

Aplicación de la Termografía Infrarroja como ensayo no destructivo (END) en la restauración del patrimonio arquitectónico

Santiago Tormo Esteve¹

INTRODUCCIÓN

Para la realización de una actuación en el patrimonio arquitectónico es importante una tarea completa de diagnóstico previa a la toma de decisiones sobre la intervención planteada. Comúnmente, se utilizan en nuestros estudios previos, técnicas destructivas para poder saber las características, propiedades o comportamientos de las zonas sobre las que se actúa, pero que siempre producen una alteración llegando a afectar considerablemente la materialidad de los elementos por su extracción y destrucción. Pero también existe la posibilidad de emplear técnicas no destructivas, basadas usualmente en efectos físicos y que por su grado de no afección sobre el elemento de estudio le dotan de una trascendencia por el alcance de datos que se consiguen sin llegar a la alteración o destrucción del elemento. El georradar, los ultrasonidos, el escáner 3D y la imagen termográfica son ejemplos de las muchas técnicas que existen hoy en día.

Por lo que refiere a la Termografía Infrarroja (TIR), aplicada al campo de la construcción y la edificación, siempre ha estado relacionado con la valoración de la eficiencia energética en edificios y en pocas ocasiones en el análisis de lesiones producidas por causas y procesos relacionados con la conservación de los edificios. El uso de esta técnica se ha consolidado en el estudio descriptivo de las variaciones de la transmitancia térmica de cerramientos y, en especial, en la detección y valoración descriptiva de puentes térmicos (Moroni, 2003), con resultados documentados en la defini-



Paneles explicativos de las investigaciones realizadas para la restauración de la iglesia de Matías en el Castillo de Buda en Budapest.

1. Dpto. Construcciones Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia (Camino de Vera s/n), santores@arq.upv.es.

ción de procesos de análisis térmico y en el estudio de la evolución temporal de temperaturas en cerramientos (Ludwig, 2003). Pero la máxima potencialidad de la técnica todavía se encuentra, en gran medida, por desarrollar.

Los resultados de investigaciones sobre los usos industriales de las TIR son muy extensos y ofrecen una importante fuente de documentación sobre esta tecnología; ahora bien, estos resultados, condicionados por los fines específicos que competen al uso industrial, no son fácilmente extrapolables a su uso como ensayo no destructivo en el estudio previo a una actuación sobre el patrimonio arquitectónico. La intervención sobre el patrimonio arquitectónico construido depende en gran medida de los estudios previos realizados con anterioridad que determinan los materiales, los sistemas constructivos y el estado patológico en el que se encuentran. La aplicación de la termografía como técnica de ensayo no destructivo, permite obtener de una forma no invasiva, rápida y segura, la información necesaria sobre la patología que se muestra en superficie permitiendo identificar en ocasiones las causas que la producen. El proceso experimental y el desarrollo del método que se ha llevado a cabo en los últimos años están basados en la prueba constante de la causa-efecto que ha permitido obtener unas conclusiones determinadas para cada experiencia planteada.

Una de las principales limitaciones de la TIR es superar el umbral de método cualitativo o descriptivo que le es propio (efectivamente, el contraste entre emisiones lumínicas de diferentes zonas, bien por una diferencia de emisividad o bien por una diferencia de temperatura, es su aplicación inmediata) para convertirse en un método de ensayo cuantitativo. En este sentido, la caracterización de las propiedades emisoras de los materiales de construcción es un aspecto importante para la utilización de la TIR como ensayo no destructivo. Este campo no está suficientemente desarrollado en la actualidad y, sin embargo, se han descrito ya importantes contribuciones de análisis cualitativo de la TIR en el ámbito constructivo que han de ser tenidas en cuenta en su uso en la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico (Guerrero, 2005). Así, desde un punto de vista más constructivo, se han analizado factores como las discontinuidades en las propiedades físicas de los materiales de construcción (Moropoulou, 2006) o la presencia de

La aplicación de la termografía como técnica de ensayo no destructivo, permite obtener de una forma no invasiva, rápida y segura, la información necesaria sobre la patología que se muestra en superficie permitiendo identificar en ocasiones las causas que la producen



Detalle de la estructura línea escondida tras el esgrafiado de una fachada en Segovia.

