

PISTOLA DE IMPEDANCIA PARA LA DETECCIÓN DE LESIONES EN MATERIALES PÉTREOS

María Ángeles Navacerrada^{1}, María Peña², Rafael Fort², María del Mar Barbero-Barrera³, Daniel de la Prida⁴ y Tomás Simón Gómez⁵*

¹Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, Spain

²Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, Spain

³Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Calle Doctor Severo Ochoa 7, 28040 Madrid, Spain

⁴Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III, Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain

⁵Department of Physics and Astronomy, KU Leuven

RESUMEN

Los edificios y monumentos históricos con el paso de los años junto con la acción de factores naturales y humanos aceleran su degradación y con ello, su pérdida. Los análisis preventivos son clave para la identificación temprana y la conservación de los monumentos, evitando el avance de los daños y su eliminación antes de que el avance del estado de degradación se torne irreversible. El correcto diagnóstico de los problemas basado en la identificación de daños y sus procesos patológicos es fundamental para garantizar que las intervenciones a acometer sean las más adecuadas en cada caso. La pistola de impedancia permite la medición en sucesivos puntos de una superficie de magnitudes como el coeficiente de absorción sonora mientras se excita el campo sonoro con un pequeño altavoz generando una representación en colores de la superficie del material de manera similar a las imágenes que se obtienen con la técnica de termografía. En este trabajo se evalúa su potencial como técnica no destructiva en el ámbito del patrimonio arquitectónico para la detección de lesiones y alteraciones en la superficie de materiales pétreos. Aspectos como la rapidez y facilidad de uso la convierten en una técnica de gran potencial para su empleo en la identificación de lesiones sobre los materiales en el ámbito de la restauración.

ABSTRACT

Buildings and historical monuments degrade over time due to natural and human factors, which accelerates their deterioration and loss. Preventive analyses are key to early identification and conservation of monuments, avoiding the advancement of damages and their elimination before the state of degradation becomes irreversible. The correct

diagnosis of problems based on the identification of damages and their pathological processes is essential to ensure that the interventions to be carried out are the most appropriate in each case. The impedance gun allows the measurement of magnitudes such as the sound absorption coefficient at successive points on a surface while the sound field is excited with a small loudspeaker, generating a color representation of the material surface similar to the images obtained with thermography. This work evaluates its potential as a non-destructive technique in the field of architectural heritage for the detection of lesions and alterations on the surface of stone materials. Aspects such as speed and ease of use make it a technique with great potential for use in identifying injuries on materials in the field of restoration.

Palabras Clave— Patrimonio histórico, coeficiente de absorción, pistola de impedancia, materiales pétreos

1. INTRODUCCIÓN

Edificios y monumentos históricos ocupan los núcleos urbanos de nuestras ciudades y son un reflejo de nuestra historia digna de conservar. El paso de los años junto con la acción de factores naturales y humanos aceleran su degradación y con ello, su pérdida. Los análisis preventivos son clave para la identificación temprana y la conservación de los monumentos, evitando el avance de los daños y su eliminación antes de que el estado de degradación se torne irreversible.

El correcto diagnóstico de los problemas basado en la identificación de daños y sus procesos patológicos es fundamental para garantizar que las intervenciones a acometer sean las más adecuadas en cada caso, lo que implica

