



EMISIÓN ACÚSTICA GENERADA POR EL DAÑO POR CRISTALIZACIÓN DE SALES EN PIEDRAS NATURALES DE GRANADA

Autores: Jessica Gallego¹, Elisabet Suárez¹, Antolino Gallego¹, José Luis Piqueras², Francisco Sagasta¹

¹Dpto. de Física Aplicada. Grupo de Investigación SNADS. Universidad de Granada

²Dpto. de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Granada

elisabetsv@ugr.es

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados y análisis preliminares de la Emisión Acústica (EA) registrada durante un ensayo de cristalización de sales en dos tipos de piedras naturales, calcarenita de Santa Pudia y caliza de Sierra Elvira, características de las construcciones de Andalucía Oriental y, en particular, de Granada.

Los resultados muestran que el daño generado durante el enfriamiento es mayor que en las etapas de inmersión y secado, registrándose una gran cantidad de EA en esta etapa. Además, se pueden distinguir dos mecanismos diferentes de generación de EA, tanto en la etapa de inmersión como en la etapa de enfriamiento.

Introducción

El fenómeno de la cristalización de la sal puede observarse sobre la superficie o en las capas externas de las piedras de algunas construcciones. Esta sal se observa en forma de eflorescencias o cortezas blanquecinas que contribuyen a una desagradable apariencia de la superficie original de la piedra. Son sales solubles

formadas por una solución parcial de la piedra y en los morteros, por el agua en circulación. Debido a los cambios de las condiciones termodinámicas y la evaporación del agua, la sal precipita dentro de los poros de la piedra produciendo tensiones. Muy a menudo la nueva sal así formada es hidratada y, durante su cristalización, tensiona las paredes del sistema poroso. Si las tensiones son suficientemente duraderas e intensas, producen microfisuras en la piedra, contribuyendo de manera importante a su deterioro [1]. Este deterioro es, especialmente, importante en las construcciones históricas y esculturas hechas de piedra.

El comportamiento de la solución salina depende de las características propias de la sal (solubilidad, diferentes estados de hidratación y polimorfismo del sulfato de sodio anhidro) y del medio. La gran mayoría de los cambios de fase de las sales que existen en la práctica ocurren a presión y temperatura constantes. No obstante, debido a que la disolución ve alterada su concentración de sal al estar sometida al proceso de cristalización, la sal experimenta cambios térmicos, dando lugar a la formación de sus diferentes fases. La Figura 1 muestra los cambios de fase que sufre la solución en función la temperatura y la humedad relativa.

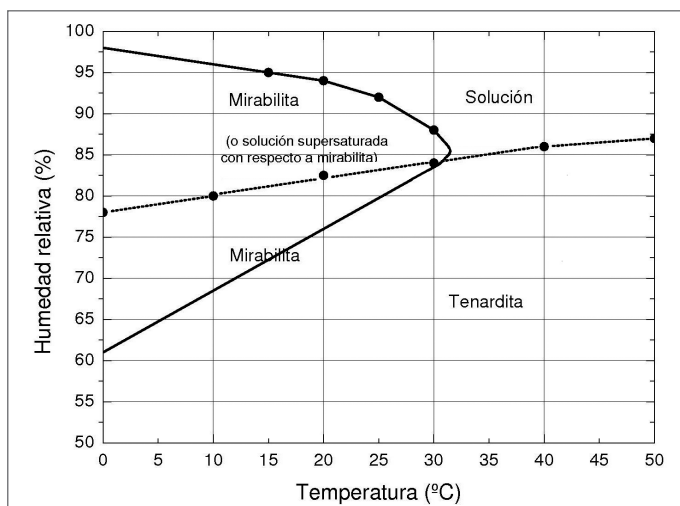


Figura 1. Diagrama de solubilidad del sistema sulfato sódico-agua en relación a la humedad relativa y la temperatura



Figura 2. Izq.: Palacio de Carlos V ubicado en el interior de la Alhambra. Dcha.: Fachada de la Catedral de Granada

El método de Emisión Acústica (EA) ha sido utilizado para detectar y evaluar daño activo en materiales como el hormigón, metales, cerámica, etc. [1-9]. En el caso de la piedra natural de uso monumental existen amplios e importantes resultados preliminares publicados en los años 80 y 90 por el Grupo de Petrofísica del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo [1], que muestran la efectividad del método de EA para seguir la evolución de las tensiones internas en la piedra durante los procesos de hidratación sufridos por los cristales de Na_2SO_4 [1,10-13].

El objetivo del presente trabajo es profundizar en el conocimiento del comportamiento de la sal como agente que provoca el deterioro de las rocas en monumentos, a partir de la aplicación del método de EA mediante ensayos de laboratorio, usando equipamiento y programas de análisis más actualizados y con más prestaciones, y su aplicación por primera vez a las piedras naturales de Granada. No obstante, estos ensayos y resultados son de naturaleza introductoria a una futura investigación más amplia.

Este método podría llegar a aplicarse a otros materiales sometidos a ambientes salinos (de sulfatos en este caso), en hormigones por ejemplo, y así poder estimar la durabilidad de los materiales y del edificio, si fuese posible.