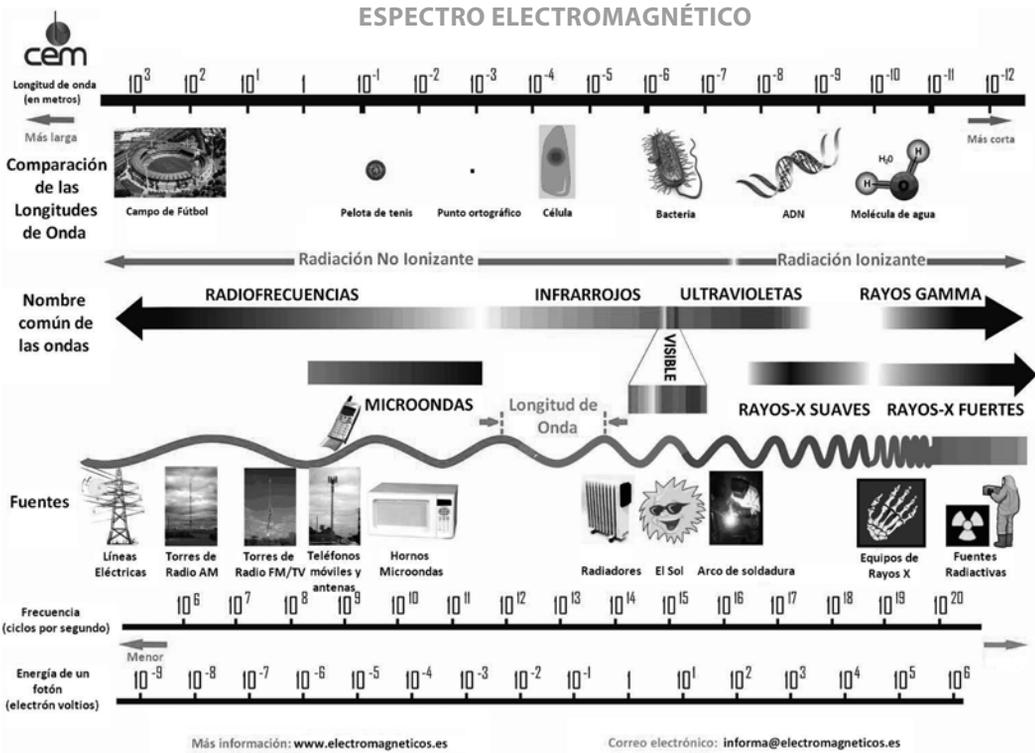
elementos ocultos (Kamoi, 2004), que son de un claro interés en la evaluación constructiva previa a una intervención.

En este momento, la aplicación de la TIR, como método de ensayo no destructivo en estudios previos de intervención y restauración del patrimonio arquitectónico está en pleno desarrollo; una dificultad inherente en este campo consiste en que los resultados obtenidos en una determinada actuación son difícilmente extrapolables a otra, dada la complejidad de tipología, constructiva, funcional y estructural, del patrimonio arquitectónico.

DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DESARROLLADA

En la actualidad, no es ninguna novedad hablar de termografía infrarroja, incluso para profanos. Estamos bastante acostumbrados a ver imágenes infrarrojas en la televisión, en el cine o en muchos informes o artículos relacionados con temas arquitectónicos y constructivos. En estas imágenes, los objetos que vemos se nos muestran con unos colores ficticios que obedecen a la respuesta térmica que se produce en la superficie. Este espectro de colores, identifican cada píxel que dicha imagen recoge, como datos que corresponden a valores de la radiación calorífica emitida por el objeto y que obedece a una evolución térmica según los comportamientos que se est n produciendo en él.

El propio nombre de termografía infrarroja puede inducir a error ya que no se trata de una imagen de temperaturas, es más bien una imagen que nos muestra la radiación saliente de las superficies que estamos observando. Y se trata de radiación infrarroja, normalmente en el espectro de



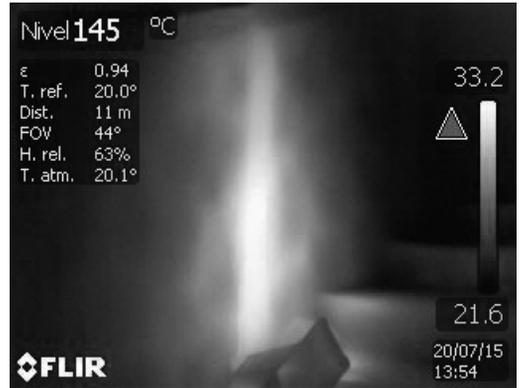
Espectro electromagnético

(Fuente: www.electromagneticos.es).

