

LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EN LA PRÁCTICA DE LA RESTAURACIÓN DE EEUU*

NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES IN THE CONSERVATION FIELD IN THE USA*

Berta de Miguel Alcalá¹ & Gabriel Pardo Redondo²

¹ Vertical Access New York Branch Manager

² Engineer at Old Structures Engineering, New York



Pulverización de agua para evidenciar filtraciones en el Empire State de Nueva York (Vertical Access)
Water spraying test for evidence infiltrations in the Empire State of New York (Vertical Access)

Palabras clave: técnicas de reconocimiento visual, técnicas acústicas, técnicas ondas electromagnéticas, UAV, TPAS.

Las técnicas no destructivas de reconocimiento y evaluación son una herramienta ampliamente utilizada en la conservación de patrimonio arquitectónico en los Estados Unidos. En el presente artículo se exponen las más utilizadas clasificándolas en técnicas de reconocimiento visual y técnicas basadas en la propagación de ondas. Dependiendo del tipo de onda, estas últimas a su vez se subdividen en técnicas electromagnéticas y técnicas acústicas. En el último apartado se exponen dos facilitadores de las técnicas de reconocimiento y evaluación: los vehículos no tripulados y Tablet PC Annotation System.

*Texto original: castellano. Traducción al inglés: los autores



Keywords: visual assessment techniques, acoustic techniques, electromagnetic techniques, UAV, TPAS

Nondestructive evaluation techniques are extensively used in the field of architectural heritage conservation in the United States. This paper outlines the most used techniques, classifying them in visual assessment techniques, and techniques based on wave propagation. Depending on the type of wave, the latter group is subdivided in electromagnetic and acoustic techniques. The final section includes a two nondestructive techniques facilitators: unmanned aerial vehicles and Tablet PC Annotation System.

*Original text: Spanish. English translation: authors

El uso de las técnicas de técnicas de reconocimiento y evaluación no destructivas o NDT (del inglés *non-destructive techniques*) aplicadas a la conservación y restauración del patrimonio es una práctica habitual en los Estados Unidos. Los NDT se emplean en las restauraciones y operaciones de mantenimiento, no sólo de edificios históricos de la era colonial, sino también de rascacielos del siglo XX. En el presente artículo se exponen las técnicas NDT más utilizadas en el campo del patrimonio arquitectónico estadounidense. Para ello se explica su funcionamiento y utilización, dependiendo de los materiales a analizar y los resultados que se pretenden conseguir.

La mayoría de los edificios patrimoniales estadounidenses se construyeron durante los últimos 200 años y deben mantenerse funcionales y adaptarse a los cambios de uso y a los nuevos códigos. Para verificar

su estado, se hace indispensable la utilización de técnicas de reconocimiento y evaluación. Hasta los años 80 del siglo XX gran parte de estas investigaciones se solían realizar extrayendo probetas que se ensayaban en laboratorio o bien con procedimientos empíricos in situ. A finales del siglo XX comenzaron a utilizarse las NDT que, aplicadas a la conservación del patrimonio arquitectónico, son un amplio grupo de técnicas utilizadas para evaluar las propiedades de un material, elemento estructural o sistema arquitectónico, de manera que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales.

El alto grado de especialización en EEUU implica grandes equipos multidisciplinares en los proyectos de restauración. Además, el elevado coste de ejecución de las obras de restauración implica la necesidad de saber con exactitud el estado del

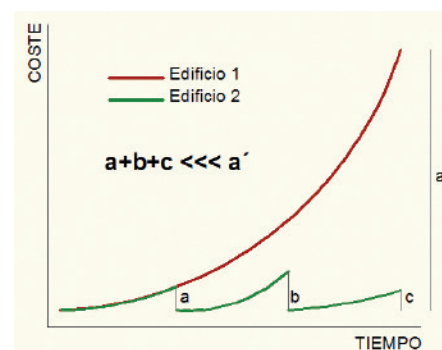
Nondestructive techniques (NDT) applied to the conservation of architectural heritage is common in the USA. Not only in old buildings from the colonial era but in more recent structures like skyscrapers, NDT are part of their restoration and maintenance operations.

This paper presents some of the most used NDT in the field of architectural conservation, explaining their principles and uses, depending on materials to analyze and objectives to achieve.

Most of the landmarks in the United States were built during the last two centuries and must continue to be functional and adapt to new uses and current codes. NDT are used to verify their state. Until the 1980s, these investigations were performed through probes extraction

that were studied at the lab or through empiric processes on site. At the end of the twentieth century, NDT started to be used to inspect architectural heritage, a wide group of techniques used to evaluate the proprieties of a material, structural element, or architectural system without altering permanently its physical, chemical, mechanical or dimensional proprieties.

The high degree of specialization in the United States involves large multidisciplinary teams in restoration projects. In addition, the high cost of restoration operations involves the need to know precisely the state of the building before the intervention. Usually, the budget for preliminary investigation is part of the restoration project and implies the use



1. Curva del decaimiento. El coste de conservar es menor que el coste de restaurar por falta de conservación (de Miguel & Pardo)

1. Decay curve. The cost of maintaining is lower than the cost of a restoration needed it due to lack of conservation (de Miguel & Pardo)

edificio antes de comenzar la intervención. La partida económica para estudios previos es normalmente un apartado del proyecto, e implica el uso de NDT. Este es uno de los motivos por los que muchos edificios tienen un programa de mantenimiento y conservación que requiere inspecciones periódicas, posponiendo así una eventual restauración (fig. 1).

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN CON NDT

Los objetivos que persigue una investigación con NDT en restauración pueden agruparse en dos categorías: control de calidad de la nueva intervención, y evaluación de los elementos existentes (Schuller y Suprenant 1995). El control de calidad asegura que la ejecución que se ha realizado cumple con las características diseñadas; por ejemplo, las radiografías para verificar las soldaduras en un elemento metálico. La evaluación de

of NDT. This is one of the reasons why many buildings have a maintenance and conservation program which requires periodic inspections that delay mayor restoration works (fig. 1)

OBJECTIVES OF AN INVESTIGATION WITH NDT

The objectives of an evaluation with NDT can be grouped in two categories: quality control of the intervention and evaluation of existing elements (Schuller & Suprenant 1995). Quality control checks that the execution of the restoration compliance with the design project; for example, X-rays to verify welding in a metallic element. The evaluation of existing elements with NDT is used to predict the behaviour of that element, localizing key features and anomalies. A common case is that of an investor who wants to

elementos existentes con NDT pronostica el comportamiento del elemento en estudio, pudiendo localizar elementos clave y anomalías. Un caso muy común es el de un inversor que quiere conocer el estado del edificio como una pieza de información valiosa en su mesa de negociación.