Materiales y metodología

Tipos de piedras a ensayar

En este trabajo se han estudiado dos tipos de piedras, la calcarenita de Santa Pudia y la caliza de Sierra

Elvira, con claras diferencias en sus propiedades (véase la Tabla 1), permitiendo establecer, más fácilmente, las diferencias en cuanto a su comportamiento acústico. Se han elegido estas piedras porque han sido utilizadas en diversos monumentos de Granada como el Palacio de Carlos V situado en el interior de la Alhambra, o la Catedral (véase la Figura 2).

La calcarenita de Santa Pudia tiene un aspecto de grano grueso, con una porosidad y granos visibles, baja compacidad y coherencia moderada. Presenta una alta y continua absorción de agua. La mala cementación que presentan sus granos la hace susceptible a la desintegración granular, por lo que sus valores de dureza son bajos en comparación con otras piedras. En cuanto al secado, debido a la buena conexión entre los poros, estas piedras están casi completamente secas y en equilibrio, bajo condiciones ambientales naturales.

Las características petrográficas y físico-mecánicas de la caliza de Sierra Elvira le confieren una calidad técnica y durabilidad muy notables para su utilización como material de construcción estructural y ornamental. Destaca su elevada densidad, que le confiere una baja porosidad. Este factor es determinante a la hora de analizar los resultados tras el ensayo de cristalización, ya que no se prevé que sufra grandes alteraciones superficiales. Además, su durabilidad viene motivada por su bajo coeficiente de anisotropía, reflejado en los escasos daños generados por esfuerzos mecánicos debidos a dilataciones y contracciones asociadas a variaciones térmicas, factor determinante en el deterioro de otros tipos de rocas ornamentales.





| PROPIEDAD | CALCARENITA | CALIZA |
|---------------------|--|--|
| Tipo | Roca sedimentaria detrítica formada por fósiles calcáreos cohesionados por cemento carbonatado | Roca sedimentaria formada a partir de barro calizo rico en fragmentos fósiles |
| Color | Amarillento a pardo claro | Verde grisáceo con bandas blancas de calcita |
| Porosidad | 12-24% | < 1% |
| Compacidad | 0.65 | 0.98 |
| Coef. absorción | 16.5% | 0.09% |
| Densidad | 1.74 g/cm ³ | 2.71 g/cm ³ |
| Aspecto superficial |  |  |

Tabla 1. Características y propiedades de la calcarenita y la caliza

Se prepararon 14 probetas cúbicas para cada tipo de piedra, con dimensiones de 5 x 5 x 5 cm³ en el caso de la caliza, y de 10 x 10 x 10 cm³ para la calcarenita. De entre todas las muestras, se eligieron 2 al azar para realizar el seguimiento del proceso mediante EA.

Descripción del ensayo

El ensayo de cristalización, conocido como ensayo de envejecimiento acelerado, se realizó siguiendo la norma UNE-EN 12370:1999 [2]. Este ensayo consiste en la realización de varios ciclos compuestos de 3 etapas, como se muestra en la Figura 3. En este caso se realizaron 11 ciclos.

Para la **primera etapa, inmersión**, con una duración de 2 horas, las probetas se sumergieron en solución acuosa al 14% de sulfato de sodio decahidratado. Durante el registro de EA se utilizó un recipiente de vidrio individual para cada tipo de piedra. La solución se renovó cada 3 ciclos, dado que en los recipientes de la calcarenita, la cantidad de material disuelto

acumulado en el fondo era muy elevado. En los ciclos en los que no se renovó la solución, se rellenó con agua destilada hasta completar el nivel apropiado. Así la concentración permaneció próxima al 14% inicial.

En la **segunda etapa, secado**, con duración de 18 horas, se introdujeron las piedras en un horno de ventilación forzada a una temperatura de 105 ± 5 °C.

En la **tercera etapa, enfriamiento**, con una duración de 4 horas, las piedras permanecieron a temperatura ambiente. La duración de esta etapa fue superior a la que indica la norma, 2 ± 0.5 h, para poder comparar los resultados obtenidos con los que establecieron Montoto y colaboradores en [1].

Tras cada etapa se registraron la temperatura y humedad relativa en las estancias, y los pesos de las piedras.

Antes de comenzar el ensayo de cristalización, hubo que llevar las probetas a masa constante según normativa. Para ello, se sometieron a secado en horno de ventilación forzada, a una temperatura de 105 ± 5 °C, hasta

que se alcanzó su masa constante, esto es, cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas, comprendidas en un intervalo de 24 ± 2 horas, no fue superior al 0.1%. Alcanzada esa masa, las probetas se etiquetaron de forma permanente y se volvieron a pesar.

Instrumentación de EA

Para registrar las señales de EA se utilizó un equipo *Vallen Systeme AMSY-5*. Se usaron 4 canales con 4 sensores piezoeléctricos multiresonantes tipo VS45-H, con un rango de sensibilidad con frecuencias entre 20 y 500 kHz, uno para cada una de las piedras estudiadas. Se colocaron centrados en la superficie de una de sus caras. Para amplificar la señal se usaron 4 preamplificadores AEP4 de 34 dB de ganancia.

Como se ha explicado, el ensayo de cristalización consistió de 3 etapas: inmersión, secado y enfriamiento. Sólo se registró la EA en las etapas de inmersión y enfriamiento durante los 11 ciclos en 4 de las muestras, 2 piedras de calcarenita y 2 piedras de caliza. Se descartó la monitorización de EA en la fase de secado debido a la complejidad para acceder a la piedra dentro del horno y porque en estudios previos se concluyó que la EA en esta etapa era despreciable [10].

