

CONTART 2018: VII Convención de la Edificación  
30 mayo - 1 junio 2018; Zaragoza (Spain): Colegio Oficial de  
Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Zaragoza. Escuela  
Universitaria Politécnica de La Almunia, p.676-684

066

**ANÁLISIS DE PATOLOGÍAS EXPANSIVAS MANIFESTADAS EN SOLERAS  
TRAS EL RECALCE DE LA CIMENTACIÓN EN LA IGLESIA DE SAN ANDRÉS  
(CALATAYUD)**

LÓPEZ JULIÁN, PEDRO LUIS<sup>1</sup>; ORTE RUIZ, DANIEL<sup>2</sup>; PÉREZ BENEDICTO,  
JOSÉ ANGEL<sup>3</sup>; ALEGRE ARBUÉS, JESÚS FERNANDO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, La Almunia, España  
E-mail: pllopez@unizar.es, Web: <http://www.eupla.unizar.es/>

<sup>2</sup>Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, La Almunia, España  
E-mail: daniorte81@gmail.com, Web: <http://www.eupla.unizar.es/>

<sup>3</sup>Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, La Almunia, España  
E-mail: joanpebe@unizar.es, Web: <http://www.eupla.unizar.es/>

<sup>4</sup>Arquitecto, Zaragoza, España  
E-mail: alegrearbues@hotmail.com, Web: <http://www.grucontec.com/>

**PALABRAS CLAVE:** Patologías, expansividad, taumasita, restauración.

**RESUMEN**

Las patologías constructivas relacionadas con fenómenos expansivos en el sustrato de apoyo de edificaciones son bien conocidas, siendo la etringita el mineral responsable de dichos procesos y existiendo estrategias para su minimización, principalmente el uso de cementos sulfato resistentes. No obstante y a pesar del uso de dichas formulaciones, se ha observado que existen patologías asociadas a fenómenos expansivos en los cuales es la taumasita el mineral responsable. El potencial expansivo de este minerales tres veces mayor que el de la taumasita, por lo que su posible aparición debe ser prevista y analizada en detalle. En este trabajo se presentan los resultados del estudio de patologías por expansividad manifestadas tras la actuación de recalce por micropilotaje en la Iglesia de San Andrés (Calatayud), donde, tras su ejecución, se comenzaron a manifestar levantamientos

centimétricos de las soleras en las zonas no sometidas a cargas verticales bajo la torre. El estudio detallado del fenómeno, principalmente desde el punto de vista del contenido mineralógico de los distintos niveles del subsuelo en las zonas afectadas, ha permitido identificar el origen del proceso (expansividad por formación de sales sulfatadas, relacionada con la operación de recalce estructural previa). También se han analizado las especiales condiciones que han concurrido en este caso y en las cuales, a pesar de emplear para el recalce un cemento sulfato resistente para así evitar la formación de etringita, la presencia de cal en el subsuelo ha dado lugar a la cristalización de taumasita, mineral que ha sido el responsable del fenómeno expansivo posterior a la intervención. El conocimiento de las condiciones de manifestación de este proceso servirá para adoptar precauciones en los proyectos de restauración monumental que impliquen la utilización de hormigones y morteros con cemento portland, así como para impulsar las investigaciones encaminadas a diseñar dosificaciones de cementos que permitan su minimización.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los trabajos de restauración o rehabilitación de edificios antiguos es muy común la utilización de materiales relativamente nuevos, como estrategia de sustitución de técnicas constructivas que después de muchísimos años se demuestran obsoletas por diferentes motivos, como por ejemplo la pérdida de los oficios, o en aplicación de los nuevos estándares de seguridad estructural que limitan las deformaciones de las estructuras, obligando a los técnicos contemporáneos a la utilización de nuevas técnicas que en numerosas ocasiones resultan contraproducentes para la conservación de estos edificios, además de irreversibles.

A raíz de nuestra experiencia sobre las intervenciones realizadas durante nuestra vida profesional se constata la preocupación que este tema produce, y se empieza a hablar sobre una técnica relacionada con la “desrestauración” de edificios de reciente intervención, y que están obligando a realizar estudios sobre cómo se están comportando los materiales contemporáneos en nuestros edificios históricos.