Ingenieros y arquitectos son los que determinan los objetivos de la investigación; acceso, estética, asuntos legales, restricciones económicas, códigos vigentes, restricciones en tiempo, etc. son otros factores a considerar.

TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE RECONOCIMIENTO Y EVALUACIÓN (NDT)

En la siguiente clasificación se incluyen las técnicas más utilizadas en el campo de la conservación arquitectónica, o que tienen mayor proyección de futuro a juicio y experiencia de los autores:

know the condition of the building as a piece of valuable information in the negotiation table.

Engineers and architects determine the objectives of the research; access, aesthetics, legal aspects, budgeting, existing codes, time limitations, etc. are other factors to consider.

NONDESTRUCTIVE TECHNIQUES OF ASSESSMENT AND EVALUATION (NDT)

The following classification includes the most used techniques in the field of architectural conservation, or those that have promising future prospect according to the authors' experience.

Visual assessment techniques

Visual assessment techniques. This group includes all those techniques that re-

Técnicas de reconocimiento visual

Este grupo engloba aquellas técnicas que requieren de la capacidad de observación del técnico que lo desarrolla.

Endoscopía. Consiste en la observación indirecta a través de un endoscopio con el fin de inspeccionar visualmente espacios inaccesibles al ojo humano. El endoscopio es un instrumento en forma de tubo, que contiene una luz y una óptica que permite la visualización del interior de una cavidad, introduciéndolo mediante un orificio natural o practicado. Existen dos tipos principales de endoscopios: los rígidos o borescopios (borescope) y los flexibles o flexoscopios/fibroskopios (fiberscopes).

Escáner láser 3D. Se trata de una técnica remota, que captura digitalmente la forma de objetos físicos utilizando rayos láser; mide el tiempo que el haz tarda en alcanzar el objeto y ser reflejado al sensor,

quire the observation of the technician.

Endoscopy. Indirect observation through an endoscope in order to visually inspect inaccessible spaces to the human eye. An endoscopy is a tube shaped instrument, with built in light and optics that allow visualization of cavities, introducing it through an existing or made hole. There are two main kinds of endoscopies: rigid or borescope, and the flexibles or fiberscopes.

3D Laser scan. It is a remote technique that digitally captures the shape of objects through a laser beam; it measures the time that the beam takes to reach the object and be reflected to the sensor in order to calculate the distance laser-object. The resulting 3D point cloud can be exported to design software such as AutoCAD (Adan et Al. 2013). Current models, like FARO Focus3D, of 5.2 Kg



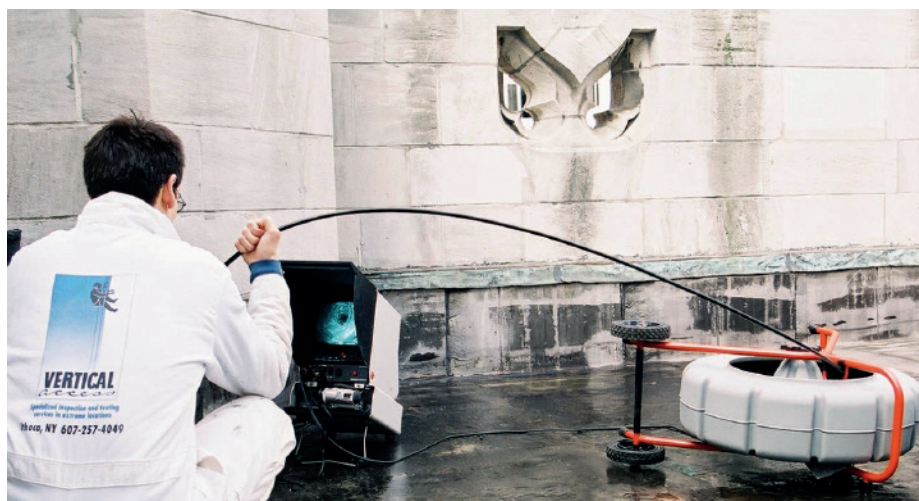
2

2. Modelo de escáner láser FARO Focus3D (de Miguel & Pardo)

2. Laser scan FARO Focus3D (de Miguel & Pardo)

3. Cámara de tubería marca SeeSnake investigando una bajante de la catedral de San Patricio en Nueva York (Vertical Access)

3. Pipe cam, Seesnake Brand, investigating a downspout in Saint Patrick's cathedral in New York (Vertical Access)



3

para calcular la distancia al mismo. La resultante nube de puntos 3D, puede ser exportada a paquetes de software como AutoCAD (Adan et Al. 2013). Los modelos actuales, como FARO Focus3D, de 5.2 Kg., con un rango 0.6-130 m toman 976.000 puntos/segundo con un error de ± 2 mm y tienen cámara integrada (fig. 2). La fundación CyArc escanea el patrimonio arquitectónico más relevante, para en el caso de una eventual catástrofe, tenerlo documentado con precisión.

and a range of 0.6-130m., takes 976.000 points/second with a precision of ± 2 mm. and has built in camera (fig. 2).

CyArc is a foundation that scans the most relevant architectural landmarks in order to have it accurately documented in case of catastrophe.