En las 2 etapas en las que se registró EA (inmersión y enfriamiento), se colocó una pieza de vidrio de 15 mm de espesor entre la superficie de la piedra y el sensor, con las mismas dimensiones que la cara de la piedra, $10 \times 10 \text{ cm}^2$ en el caso de la calcarenita, y $5 \times 5 \text{ cm}^2$ en el caso de caliza, a modo de guía de ondas. Se colocó una capa de acoplante entre la superficie de la piedra y el vidrio y entre el vidrio y el sensor, para proporcionar una buena transmisión acústica. La función del vidrio era asegurar una correcta transmisión al sensor de las ondas generadas en la piedra, así como tener una superficie de contacto entre la piedra y el

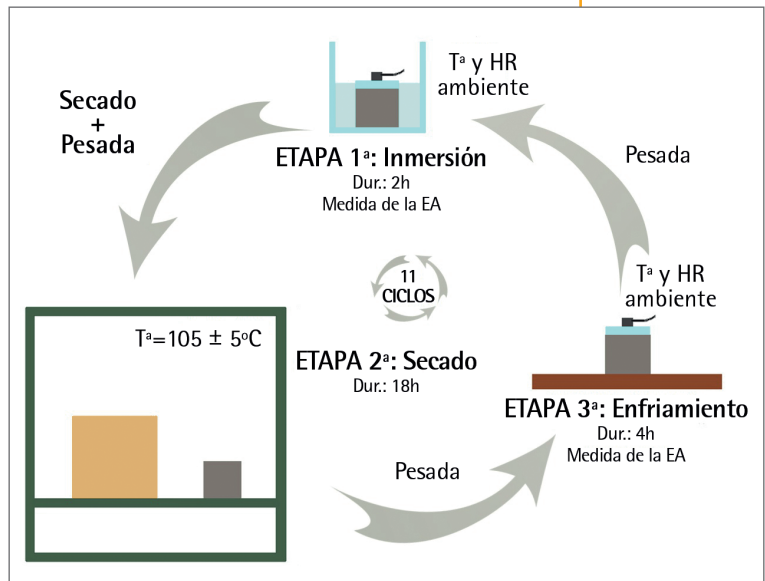


Figura 3. Desarrollo de un ciclo del ensayo de cristalización con medida de EA

sensor lo más uniforme posible (véase Figura 4). Además, permite una separación que impide que el sensor pueda captar solución salina directamente o por capilaridad, evitando el daño del sensor. También impide el contacto directo piedra-sensor en la fase de enfriamiento, lo que hace que el intervalo de temperatura admisible del sensor no se supere.

Las probetas se colocaron sobre una mesa independiente del equipo, con bandas de goma entre las patas y el suelo, para aislar el ensayo de posibles vibraciones o señales ruidosas externas. En la imagen izquierda de la Figura 4 se muestran las probetas en la primera etapa de inmersión. Los sensores 1 y 2 corresponden a las piedras de calcarenita y los sensores 3 y 4 a la caliza. Los sensores se sujetaron al recipiente mediante una cinta, para impedir el movimiento del sensor durante el tiempo de ensayo. En el caso de la caliza, debido a su menor tamaño, se colocó una pesa sobre el sensor para facilitar su sujeción. Las piedras con los sensores colocados durante el enfriamiento del tercer ciclo se muestran en la imagen derecha de la Figura 4.

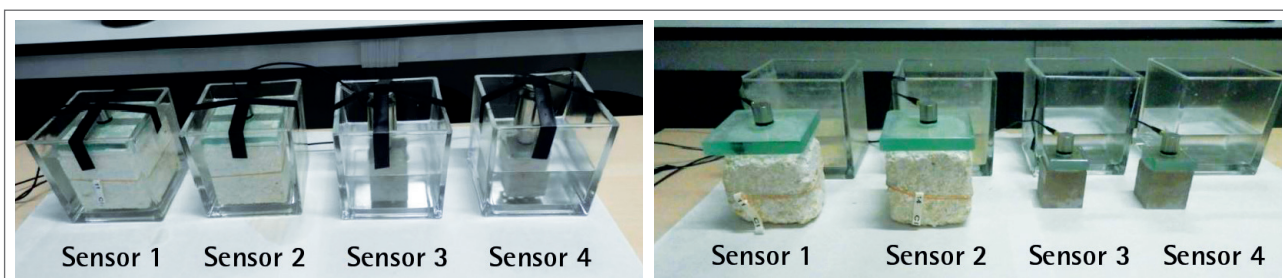


Figura 4. Colocación de las piedras y sensores según etapas. Izq.: Inmersión. Dcha.: Enfriamiento