Se analiza en la presente comunicación la interacción de silicatos, carbonatos, sulfatos, agua y temperaturas bajas, que cuando actúan en conjunto son causantes de la formación de sales sulfatadas expansivas, concretamente de taumasita. Esta combinación de minerales aparece en los recalces de edificios que emplean hormigón de portland, pero que previamente habían sido cimentados con un conglomerante a base de cal aérea y apoyados en sustratos yesíferos.

Los estudios geotécnicos previos a la restauración, tal y como prescribe la normativa de referencia (EHE-08 en España; [1]), recomiendan utilizar cementos de bajo contenido en alúmina, denominados cementos sulfato resistentes, para cimentaciones o recalces en suelos con ambientes agresivos por presencia de sulfatos, y éste es el criterio que obviamente se ha utilizado para los recalces en edificios históricos.

Para el presente estudio se ha analizado el comportamiento anómalo que se detectó a raíz de una de las intervenciones en la Capilla Bautismal de la Iglesia Parroquial de San Andrés en Calatayud, que también se restauró en base a los criterios que la normativa marca y que como vamos a comentar en esta documentación se considera no tienen en cuenta otras causas de agresividad al cemento portland que aportan sales y entumecimientos a las estructuras anteriormente mencionadas.

Según el estudio geotécnico que se realizó previamente a la intervención estructural,

este monumento se cimienta sobre un terreno constituido superficialmente por un nivel de rellenos antrópicos de unos 5 m de espesor, de naturaleza arcillo-limosa y que incorporan fragmentos de gran tamaño y restos de materiales de construcción, con un contenido muy elevado de yeso (que supone un grado de exposición  $Q_c$  según la EHE-08; [1]). Es un nivel de resistencia muy baja, lo que dio lugar a una recomendación de recalce mediante micropilotaje para detener la evolución de las patologías asociadas a fenómenos de asentamientos excesivos. Dicho nivel presentaba además un contenido elevado en humedad, entre un 10 y un 25%, a pesar de que el nivel freático se localizó en esta zona a unos 10 m de profundidad.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Inspección visual de patologías

Después de la intervención de recalce realizada en la nave de la Iglesia Parroquial de San Andrés en Calatayud, se llevó a cabo la restauración de la capilla bautismal ubicada bajo la torre campanario. Uno de los problemas que presentaba la capilla era la mala conservación de sus paramentos así como de sus solerías, que exhibían graves deterioros relacionados con humedades y con precipitación de sales asociadas a un ascenso capilar de agua desde el subsuelo. Los paramentos fueron saneados y se hizo una recolocación de los azulejos originales. Se hizo además un saneado en profundidad de los restos que existían bajo solados hasta buscar el cimiento de la torre, se ejecutó solera de hormigón y se recolocó el pavimento original colocando algunas piezas nuevas.

Una vez finalizada dicha restauración, y en un intervalo corto de tiempo (2 años), comenzó a manifestarse un levantamiento de la solera, resultando más pronunciado en la zona central y menos en las proximidades de los paramentos, lo que daba a la solera un aspecto convexo. A pesar de encontrarse en la zona central, el apoyo de la pila bautismal no sufrió ascenso alguno. Los valores medidos del levantamiento de la solera llegaron a alcanzar un máximo de 5 cm, tomando como referencia tanto la zona adyacente a las paredes (que formaban parte de la estructura de soporte de la torre) como la pila bautismal, cuya cota de apoyo quedó por tanto por debajo del pavimento. En la Figura 1 se observan los detalles del aspecto de la solera afectada por la patología descrita.



Figura 1. Arriba, aspecto general de la Capilla Bautismal tras la restauración.  
Abajo, detalle de la solera afectada por expansividad por ataque sulfatado con formación de taumasita.

