bandas extensométricas y la zona de taladrado de acuerdo con la Norma ASTM E837-95.

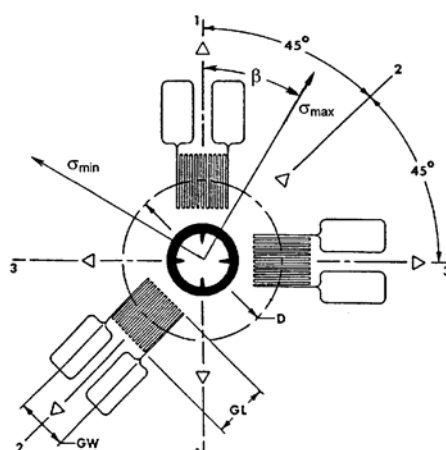


Figura 4 - Disposición convencional de las bandas extensométricas y del taladro (círculo central) de acuerdo con la Norma ASTM E837-99. Las galgas 1 y 3 se disponen perpendicularmente entre sí, mientras que la galga 2 se dispone sobre la bisectriz, en el lado opuesto, de dichas direcciones. “D” es el 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. [7]

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. 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.

## 2.2 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental es laborioso y se compone de varios pasos que tienen todos ellos una fuerte incidencia en los resultados. 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:

1. Elección y pegado de las bandas extensométricas
2. Una vez adheridas las bandas extensométricas, se conectan mediante “medio puente de Wheastone” a un equipo multicanal de registro de deformaciones.
3. Registro de deformaciones antes del taladrado
4. Taladrado
5. Registro de las deformaciones después del taladro
6. Obtención de los estados tensionales

Las tensiones principales y sus direcciones se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{A} - \frac{1}{B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{A} + \frac{1}{B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \arctan g \left( \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \right) \quad (6)$$

siendo  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$  las deformaciones registradas a  $0^\circ$ ,  $225^\circ$  y  $90^\circ$  con una dirección de referencia,  $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$  son las tensiones principales máxima y mínima respectivamente y  $\beta$  es el ángulo entre  $\sigma_{\max}$  y la dirección de  $\varepsilon_1$  medido en sentido antihorario (también es el ángulo entre  $\sigma_{\min}$  y la dirección de  $\varepsilon_3$ ). Para la deducción del ángulo  $\beta$  debe de tenerse en cuenta los signos del numerador y del denominador. 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. Dichas constantes A y B pueden determinarse de forma teórica en función de unos parámetros adimensionales (a y b), del módulo de Young (E) y del coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), o bien experimentalmente mediante un ensayo basado en la realización de un taladro idéntico al llevado a cabo en el elemento portante en servicio, pero en este caso en una probeta paralelepípedica de similar calidad al material ensayado in situ.

### 3 Técnicas dilatométricas

La técnica dilatométrica o presiométrica se trata de un ensayo de carga in situ realizado sobre un muro en el que se introduce una tensión mediante una sonda cilíndrica que alojada en una perforación practicada en la pared puede dilatarse radialmente. Se trata de un método adecuado de cuantificación in situ de propiedades mecánicas de fábricas involucradas en elementos de gran espesor.

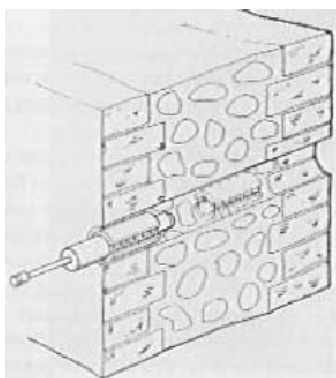


Figura 5 - Perspectiva general de los dispositivos involucrados.

A partir de las lecturas del ensayo puede obtenerse la curva tensión – deformación, de la que pueden estimarse parámetros mecánicos como el módulo presiométrico Menard o el límite elástico.

La unidad de control está equipada con dispositivos para una regulación precisa de la presión aplicada a la sonda y registrar sus incrementos volumétricos con las variaciones de presión y con el tiempo.

La sonda incluye una célula de medición central, llena del agua. Sus cambios de volumen pueden leerse en el controlador de volumen. La sonda está totalmente protegida por una cubierta de goma que es inflada por el gas para formar las 2 células de guarda laterales. La presión aplicada a las paredes de perforación es mantenida constante a lo largo de las 3 células (las dos de guarda laterales y la central de medida) mediante un regulador diferencial de presión, de esta forma se garantiza que la deformación es verdaderamente radial a lo largo de la célula central de medición. Un cable coaxial flexible y de alta resistencia, conecta la sonda con la unidad de control.