que no sólo se conozcan los daños en sí, sino también las condiciones climáticas y de evolución del propio edificio. En este sentido, la realización de cartografías de daños favorece la visualización y correlación entre los daños y su posición específica en el Bien pudiendo planificar y establecer los criterios de intervención. Una de las técnicas más empleadas para ello es el análisis digital de imágenes, el levantamiento fotogramétrico o el uso de técnicas LiDAR [1-2]. Junto con ellas, el uso de técnicas no destructivas (TND) se ha ido implantando sucesivamente en los últimos años debido a una mejora significativa de la tecnología necesaria para realizar las evaluaciones in situ [3-4]. Estas técnicas permiten representar la distribución, en la superficie de los edificios o de piezas de interés cultural, de parámetros físicos o químicos que detectan las zonas más deterioradas. Entre las técnicas disponibles, las técnicas de tomografía de resistividad eléctrica, ultrasonidos o georadar, entre otras, dan información sobre la estructura interna de los materiales pudiendo detectar huecos, fisuras, discontinuidades, humedades, irregularidades... otras técnicas como la espectrofotometría, dureza, medidor de humedad aportan información de la superficie de los materiales. En este sentido, es fundamental identificar los procesos patológicos y seleccionar en cada caso las técnicas más adecuadas que permitan alcanzar un mayor nivel de información y que permitan identificar, con mayor grado de precisión, las causas y grado del deterioro. Estas técnicas de contacto implican la realización de cuadrículas o mallas analíticas, que pueden ser muy laboriosas cuando cubren grandes superficies. Frente a esto, se prima el empleo de técnicas que minimicen el proceso de análisis aunque implique una cierta pérdida de precisión.

La pistola de impedancia acústica permite la medición en sucesivos puntos de una superficie de magnitudes como el coeficiente de absorción sonora mientras se excita el campo sonoro con un pequeño altavoz generando una representación en colores de la superficie del material de manera similar a las imágenes que se obtienen con la técnica de termografía. Se ha utilizado para evaluar problemas acústicos en automoción en maquinaria industrial o en aeronáutica con distintos objetivos como visualizar el campo sonoro generado por un dispositivo, evaluar caminos de transmisión del sonido o para la medición del coeficiente de absorción sonora de un material. Aspectos como la rapidez y facilidad de uso la convierten en una técnica de gran potencial para su empleo como técnica no destructiva en la identificación de lesiones sobre los materiales en el ámbito de la restauración. En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre el uso de la pistola de impedancia como técnica no destructiva en el ámbito del patrimonio arquitectónico para la detección de lesiones y alteraciones en la superficie de materiales pétreos. Se muestran resultados de mediciones llevadas a cabo en piedra natural en el laboratorio e in situ y se compara con los resultados obtenidos con otras técnicas no destructivas utilizadas habitualmente en conservación del patrimonio.

2. TÉCNICAS Y MATERIALES

Se ha utilizado la pistola de impedancia de Microflow Technologies [5-6]. Este dispositivo portátil consta de un altavoz esférico de 15 cm de diámetro, un sensor PU (velocidad de partículas y presión sonora) montados a una distancia de 27 cm sobre una estructura robusta que permite su fácil manipulación. El dispositivo portátil, tal como se muestra en la Figura 1, se conecta a través del acondicionador de señal Microflow MFSC-2 a un ordenador que se encarga de recolectar las señales medidas y realizar los cálculos mediante el software Velo. El rango de frecuencia de medición se puede establecer entre 300 Hz y 10.000 Hz.



Figura 1. Montaje de medida de la pistola de impedancia

El software Velo permite operar en el modo Scan and Paint basado en la adquisición de la presión y velocidad de las partículas de manera continua [5]. La medida se realiza desplazando el sensor manualmente sobre la superficie del material mientras se graba con una cámara. La grabación se divide en múltiples segmentos aplicando un algoritmo de cuadrícula espacial y cada fragmento de la señal se vincula con cada una de las celdas de la cuadrícula. Usando esta malla discreta de valores y aplicando una interpolación lineal se obtiene una representación en color del, por ejemplo, el coeficiente de absorción sobre la superficie del material. Un esquema del proceso descrito se muestra en la Figura 2.