## 2.2 Análisis de morteros

La aparición de la patología tras la intervención llevó a plantear la posibilidad de que se hubiese producido la precipitación de alguna sal expansiva, a pesar de haberse empleado cemento sulfato resistente, y que dicha expansividad se manifestase en las zonas donde la solera no recibía carga vertical alguna. Para confirmar o descartar esta hipótesis se procedió a la toma de muestras bajo la solera de la capilla. De los distintos niveles identificados se recogieron muestras que fueron posteriormente analizadas por difracción de rayos X en

el laboratorio de la planta de la empresa CEMEX en Morata de Jalón. Esta metodología analítica permite la determinación de las fases mineralógicas presentes en un agregado sólido, y la ventaja de analizarlo e interpretarlo en dicho laboratorio estriba en su amplia experiencia en el análisis de morteros y cementos, ya que se utiliza intensivamente para el control de calidad de la planta. En concreto, se empleó un equipo D4 Endeavor de BRUKER (tensión máxima del equipo 50kV e intensidad máxima 50 mA). El análisis se realizó con un voltaje de 35 kV y una intensidad de 45 mA. El escaneo del eje 2theta empezó a los 10° y terminó a los 65° y el escaneo del ángulo theta empezó a 5° y terminó a 32,5°. El detector que se utilizó fue un LynxEye. Para cuantificar las fases se utilizó el programa TOPAS3 que utiliza el método Rietveld, y la base de datos de las estructuras usadas es el PDF-2.

### 3. RESULTADOS

Tras la inspección visual, se decidió desmontar las piezas de la solera, de barro cocido superficial, bajo las cuales apareció una capa de mortero compacto y con aspecto laminado, de unos 8 cm de espesor, y por debajo se encontró una capa de mortero de aspecto disgregado y muy húmedo. Bajo este nivel apareció ya el cimientado de la torre a base de yesones, que constituía la cimentación de apoyo de la torre.

En el nivel de morteros disgregados se tomaron 3 muestras a distintas profundidades, y una muestra más, representativa esta última del mortero laminado superior. El análisis mineralógico por difracción de rayos X de todas estas muestras se ofrece en la Tabla 1.

Para la interpretación de los resultados obtenidos hay que tener en cuenta que las muestras, previamente a su análisis, se secaron en estufa a 104 °C durante 24 horas, lo que ha podido influir en la presencia o ausencia de algunas fases minerales concretas. Por ejemplo, no se ha detectado la presencia de yeso, pero sí la de bassanita (hemihidrato, sulfato cálcico con media molécula de agua), debido precisamente a la necesidad de esta preparación previa de la muestra y que en este caso concreto ha provocado la citada transformación mineralógica.

El análisis realizado muestra la presencia en las muestras de un importante número de fases mineralógicas, pero todas ellas se pueden agrupar en tres grupos principales: los minerales presentes en la fracción de árido (y/o filler), los hidratos generados en el fraguado del cemento y, finalmente, las sales minerales formadas con posterioridad. En la Tabla 2 se presentan los valores porcentuales que suponen cada una de estas clases para las muestras analizadas, observándose varios aspectos destacables. Recordando que las muestras fueron tomadas a diferentes profundidades, se comprueba que desde la superficie y hacia el contacto con el sustrato hay un descenso acusado en la proporción de minerales procedentes de los áridos. Los dos morteros más superficiales tienen un contenido algo superior al 50% en peso, mientras que en los dos más profundos su presencia se reduce drásticamente, hasta alcanzar un mínimo del 13%.

Tabla 1: Contenidos mineralógicos (en % en peso) de las muestras analizadas. Los minerales se han agrupado en tres categorías, según correspondan a la fracción de árido, a los productos de hidratación o a las sales formadas.

