

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO: INSPECCIÓN VISUAL, TÉCNICAS ACÚSTICAS, ELECTROMAGNÉTICAS Y TOMOGRÁFICAS.

Ignacio Lombillo¹ (Ignacio.lombillo@unican.es); Elena Agudo² (elena.agudo@unican.es); Luis Villegas³ (luis.villegas@unican.es); GTED-UC⁴ (gted@unican.es).

¹ Ingeniero de Caminos, C. y P. Doctorando UC.

² Ingeniero de Caminos, C. y P.

³ Catedrático de Universidad. Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

⁴ Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander.

Resumen

El propósito de la comunicación es aportar una visión actualizada de algunas de las metodologías no destructivas basadas en la inspección visual, en técnicas acústicas, electromagnéticas y tomográficas 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, de las cuáles algunas apenas tienen desarrollo en España. Entre otras técnicas se tratarán las relacionadas con 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.

1.- 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.

1.1.- Endoscopios rígidos o boroscopios.

Entre los boroscopios, según el tipo de transmisión de imagen, puede distinguirse entre endoscopios rígidos de lentes (*Figura 1*) y boroscopios de fibras ópticas. 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.

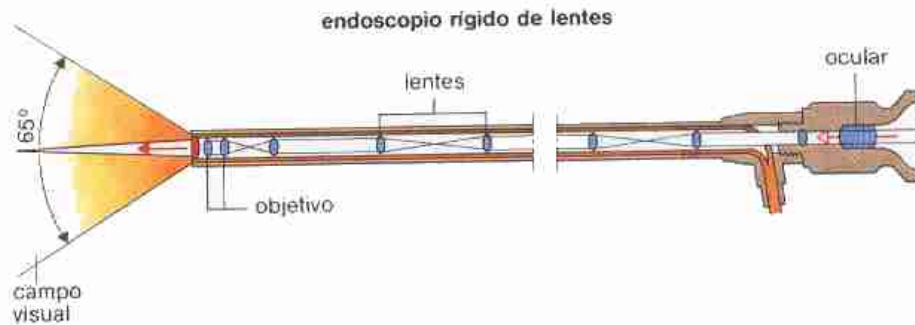


Figura 1: Endoscopio rígido de lentes. (Fuente: LABEIN)

1.2.- 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.

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 2), a través de las cuales se transmite la imagen del objetivo al ocular.

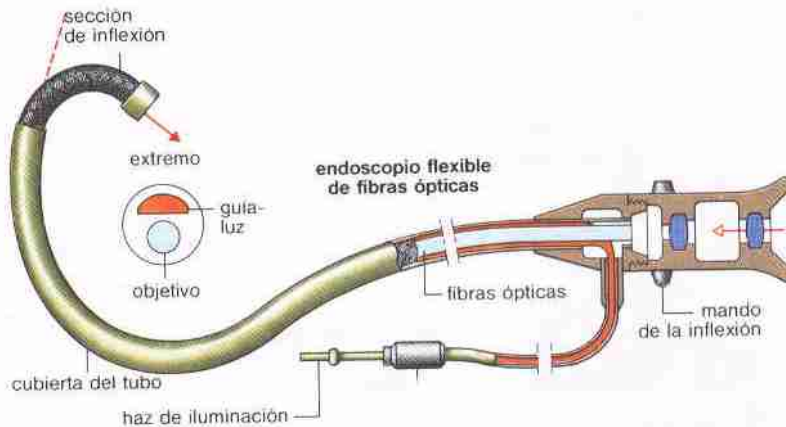


Figura 2: Flexoscopio. (Fuente: LABEIN)

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.

2.- 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 3).

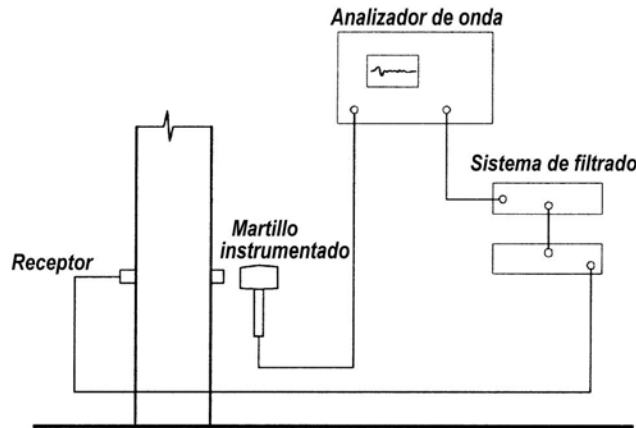


Figura 3: Equipamiento del ensayo sónico.

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).

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, ν , y la densidad, ρ , 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, λ , 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.

2.1.- 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.

2.2.- Métodos sónicos.