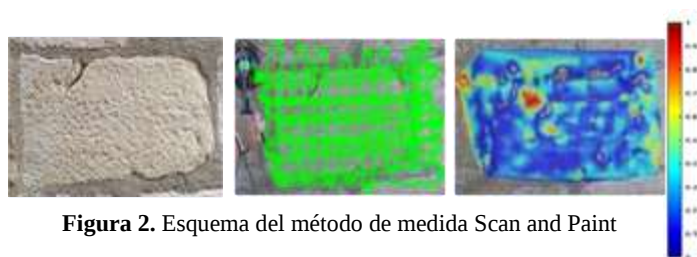


Figura 2. Esquema del método de medida Scan and Paint

Se ha escogido la piedra natural por ser uno de los materiales de mayor importancia en la construcción de edificios históricos. Sin embargo, su exposición a la intemperie da lugar a procesos de deterioro que abarcan desde las fracturas provocadas por los gradientes térmicos hasta la heladicidad o la cristalización de sales u otros componentes contaminantes. A pesar de que el proceso de deterioro es muy lento, algunos de estos procesos generan sobre los elementos pétreos daños irreversibles y de gran magnitud. Se han llevado a cabo mediciones sobre la superficie de materiales pétreos en

laboratorio e in situ. Se resumen en las siguientes secciones los resultados obtenidos hasta ahora en este tipo de materiales.

3. MEDICIONES EN PIEDRA NATURAL EN LABORATORIO E IN SITU

3.1. En laboratorio

En el laboratorio se han llevado a cabo mediciones en placas de piedra caliza nueva con superficies lisas y de distinta densidad y porosidad: la piedra de Colmenar, piedra de Hontoria y piedra de Marés. En la Figura 3 se muestran fotos de la superficie de las placas de piedra y los valores de la densidad y la porosidad abierta de estas piedras.



Material	Densidad aparente (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Dimensiones
Piedra de Colmenar	2504 ± 24	7,45 ± 0,87	40 cm x 40 cm
Piedra de Hontoria	2102 ± 18	17,73 ± 1,45	25 cm x 25 cm
Piedra de Marés	1940 ± 13	28,37 ± 0,47	

Figura 3. Foto de la superficie de las placas, de izquierda a derecha, de piedra de Colmenar, de Hontoria y de Marés. Se indican los valores de la densidad, de la porosidad abierta y de las dimensiones de las placas de piedra natural.

Los resultados indicaron que conviene no trabajar con tamaños de placa menor de 25 cm y rodear la placa con material absorbente como una lana mineral [7]. El tamaño finito de la muestra se traduce en la presencia de oscilaciones en la curva de absorción que condicionan las frecuencias útiles en el modo Scan and Paint. Las imágenes se obtienen en tercio de octava y se establece el rango óptimo de frecuencias para el análisis entre 2500 y 5000 Hz.

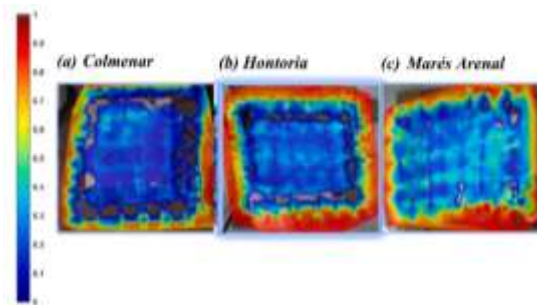


Figura 4. Imágenes de Scan and Paint de la superficie de las tres placas de piedra natural para la banda de frecuencia de 4000 Hz.

Las imágenes de la Figura 4 corresponden a la superficie de placas lisas sin lesiones en la banda de 4000 Hz. En las imágenes predominan las áreas de coeficiente de absorción entre 0,1 y 0,3. Estas áreas se alternan con otras de coeficiente de absorción de hasta 0,5 principalmente sobre la superficie de la piedra de Marés (de menor densidad y mayor porosidad), que estarían indicando, en principio, variaciones locales de la porosidad de la superficie de la piedra. Estas imágenes nos sirven como referencia para comparar con las imágenes que se obtendrán en piedras con lesiones