	Fase Mineral	Mortero compacto (prof.5 cm)	Mortero 1 (prof. 10 cm)	Mortero 2 (prof. 13 cm)	Mortero 3 (prof. 16 cm)
ÁRIDOS	Calcita	24,96	16,88	7,31	2,75
	Calcita Mg	2,86	2,56	0,54	1,10
	Cuarzo	16,02	29,21	10,03	3,18
	Vaterita	7,10	3,81	3,05	1,30
	Magnesita	0,22	-	-	4,67
HIDRATOS	Portlandita	7,73	3,15	1,21	-
	C <sub>3</sub> S	0,44	0,47	0,04	1,18
	C <sub>6</sub> S <sub>3</sub> H	6,87	5,77	1,88	1,84
	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub> H	8,49	6,14	6,35	5,87
	C <sub>2</sub> AS	1,27	1,16	0,68	-
	Mullita	0,73	0,81	3,39	4,57
SALES	Arcanita	3,91	3,65	2,11	-
	Tobermorita	2,46	1,74	2,15	-
	Taumasita	0,34	1,41	2,01	2,34
	Ca-Langbeinita	0,78	0,90	1,11	-
	Langbeinita	-	1,28	-	3,88
	Singenita	4,39	3,27	-	-
	Bassanita	8,97	16,05	54,62	64,17
	Etringita	-	-	0,56	-
Akermanita	-	-	-	3,15	

Por su parte, el contenido total en minerales procedentes de la hidratación del cemento disminuye ligeramente, desde casi un 18% en el mortero más superficial hasta un 12-13% en los dos morteros situados a mayor profundidad. Finalmente, en el caso de los minerales salinos, cuya presencia normal no debería superar el porcentaje asociado al yeso (o su equivalente deshidratado, la bassanita) usado como retardante del fraguado, cuyo valor máximo es del 3%, se observan unos valores muy superiores a dicho umbral en todas las muestras, incrementándose su porcentaje en profundidad hasta un máximo del 73%. Dentro de este último grupo de minerales salinos, destaca la presencia de taumasita en todas las muestras analizadas, con unos contenidos totales bajos pero crecientes en profundidad. También se ha detectado la presencia de etringita, pero sólo en una de las muestras y en una proporción muy reducida.

De la observación de los resultados obtenidos se concluye que los morteros existentes bajo la solera de la capilla presentan una pauta de variación mineralógica en profundidad, consistente en una disminución cuantitativamente importante del porcentaje de árido, un aumento llamativo en la proporción de sales, así como una reducción progresiva aunque de menor magnitud en las fases minerales formadas en el fraguado y endurecimiento del cemento.

Tabla 2: Contenidos totales (en % en peso) de los grupos de minerales identificados.

Grupo Mineral	Mortero compacto (prof.5 cm)	Mortero 1 (prof. 10 cm)	Mortero 2 (prof. 13 cm)	Mortero 3 (prof. 16 cm)
Áridos	51,16	52,46	20,93	13,0
Hidratos cementantes	17,8	15,16	12,34	13,46
Sales	20,85	28,3	62,56	73,54

#### 4. DISCUSIÓN

La presencia de taumasita en los análisis aquí realizados viene a confirmar la hipótesis de partida, según la cual el abombamiento de la solera de la capilla, manifestado después de la intervención estructural en la iglesia (y que no se había observado previamente a dicha actuación), debía tener su origen en algún tipo de reacción con formación de sulfatos expansivos. El uso de cemento sulfato resistente en la obra de recalce conducía el razonamiento hacia la posible formación de taumasita, mineral que puede aparecer afectando incluso a formulaciones de cementos de este tipo.

La taumasita es un mineral sulfatado responsable de importantes procesos de degradación de hormigones y morteros, principalmente cuando estos materiales constructivos se encuentran enterrados o en contacto directo con el sustrato y sometidos a condiciones frías (con temperaturas por debajo de 15 °C), muy húmedas y con presencia en el medio de iones carbonato y sulfato [2]. Las reacciones de los sulfatos y carbonatos con la pasta hidratada del mortero dan lugar a la formación de la taumasita, una sal compleja cuya fórmula estequiométrica es  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$  [3] [4], caracterizada por presentar los átomos de silicio en coordinación octaédrica. La precipitación de este mineral salino en morteros y hormigones produce daños irreparables, bien por su carácter expansivo o bien por desintegración del gel C-S-H a velocidad lenta [5], o bien por ambas acciones combinadas.