longitudes de onda de 8 a 14 micras, alejado del intervalo de la radiación visible, que por dar un orden de magnitud va de 0,4 a 0,7 micras. Es justamente en este intervalo infrarrojo en el que los cuerpos que suelen rodearnos emiten la máxima radiación, y que habitualmente interpretamos como calor. Las cámaras infrarrojas trabajan por tanto con radiación. Y esa radiación es traducida en temperaturas superficiales, las que observamos en la imagen anterior, a partir de la utilización de unos parámetros (parámetros de objeto), que fija el usuario de la cámara.

Los equipos infrarrojos habituales en la actualidad permiten visualizar diferencias de temperatura superficiales en el rango de 0,05 K e incluso inferiores para cámaras mucho más sofisticadas (hasta 0,02 K). Hay que entender que el defecto que tratamos de detectar debe provocar al menos dicha diferencia de temperatura en la superficie del cerramiento en el que se encuentra.

Debemos considerar que en el patrimonio arquitectónico las únicas herramientas que nos permiten conseguir el contraste térmico están basadas en la denominada termografía pasiva como son la propia radiación solar, el enfria-



miento nocturno y la calefacción o refrigeración que pueda existir en el interior de los edificios. Un termógrafo experto, especializado en patrimonio, deberá hacer el uso más adecuado de estas herramientas, y sobre todo y como ya se ha comentado, saber interpretar y sacar el máximo partido de todos estos fenómenos térmicos.

Por otra parte existe la posibilidad de excitar térmicamente los objetos a observar mediante una fuente de calor externa para producir un contraste en la superficie y de esta manera poder extraer las conclusiones más directas respecto a la información no detectada de forma pasiva. Hay que valorar en todo momento la posibilidad de esta forma de actuar ya que en ocasiones puede estar contraindicada dependiendo del deterioro de los elementos o del grado de protección que tenga la superficie. Un ejemplo de esta metodología lo constituye el estudio que está realizando el equipo de investigación coordinado por los doctores Rafael Marín y Arturo Zaragoza en la escalera de subida al coro de la Iglesia Arciprestal de Santa María la Mayor de Morella, en la que mediante una fuente de calor externa se pretende distinguir la presencia de distintos materiales debido a los valores de conductividades que presentan cada uno de ellos.

Aplicación de una fuente de calor externa (termografía activa) para detectar la presencia de elementos estructurales con distinto comportamiento de conductividades térmicas. Iglesia Arciprestal de Santa María en Morella.

LAS APLICACIONES EN EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

En los últimos años se han producido numerosas investigaciones en el campo de la termografía y su aplicación en el patrimonio arquitectónico. Los investigadores Moropoulou, Kouli, y Avdelidis (Moropoulou, 2000) utilizan la TIR como herramienta de ensayo no destructivo realizando

una exhaustiva evaluación de los materiales y la técnica que permite evaluar el estado de los edificios históricos. Los profesores Meola y Carlomagno (Meola, 2004) describen la conveniencia de la integración de la TIR, junto con otras tecnologías de ensayos no destructivos como una parte muy importante del diagnóstico patológico en los edificios.

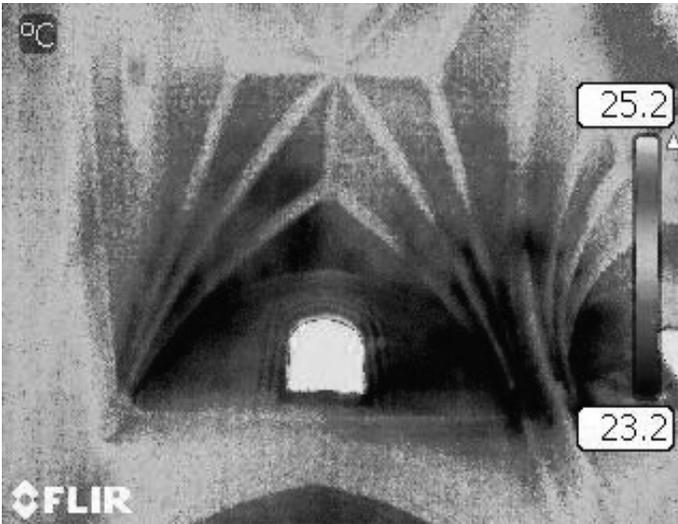
Estos son dos ejemplos de investigadores relacionados con el patrimonio arquitectónico y que recogen el gran bagaje que muchos otros, como Cesare Romeo, Luigia Binda, Giulia Bartoli, etc., siguen investigando y sacando resultados en torno a la aplicación de la TIR sobre el patrimonio.