3.2. In situ

La iglesia de San Juan Bautista se encuentra localizada en el término municipal de Guadalix de la Sierra. Se trata de una iglesia realizada en varias etapas del siglo XVI siendo la primera de ellas la construcción de la torre. El conjunto de la torre está ejecutado con sillares de dolomías procedentes de canteras de la zona. En el año 1992 la iglesia fue sometida a un proceso de restauración. Las mediciones se llevaron a cabo en la pared exterior del tramo central de la torre (ver Figura 5), dado que presentaba sillares con lesiones muy variadas, generadas principalmente por la presencia de sales y humedades procedentes de los morteros de cementos utilizados en la intervención comentada [7]. La cristalización de las sales en los poros de los materiales pétreos es uno de los principales mecanismos causantes de su deterioro. Los sillares tienen unas dimensiones aproximadas de 50-60 cm de ancho 30 cm de alto y 50 cm de espesor.



Figura 5. Pared este del tramo central de la torre en la que se han llevado a cabo las mediciones in situ.

Como se aprecia en la Figura 5, los sillares del paramento muestran distintos procesos de deterioro que alteran y modifican la morfología de su superficie. En una inspección visual se detectan eflorescencias salinas y subeflorescencias que han dado lugar a la formación de desplazados, descamados y arenización. Los morteros de cemento de junta, con elevada dureza y rigidez, también generan importantes fisuras de retracción en el contacto con los sillares pétreos. En estos contactos mortero sillar también se concentran eflorescencias y subeflorescencias que provocan desplazados y caída de volúmenes perimetrales en los sillares.

En la Figura 6 se muestran a modo de ejemplo las imágenes de Scan and Paint para tres sillares y para cuatro bandas de tercio de octava. Los sillares muestran lesiones a diferentes

escalas: (a) un sillar con alveolos (huecos) en distintos grados de génesis, (b) un sillar con una fisura de unos 7 cm de longitud en la parte central superior y (c) un sillar con un descamado de poca profundidad y con fisuras y desplazados en los bordes del sillar.

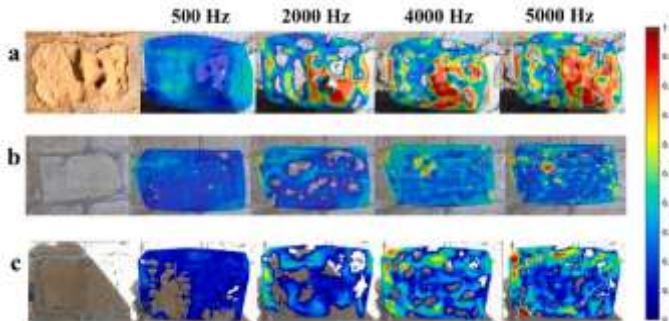


Figura 6. Foto e imágenes de Scan and Paint para cuatro bandas de tercio de octava para (a) sillar con alveolos de distintas dimensiones, (b) sillar con una grieta de unos 7 cm de longitud y (c) sillar con un descamado de poca profundidad y desplazados y pérdidas de volúmenes en la unión con el mortero.