El procedimiento de ensayo consiste en taladrar una perforación (Figura 5), cuidando de reducir al mínimo la perturbación en la pared, con un diámetro (en general de unos 50 – 70 mm) compatible con

el tamaño de sonda a introducir (de unos 200 mm de longitud). La sonda es deslizada por la perforación hasta la profundidad requerida de ensayo, con posterioridad se aplica la presión en incrementos iguales. Tanto la presión suministrada como el incremento de volumen son registrados por la unidad de control. La sonda ejerce una tensión radial conocida contra el material que la rodea. Relacionando esta tensión con la deformación medida en la misma dirección (a partir de consideraciones de variación volumétrica) se obtiene un índice del módulo de deformación de la fábrica en la zona de aplicación.

Existe la posibilidad de desplazar la sonda y realizar el ensayo en distintos puntos a lo largo del recorrido facilitando la obtención de perfiles de distribución de determinadas propiedades mecánicas.

## 4 Técnicas de inspección visual o endoscopia.

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. Actualmente estos equipos permiten la toma de medidas en puntos inaccesibles empleando una cabeza compuesta de dos lentes que por efecto estereoscópico permiten estimar con cierta exactitud distancias.

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 todo ello que la endoscopia ofrece excelentes posibilidades para el examen no agresivo concebido como complemento de los métodos de exploración convencionales.

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. Esto pone al alcance del observador competente un cuadro con el que formarse un juicio rápido y certero.

Hay varios tipos de endoscopios según sean rígidos o flexibles y según sea la transmisión de la imagen, de lentes o de fibras ópticas.

### 4.1 Endoscopios rígidos o boroscopios.

Entre los boroscopios, según el tipo de transmisión de imagen, puede distinguirse entre endoscopios rígidos de lentes (Figura 6) y boroscopios de fibras ópticas.

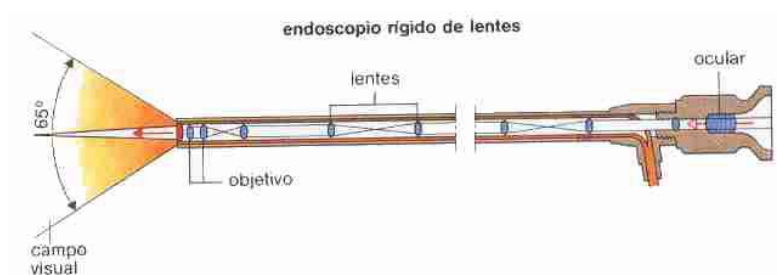


Figura 6 - Endoscopio rígido de lentes. [1]

Los primeros se componen, 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. Por su parte los segundos presentan características equivalentes a la de los Flexoscopios, por ello que se pase directamente a dar unas pinceladas de dichos dispositivos.

## 4.2 Endoscopios flexibles o flexoscopios.

Cuando el acceso al espacio a examinar es sinuoso, se utilizan endoscopios flexibles o "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.

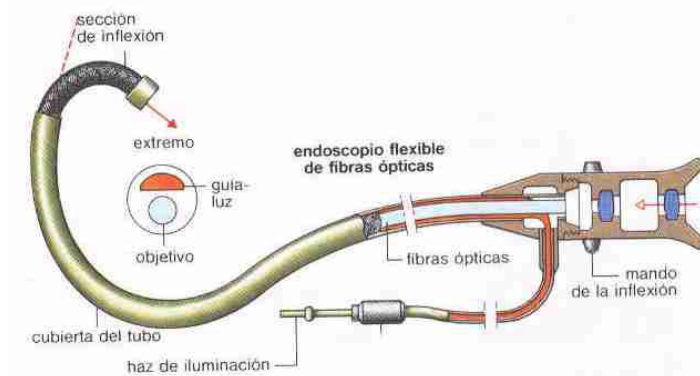


Figura 7 - Flexoscopio. [1]

Dentro de este tubo flexible obviamente no puede instalarse un sistema de lentes, por ello que este tipo de endoscopio se fundamenta en un sistema de transmisión de imágenes mediante delgadas fibras de vidrio (haz transmisor de imágenes, Figura 7), a través de las cuales se transmite la imagen del objetivo al ocular.

La resolución de la imagen de un endoscopio flexible y 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. Puesto que cada fibra sólo transmite un punto de la imagen, es preciso reunir muchas fibras en un haz. 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.