La aplicación más inmediata en la determinación de patologías en los edificios antiguos es la causada por la humedad de cualquier tipo. Sea una filtración, capilaridad o condensación, los paramentos que consiguen retener el agua, en su proceso de evaporación, van a generar un comportamiento térmico superficial muy fácil de detectar por cualquier cámara térmica ya que la diferencia de temperatura en estos casos puede elevarse entre dos y cinco grados dependiendo de las condiciones atmosféricas del ambiente.

Debido a la elevada transferencia de calor que supone la evaporación o condensación de agua, asociada al calor latente o de cambio de fase, cualquier superficie húmeda aparecerá ciertamente más fría que las superficies secas adyacentes, produciéndose así un contraste térmico que cualquier equipo infrarrojo convencional nos permitirá visualizar. Podremos así detectar humedades, independientemente de cuál sea la causa: infiltraciones o goteras de agua, condensación, capilaridad o incluso una rotura en cualquier canalización empotrada en la pared.

En el marco de las líneas de investigación, en el año 2007, se presentó un trabajo desarrollado por la Catedrática D.^a Liliana Palaia, subvencionado por el Ministerio de Fomento, que intentaba comparar los distintos métodos de ensayos no destructivos y su aplicación en la conservación de los monumentos históricos (Palaia, 2011). Una de las conclusiones extraídas de dicho estudio, evidenciaba que, dependiendo de la técnica empleada de END, se podía averiguar los distintos sistemas constructivos que se encontraban bajo el estrato visible, sus patologías y su disposición, gracias a la respuesta térmica que su distinto comportamiento de conductividades y de inercias generaban las distintas superficies.

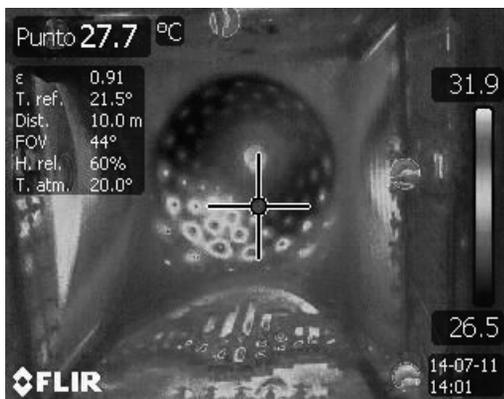
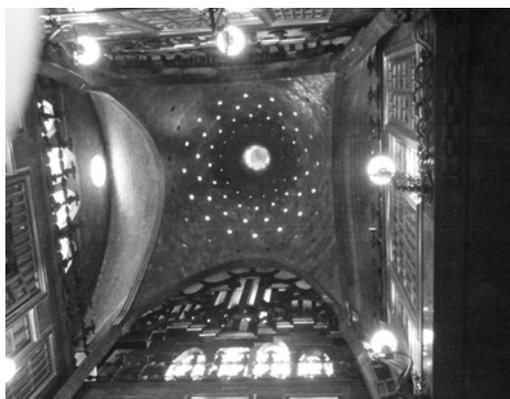
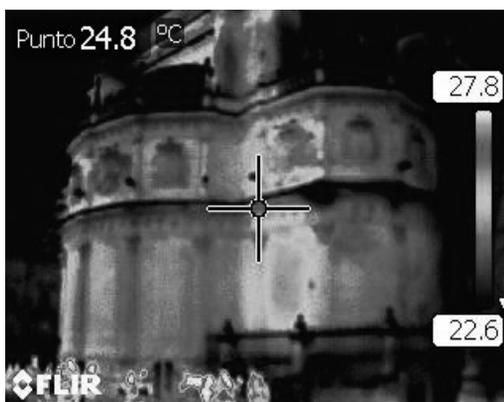
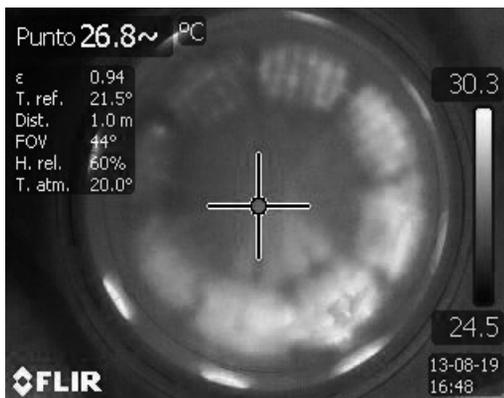
La determinación de patologías en los edificios antiguos causadas por la humedad –filtración, capilaridad o condensación–, en función de los paramentos que consiguen retener el agua en su proceso de evaporación, van a generar un comportamiento térmico superficial muy fácil de detectar por cualquier cámara térmica