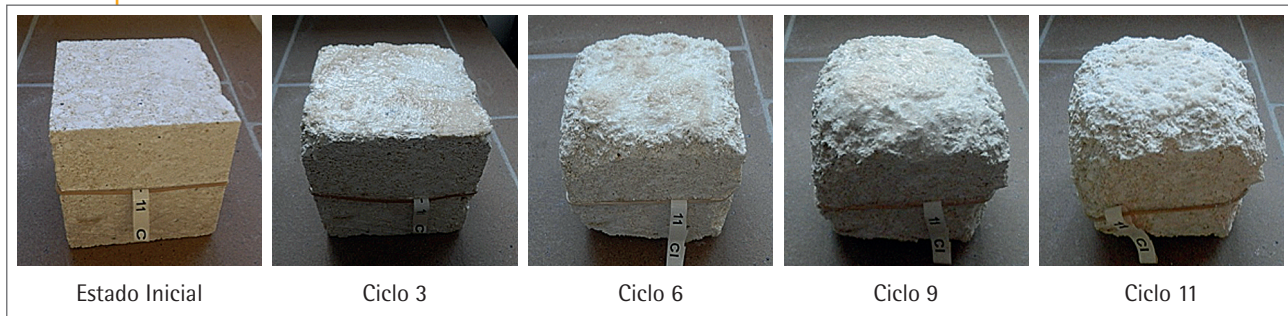


Figura 5. Seguimiento fotográfico de la evolución de la probeta calcarenita 1

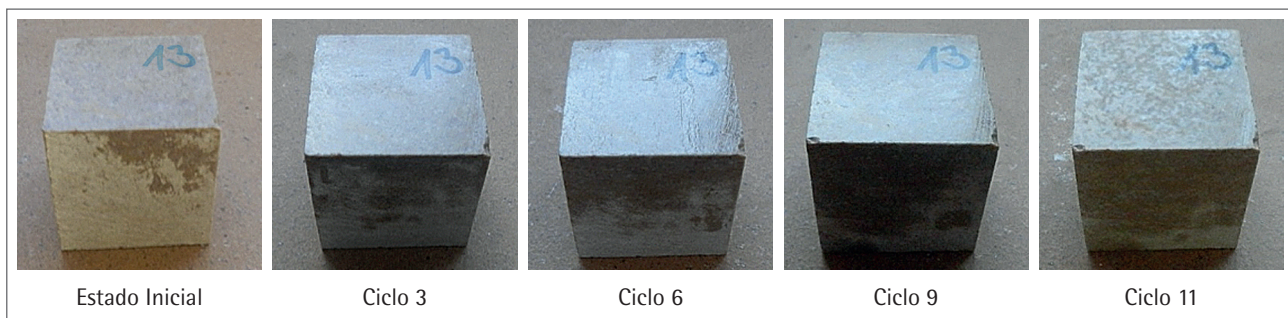


Figura 6. Seguimiento fotográfico de la evolución de la probeta caliza 1

Resultados y discusión

Cambios superficiales

Las Figuras 5 y 6 muestran el seguimiento fotográfico en algunos ciclos del estado de la probeta de calcarenita 1 y la caliza 1 respectivamente, tras la etapa de enfriamiento, con el objetivo de comprobar, visualmente, el deterioro sufrido en cada una.

Las probetas de calcarenita quedaron notablemente deterioradas, experimentando un importante desprendimiento de material en sus caras, por lo que la geometría final difirió bastante de la que presentaba antes del inicio del ensayo. Se sabe que la deposición de cristales de sulfato sódico tiene lugar dentro de los poros más grandes de la piedra. Los cristales situados en la superficie forman capas delgadas de unos pocos milímetros que se desprenden sucesivamente junto con las capas superficiales de calcarenita [14].

Sin embargo, en las probetas de caliza no se apreció un deterioro relevante de manera visual. Únicamente pudo observarse un cambio de tonalidad en la cara superior debido al contacto con la grasa de silicona utilizada como acoplante acústico. En la caliza la sal se concentra fundamentalmente en una estrecha zona debajo de la superficie del material, aproximadamente de 2.6 mm de profundidad, dando lugar a daños en el material debido al desprendimiento de capas de la superficie. El número de ciclos del ensayo no es significativo para que se produzca daño superficial en la caliza.

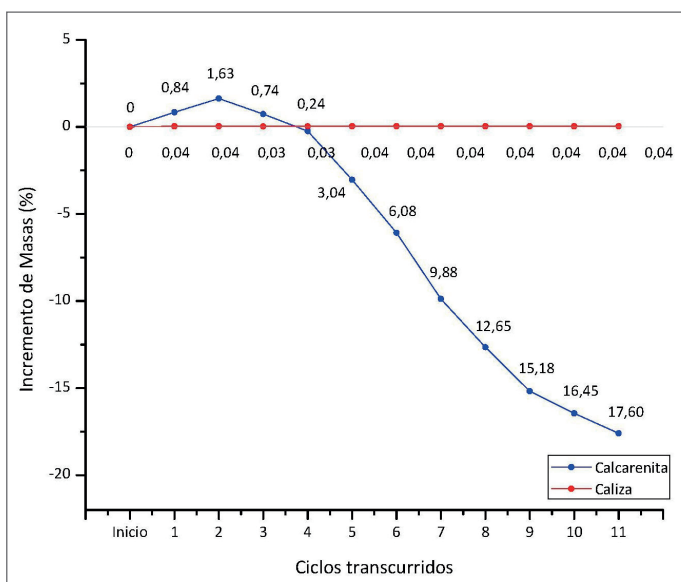


Figura 7. Incremento de masa en la calcarenita y la caliza, tras el enfriamiento

Variación de la masa

Al finalizar cada una de las 3 etapas de los 11 ciclos se comprobó la evolución de la masa de cada probeta. La Figura 7 muestra las variaciones de masa relacionadas con el número de ciclos transcurridos. La calcarenita

sufrió un aumento de masa en los 2 primeros ciclos debido a la colmatación de los poros, y luego un claro descenso debido a la pérdida de material por el deterioro sufrido durante el ensayo. Sin embargo, en la caliza la masa permaneció prácticamente constante.