Los métodos sónicos se basan en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia (frecuencias sónicas) mediante un martillo instrumentado (*Figura 4*). 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:

$$V_{onda} = \frac{D_{transmisor-receptor}}{t_{viaje}} \quad (2)$$

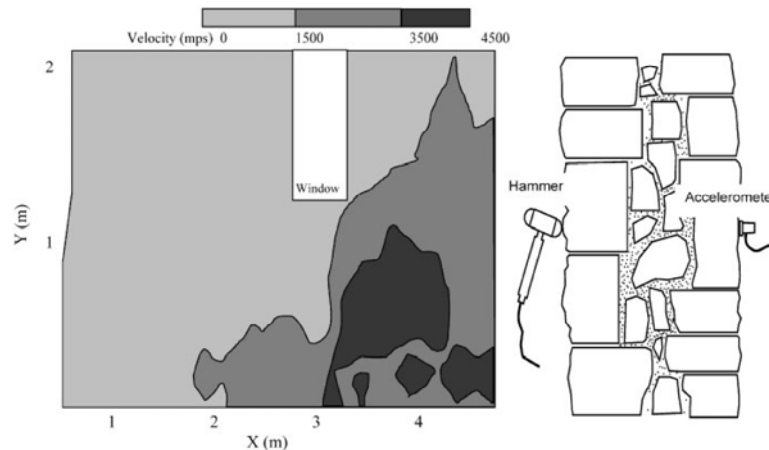


Figura 4: El contorno representa la velocidad de pulso sónico a través de una pared que fue generada para evaluar la solidez de la hoja interna de un campanario mediante el método de velocidad de pulso sónico como se muestra a la derecha. (Fuente: M. P. Schuller).

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.

2.3.- 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.

2.3.1.- 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°, 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.

2.3.2.- El método.

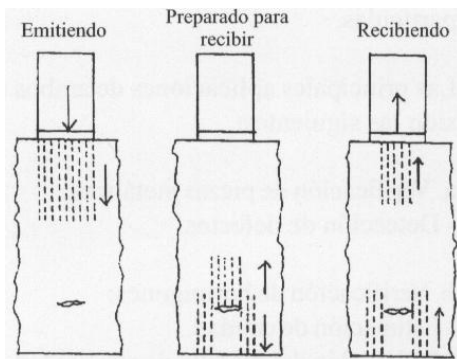


Figura 5: Método de impacto eco



Figura 6: Equipamiento de un ensayo de impacto-eco. (Fuente: N. J. Carino).

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 5). La excitación superficial (generalmente un impacto, Figura 6) 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).

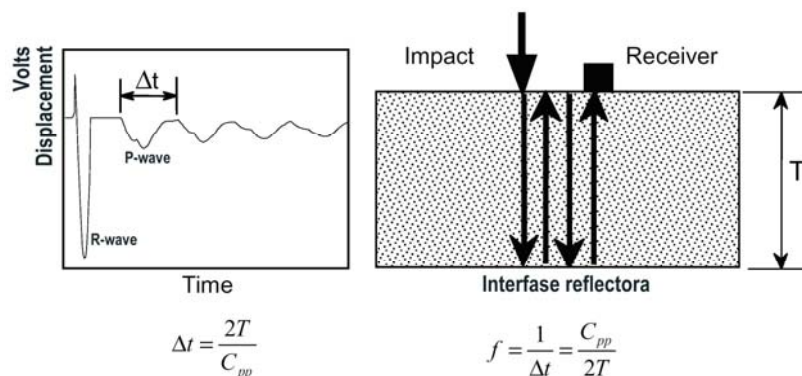


Figura 7: Principio del análisis frecuencial: en el dominio de tiempo la onda tiene una periodicidad debida a la llegada de la onda-P como resultado de las múltiples reflexiones entre la parte superior y la interfase reflectora; la frecuencia de llegada de la onda-P se relaciona directamente con el espesor de la placa. (Fuente: N. J. 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 7*.

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 7*, 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:

$$f = \frac{\beta \cdot C_{pp}}{2 \cdot T} \quad (3)$$

Donde:

- C_{pp} : Velocidad de la onda-P a través del espesor de la placa.
- T : Profundidad de la interfase reflectora.
- β : 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, $\beta = 0.96$.

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

3.- Técnicas electromagnéticas.

3.1.- 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 ($-273.15 \text{ }^\circ\text{C}$) 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 está 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 (*Figura 8*), 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.



Figura 8: Aplicación de termografía infrarroja en la Basilica di Santa Maria di Collemaggio L'Aquila. (Fuente: Università degli study di L'Aquila, Dipartimento di energetica)

3.2.-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 (*Figura 9*). Esta técnica se emplea para el estudio en estructuras verticales y horizontales de fábrica y hormigón.