Imágenes del interior de la nave central de la Iglesia de San Miguel en Morón de la Frontera (Sevilla). Proyectos de investigación del profesor Juan Antonio Fernández Naranjo.

En los edificios monumentales los sistemas constructivos determinan en muchos casos la aparición de patologías o condiciones interiores que afectan al comportamiento térmico del edificio. Así pues, las cubiertas de las capillas, cúpulas y naves centrales pueden determinar mediante la imagen térmica cual es el sistema constructivo empleado, identificando los puentes térmicos que generan dichos materiales, incluso los valores distintos de higroscopicidad que poseen.

En la comparación de las imágenes de la cúpula del Palau Guell en Barcelona, se puede apreciar un círculo que indica la intersección del elemento que sobresale de la cu-



Imágenes desde el interior de la cúpula de la iglesia de Canet lo Roig (Castellón), en la que se aprecia la estructura constructiva y el material cerámico que lo cubre.

Detalle de los muros de la Capilla Real de la Catedral de Sevilla, donde se pueden apreciar los distintos espesores de la fábrica desde el exterior.

Imágenes del interior de la cúpula del Palau Güell en Barcelona. Se puede observar la zona de la cubierta que sobresale y recibe el soleamiento.

bierta y que debido al soleamiento que está recibiendo permite identificar la zona.

Por otro lado el uso de las técnicas de termografía activa (TA) en comparación con la pasiva, consigue una mejor lectura según el marco del estudio buscado y evalúa el comportamiento térmico durante un período de tiempo determinado. Es usual en las investigaciones más recientes la utilización de esta metodología que excitan la superficie térmicamente buscando el contraste de las radiaciones de calor por el distinto valor de las conductividades e inercias térmicas de cada material, marcando muy claramente las discontinuidades, alteraciones o patologías no visibles (Young, 2014).

LAS APLICACIONES EN EL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO

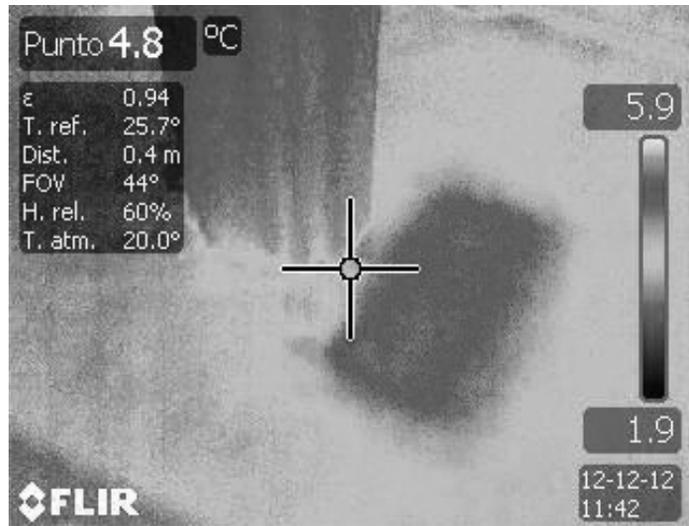
Las técnicas no destructivas de carácter no invasivo como puedan ser la fotografía aérea, o los métodos geofísicos, han ido cobrando cada vez más importancia en la arqueología como instrumentos para la intervención y la planificación de una excavación arqueológica, sobre todo aquellos enfocados a la localización de nuevos yacimientos o para mejorar la información de yacimientos ya documentados (Piga et al., 2014).