Photogrammetry. This technique of making measurements from photographs. Current software such as Gisoft PhotoScan use Structure for Motion

Fotogrametría. La técnica genera fotografías sobre las cuales poder obtener dimensiones del objeto fotografiado. Softwares actuales como Agisoft PhotoScan utilizan algoritmos Structure for Motion (SfM) multi-punto para crear una nube puntos densa que puede ser transformada a modelos 3D texturizados. La utilización de algoritmos SfM eliminan el proceso de calibración de la cámara siempre que existan puntos coincidentes en la red de diferentes fotografías. Es decir, en

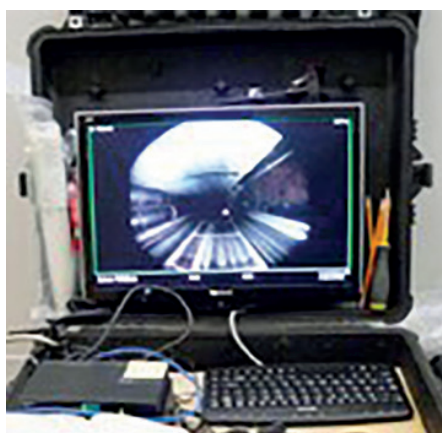
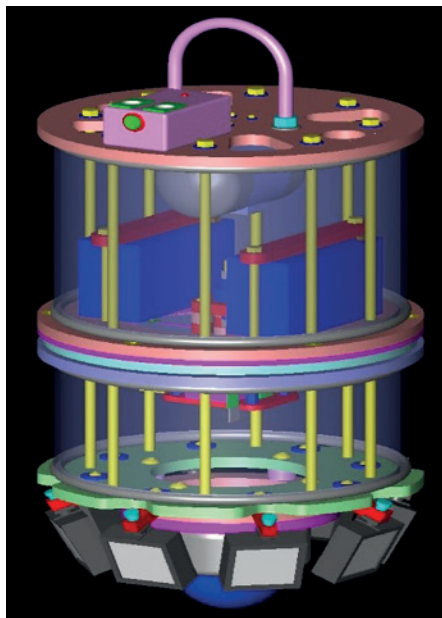
(SfM) algorithms multipoint to create a dense point cloud that can be transformed to a texturized 3D model. The use of algorithms SfM eliminates the process of calibration of the camera if there is a set of matched point correspondences, found in the overlapping photographs of a network of images. In SfM, the camera calibration, its position and matching points are resolved simultaneously. Afterwards, the soft-

SfM la calibración de la cámara, su posición y los puntos coincidentes se resuelven simultáneamente. Posteriormente el software utiliza algoritmos de superficie para confeccionar una malla geométrica que genera modelos 3D texturizados y que pueden ser medidos con precisión de hasta 0.1 mm (Camp et Al. 2013).

Actualmente existen en el mercado aplicaciones como 123D Catch, Agisoft Photoscan, o PhotoModel3D que transforman las fotos tomadas por el usuario en

ware uses surface algorithms to build a geometrical mesh that generates a 3D texture map with a precision up to 0.1 mm (Camp et Al. 2013).

Currently there are applications such as 12D Catch, Agisoft Photoscan or PhotoModel3D that transform photographs taken even from mobile devices in 3D models through intuitive and user friendly software. Pix4D is designed to be used in combination with drones.



modelos 3D de forma intuitiva y sencilla, incluso desde teléfonos móviles. Pix4D está diseñado para su uso desde drones. El modelo 3D es después exportable a softwares gráficos como AutoCAD.

En Estados Unidos el uso de la fotogrametría en la restauración arquitectónica es marginal. Los avances en softwares y aplicaciones que permiten el uso de cámaras convencionales y simplifican el proceso, posiblemente faciliten un uso más generalizado de esta técnica.

Cámara de tubería. Consiste en una micro-videocámara de gran angular con iluminación incorporada que instalada en el extremo de un cable de fibra óptica de hasta 60 m. retransmite el interior de tuberías y bajantes (fig. 3).

Cámara de chimenea. Retransmite en directo el interior de conductos verticales por medio de una videocámara de campo visual (FOV) 360° estabilizada con un giroscopio (fig. 4).

The file is exportable to design software such as AutoCAD.

In the United States, the use of photogrammetry in the architectural conservation field is marginal. The improvement of software and applications that allow using conventional cameras and simplify drastically the process, will possibly lead to a more general use of this technique.

Pipe cam. It is a micro-wide lens video camera with built in illumination that, installed in the extreme of a fiber optic cable of up to 60 m., records the interior of pipes, gutters and downspouts (fig. 3).

Shaft cam. It is a video camera of 360° of field of vision (FOV) stabilized with a gyroscope that broadcasts the interior of vertical conduits (fig. 4).

Técnicas basadas en la propagación de ondas

Ampliamente utilizadas, consisten en la emisión de ondas, electromagnéticas o acústicas, y el posterior estudio de su refracción en los diferentes materiales que atraviesan.

Técnicas electromagnéticas

-Termografía . El equipo utilizado en esta técnica es capaz de recoger la radiación infrarroja emitida por el material (región del espectro electromagnético entre luz visible y las microondas, con longitudes de onda entre 0.75 y 10 μm), y representarla en una imagen, resultando un mapa térmico basado en una escala térmica (figs. 5 y 6). Es una herramienta que, mediante visión térmica, permite detectar anomalías. De sus múltiples aplicaciones caben destacar: el estudio de puentes térmicos, la identificación de estructuras ocultas, localización de aberturas tapiadas, localización de humedades y detección de delaminaciones.

Techniques based on wave propagation

Widely used, they use electromagnetic or acoustic wave emission and analyze its refraction in the different materials that they traverse.

Electromagnetic techniques

-Infrared thermography. The equipment collects the infrared radiation emitted by the material (region of the electromagnetic spectrum between visible light and microwaves with wavelengths between 0.75 μm and 10 μm), and generate and image, resulting in a chromatic graphic based on a thermal scale (figs. 5 and 6). It is a tool that, through thermal vision, allows to detect anomalies. From its multiple applications the following to be highlighted: the study of thermal bridges, identification of hidden structures, loca-

-Geo-Radar. Es una técnica basada en el estudio de las reflexiones de impulsos de ondas electromagnéticas de frecuencias entre 100 MHz y 1 GHz, emitidos a través de un sólido por medio de una antena bipolar, que posteriormente se reciben en otra, normalmente alojadas en la misma carcasa. Las ondas reflejadas y el tiempo que tardan en hacerlo indican la distancia a la que se encuentra la superficie que las refleja. Los impulsos se reflejan en las interfaces de materiales con propiedades dieléctricas diferentes.

La longitud de onda electromagnética es inversamente proporcional a la frecuencia; frecuencias mayores a 500 MHz presentan gran atenuación de energía por lo que penetran menos profundidad pero tienen una resolución espacial de más calidad que las bajas frecuencias. Esta técnica es muy útil para localizar elementos embebidos y es fácil y rápida de ejecutar, aunque no tanto de interpretar.