La disponibilidad de iones carbonato para la manifestación de este proceso es bastante común, ya que muchos hormigones emplean áridos (gruesos o finos, o ambos) con un contenido apreciable en minerales con esta composición. Además, si la obra se localiza en una zona con presencia de carbonatos en el subsuelo, aspecto éste muy común al tratarse de uno de los minerales sedimentarios más abundantes, la fuente de ion carbonato estará garantizada si hay una circulación de agua subsuperficial apreciable. Y finalmente, por si esto fuera poco, la generalización del uso de filler calizo también supone un factor adicional de riesgo, importante para este proceso [6].

En general, la disponibilidad de iones sulfato en proporción significativa está relacionada con sustratos ricos en yeso, mineral salino muy soluble, por lo que en las zonas en las que está presente en el sustrato se incorpora muy fácilmente por disolución a las aguas subterráneas circulantes. En el caso concreto estudiado, la presencia de abundante yeso en el subsuelo de Calatayud es ampliamente conocida, lo que condiciona la generalización del uso de formulaciones sulfato resistentes para prácticamente todas las obras que se realizan en esta ciudad, sobre todo las ubicadas en el casco histórico.

En teoría, una vez se dan las condiciones favorables para su formación, la taumasita reemplaza gradualmente a la matriz de la pasta de cemento del hormigón, consumiendo portlandita y otros hidratos, llegando a provocar incluso la desintegración del hormigón

[7]. En este caso concreto, y a la vista de los resultados obtenidos y que se recogen en las Tablas 1 y 2, se puede afirmar que bajo la solera de la capilla estudiada se está produciendo un deterioro por ataque sulfatado con formación de taumasita, cuya intensidad aumenta al profundizar en el terreno. Dicho de otra manera, el proceso de reacción progresa de abajo hacia arriba, y es plenamente compatible con la distribución en los porcentajes de árido, hidratos y sales (especialmente taumasita) obtenidas mediante el análisis mineralógico. La distribución de grupos de minerales en profundidad parecen indicar que el proceso no está concluido, por lo que se prevé que la deformación siga amplificándose todavía durante un periodo de tiempo impredecible, si no se toman las medidas oportunas.

Tal y como se ha discutido anteriormente, en este caso concreto se dan todos los condicionantes para la formación de taumasita: elevada humedad en el subsuelo, bajas temperaturas, presencia de iones sulfato y carbonato y, finalmente, disponibilidad de fases silicatadas procedentes de la actuación de restauración. Todo ello, a pesar de que se empleó cemento sulfato resistente, que es efectivo frente al ataque sulfatado por etringita pero que, como se ha comprobado aquí, no sirve para evitar la formación de taumasita, con las subsiguientes patologías constructivas.

De lo discutido hasta ahora cabe abordar la cuestión desde dos puntos de vista. Por un lado está la posible actuación en un caso como el aquí estudiado, una vez identificado que el origen de las patologías reside en la formación de taumasita. La mejor solución pasaría por retirar todos los restos de mortero u hormigón presentes en el subsuelo de la solera, que en este caso particular es abordable al constituir un volumen no muy elevado, y sustituirlo por un mortero tradicional de yeso y cal. Esta solución evitaría que las patologías siguiesen evolucionando y que fuesen necesarias actuaciones periódicas adicionales, pero, por el contrario, supondrían un aporte de sales al subsuelo que, en las condiciones de humedad elevada que ya provocaron la formación de taumasita, favorecerían la generación de eflorescencias salinas en la solera y en los paramentos. Por tanto, esta solución necesitaría combinarse con otra tendente a evitar los ascensos capilares para garantizar la efectividad de la reparación.