## 5 Técnicas acústicas.

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 8).

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.

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).

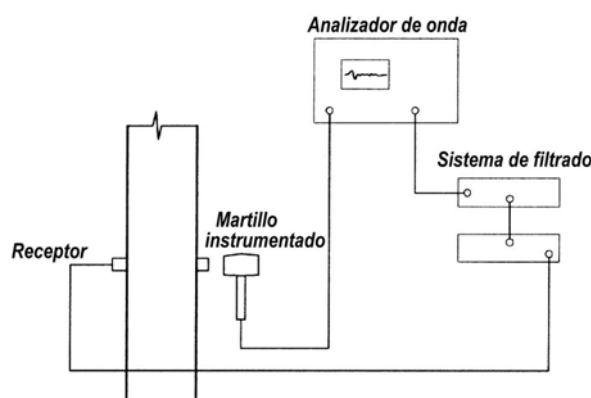


Figura 8 - Equipamiento del ensayo sónico.

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, “ondas primarias”, son las que presentan mayor velocidad de propagación. Las ondas S, “ondas secundarias” se reciben más tarde que las longitudinales. Las ondas R, “ondas de Rayleigh o de superficie”, son las más lentas y no penetran en el material más allá de su longitud de onda.

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 elasticidad,  $E$ , el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , y la densidad,  $\rho$ , como sigue (Krauthrämer y Krauthrämer):

$$C_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (7)$$

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 espesor del elemento que puede ser investigado. 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: en metales 15 MHz, en hormigones y madera de 45-54 KHz., y para fábricas es preferible emplear un pulso sónico con una frecuencia alrededor de los 3,5 kHz.

Pueden realizarse tres tipos de ensayo el directo, de transparencia o a través del muro, el semidirecto y el indirecto o impacto eco.

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

### 5.1 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.

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.

### 5.2 Métodos sónicos.

Los métodos sónicos se basan en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia (frecuencias sónicas) mediante un martillo instrumentado.

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.

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:

$$V_{onda} = \frac{D_{transmisor-receptor}}{t_{viaje}} \quad (8)$$

El empleo de los ensayos sónicos para la evaluación de estructuras de fábrica tiene, entre otros 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, y detectar cuando las características físicas de los materiales han cambiado.

### 5.3 Impacto eco.

Primeramente desarrollado para hormigones, el impacto-eco es una variación del método de transparencia 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.

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.

### 5.3.1 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 en un material y la densidad del mismo. 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  $90^\circ$ , incidencia normal).

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. 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.

### 5.3.2 El método.



Figura 9 - Equipamiento de un ensayo de impacto-eco. [8]

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. La excitación superficial (generalmente un impacto, Figura 9) 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).

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. El principio del análisis frecuencial se ilustra en la Figura 10.

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 referida Figura 10, 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:

$$f = \frac{\beta \cdot C_{pp}}{2 \cdot T} \quad (9)$$

Donde:

- $C_{pp}$ : Velocidad de la onda-P a través del espesor de la placa.
- $T$ : Profundidad de la interfase reflectora.
- $\beta$ : Factor que tiene en cuenta la velocidad real de la onda. Lin y Sansalone comprobaron que la velocidad de la onda era aproximadamente un 96% de la velocidad de la onda-P, esto es,  $\beta = 0.96$ .

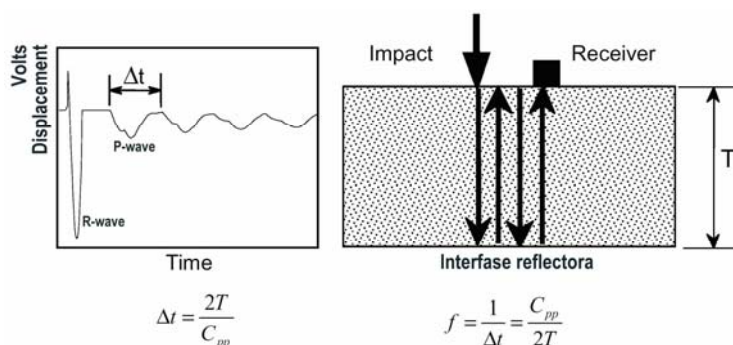


Figura 10 - Principio del análisis frecuencial: en el dominio de tiempo la onda tiene una periodicidad debida a la llegada de la onda-P como resultado de las múltiples reflexiones entre la parte superior y la interfase reflectora; la frecuencia de llegada de la onda-P se relaciona directamente con el espesor de la placa. [8]

La ecuación (3) es la relación básica para interpretar los resultados de los ensayos de impacto-eco.