La frecuencia de las antenas a emplear determina la resolución, la penetración y en consecuencia el tamaño del material a investigar; de este modo, en paredes de gran espesor y presencia de humedad se recomiendan frecuencias de 500MHz mientras que para paredes poco espesas frecuencias en torno a 1GHz suelen funcionar. El uso de esta técnica es habitual en conservación del patrimonio arquitectónico para localizar subestructuras, identificar daños, presencia y nivel de humedad y localización de vacíos y elementos metálicos o madera entre otros (Fernández Luco, 2005) (fig. 7).

Técnicas acústicas

Son particularmente útiles para medir grosores y localizar oquedades. Las técnicas acústicas más complejas se basan en el estudio de impulsos acústicos (stress waves), generados mediante percusión o mediante un dispositivo transmisor, en un punto de la estructura. El impacto genera

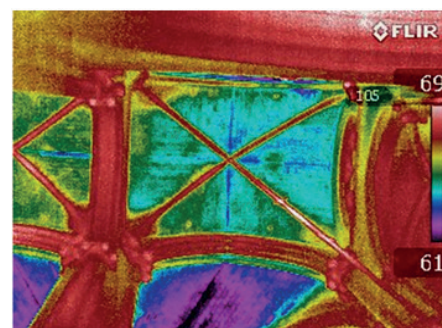
tion of closed openings, location of moisture and detection of delaminations.

-Ground Penetrating Radar. It is a technique that studies the reflections of electromagnetic waves of frequencies between 100 MHz and 1 GHz, emitted through the element with a dipole antenna, which are subsequently received in another antenna usually housed in the same casing. The reflected waves and the time they take to be reflected indicate the distance to the element in which the pulse was reflected. The pulses are reflected at the interfaces of materials with different dielectric properties. The electromagnetic wavelength is inversely proportional to the frequency; frequencies above 500MHz have great energy attenuation therefore they penetrate less depth but have better spatial

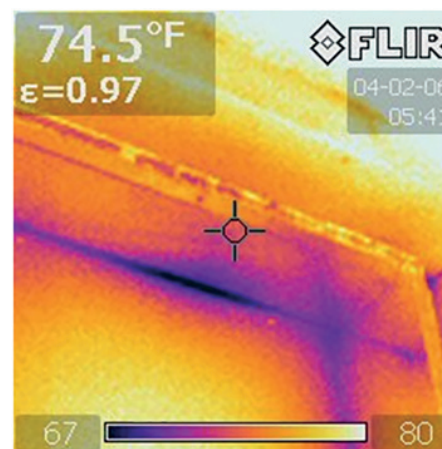
resolution than lower frequencies. It is a very useful technique to locate embedded elements and it is fast and easy to perform, not so much to interpret. The frequency of the antenna to be used determines the resolution and the penetration and consequently, the size of the material to investigate. For instance, thick walls with moisture are recommended to be inspected with 500MHz frequency antennas; for thin walls, frequencies around 1 GHz are usually effective. The GPR in the field of architectural conservation is used for locating substructures, identify internal damage, moisture, voids and embedded elements (Fernández Luco, 2005) (fig. 7).

Acoustic techniques

Acoustic techniques are especially useful for measuring thicknesses and locate



5



6

4. Cámara de chimenea. Abajo, imagen retransmitida en directo en una investigación en los conductos verticales del rascacielos Woolworth en Nueva York (de Miguel & Pardo)

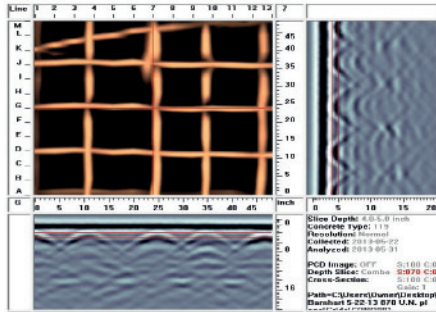
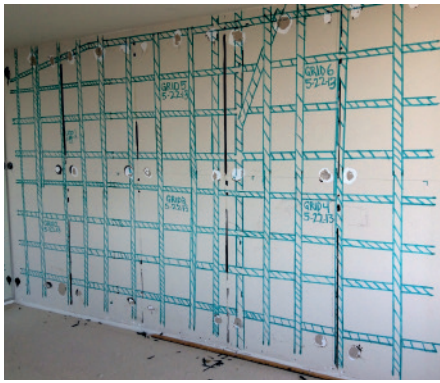
4. Shaft cam. Down, broadcast image in an investigation of the vertical conducts at the Woolworth skyscraper in New York (de Miguel & Pardo)

5. Representación termográfica que muestra una paleta de colores que representa el rango térmico entre 61 F y 69 F en una bóveda lateral en Saint John the Divine, Nueva York. Temperatura exterior: 44 F (de Miguel & Pardo)

5. Thermo graphic that shows a chromatic pallet that represents the thermal range between 61 F and 69 F in a side vault at Saint John the Divine, New York. Outdoor temperature: 44F (de Miguel & Pardo)

6. Pulverización de agua en el exterior y fotografía térmica desde el interior que muestra una filtración de agua en tono oscuro a 67 Fahrenheit. Planta 84 del edificio Empire State en Nueva York (Vertical Access)

6. Water spraying test (left) and infrared photography (right) from the inside that shows water infiltration in dark purple, 67 Fahrenheit. Floor 84 in New York (Vertical Access)



tres tipos de onda: ondas P (primarias), ondas S (secundarias), y ondas R (de superficie o Raleigh). Las ondas P son las que presentan mayor velocidad de propagación, viajan por dentro del espécimen y se reflejan en discontinuidades y en la cara posterior del elemento. En un sólido isótropo la velocidad de la onda P, se relaciona con el coeficiente de Poisson, el módulo de elasticidad, E, y la densidad, a través de la siguiente ecuación (Krauthrämmer y Krauthrämmer):

$$Cp = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho[(1 - 2\nu)(1 + \nu)]}}$$

La longitud de onda es directamente proporcional a la velocidad de onda, e inversamente proporcional a la frecuencia de la onda. Es por esto que es recomendable emplear altas frecuencias para conseguir mayores resoluciones. Una anomalía será detectada si la longitud de onda incidente

es menor que su tamaño. Sin embargo, la frecuencia también es directamente proporcional a la energía atenuada, por lo que a mayor frecuencia, menor profundidad de penetración. Se trata de encontrar la relación apropiada entre frecuencia, atenuación y resolución. Valores normales de frecuencia en función del material serían: 15 MHz para metales, de 40 a 55 KHz para hormigones y madera, y en torno a los 3 KHz para fábricas de ladrillo y piedra (Lombillo, Villegas et al. 2007). Las ondas electromagnéticas son sensibles a interfaces con agua y las ondas acústicas a interfaces de aire, motivo por el cual son dos métodos de inspección complementarios.