La presencia de eflorescencias, oquedades, desplazados, suciedad o sales se traducen en cambios del coeficiente de absorción sonora. Las lesiones que dan lugar a la formación de cavidades, desniveles, bordes o aristas, en la superficie del sillar se muestran en las imágenes de Scan and Paint como áreas de máxima absorción a la frecuencia para la que la longitud de onda es comparable a las dimensiones de estos bordes o desniveles. Del dato de la frecuencia a partir de la que la lesión es visible es posible obtener información cuantitativa sobre sus dimensiones. La longitud del alveolo situado en el centro del sillar (a), de entre 12-14 cm, explica las zonas de máxima absorción visibles ya a partir de 2000 Hz, no por un aumento en la porosidad de la superficie del material pétreo, sino por un efecto de difracción o dispersión de las ondas incidentes en superficies que no son planas. Para frecuencias más altas, 4000 y 5000 Hz, la longitud de onda es comparable a la longitud del resto de alveolos presentes en el sillar y el área de la zona de máxima absorción se amplía a toda el área derecha del sillar. La zona central, menos deteriorada, presenta una tonalidad azul correspondiente a un coeficiente de absorción menor, con zonas de mayor coeficiente de absorción por el aumento de la porosidad o presencia de sales. La grieta de unos 7 cm del sillar (b) se empieza a distinguir del resto del sillar a 4000 Hz y en la imagen a 5000 Hz la grieta se visualiza de una manera clara como una zona de absorción máxima. La zona central del sillar, mejor conservada, se caracteriza por presentar el menor coeficiente de absorción (tono azul), con valores comparables a los presentados por la superficie de las placas nuevas medidas en el laboratorio. Valores más altos del coeficiente de absorción se miden en la zona de alrededor de la grieta y los bordes del sillar, apuntando a un aumento de la porosidad de la piedra o a la presencia de eflorescencias salinas. El descamado del sillar (c) no es

claramente visible para ninguna frecuencia, el desnivel que se genera en el sillar no es suficiente para visualizarlo por difracción o dispersión. Si se aprecia la pérdida de volumen de la parte superior izquierda del sillar, en la unión con el mortero, desde los 2000 Hz. Los bordes y las aristas entre el sillar y el mortero, de menor longitud, se distinguen a frecuencias más altas y de menor longitud de onda.

Los ensayos descritos evidencian el potencial de la pistola de impedancia como técnica de análisis no destructivo para materiales pétreos. Es una técnica que no interfiere con el funcionamiento del edificio pero la medida se tiene que hacer próxima a su superficie. Las zonas de máxima absorción se relacionan principalmente con lesiones que suponen una pérdida de material y la presencia de bordes y aristas. Estas zonas de máxima absorción se combinan en las imágenes con áreas en las que el coeficiente de absorción varía entre 0,2 y 0,6. Un valor próximo a 0,6 indicaría lesiones que alteran la superficie del sillar haciéndola más porosa. Valores de 0,2, áreas donde la piedra del sillar se presenta lisa o bien conservada. La evolución de las imágenes de Scan and Paint en función de la frecuencia permite un análisis cuantitativo de la escala de las lesiones. No obstante, una técnica sola no es capaz de arrojar resultados concluyentes. Para confirmar y validar los resultados obtenidos y para una interpretación más completa de los resultados es interesante combinar esta información con la obtenida con otras técnicas no destructivas utilizadas habitualmente en conservación del patrimonio histórico.

4. COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS NO DESTRUCTIVO

4.1. In situ

Se llevó a cabo una prospección de los sillares de la iglesia de San Juan Bautista con las siguientes técnicas no destructivas: la pistola de impedancia, termografía infrarroja, conductividad eléctrica y ultrasonidos [8]. Se muestran los resultados para tres sillares en la Figura 7. Con las dos últimas técnicas se utilizó una malla de muestreo de 5 cm x 5 cm sobre cada uno de los sillares y posteriormente se realizó una modelización superficial con el software Surfer. Para la pistola de impedancia se escoge la imagen de 5000 Hz. Las técnicas como termografía, pistola de impedancia y conductividad eléctrica proporcionan información sobre el deterioro superficial, los ultrasonidos proporcionan además datos fiables de la estructura interna del material.

De acuerdo con las imágenes de la Figura 7, la termografía detecta la presencia de sales en el mortero. Análisis mediante cromatografía iónica en muestras tomadas en el sitio confirmaron elevada presencia de sales en sillares y mortero, principalmente nitratos y sulfatos. La presencia de sales en el mortero se identifica en la imagen de termografía como áreas

de mayor temperatura. Por el contrario, una reducción de la temperatura superficial puede observarse en las áreas con alveolos debido a que éstos se comportan como aislantes térmicos. La termografía confirma que las zonas de más alto coeficiente de absorción del sillar 3 combinan el efecto del descamado y la presencia de sales, sin embargo la grieta del sillar 2 y el desplazado del sillar 1, lesiones detectadas por la pistola de impedancia, no tienen un efecto notable sobre la termografía.