## 6 Técnicas electromagnéticas.

### 6.1 Termografía Infrarroja.

La radiación infrarroja es la región del espectro electromagnético entre la luz visible y las microondas, con un rango de longitudes de onda comprendido entre 0.75 y 10  $\mu\text{m}$ .

La termografía de infrarrojos es una herramienta para el análisis de temperaturas e imágenes que mediante visión térmica permiten detectar anomalías y diagnosticar acciones correctoras.

El principio de la termografía se basa en que todo cuerpo a temperatura superior al cero absoluto (-273.15 °C) emite radiación en forma de calor, con una distribución espectral en función de la

temperatura, de la composición del cuerpo y de su emisividad. A temperatura ambiente, la radiación térmica esta situada en la banda del infrarrojo, por tanto, para su estudio será necesario el empleo de equipos termográficos que midan la intensidad de la radiación de los objetos y calculen así la temperatura de los mismos.

Para el ensayo de termografía infrarroja es necesario la existencia de un gradiente térmico (generalmente diario y/o estacional) para inducir la respuesta térmica de las superficies. Se considera que una diferencia de 20 °C es satisfactoria, así, las medidas se tomarán sobre edificios que estén calientes a temperaturas ambiente frías. En función del tipo de edificio las inspecciones se deben realizar en diferentes momentos del día:

- En edificios con muros de carga ha de aplicarse preferentemente después de anochecer, ya que como tienen espesor considerable aumenta el volumen que puede almacenar calor, es por esto que al anochecer es cuando los muros de carga emiten más radiación térmica, dado que por la falta de radiación solar se produce un descenso de las temperaturas más acusado del resto de elementos.
- En edificios con estructuras internas ha de llevarse a cabo al amanecer, ya que el interior del edificio normalmente, al amanecer, está a mayor temperatura que el exterior, además el muro de fachada permanece todavía a baja temperatura lo que resulta en un mayor contraste de temperaturas.

En el sector de la rehabilitación, las aplicaciones más habituales son la localización de humedades, la identificación de estructuras, la localización de huecos cegados, la identificación de grietas, el reconocimiento de zonas de acumulación de calor y de pérdidas del mismo, la localización de diferentes materiales, el análisis del estado de pinturas murales y del estado de conservación de materiales.

## **6.2 Técnicas radar (Georadar o GPR – Ground Penetrating Radar).**

La técnica de radar es una aplicación en desarrollo, basada en el estudio de las reflexiones de ondas electromagnéticas. Esta técnica se emplea para el estudio en estructuras verticales y horizontales de fábrica y hormigón.

Los aplicaciones más habituales en el sector de la rehabilitación son la localización de grandes vacíos e inclusiones de materiales diferentes (como acero, madera, etc.), la identificación del estado de conservación o daño de estructuras, la definición de la presencia y nivel de humedad, el control de la eficacia de reparación por técnicas de inyección y, en fábricas, descubrir la morfología de la sección de muros de múltiples hojas de piedra y/o ladrillo.

### **6.2.1 Fundamentos.**

El método radar está basado en la propagación de impulsos electromagnéticos (con frecuencias de 100 MHz - 1 GHz) a través de un sólido por medio de una antena bipolar, la energía electromagnética se genera en una antena y posteriormente se recibe en otra. Los impulsos emitidos se reflejan en las interfaces de materiales con propiedades dieléctricas diferentes.

Al igual que las ondas acústicas en sólidos, la longitud de onda electromagnética es inversamente proporcional a la frecuencia (a mayor frecuencia, menor longitud de onda y mayor poder resolutivo). A su vez las ondas de frecuencias más altas presentan gran atenuación de energía y por tanto limitan la profundidad de la inspección.

Cuando las antenas emisoras y receptoras, las cuales normalmente se encuentran alojadas en una misma carcasa, se mueven a lo largo de la superficie objeto de ensayo se crean unas imágenes conocidas como radar-gramas (Figura 11), que mediante una escala de intensidad de colores indica la posición de la antena en función del tiempo.