-Impacto-eco. El método analiza la frecuencia de los ecos de las ondas para localizar discontinuidades internas. Un transductor electromecánico genera un pulso de onda de tensión acústica; cuan-

voids. The most complex ones study stress waves generated through percussion or a transmitter in a certain point of the structure. The impact generates three types of waves: P waves (primary), S waves (secondary) and R waves (surface or Releigh). P waves are the ones with greatest speed of propagation, they travel through the element, and are reflected in discontinuities such as the rear side of the element. In an isotropic solid the P wave velocity, is related with the Poisson coefficient, the elasticity modulus, E, and the density, through this equation (Krauthrämmer y Krauthrämmer):

$$Cp = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho[(1 - 2\nu)(1 + \nu)]}}$$

Wavelength, is proportional to wave velocity, , and inversely proportional to the frequency of the wave. That is the

reason why it is advisable to use high frequencies to achieve higher resolutions. An anomaly will be detected if the incident wavelength is smaller than its size. However, frequency is also directly proportional to energy attenuation, so the higher the frequency, the shorter the penetration depth. The ideal is to find the appropriate relation between frequency, attenuation and resolution. Normal frequency values depending on the material are: 15MHZ for metals, 40-55 KHz for concrete and timber and around 3 KHz for brick and stone (Lombillo, Villegas et al. 2007).

Electromagnetic waves are responsive to water interfaces while acoustic waves are responsive to air interfaces, which is why they are two complementary inspection methods.

-Impact-echo. This technique analyzes

7. Test de geo-radar en un muro de un edificio en UN Plaza, Nueva York. La representación del GPR muestra una capa de armado a 4-5" de profundidad y una segunda a 5-6". A la derecha se observa el dibujo real en el exterior del muro trazado por el técnico tras la investigación de END (de Miguel & Pardo)

7. GPR test in a wall of a building in UN Plaza, New York. The GPR graphic shows rebars 4-5" deep and 5-6" deep. On the right, the GPR technician has drawn the location of the rebars after the NDT inspection (de Miguel & Pardo)

do dicha onda, que viaja por el material, incide con la interfase de otro material o con un contorno externo, parte de esa onda es reflejada. La impedancia acústica es el producto de la velocidad de onda por la densidad del material que atraviesa. El impacto-eco utiliza la onda reflejada en la superficie posterior del elemento o en las superficies generadas por anomalías, requiriendo bajas frecuencias, normalmente entre 10 y 50 Hz. La energía de la onda reflejada en una interfase será directamente proporcional a la diferencia entre las impedancias de los materiales que generan la interfase. Cuando la onda encuentra una interfase con aire, la reflexión es prácticamente total (fig. 8). De las formas de onda resultantes, el técnico puede determinar la profundidad de la reflexión, d , mediante la siguiente relación entre el tiempo transcurrido entre la recepción de sucesivas ondas P, Δt y la

velocidad de la onda P, C_1 (Sadri 2003). Además, el intervalo de tiempo entre llegadas de las reflexiones de la onda P equivale a la distancia recorrida dividida por la velocidad de onda. La frecuencia es el inverso de dicha relación (fig. 9).

$$d = \frac{2\Delta t}{C_1} \quad f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{C_1}{2d}$$

Este sistema se utiliza en hormigón y fábricas de piedra y ladrillo principalmente para determinación de espesores, localización de grietas, oquedades y desplazaciones. Sólo requiere acceso a una de las dos caras de la estructura.

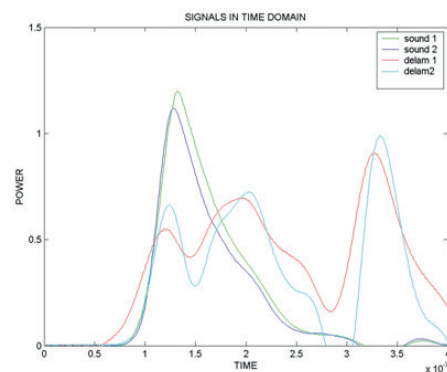
-Ensayo sónico de impulso-respuesta. Se trata de una técnica que resulta especialmente útil en elementos de fábrica y en placas de hormigón, como puentes. El test de ensayo sónico se vale de un estrés a compresión (onda mecánica de baja frecuencia) generado por un impacto.

the frequency of the echoes in order to find internal discontinuities. An electro mechanic transducer generates an acoustic tension wave pulse; when that traveling pulse impacts with an interface, part of that wave is reflected. The acoustic impedance is the product of the wave speed by the density of the material. The impact-echo uses the wave reflected in the rear surface of the element or in any interface, requiring low frequencies, usually between 10 and 50 Hz. The energy of the reflected wave at the interface is directly proportional to the difference between the impedances of the materials that form the interface. When the wave finds a void, the reflection is almost complete (fig. 8). Studying the resulting waveforms, the technician can calculate the depth of the reflection, d , through the following rela-

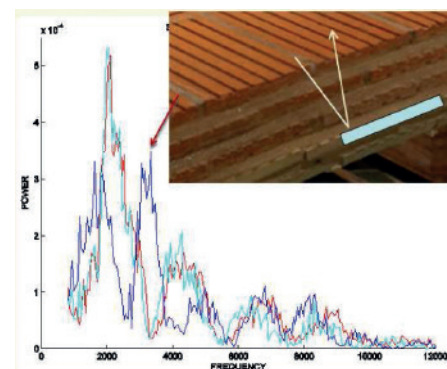
tion between the elapsed time between the reception of successive P waves, Δt , and the velocity of the P wave, C_1 (Sadri 2003). Furthermore, the interval between arrivals of P waves reflections is the distance traveled divided by the wave speed. Frequency, f , is the inverse of that ration (fig. 9).