Evolución del número de señales de EA en las etapas de inmersión y enfriamiento

El número de "hits" acumulados (número de señales de EA) en las 2 probetas de cada tipo fue similar en todos los ciclos, tanto en inmersión como en enfriamiento. Por ello, se ha elegido la de mayor actividad de EA registrada de cada tipo y se comparan entre ellas.

La imagen superior de la Figura 8 muestra la evolución temporal del número de "hits" de EA acumulados en la etapa de inmersión registrados en las probetas calcarenita 2 y caliza 2. El número total de "hits" acumulados en ambas piedras fue muy similar, algo mayor en el caso de la calcarenita, porque además de los "hits" debidos a la cristalización, habría otros debidos a la fisuración del material. Observando la evolución, en la calcarenita se puede observar un claro incremento de pendiente (aumento de la EA) a partir del cuarto ciclo. En la caliza se pueden distinguir 3 pendientes de crecimiento: la primera desde el inicio del ensayo hasta el tercer ciclo, la segunda incluye desde el ciclo 4 hasta el ciclo 8 y la última desde el ciclo 9 hasta el final del ensayo.

En la etapa de enfriamiento (imagen central de la Figura 8), los "hits" acumulados en la caliza 1 fueron, aproximadamente, 10 veces más que los acumulados en la calcarenita. Una de las causas puede ser la mayor porosidad de la calcarenita. En la caliza el medio por el que se propagan las ondas elásticas es más homogéneo que en la calcarenita, lo que se traduce en menor número de interfaces piedra-aire. Es bien conocido que el cambio del medio por el que se propaga una onda, produce su atenuación, provocando una disminución de su amplitud y su energía. Los continuos cambios de medio que sufre la onda propagándose a través de la calcarenita, hacen que disminuya su amplitud por debajo del umbral establecido para el registro de EA, registrándose un menor número de eventos de EA. Si observamos un ciclo de manera aislada, se aprecia una mayor emisión hasta la mitad del ciclo y luego una estabilización de los "hits" acumulados, indicando que la emisión se

redujo. Para la caliza, se produce un cambio de pendiente tras el cuarto ciclo.

En la imagen inferior de la Figura 8 se muestran conjuntamente la evolución de los "hits" acumulados a lo largo de las etapas de inmersión y de enfriamiento, comparando los resultados de las probetas calcarenita 2 y caliza 1. Se observa que la tendencia general está mucho más influenciada por los resultados de

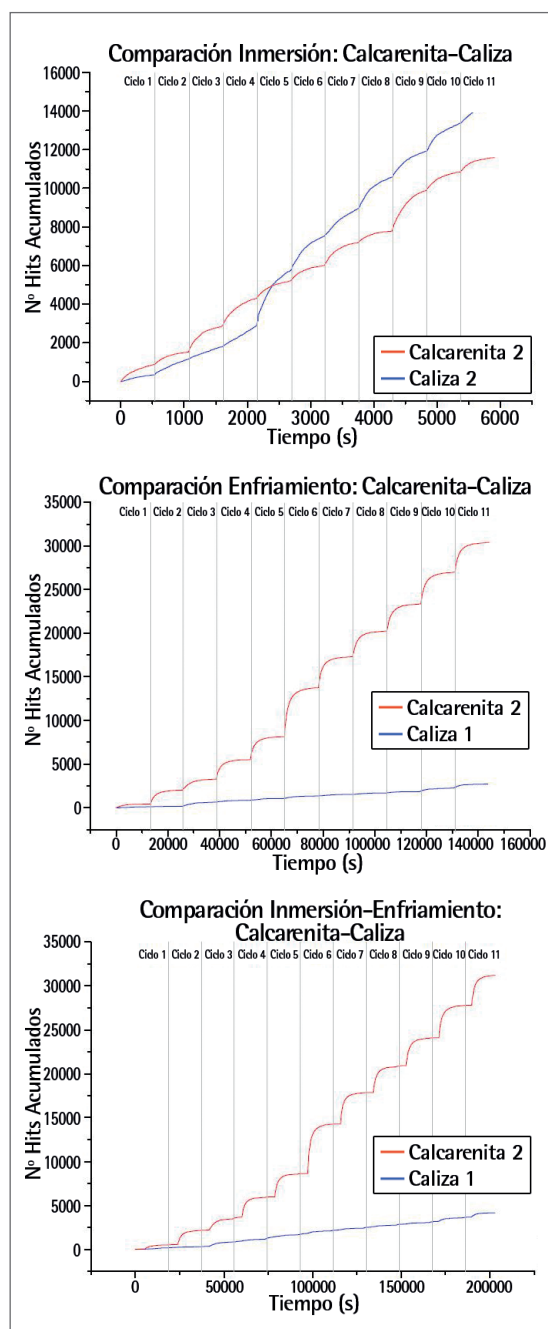


Figura 8. Comparación de los "hits" acumulados de la calcarenita y la caliza. Arriba: Etapa de inmersión. Centro: Etapa de enfriamiento. Abajo: Etapa de inmersión y de enfriamiento juntas