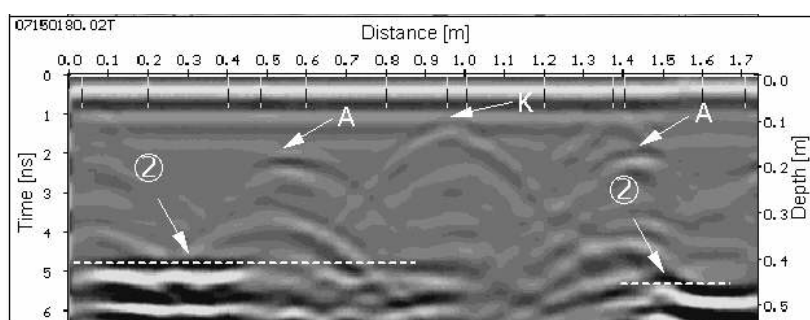


Figura 11 - Ejemplo de radar-grama.

La constante dieléctrica relativa de un material es un parámetro que representa la relación entre la velocidad de pulso electromagnética en el vacío y la velocidad a través del material examinado. Al igual que en los métodos acústicos regía el principio de la impedancia acústica, en las técnicas radar rige el “principio de dielectricidad electromagnética”, según el cual la amplitud de energía electromagnética reflejada en una interfase existente entre dos materiales está directamente relacionada con la diferencia de las constantes dieléctricas relativas de los mismos. Las ondas electromagnéticas son sensibles a interfaces con agua, mientras como ya se ha aludido las ondas acústicas lo eran a interfaces con aire, por ello que se muestran como dos métodos de inspección complementarios. En algunos casos, donde no es posible aplicar el método de radar (presencia de agua o metales), los métodos acústicos pueden ser la única solución, y viceversa, cuando la metodología acústica falla (gran presencia de huecos o grandes heterogeneidades) el radar puede detectar los elementos principales del objeto de estudio.

El equipamiento básico para este ensayo consiste en un juego de varias antenas con frecuencias diferentes, un sistema de captación de datos (ordenador portátil) y un software para el tratamiento de datos.

Un parámetro importante es la frecuencia de las antenas a emplear, pues de ella depende la resolución de la inspección, su capacidad de penetración y por ende el tamaño del elemento a investigar. Según consideraciones de casas comerciales y de expertos de reconocido prestigio, se deben emplear antenas con diferente frecuencia según el objetivo del ensayo, así en paredes de gran espesor o con alto contenido de humedad hay que ir a frecuencias del orden de 500 MHz, mientras que para paredes de menor espesor, frecuencias de 1 GHz.

## 7 Técnicas tomográficas.

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, sónicos o de radar pueden ser empleados como datos de entrada de un algoritmo de reconstrucción tomográfica para proporcionar una representación, bidimensional o tridimensional, de las propiedades internas de una determinada sección de un elemento. Por tanto la tomografía tiene la finalidad de reproducir la estructura interna de un objeto a partir de medidas recogidas desde su superficie externa.

La precisión del ensayo depende del número de transductores empleados, por lo que deberían utilizarse ocho sensores como mínimo. Todos se conectan entre sí y la unidad central 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 elemento de ensayo un color en función de la velocidad de transmisión de la onda que atraviese por ese punto.

Las técnicas de análisis tomográfico envuelven un considerable esfuerzo para adquirir el extenso conjunto de datos requerido.

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.

## Referencias.

- [1] GTED-UC (Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria), “Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido”. Santander. [libro de ponencias de la 1ª Jornada Nacional sobre Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido, noviembre 2006]
- [2] S. Sánchez Beitia, J. Barrallo, A. Zulueta. “El Método Donosita en torno a los 20 kp/cm<sup>2</sup>”. Ingeniería Civil 125/2002, págs. 113-123. [artículo]
- [3] P. Gregorczyk, P.B. Lourenço, “A Review on Flat-Jack Testing”; 2000. [artículo]
- [4] L. Binda, A. Saisi, L. Zanzi, “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. [artículo]
- [5] L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi, “Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries”, Elsevier; January 2000. [artículo]
- [6] M. P. Schuller, “Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures”. Structural Masonry. Prog. Struct. Engng Mater. 2003; 5: 239–251. [artículo]
- [7] ASTM E837-99: “Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method”. [normativa]
- [8] N. 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. [artículo]
- [9] 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. [artículo]
- [10] L. Binda, G. Lenzib, A. Saisi, “NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterization of stone masonries”; Elsevier; 1998. [artículo]
- [11] M.R. Clark, D.M. McCann, M.C. Forde, “Application of infrared thermography to the nondestructive testing of concrete and masonry bridges”; Elsevier; 2003. [artículo]