$$d = \frac{2\Delta t}{C_1} \quad f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{C_1}{2d}$$

This method is useful for testing concrete, stone and brick, to find out thickness of elements, location of internal cracks, voids or delaminations. Access to the element is only required on one side. -Impulse-response. It is a technique especially useful for large elements and concrete slabs, like bridges. A compression wave (a low frequency mechanical wave) is generated by an impact. As a



8



9

8. Representación de la señal recibida en dominio tiempo para piedras no defectuosas (verde y azul) y defectuosas (roja y celeste) en una investigación con impacto-eco de desplazación en el edificio Confederación en San Juan de Terranova, Canadá (Vertical Access)

8. Representation of the received signal in time domain for non-defective stones (Green and blue) and defective (red and blue) in a delamination research with impact-echo at the Confederation building in St. John of Terranova, Canadá (Vertical Access)

9. Variación del test de impacto-eco en una reproducción de bóveda de Guastavino para estudiar la adhesión de los ladrillos: el gráfico muestra en azul el contenido de frecuencia de la onda en ladrillos mal adheridos. En celeste y rojo la representación en elementos sanos; cada pico representa una capa de ladrillo (Vertical Access)

9. Variation of the impact-echo test to study brick adhesion in a reproduction of a Guastavino vault: the graphic shows in blue the wave frequency content in bricks with poor adhesion. In light blue and red, same value in good adhered bricks; each peak identifies a brick layer (Vertical Access)

Este gran impacto implica que la losa o elemento responde en modo flexión con una frecuencia mucho menor, con rangos comprendidos entre 0,5 kHz y 10 KHz a diferencia del modo reflexión del impacto-eco (Davis et al. 2001). La velocidad de la onda, V, será la resultante de dividir la distancia entre el transmisor y el receptor, D, entre el tiempo transcurrido, t.

$$V = \frac{D}{t}$$

Normalmente se utiliza un martillo de 1 Kg con una célula de carga insertada en el cabezal; la masa y la dureza del cabezal definen la frecuencia y energía de la onda. Se mide la respuesta utilizando un transductor de velocidad o geófono (o acelerómetro). Ambos, martillo y geófono, se conectan a un ordenador para almacenar la información. El test utiliza el algoritmo Fast Fourier Transform para determinar la amplitud del espectro. Si el parámetro mo-

vilidad (velocidad media/fuerza aplicada) resulta constante, el material está en buen estado; sin embargo, si la movilidad media tiene picos, implica la existencia de material pobremente consolidado. Esta técnica es muy útil para localizar rápidamente amplias zonas en mal estado. Si la patología detectada es desplazación, la movilidad sufrirá un aumento drástico y la rigidez dinámica (dynamic stiffness) un descenso considerable. En este test los valores de movilidad para hormigón en buen estado suelen estar en torno a 3×10^{-7} (m/s)/N; valores mayores pueden estar delatando la existencia de patologías. El ensayo impulso-respuesta es apto para materiales heterogéneos y se ha utilizado satisfactoriamente para detectar vacíos y defectos bajo una losa de hormigón, encontrar patrones de agrietamiento y modelos de lesiones, detectar delaminaciones entre acero y hormigón en forjados y paredes, o

entre aplacados y soportes, comprobar la reparación por inyección, detectar grandes áreas de fisuras (honeycombing) y detectar si las características físicas del material han cambiado (Cecire 2002).

-Ultrasonidos. Este tipo de test utiliza ondas ultrasónicas de alta frecuencia, mayores de 20.000 KHz. Una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, que mediante un cristal piezoeléctrico lo transforma en una onda de tensión baja y frecuencia alta. Tras viajar por el elemento, es captada por el transductor receptor que convierte la energía de la onda en eléctrica de nuevo. El tiempo, generalmente en milisegundos, se visualiza en una pantalla. La lectura puede ser directa, semi-directa o indirecta. Da buenos resultados en materiales homogéneos y con superficies lisas o materiales con altas densidades. Cuando el material es muy heterogéneo se recomienda utilizar técnicas sónicas.

response, the slab or element sends back a lower frequency wave in bending mode, between 0.5 KHz and 10 KHz, unlike the reflection mode on the impact-echo technique (Davis et al. 2001). Wave velocity, V, is calculated by dividing the distance between the transmitter and the receiver, D, between the elapsed time, t.

$$V = \frac{D}{t}$$

The tool used is usually a 1 Kg hammer with a load inserted in its head; mass and hardness of the head define wave frequency and energy. Velocity is measured with a transducer or a geophone (or accelerometer). Both, hammer and geophone, are connected to a computer to storage the information. The amplitude is calculated through the Fast Fourier Transform algorithm. If the mobility parameter (average velocity/applied

force) is constant, the material is in good state; however, if the average mobility has peaks, is due to poor consolidation in the material. This technique is useful to quickly locate large areas in poor condition. If the pathology detected is delamination, the mobility will show a sudden increase and the dynamic stiffness a significant decrease. A normal mobility value for concrete in good condition is 3×10^{-7} (m/s)/N; higher values may be caused by the existence of other pathologies. The impulse-response test is useful for testing heterogeneous materials and locating voids and pathologies in a concrete slab, find crack patterns, detect delamination between steel and concrete in slabs and walls, or between veneer and bearing wall, check injection repairs, locate honeycombing, and check if the physical proprieties of the

material have changed (Cecire 2002).

-Ultrasound. This test uses high-frequency ultrasonic waves, higher than 20,000 KHz. An electric sign is send to the transducer, which through a piezoelectric crystal transforms it in a low tension high frequency wave. After traveling through the element, it is received by a receptor which transforms it back to electric energy. The elapsed time, usually in milliseconds, is shown in a screen. The test can be direct, semi-direct or indirect. It is a useful test for homogenous material with flat surface and high density materials. If the material is heterogeneous it is recommended to use sonic techniques.

NDT facilitators. Resources that enable the use of NDT fall into this classification

-The unmanned aerial vehicles (UAV) are commonly known as drones. Their origin comes from the war industry and dates

Facilitadores de las técnicas de reconocimiento y evaluación

Se engloban en esta clasificación aquellos recursos que posibilitan el uso de NDT.