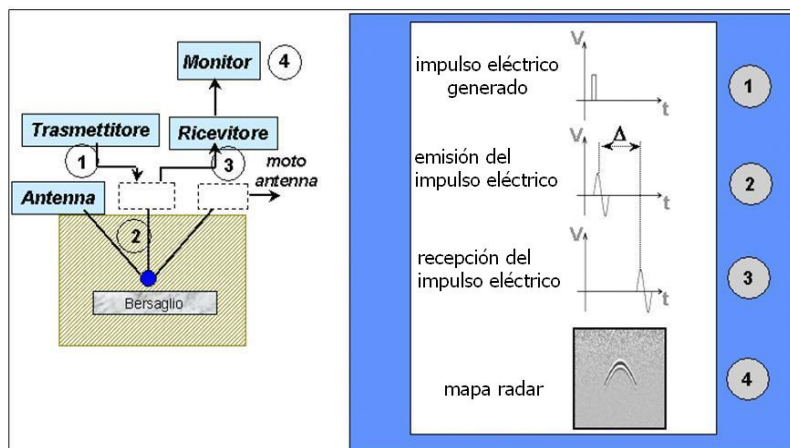


Figura 9: Fundamento del ensayo.

Las 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.

3.2.1.- 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 10*), que mediante una escala de intensidad de colores indica la posición de la antena en función del tiempo.

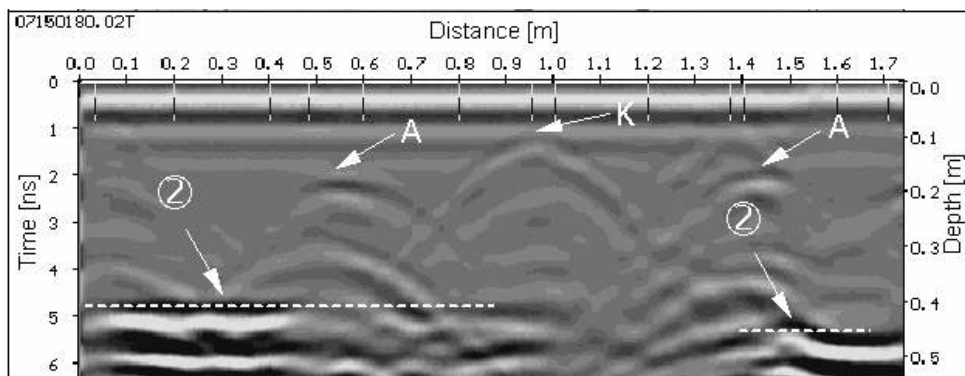


Figura 10: Ejemplo de radar-grama. (Fuente: C. Maierhofer, J. Wöstmann, C. Hennen)

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 cuál 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 muestren 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.

Tabla 1: Frecuencias óptimas para empleo en edificación	
Frecuencia de antena (MHz)	Penetración (m)
250	6,0
500	4,0
800	1,5 – 2,0

4.- 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, sínicos 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. Una distribución típica de las trayectorias de los rayos y la reconstrucción tomográfica de la velocidad se muestra en la *Figura 11*.

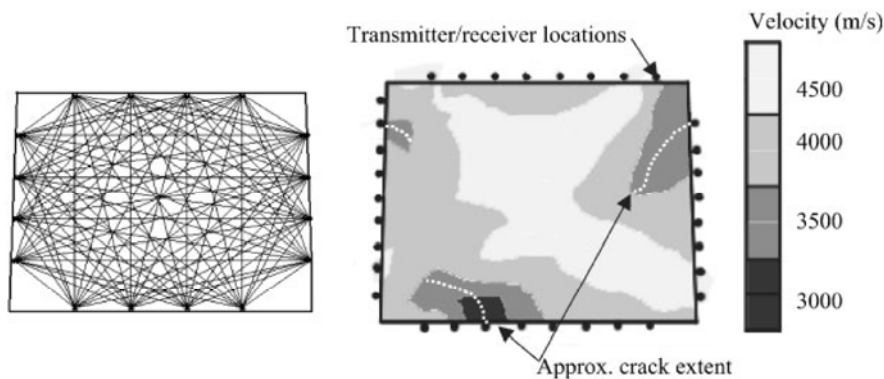


Figura 11: Los resultados tomográficos mostrados aquí representan el perfil de velocidades a través de una sección de un monumento de piedra. (Fuente: M. P. Schuller).

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.

5.- Bibliografía.

- (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) 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]
- (3) 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]
- (4) L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi, “Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures”. NDT&E International 34 (2001) 123-138. [artículo]
- (5) 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]
- (6) A. Saisi, S. Valle, L. Zanzi, L. Binda, “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. [artículo]
- (7) M. P. Schuller, “Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures”. Structural Masonry. Prog. Struct. Engng Mater. 2003; 5: 239–251. [artículo]
- (8) Da Porto, Francesca; Valluzzi, Maria Rosa and Modena, Claudio; “Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings”; DGZIP; 2003
- (9) L. Binda, G. Lenzib, A. Saisi, “NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterization of stone masonries”; Elsevier; 1998. [artículo]
- (10) Z. Li, W. Yao, S. Lee, C. Lee, Z. Yang, “Application of infrared thermography technique in building finish evaluation”; Journal of Nondestructive Evaluation vol. 19; 2000. [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]