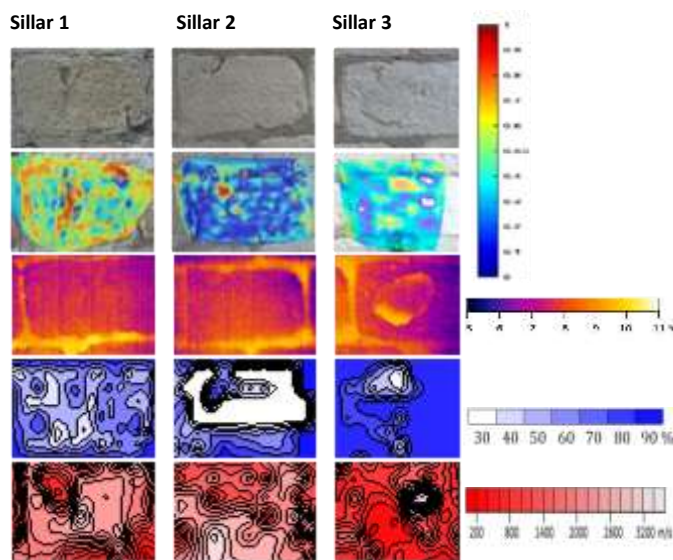


Figura 7. Imágenes para tres sillares con cuatro técnicas de evaluación no destructiva, de arriba abajo: 1. Pistola de impedancia, 2. Termografía infrarroja, 3. Conductividad eléctrica y 4. Ultrasonidos

La medida de la conductividad eléctrica permite evaluar la humedad superficial de los sillares. Los valores de humedad que se miden son altos, lo que confirmaría la presencia de sales higroscópicas que aumentan la retención de agua. Hay una buena correspondencia entre las imágenes de conductividad y las de la pistola de impedancia. Las variaciones en la humedad superficial se corresponden con las variaciones del coeficiente de absorción en el descamado del sillar 3, la zona no deteriorada del sillar 2 y en la imagen heterogénea que para ambas magnitudes presenta el sillar 1. La formación de eflorescencias salinas pulverulentas o en costra dura se ve favorecida por la evaporación de las humedades de los sillares. Los valores más bajos de humedad, en el sillar 2 y el sillar 3, se corresponden con zonas de coeficiente de absorción bajo indicando zonas mejor conservadas o superficies en las que las sales están llenando la estructura porosa. La baja humedad y el alto coeficiente de absorción que se mide alrededor del descamado del sillar 3 indicaría sales dispuestas de manera pulverulenta y porosa.

Las imágenes de ultrasonidos muestran las velocidades más bajas donde el sillar está más deteriorado, como en los bordes

y el desplazado del sillar 1, la grieta y el lateral derecho del sillar 2 y la zona central correspondiente al descamado del sillar 3, zonas que presentan alto coeficiente de absorción. Los valores más altos de la velocidad de ultrasonidos se miden donde el sillar está mejor conservado, como las zonas centrales a ambos lados del desplazado del sillar 1 y la parte inferior de la grieta del sillar 2 que además se corresponden con las zonas de menor coeficiente de absorción.

Los resultados que ofrece la pistola de impedancia son confirmados y completados por las otras técnicas [8]. La pistola de impedancia puede permitir una cartografía inicial del edificio con la medición de varios sillares en un tiempo corto. La técnica se podría usar para una inspección inicial y establecer a partir de ahí que partes requieren un análisis más específico con más técnicas.