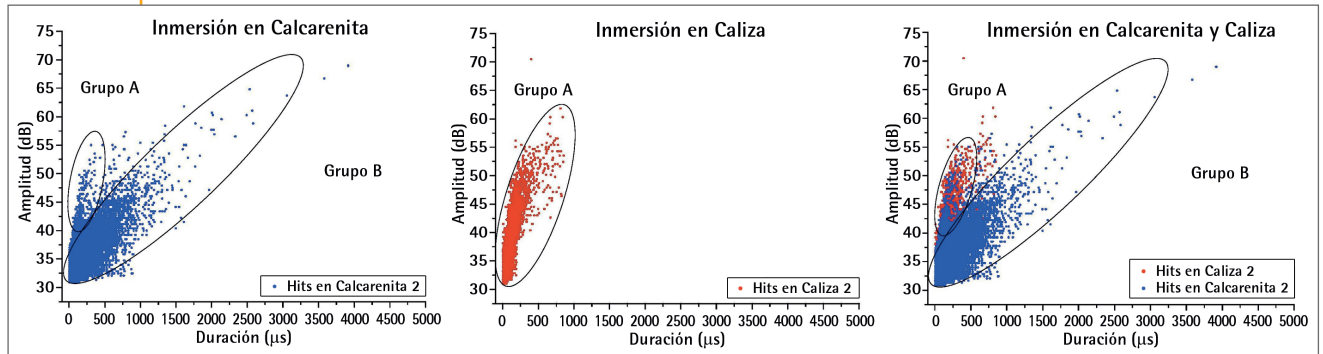


Figura 9. Amplitud y duración de los "hits" en la etapa de inmersión de la calcarenita, de la caliza y las dos superpuestas (de izq. a dcha.)

enfriamiento, debido a que en la caliza el número de "hits" registrado fue 25 veces mayor que en la etapa de inmersión. En la calcarenita, los "hits" registrados en enfriamiento fueron aproximadamente el doble que los registrados en inmersión. La primera parte de cada ciclo, de menor duración, corresponde con la etapa de inmersión. Se puede distinguir por el punto de inflexión. Esta etapa tiene una pendiente menor y más constante que la de enfriamiento, hecho que indica que se produjo un registro más continuo de "hits" durante dicha etapa, más claramente observable en la caliza.

Relación Amplitud / Duración de las señales de EA

En la imagen izquierda de la Figura 9 se muestra la relación entre la amplitud (en dB_{AE}) y la duración (en μs) de los "hits" registrados en inmersión en la probeta calcarenita 2. Se pueden distinguir claramente dos grupos de "hits", diferenciándose principalmente en la duración de las señales: un grupo A con señales de corta duración (hasta $250 \mu\text{s}$) y un grupo B con la mayoría de las señales de mayor duración (hasta $1500 \mu\text{s}$).

La Figura 10 muestra ejemplos de señales registradas en la probeta calcarenita 2 en el etapa de inmersión del ciclo 5. A la izquierda, una señal clasificada en el grupo A y a la derecha una señal del grupo B. Se observa una enorme diferencia en la duración.

En el resultado obtenido en la caliza 2 (imagen central de la Figura 9), todos los "hits" se acumulan en un mismo grupo A, con duraciones en el intervalo de 0 a $400 \mu\text{s}$ principalmente, quedando "hits" con mayor dispersión para duraciones superiores. La mayoría de las amplitudes son menores de $55 \text{ dB}_{\text{AE}}$. Si representamos, conjuntamente, los resultados de inmersión en ambas probetas (imagen derecha de la Figura 9), queda mejor constatada la clara diferencia entre ellas.

Por tanto, del estudio de la relación amplitud-duración de los "hits" registrados en la etapa de inmersión, se observa que:

- En términos generales, en la calcarenita se registran señales de mayor duración que en la caliza

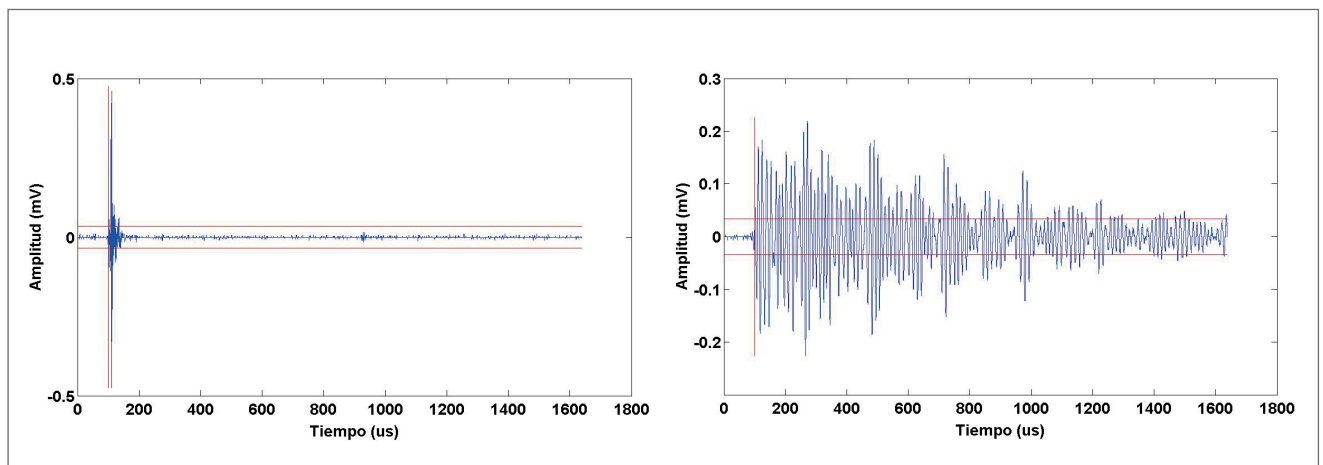


Figura 10. Señales registradas en la quinta etapa de inmersión de la probeta Calcarenita 2. Izq.: Señal del grupo A. Dcha.: Señal del grupo B

