

Estudio de la alteración del enlosado de pizarra de la Iglesia de las Agustinas de Salamanca⁽¹⁾

JUAN ANTONIO DÍEZ TORRES (*)
FERNANDO MADRUGA REAL (**)
MÓNICA AÑORBE URMENETA (***)
JOSÉ M^a MARTÍN POZAS (****)

RESUMEN Se estudia el estado de alteración y origen del deterioro del suelo de pizarra de la Iglesia de Las Agustinas de Salamanca. Las losas en la zona del crucero presentaban una gran acumulación de sales blanquecinas lo que había provocado descamaciones y levantamiento de placas con pérdida de material. Se identifican las sales y se propone un mecanismo de precipitación de las mismas y de alteración de la superficie de las pizarras.

STUDY OF THE ALTERATION OF THE SHALE PAVEMENT OF LAS AGUSTINAS CHURCH IN SALAMANCA⁽¹⁾

ABSTRACT This paper focuses on the study of the state of alteration and the origin of the damage of the shale pavement found in the church of "Las Agustinas" in Salamanca. Slabs from the church transept were found to have a great accumulation of whitish salts which had caused the surface to flake off with lifting of plates and loss of material. These salts are identified here and a mechanism of precipitation is proposed. In addition, a model is given to the study of the alteration of the shales surface.

Palabras clave: Alteración; Monumentos; Pizarras; Epsomita; Hexahidrita; Salamanca.

1. INTRODUCCION

En Agosto de 1987 comenzaron los trabajos de restauración de la Iglesia de Las Agustinas de Salamanca, también llamada "La Purísima" (Fot.1). En 1986 había sido cerrada al culto debido al mal estado de la cúpula y cubiertas de las bóvedas, que permitían la entrada de aguas de lluvia a su interior. Tras la reparación de éstas, se retiró un entarimado de madera que cubría el suelo de la iglesia en toda su extensión, a excepción del presbiterio, apareciendo un enlosado de pizarra en diferente estado de conservación por lo que se decidió realizar un estudio del estado de alteración de dichas

pizarras, así como del origen del deterioro y posibles soluciones al problema.

Por referencias bibliográficas, corroboradas posteriormente con los estudios realizados, se sabe que las pizarras proceden de antiguas canteras ubicadas en el cercano pueblo de Mozárbez, donde afloran materiales del denominado Complejo Esquistos-Gauwáquico de edad preordovícica (Fot.2).

El suelo de la iglesia se encontraba aparentemente en buen estado de conservación a excepción del crucero bajo la cúpula donde las losas de pizarra aparecían superficialmente muy alteradas y desescamadas, y presentaban una gran acumulación de sales blanquecinas (Fot.3).

Bajo este crucero se encuentra una cripta escavada en el terreno natural, en la que aparecían las zapatas de apoyo de las pilastras del crucero y unas bóvedas de fábrica. En el acceso a la cripta, que ha permanecido cerrada durante un largo período de tiempo, se descubrió una corriente de agua ocasional de dudosa procedencia. Ya sea por esta o por otra razón (saturación del terreno), la cripta se ha encontrado permanentemente encharcada.

2. TOMA DE MUESTRAS Y ENSAYOS REALIZADOS

Se tomaron cinco muestras de losa de pizarra del suelo de la iglesia, numeradas del uno al cinco, tres en el crucero bajo la cúpula y dos en la nave central (Fig.1).

(1) Comunicación tipo poster presentada en la Conferencia Internacional sobre el Paleozoico Inferior de Ibero-América, celebrada en Mérida en Mayo de 1992.

(*) Licenciado en Ciencias Geológicas. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (MOPT).

(**) Doctor en Ciencias Químicas. Centro de Control de Calidad. Consejo de Fomento, Junta Castilla y León, Salamanca.

(***) Licenciada en Ciencias Geológicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPT).

(****) Doctor en Ciencias Químicas. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca.



FOTO 1. Iglesia de las Agustinas de Salamanca.

Las tres muestras del crucero son representativas del estado de las pizarras en el mismo, esto es, presentaban alta degradación superficial con presencia de eflorescencias y descamación (Fot.4).

Las muestras de la nave se encontraban en buen estado aparente, como el resto de las losetas en dicha situación salvo raras excepciones.

En cada punto de toma de muestra, debajo de la loseta levantada, se practicó una cata de reducidas dimensiones. Bajo las losas aparecía un mortero de arena y cal de color blanquecino de 3 a 5 cm de espesor que apoyaba en un relleno artificial de arena y cascotes con cantos de cuarzo, trozos de pizarra, mármol, madera, ladrillo, etc (Fot.5).

De igual forma se tomaron cinco muestras de mortero a las que se realizaron los siguientes ensayos: porcentaje de humedad, pérdida al fuego, residuo insoluble en CH₃, contenido en sulfatos, equivalente en CO₂/Ca, conductividad, contenido en sales solubles, análisis químico y difracción de rayos X.

Sobre las muestras de pizarra, se realizó una limpieza muy suave y una separación de las sales superficiales; a continuación las losetas se partieron longitudinalmente para separarlas en dos trozos, uno de los cuales se sometió a una limpieza más enérgica en la que se desprendieron escamas y lascas de pizarra, bajo las cuales, en ocasiones, aparecían sales blancas (subeflorescencias), que fueron aisladas para su análisis.

En el otro trozo de cada muestra, se cortaron y tallaron probetas normalizadas para someterlas a ensayos físico-mecánicos: peso específico y absorción, resistencia a flexión y resistencia al desgaste por rozamiento.

Las sales y muestras de pizarra en distinto estado de alteración fueron estudiadas mediante microscopía óptica polarizante, lupa binocular y difracción de rayos X.