-Los vehículos no tripulados (UAV) se conocen comúnmente como drones. Su origen proviene de la industria bélica y se remonta a la década de 1880 cuando Austria envió un globo aerostático para atacar Venecia. Estados Unidos en la guerra de Vietnam desarrolló la generación de UAVs que ha evolucionado hasta los modelos que se usan actualmente (Taylor 1978).

En Estados Unidos, para volar un UAV de uso comercial se requiere que el técnico que lo opera sea un piloto profesional y que haya un observador acreditado junto al piloto cuando el aparato está en uso. Además, se requiere una exención FAA 333 expedida por la Administración federal de aviación (FAA). Estos

back to the 1880s, when Austria sent a balloon to attack Venice. During the Vietnam War, The United States developed the UAV generation that has evolved to the currently used models (Taylor 1978). In the United States, to fly a drone for commercial use is required that the technician that operates the UAV is a professional pilot and that a certified observer is on site at all times. In addition, a FAA 333 exemption issued by the Federal Aviation Administration (FAA) is required. These barriers are the main reason why the use of drones in the architectural conservation industry is being slow.

The UAV in figure 10, used for the inspection of architectural heritage, is a Phantom 2 quadcopter with a Zenmuse H3 gimbal on which a GoPro Hero3 is mounted to take photographs and vid-

obstáculos son el principal motivo por el que la adaptación de drones a la industria de la conservación arquitectónica esté siendo lenta.

El UAV de la fig. 10, utilizado para la inspección de patrimonio arquitectónico, es un cuadricóptero Phantom 2 con una suspensión Cardán Zenmuse H3 sobre la que se monta una cámara GoPro Hero3 para capturar videos y fotografías. El conjunto de soportes pivotados con suspensión Cardán permite mantener la orientación de un eje de la cámara mientras el UAV se mueve en los tres ejes. La aeronave también dispone de un sistema de posicionamiento global (GPS) y de una unidad de medición inercial (IMU) que mide la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales usando un acelerómetro y un giroscopio. Además se le puede adaptar una cámara de infrarrojos, puede retransmitir en directo

eos. The set of gimbal pivoted supports keep the orientation of an axis of the camera while the UAV moves in the three axes. The aircraft also has global positioning system (GPS) and inertial measurement unit (IMU) that measures the speed, direction and gravitational forces using an accelerometer and a gyroscope. In addition, it can be used with an infrared camera, can broadcast live and can transmit the information to TPAS digital annotation system. Its battery last around 25 minutes.

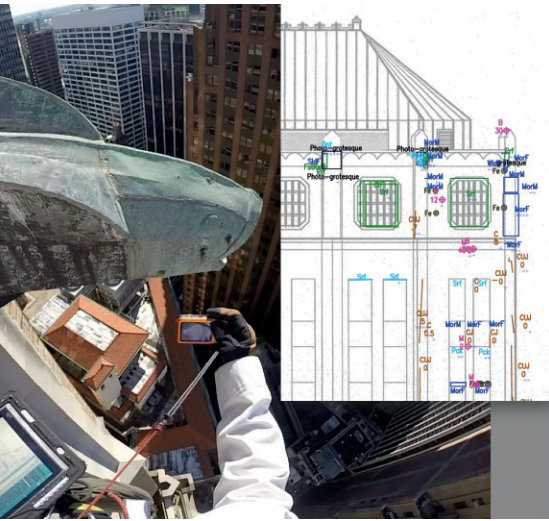
At present, UAVs document elements down to the size of a nail or a crack. There are models like Riegl Ricoper equipped with a LiDAR VUZ-1UAV sensor, unit IMU/GNSS and four high resolution cameras. This laser scan system can scan with a FOV of 230°, 350,000 points per second and a precision of 10 mm.



10

10. UAV cuadricóptero Phantom 2 y fotografía de una grieta desde el mismo (Vertical Access)

10. UAV Phantom 2 quadcopter and photograph of a crack from the UAV (Vertical Access)



11

y transmitir la información al sistema de anotación digital TPAS. Su batería dura 25 minutos.

En la actualidad los UAVs documentan elementos del tamaño de clavos y fisuras. Existen modelos como el Ricopter de Riegl equipados con un sensor LiDAR VUZ-1UAV, unidad IMU/GNSS y cuatro cámaras de alta resolución. Este sistema de escáner láser permite hacer levantamientos con un FOV de 230°, 350.000 puntos por segundo y exactitud de 10 mm.

-Tablet PC Annotation System (TPAS). Contar con una documentación precisa y manejable del estado de situación del edificio es el primer paso de un proyecto de restauración. Como fruto de esa realidad surgió en el 2003 TPAS, desarrollado por Vertical Access, una empresa especializada en investigación de edificios históricos. En la actualidad es el programa de toma de datos más utilizado en el país. La plataforma base de software es una combinación de AutoCAD y AutoLISP, que a través de una tableta digital permite introducir datos

gráficos y numéricos. Con este sistema, las condiciones existentes se documentan gráficamente in situ en un plano digital utilizando bloques predefinidos en la librería virtual de patologías, en función del material.

Del mismo modo, el TPAS permite la conexión a otros dispositivos como cámaras, u otros instrumentos de investigación no destructiva como georadares o endoscopios. Cada archivo que el técnico toma se enlaza automáticamente a su localización en el plano (figs.11 y 12).

La novedad más destacable de este método consiste en su portal online (TPAS Web Portal), una aplicación en una nube digital que permite el análisis interactivo. El portal sirve de soporte de información al que cualquier miembro del equipo puede acceder remotamente desde un dispositivo con internet y filtrar la información que necesite.

Un informe TPAS posibilita la redacción del proyecto acorde a la realidad precisa del edificio, lo que implica la disminución drástica de desvíos económicos durante la ejecución.

-Tablet PC Annotation System (TPAS). Having accurate and manageable documentation of existing conditions in the building is the first step of a conservation project. As a result of that reality, TPAS was developed in 2003 by Vertical Access, a company specialized in investigating historic buildings. It is the most used software for documentation of existing conditions. The base platform is AutoCAD and AutoLISP and installed in a tablet, allows to input graphical and numerical data.