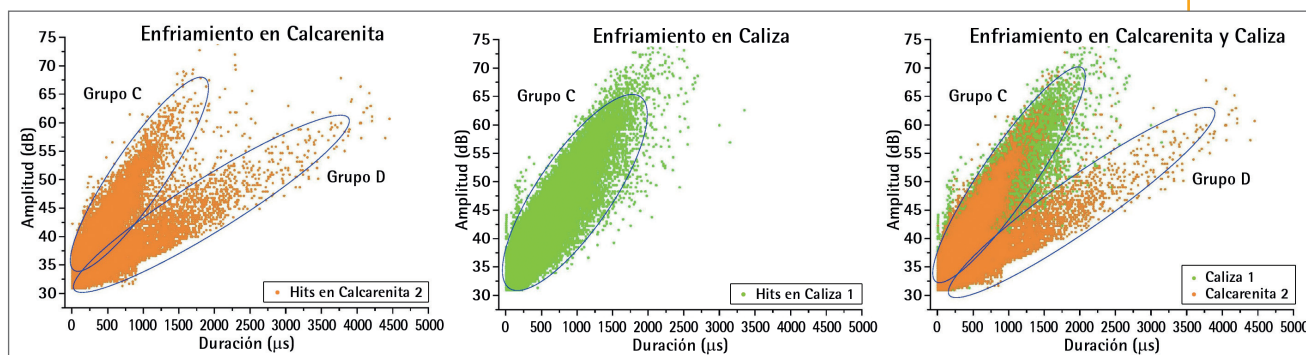


Figura 11. Amplitud y duración de los "hits" en la etapa de enfriamiento de la calcarenita, de la caliza y las dos superpuestas (de izq. a dcha.)

- Los "hits" registrados en la calcarenita se concentran en dos grupos, A y B, lo que indica dos mecanismos diferentes generadores de EA
- Los "hits" registrados en la caliza se concentran en un sólo grupo, coincidente con el grupo A de la calcarenita
- Por tanto, el grupo A, coincidente en ambas piedras, puede estar originado por la cristalización o nucleación de la sal, penetración de la solución en la piedra [15] y posibles reacciones químicas originadas en ambas piedras. Por su parte, el grupo B podría deberse a la fisuración y al desprendimiento que sufre la calcarenita, ya que pudo observarse gran cantidad de sedimentos

En enfriamiento (Figura 11), la cantidad de "hits" crea una nube de puntos mayor que en inmersión. En la imagen de la izquierda se muestran los "hits" registrados en los 11 ciclos de enfriamiento en la probeta de calcarenita 2. La división en 2 grupos (C y D) que se observaba en inmersión queda mucho más clara en este caso, estando más definidos los dos posibles mecanismos. Además, las señales tienen duraciones más altas que en inmersión (hasta 1500 μs mayores) y amplitudes 10 dB_{AE} mayores.

En la probeta de caliza 1 (imagen central de la Figura 11) se pone de manifiesto el aumento de "hits" registrados respecto de la inmersión, junto con el aumento de duración y de amplitud, del orden de 1500 μs y 20 dB_{AE} , respectivamente. En este caso, al igual que pasaba durante la inmersión, sólo se observa un grupo de "hits".

Tras la superposición de las gráficas correspondientes a ambos tipos de piedra (imagen derecha de la Figura 11),

se observa que uno de los mecanismos de EA en la calcarenita (grupo C) coincide con el agrupamiento de los "hits" de la caliza, como ocurría en inmersión, mientras que los "hits" del otro (grupo D) se sitúan por debajo de estos (mayores duraciones y menores amplitudes).

De la etapa de enfriamiento, de las relaciones amplitud-duración se puede extraer:

- Los "hits" registrados en la calcarenita se vuelven a concentrar en dos grupos, C y D, lo que vuelve a indicar dos mecanismos generadores de EA
- En la caliza, los "hits" se concentran en un sólo grupo, coincidente con el grupo C de la calcarenita
- El mecanismo asociado al grupo C puede ser debido al cambio térmico de las piedras, ya que es algo que ambas piedras experimentan. No obstante, su asociación a un mecanismo claro está aún sin determinar, y precisa de un análisis más profundo. El grupo D, se podría vincular con fisuración de la calcarenita, puesto que la caliza no sufrió daños por este mecanismo. Además, en piedras con alto grado de porosidad, como ocurre con la calcarenita, con poros de fácil acceso, se produce un secado completo de la solución, y esto posibilita que la sal precipitada en forma de thenardita (sal anhidra) experimente cambios cristalográficos, texturales, microfisuración, etc., en enfriamiento, originando EA. En cambio, en piedras poco porosas, como la caliza, no se produce un secado completo y no se produce EA durante el enfriamiento [1]

Las duraciones de las señales registradas, independientemente de la etapa del ciclo, fueron mayores en la calcarenita que en la caliza, lo que se explica por la mejor transmisión de las ondas elásticas en la caliza.