Los principales resultados en estas observaciones se tienen que buscar cuando el contraste térmico entre los estratos y superficies a observar son mayores. Así por ejemplo en el campo de la investigación arqueológica nos puede determinar restos arquitectónicos que por su inercia térmica constituyen un comportamiento térmico en la superficie diferente identificando los restos de muros, criptas y demás construcciones enterradas (Cortes, 2014).

En esta disciplina, también se puede emplear la termografía activa en objetos de arte para detectar defectos o daños que no son visibles en superficie. Este es el caso del estudio presentado por Panagiotis Theodorakeas donde emplean termografía pasiva y activa para inspeccionar el estado de conservación de pavimentos de mosaico.

Del mismo modo que las imágenes anteriores obtenidas en el 2014 en Ostia Antica (Roma), el profesor Theodorakeas lo aplica en el pavimento de mosaico paleocristiano del museo de Delfos, en el pavimento mosaico de la antigua

Para la intervención y la planificación de una excavación arqueológica los principales resultados se tienen que buscar cuando el contraste térmico entre los estratos y superficies a observar son mayores, por ejemplo, identificando los restos de muros, criptas y demás construcciones enterradas



Imágenes del interior de la iglesia del Convento de San Francisco en Benigánim (Valencia). Se puede apreciar la existencia de una cripta de un enterramiento. Proyecto de intervención de José Pardo y Luis Cortes.

ágora de Atenas y en el mosaico del santuario de Pan. En el primer caso lo usan con el objetivo de observar la acumulación de humedad. Se emplea un enfoque pasivo, y se recoge a mediodía, en el momento de mayor radiación solar. En el mosaico del Ágora de Atenas (siglo II a. C.) la inspección termográfica reveló grietas en la superficie, que eran difíciles de detectar a simple vista. (Theodorakeas et al. 2015).

Recientemente se ha presentado un trabajo final en el Master de Arqueología de la Universitat de Valencia por la alumna Ana Royo (2015), en el que se repasan los métodos, y se proponen distintos experimentos desarrollados para poder aplicar esta técnica en la prospección arqueológica



Estado del pavimento de las termas de Neptuno en Ostia Antica (Roma). Se puede apreciar la estructura del hipocausto.

orientada a determinar restos arquitectónicos. De las experiencias desarrolladas aplicando tanto la termografía pasiva como la activa, se extraen conclusiones que permiten determinar una de las grandes limitaciones de esta técnica en estas aplicaciones. En concreto, es la necesidad de un gran contraste térmico que en estos casos es difícil de conseguir, sobre todo si los objetos o elementos no están en cotas cercanas a la superficie

CONCLUSIONES

Se ha expuesto en este trabajo las principales conclusiones obtenidas hasta la fecha, en torno a la definición de una metodología de evaluación por TIR del estado superficial y la detección de elementos ocultos en paramentos, para su aplicación en estudios previos a intervenciones en conservación y restauración del patrimonio arquitectónico.

Se ha constatado la adecuación de la TIR para el estudio de irregularidades, heterogeneidades y discontinuidades en grandes muros mediante el procedimiento combinado de restitución fotogramétrica de imágenes reales y termográficas. Se ha constatado experimentalmente la diferencia de radiación emitida en un proceso de calentamiento controlado de muestras uniformes de morteros de diferentes dosificaciones sobre soportes constructivos clásicos. Se ha evidenciado así mismo que, para el análisis global de grandes superficies, es necesario realizar un estudio previo sobre el proceso de calentamiento de las diversas superficies para valorar, a causa de las diferencias de inercias térmicas de los elementos que la componen, el momento adecuado del día en que la imagen por TIR puede presentar mayor contraste y ofrecer, por consiguiente, una información más amplia.

Se ha comprobado también la especial importancia de la TIR en la detección de humedades en grandes superficies arquitectónicas. La aplicación de TIR a grandes superficies arquitectónicas se muestra eficaz en la detección de elementos ocultos si éstos tienen unas dimensiones suficientemente grandes y sus diferencias constructivas (inercia y conductividad térmica) con el entorno son suficientemente altas.

Encuentro científico de la Academia del Partal en julio de 2014, Jorba (Barcelona).