With this system, the existing conditions are graphically documented on site in a digital drawing using blocks, depending on the material, from a digital library. TPAS

can be connected to other devices such as cameras, and other NDT instruments such as GPRs or endoscopies. Each file that the technician makes, is automatically linked to the drawing (figs. 11 and 12).

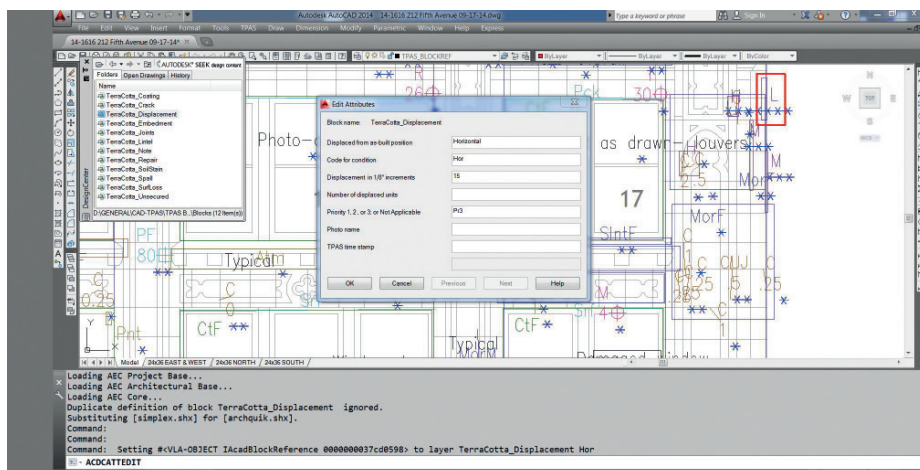
The most notable new feature of this method is its online portal (TPAS Web Portal), an application in a digital cloud that allows interactive analysis. The portal is an information platform to which any member of the team can remotely access from any device with internet and filter the information as needed. A TPAS report makes possible the assemblage of the conservation project according to the reality of the building, which translates

11. Con TPAS todas las condiciones existentes se documentan in situ en un ordenador. 63 Wall Street (de Miguel & Pardo)

11. With TPAS all the existing conditions are documented on site in a tablet computer. 63 Wall Street (de Miguel & Pardo)

12. Pantalla tipo de TPAS que muestra el plano del edificio, la librería de patologías en función del material, la pantalla de atributos para una determinada patología y los hipervínculos a otros archivos (de Miguel & Pardo)

12. Typical TPAS screen that shows a building elevation, the condition library depending on the material, the attribute screen for a certain pathology and the hyperlinks to other files (de Miguel & Pardo)



12

REFLEXIÓN FINAL

Las técnicas de reconocimiento visual permiten identificar elementos, representarlos y, en conjunto con los adecuados paquetes de software, permiten organizar toda la información para hacerla manejable, accesible a los grandes equipos multidisciplinares que participan en la restauración del patrimonio arquitectónico. Las técnicas electromagnéticas son útiles para la localización de elementos conductores, instalaciones, estructuras ocultas, humedades y control de calidad en procesos de inyección. Otro grupo de técnicas, las acústicas, son efectivas para localizar va-

into a dramatic decrease of economical deviations during the construction phase.

FINAL THOUGHTS

Visual assessment techniques allow to identify elements, draw them and together with the appropriate software allow to organize all the information to make it manageable and accessible to the members of the large multidisciplinary teams involved in the preservation of architectural heritage. Electromagnetic techniques are useful for locating conductive elements, installations, buried structures, moisture and quality control in injection interventions. Acoustic tech-

niques, interfaces, espesores y desplazaciones. El futuro de las NDT está directamente relacionado con el desarrollo de la tecnología. Las técnicas descritas van evolucionando siendo más potentes y precisas gracias a los avances técnicos en la instrumentación y la mejora de los soportes informáticos de interpretación. Recursos como TPAS han mejorado en los últimos dos años facilitando informes y portales precisos y manejables. Las opciones de elección son muchas y se requiere de planificación, especialización y formación continua para poder escoger la técnica más adecuada.

niques are effective to locate voids, interfaces, thicknesses and delaminations. The future of NDT is directly related to technology development. All described techniques are evolving getting more powerful and accurate thanks to technical development in the instrumentation and improvement of interpretation software. Resources such as TPAS have improve during the last two years resulting in accurate reports and digital and user friendly portals. Choice options for NDT are many, therefore planning, specialization and continuous training are necessary in order to choose the most appropriate technique.

Referencias / References

ADAN, A. ET AL. 2013. "Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data". *Automation in Construction* (v.31, pp.325-337).

CAMP, G. ET AL. 2013. "Large structures: which solutions for health monitoring". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXIV ICIPA Symposium (vol. XL-5/W2)

CECIRE, A. 2002. MS Thesis *Nondestructive Evaluation of Historic Structures* (pp. 23). Tufts University. Massachusetts

DAVIS, A., OLSON, C. Y MICHOLS, K. 2001. "Evaluation of Historic Reinforced Bridges". *A Structural Engineering Odyssey, Proceedings of the 2001 Structures Congress - Structural Engineering Institute of ASCE* (pp. 3). Washington, D.C., USA

DIEBOLT, K., STREETER, K. 2012. "Ultrasonic Investigation for the Characterization and Evaluation of Guastavino Tile Vaults: A Pilot Study". *The Construction History Society of America (CHSA) 2012 Symposium*. MIT, Boston, USA.

FERNÁNDEZ LUCO, L. 2005. "Non-destructive evaluation of the concrete cover Comparative test – Part II: Comparative test of covermeters", *Materials and Structures*, (v.38, pp.284). RILEM TC 189-NEC

LOMBILLO, I., VILLEGAS, L. ET AL, 2007. "Evaluación no destructiva del patrimonio construido". *Congresso Construção 2007* (pp. 8-15) Coimbra, Portugal.

Schuller, M. y Suprenant B. 1995. *Nondestructive Evaluation & Testing of Masonry Structures*. The Aberdeen Group. Addison, IL, USA.

TAYLOR, J. 1977. *Jane's pocket book of remotely piloted vehicles*, Collier Books. Nueva York, USA.

Otros recursos / Other resources

American Society of Nondestructive Testing (ASNT) <https://www.asnt.org/>

ASTM International <http://www.astm.org/>