4.2. En laboratorio

Teniendo en cuenta que las sales son una de las causas de deterioro más importante se diseña un experimento para monitorizar el deterioro acelerado por cristalización de sales en el laboratorio según la norma UNE EN 12370 para la piedra de Colmenar y la piedra de Marés [9]. Cada 7 ciclos, consistentes cada uno en la inmersión durante 2 horas en la solución salina y secado a unos 70 grados durante al menos 20 horas, se realiza un estudio de control de la evolución de la degradación de las placas mediante técnicas no destructivas. Las muestras fueron sometidas a un total de 35 ciclos. La reacción al proceso de envejecimiento con sales fue diferente debido a la diferencia de textura y composición de cada una de las piedras, generándose procesos patológicos concretos para cada una de ellas. La piedra de Colmenar presenta un bajo porcentaje de porosidad, en torno al 8 %, con un tamaño de poro predominante entre 0,01 y 5 micras. La piedra de Marés presenta un porcentaje de porosidad más alto, un 28 %, con un tamaño de poro predominante entre 10 y 120 micras. De manera que la piedra de Marés presenta mayor accesibilidad al agua y a las sales. La pistola de impedancia muestra resultados variables como se muestra en la Figura 8 con las imágenes correspondientes a 0, 14 y 35 ciclos que la revela de nuevo como técnica útil para la identificación prematura de lesiones superficiales.

La piedra de Colmenar se mantiene con una masa prácticamente constante durante los ciclos, sufriendo una ligera disminución del 0,4 % debido a desprendimientos en los bordes de la placa y algunas otras partes de la superficie. La imagen inicial de la pistola de impedancia es una imagen con áreas de coeficiente de absorción entre 0,2 y 0,4 con predominio de las áreas de menor coeficiente de absorción. Las zonas de coeficiente 0,4 se amplían con los ciclos indicando zonas de la superficie en la que se depositan sales. Cuando la porosidad es baja la sal cristaliza principalmente sobre la superficie como se ven en la imagen real de la piedra

y puede dar lugar a mayor absorción o dispersión que en cualquiera de los dos casos se traduce en un aumento del coeficiente de absorción.

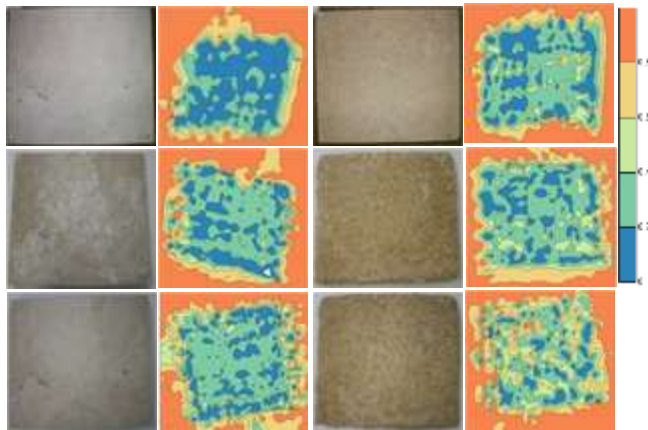


Figura 8. Imágenes a 5000 Hz de la pistola de impedancia para 0, 14 y 35 ciclos para la piedra de Colmenar y de Marés.

La piedra de Marés experimenta una disminución del volumen en torno al 20 % debido a la pérdida gradual de masa desde los ciclos iniciales por la disgregación de los bordes y vértices principalmente pero también de la zona central de su superficie. En la imagen a los 14 ciclos las zonas en las que se mide el coeficiente de absorción más elevado estarían empezando a indicar la presencia de bordes y de la superficie de pérdida de material. La pistola de impedancia reproduce como si de una fotografía de la superficie se tratase, con valores crecientes del coeficiente de absorción, las zonas en las que la superficie se mantiene, las zonas en las que la superficie ha modificado su porosidad y las zonas de mayor coeficiente de absorción que indicarían la pérdida de material [9].