Por otro lado está el conocimiento de las condiciones en las que es esperable que una patología de este tipo se pueda manifestar con el motivo de una restauración en su fase de proyecto. Dado que el material aglomerante por excelencia en las últimas décadas es el cemento portland, cuando se va a emplear en restauración monumental es necesario evaluar la posible incidencia de los factores que provocan el ataque sulfatado por taumasita, es decir, las condiciones de elevada humedad, baja temperatura y alta disponibilidad de iones carbonato y sulfato. Para ello sería necesario un adecuado conocimiento de las características del subsuelo (composición mineralógica, determinación de los niveles de humedad y/o freáticos, y composición química de las aguas subterráneas), y de las correspondientes a los materiales constructivos, tanto los preexistentes como los que se van a emplear en la restauración, principalmente la composición de los áridos y del filler, evitando el uso en estas fracciones de materiales de mineralogía carbonatada.

Este trabajo forma parte de una línea de investigación que, partiendo de la identificación de las patologías ocasionadas por la formación de taumasita con posterioridad a una intervención estructural en monumentos, pretende simular en laboratorio las condiciones necesarias para su génesis y así, en una última fase, abordar las posibles soluciones para evitar este tipo de reacciones adversas. Estas posibles soluciones podrán venir bien del estudio de materiales, principalmente investigando qué tipo de adiciones a hormigones y morteros pueden ser capaces de neutralizar esta reacción, bien en la línea de recomendaciones

de ejecución encaminadas al uso de materiales cementantes tradicionales combinadas con métodos de reducción o eliminación de humedades en sustratos y paramentos.

## 5. CONCLUSIONES

Con el análisis realizado se puede concluir que para la utilización de hormigones en recalces de edificios históricos, no es suficiente utilizar cementos sulfato resistentes, sino que hay que tener en cuenta que será necesario evitar el uso de fracciones minerales carbonatadas como árido grueso, fino o filler, en la elaboración de los hormigones y morteros, siendo imperativo el uso exclusivo fracciones de mineralogía silicatada en sus dosificaciones.

Dado que las condiciones de elevada humedad son imprescindibles para que se produzcan estas reacciones, será siempre necesario el saneado de humedades o el rebaje de niveles freáticos con carácter previo a la ejecución de los recalces, garantizando un mantenimiento permanente de las condiciones de sequedad en las zonas susceptibles de dar lugar a la reacción que conduce a la formación de thaumasita.

Finalmente y con una perspectiva más general, es preciso comentar que todavía se dan procesos patológicos en materiales tan utilizados, pero relativamente nuevos, como son los hormigones y morteros basados en cementos portland cuando se aplican a restauración monumental. Esto nos debería hacer reflexionar sobre la realización de actuaciones no reversibles en edificios que, en el caso de recalces y con las técnicas actuales, sólo nos permiten realizar actuaciones paliativas que en la medida de lo posible frenen estos procesos patológicos.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la empresa CEMEX, y en particular al personal del laboratorio de análisis de su planta de Morata de Jalón, por la realización e interpretación de los análisis mineralógicos por difracción de rayos X.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VV.AA. (2008). *EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural*. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 724 págs.
- [2] Torres, S.M., Kirk, C.A., Lynsdale, C.J., Swamy, R.N. & Sharp, J.H. (2004). Thaumasite-ettringite solid solutions in degraded mortars. *Cement and Concrete Research*, 34, 1297-1305.
- [3] Crammond, N. (2003). The thaumasite form of sulfate attack in the UK. *Cement and Concrete Composites*, 25 (8), 809-818.
- [4] Irassar, E.F., Bonavetti, V.L., Trezza, M. & González, M. (2005). Thaumasite formation in limestone filler cements exposed to sodium sulphate solution at 20 °C. *Cement and Concrete Composites*, 27 (1), 77-84.
- [5] Izquierdo, S., Díaz, J., Mejía de Gutiérrez, R. y Torres, J. (2016). Durabilidad de morteros adicionados con FCC expuestos a sulfato de magnesio y sulfato de sodio. *Revista Ingeniería de Construcción*, 31 (3), 183-190.
- [6] Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Kakali, G. & Batis, G. (2002). An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24 (3-4), 371-378.
- [7] Thaumasite form of sulfate attack on concrete (TSA). MPA Cement Fact Sheet 2. Accedido el 31 de enero de 2018, desde <http://cement.mineralproducts.org/documents/>