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- AVDELIDIS, N. P., MOROPOULOU, A., STAVRAKAS, D., «Detection and quantification of discontinuities in building materials using transient thermal NDT techniques: modelling and experimental work», *Materials Evaluations* 64(5), 2006, pp. 489-491.
- CARLOMAGNO, G. M., MEOLA, C., *Infrared thermography in the restoration of cultural properties*, Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering, 4360, 2001, pp. 203-216.
- CORTES MESEGUER, L., MARTINEZ HURTADO, S., PARDO CONEJERO, J., PIERA ROIG, A., TORMO ESTEVE, S., *Convento e iglesia de Sant Francesc de Benigànim. Historia y Valor Patrimonial*. Ajuntament de la Vila Reial de Benigànim. Valencia, 2014.
- CUSIDÓ, J. A., DEVANT, M., RIBA, J., «Aplicaciones de la termografía infrarroja y la espectrometría en el estudio del deterioro del patrimonio arquitectónico nacional», *Informes de la construcción*, 48, 1996, p. 443.
- GUERRERO, I. C., OCAÑA, S. M., REQUENA, I. G., «Thermal-physical aspects of materials used for the construction of rural buildings in Soria (Spain)», *Construction and Building Materials*, 19 (3), 2005, pp. 197-211.
- KAMOI, A., OKAMOTO, Y., VAVILOV, V., «Study on detection limit of buried defects in concrete structures by using infrared thermography», *Advances in nondestructive evaluation*, 1-3, 2004, pp. 270-273 y 1549-1555.
- LUDWIG, N., «Thermographic testing on buildings using a simplified heat transfer model», *Materials Evaluation*, 61(5), 2003, pp. 599-603.
- MEOLA, C., «Recent advances in the use of infrared thermography», *Sci. Technol.* 15, 2004, R27-R58.
- MORONI, I., ESPOSTI, V., «Using infrared thermography for the experimental analysis of the thermal profile of building elements subjected to thermal and mechanical action», *Novel Approaches in Civil Engineering*, 14, 2003, pp. 203-208.
- MOROPOULOU, A., AVDELIDIS, N. P., *An outdoor thermographic survey of historic structures*. Thermosense, XXV 5073, 2003, pp. 117-121.
- MOROPOULOU, A., AVDELIDIS, N. P., «Emissivity considerations in building thermography», *Energy and Buildings*, 35(7), 2003, pp. 663-667.

- PALAIA, L. TORMO, S., SANCHEZ, R., «Aplicación de la termografía como END en la restauración del Patrimonio arquitectónico», *Actas del 12º Congreso Nacional de Ensayos No Destructivos* (pp 237-248). Editorial UPV. Valencia, 2011.
- PIGA, C., PIRODDI, L., POMPIANU, E., RANIERI, G., STOCO, S., TROGU, A., *Integrated Geophysical and Aerial Sensing Methods for Archaeology: A Case History in the Punic Site of Villamar (Sardinia, Italy)*, 2014.
- ROSINA, E., «Applying infrared thermography to historic wood-framed buildings in North America», *APT Bulletin*, 33.4, 2002, p. 37.
- ROSINA, E., «Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana», *APT Bulletin*, 34.1, 2003, p. 11.
- ROYO PASTOR, R., TORMO ESTEVE, S., CAÑADA SORIANO, M., FERRER LACRUZ, P., «Evaluación mediante termografía infrarroja del arco romano del Pont del Diable de Martorell (Barcelona)», *Revista AEND* n.º 73, 2015, pp. 12-27.
- SANDROLINI, F., FRANZONI, E., «An operative protocol for reliable measurements in porous materials of ancient buildings», *Building and environment*, 41 (10), 2006, pp. 1372-1380.
- SILMAN, R., «Applications of non-destructive evaluation techniques in historic buildings», *APT bulletin* 271-2, 1996, p. 69.
- THEODORAKEAS, P., CHEILAKOU, E., FTIKOU, E., KOU, M., *Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures*, Proc.: 33rd UIT Heat Transfer Conference, At L'Aquila, Italy, 2015.
- VOLLMER, V., MÖLLMANN, K.P., *Termografía Infrarroja. Fundamentos, investigaciones y aplicaciones*. Traducción de Rafael Royo. Editorial: Universitat Politècnica de València, 2013.
- YOUNG HOON J., CHAN HEE L., «Quantitative modeling of blistering zones by active thermography for deterioration evaluation of stone monuments», *Journal of Cultural Heritage*, 2014.

Fotografías:

Las imágenes que aparecen en el artículo son del autor del mismo salvo indicación expresa.