Conclusiones

Como resultado de la discusión de los resultados obtenidos, las primeras conclusiones de este trabajo son:

- Los descensos de masa son muy relevantes en la calcarenita, mientras que en la caliza las pequeñas variaciones, del orden de una décima de gramo, no son apreciables. La calcarenita, por su porosidad, tiende a decohesionarse más fácilmente y, a su vez, a facilitar la evaporación del agua de la disolución dejando en su interior sal anhidra
- Como se pudo demostrar ya anteriormente [1] en la etapa de enfriamiento se produce mayor EA que durante la inmersión, en ambas piedras. Parece por tanto claro que el enfriamiento, acompañado de la rehidratación de la sal y la consecuente expansión, es la etapa que causa más daños a la piedra natural de construcción
- En la etapa de inmersión, atendiendo a la relación amplitud-duración, se pueden distinguir dos mecanismos generadores de EA en la calcarenita y sólo uno en la caliza. El mecanismo común se puede deber a la cristalización, penetración de la sal en la piedra y otras posibles reacciones químicas. Por el contrario, en la calcarenita aparece otro mecanismo asociado a la fisuración y desprendimientos de material
- En la etapa de enfriamiento, también aparecen dos mecanismos diferentes en la calcarenita y sólo uno en la caliza. Sólo en la calcarenita se pueden detectar los cambios experimentados por la sal anhidra precipitada y posibles fisuraciones

Bibliografía

- [1] M. Montoto, R. M. Eibert, L. M. Suarez del Rio, V.G. Ruiz de Argandona y C. M. Grossi, 1991, "Acoustic Emission / Microseismic Activity Monitoring of Salt Crystallization for Stone Conservation", Journal of Acoustic Emission, vol. 10, pp. 35-41.
- [2] UNE-EN 12370, Noviembre 1999, "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales".
- [3] A. Carpinteri y G. Lacidogna, 2007, "Damage evaluation of three masonry towers by acoustic emission", Engineering Structures, nº 29, pp. 1569-1579.
- [4] S. De Santis y A. K. Tomor, 2013, "Laboratory and field studies on the use of acoustic emission for masonry bridges", NDT&E International, nº 55, pp. 64-74.
- [5] A. Anzani, L. Binda, A. Carpinteri, S. Invernizzi y G. Lacidogna, 2010, "A multilevel approach for the damage assessment of Historic masonry towers", Journal of Cultural Heritage, nº 11, pp. 459-470.
- [6] C. Baudin, F. Cambier y L. Delaey, 1986, "Aplicación de la técnica de emisión acústica al estudio de la fracturación de un material cerámico multifásico", III Encuentro del Grupo Español de Fractura, Sigüenza, Guadalajara, 17-18 de Abril de 1986, pp. 237-249.
- [7] A. Benavent-Climent, E. Castro y A. Gallego, 2009, "AE Monitoring for Damage Assessment of RC Exterior Beam-Column Subassemblages Subjected to Cyclic Loading", Structural Health Monitoring, vol. 8, pp. 175-189.
- [8] A. Benavent-Climent, E. Castro y A. Gallego, 2009, "Evaluation of low-cycle fatigue damage in RC exterior beam-column subassemblages by acoustic emission", Construction and Building Materials, vol. 24 (10), pp. 1830-1842.
- [9] A. Gallego, E. Suárez, J. M. Vico, C. Infantes y R. Piotrkowski, 2010, "Acoustic emission during three-point bending test of corroded galvanized steel", European Working Group on Acoustic Emission, EWGAE 2010, Viena (Austria).
- [10] C. M. Grossi, R. M. Eibert y L. M. Suárez del Río, 1997, "La emisión acústica aplicada al estudio del deterioro de la piedra en ensayos de cristalización con sulfato de sodio", Materiales de Construcción, vol. 47, nº 245, pp. 5-15.
- [11] C. M. Grossi, 1993, "Cristalización de sales en rocas monumentales porosas y su auscultación mediante emisión acústica", Tesis Doctoral en el Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo.
- [12] C. M. Grossi, R. M. Eibert y L. M. Suárez del Río, 1998, "Degradación y durabilidad de materiales rocosos de edificación en ambientes urbanos", Materiales de Construcción, vol. 48, nº 252, pp. 5-15.
- [13] R. M. Eibert, C. M. Grossi, L. Valdeon, F. J. Alonso y R. M. Marcos, 1990, "Estudio de laboratorio sobre la conservación de la piedra de la Catedral de Murcia", Materiales de Construcción, vol. 40, nº 217, pp. 5-15.
- [14] C. Rodríguez-Navarro y E. Doehne, 1999, "Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern", Earth and Surface Process Landforms, vol. 24, pp. 191-209.
- [15] A. La Iglesia, V. Gonzalez, V. Lopez-Acevedo y C. Viedma, 1997, "Salt crystallization in porous construction materials I. Estimation of crystallization pressure", Journal of Crystal Growth, vol. 177, pp. 111-118.