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo se ha evaluado la viabilidad del uso de la pistola de impedancia como técnica no destructiva en materiales pétreos para conservación del patrimonio histórico. El uso de esta técnica arroja novedades interesantes para su empleo como una técnica más de estudio complementaria a las utilizadas en la actualidad. Presenta la ventaja, respecto a otras técnicas que se trata de una técnica de manejo sencillo, el tiempo de medición es corto y permite medir sobre áreas grandes. Las capas de suciedad o presencia de sales se traducen en variaciones del coeficiente de absorción respecto al valor de la piedra sin lesiones. Las lesiones que dan lugar a la formación de cavidades, desniveles, bordes o aristas, se muestran en las imágenes como áreas de máxima absorción a la frecuencia para la que la longitud de onda es comparable a las dimensiones de los bordes o desniveles que presenta la lesión. En el caso de tener que elegir la imagen que represente el estado de la superficie,

las frecuencias más adecuadas en piedra serían 4000 y 5000 Hz. En placas de piedra en el laboratorio, el rango útil de frecuencias es dependiente del tamaño. Es conveniente no trabajar con placas de dimensiones menores de 25 cm x 25 cm. Los resultados que se han derivado hasta ahora son muy interesantes y prometedores de manera que se plantea continuar con las siguientes líneas:

- ❖ explorar las posibilidades de la pistola de impedancia en el modo de operación de pérdidas por transmisión para la detección de lesiones internas en muros de edificios
- ❖ monitorizar lesiones en materiales pétreos por otros agentes, como por ejemplo en un ensayo de envejecimiento por heladicidad
- ❖ ampliar las evaluaciones in situ y en laboratorio a otros tipos de materiales: granitos o areniscas, también en hormigones o para detectar zonas de despegue en morteros de revestimiento

6. REFERENCIAS

- [1] A. Owda, J. Balsa-Barrero and D. Fritsch, Methodology for digital preservation of the cultural and patrimonial heritage: generation of a 3D model of the Church St. Peter and Paul (Calw, Germany) by using laser scanning and digital photogrammetry, *Sensor Review*. 38, pp. 282–288, 2018.
- [2] J. Corso, J. Roca and F. Buill, Geometric analysis on stone façades with terrestrial laser scanner technology, *Geosciences (Basel)* 7 (103), pp. 1–12, 2017.
- [3] C. Moses, D. Robinson and J. Barlow, Methods for measuring rock surface weathering and erosion: A critical review, *Earth-Science Reviews* 135, pp. 141–161, 2014.
- [4] M. E. Hatir, M. Korkanç and M. Başar, Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: the Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, pp. 3465–3478, 2019.
- [5] E. Tijs, H. E. de Bree, S. Steltenpool and J. Smyrnova, Scan and Paint: a novel sound visualization technique, *Proceedings of Internoise 2010, Lisbon*, 2010.
- [6] A. Pedrero, M. A. Navacerrada, D. de la Prida, L. Iglesias y A. Díaz-Chyla, On the accuracy of the sound absorption measurement with an impedance gun, *Applied Acoustics* 158, 107039, 2020.
- [7] M. A. Navacerrada, M. M. Barbero-Barrera, R. Fort, D. de la Prida, J. C. Núñez and T. S. Gómez, Application of acoustic impedance gun to non-destructively monitor stone damage, *Construction and Building Materials* 323, 126510, 2022.
- [8] R. Fort, J. Feijoo, M. J. Varas-Muriel, M. A. Navacerrada, M. M. Barbero-Barrera and D. de la Prida, Appraisal of non-destructive in situ techniques to determine moisture- and salt crystallization-induced damage in dolostones, *Journal of Building Engineering* 53, 104525, 2022.
- [9] M. Sánchez, M. A. Navacerrada, R. Fort and M. M. Barbero-Barrera, Assessment of limestone cladding deterioration due to crystallization of salts by non-destructive techniques, *Construction and Building Materials* 400, 132640 (2023).