Las normas y procedimientos de ensayos utilizados fueron los siguientes:



FOTO 2. Afloramiento de pizarras preordovicianas en la localidad de Mozárbez, municipio próximo a Salamanca, de cuyas canteras se extrajeron las losas de pizarra colocadas en el suelo de la iglesia.



FOTO 3. Acumulación de sales de color blanquecino en la superficie de las losas del crucero. Bajo ellas se encuentra la cripta que durante mucho tiempo ha permanecido cerrada y encharcada.

Para las pizarras:

- Peso específico y absorción. Norma UNE 22191-85
- Resistencia a flexión. Norma UNE 22195-85
- Resistencia al desgaste por rozamiento. Norma UNE 22192-85

Para los morteros:

- Calcinación. Norma UNE 80221-86
- Residuo insoluble. Norma UNE 80223-86
- Sales solubles en agua. Se toman cinco gramos de muestra molida en mortero de ágata y se añaden a 100 ml de agua destilada en agitación mecánica, tomando medida de la conductividad hasta que ésta se estabiliza. Se filtra el líquido y se lleva a sequedad pesando el residuo.

3. RESULTADOS

3.1. PETROGRAFÍA

La roca objeto de estudio observada al microscopio óptico aparece como un esquistos clorítico-sericitico que presenta un bandeo de color más blanco o más verde según sea mayor o menor la proporción de cuarzo respectivamente. Dicho mineral aparece de forma granoblástica equigranular, rodeado por cloritas y sericitas orientadas marcando la esquistosidad de la roca. Se observan restos de biotitas transformándose a cloritas, con orientaciones diversas con respecto a la esquistosidad, incluso perpendiculares a ella. Los minerales opacos (probablemente sulfuros) marcan la esquistosidad y aparecen parcialmente transformados a óxidos de hierro.

El aspecto macroscópico de la roca es el de una pizarra de color gris oscuro rica en cuarzo, con exfoliación y esquistosidad poco desarrolladas.

Esta roca fue comparada al microscopio óptico y mediante difracción de rayos X (Fig. 2) con muestras de pizarras procedentes de las localidades salmantinas de Mozárbez y Berrocal de Huebra, con vistas a identificar las

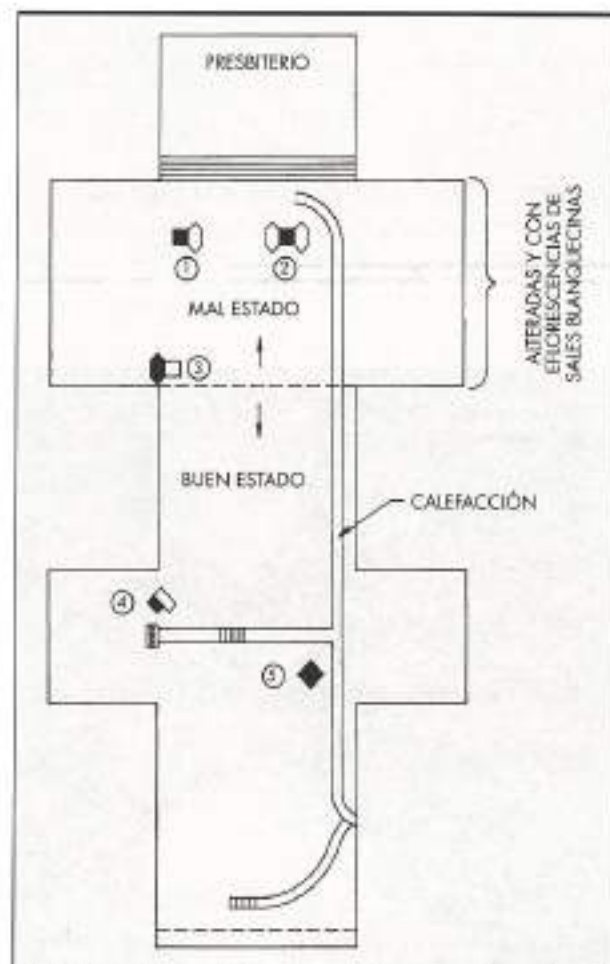


FIGURA 1. Localización de las muestras de losetas recogidas en el suelo de la iglesia. Las situadas en la zona del crucero presentaban grave deterioro; en el resto de la nave aparecían en buen estado.

FOTO 4. Detalle de la descomposición que sufren las losas de pizarra debido a la cristalización de sales.



canteras de origen. Los resultados aportaron una gran similitud litológica entre las muestras de Mozárbez y las tomadas en el suelo de la iglesia. Por el contrario, las pizarras de Berrocal presentaban mayor contenido en moscovita y sulfuros y menor riqueza en cuarzo, biotita y clorita.

3.2. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LAS PIZARRAS

La tabla adjunta (Tabla 1) presenta el resultado de los ensayos físico-mecánicos de los que cabe destacar las siguientes consideraciones:

La densidad real presenta valores normales para este tipo de rocas y la porosidad está dentro de los límites aceptables.

La resistencia a flexión está por debajo de los 200 Kg/cm², a excepción de la muestra número 4 (más de 400 Kg/cm²), independientemente del estado de alteración.

No ocurre igual en el ensayo de desgaste por rozamiento, en el que los resultados de las muestras tomadas en el crucero son notablemente más altos que los de las muestras de la nave.



FOTO 5. Toma de muestra del mortero de nivelación. Efectuando una pequeña corte aparecía, bajo el mortero, un relleno artificial de arena con cascotes (trozos de pizarra, mármol, madera, cascotes de cuarzo, etc).

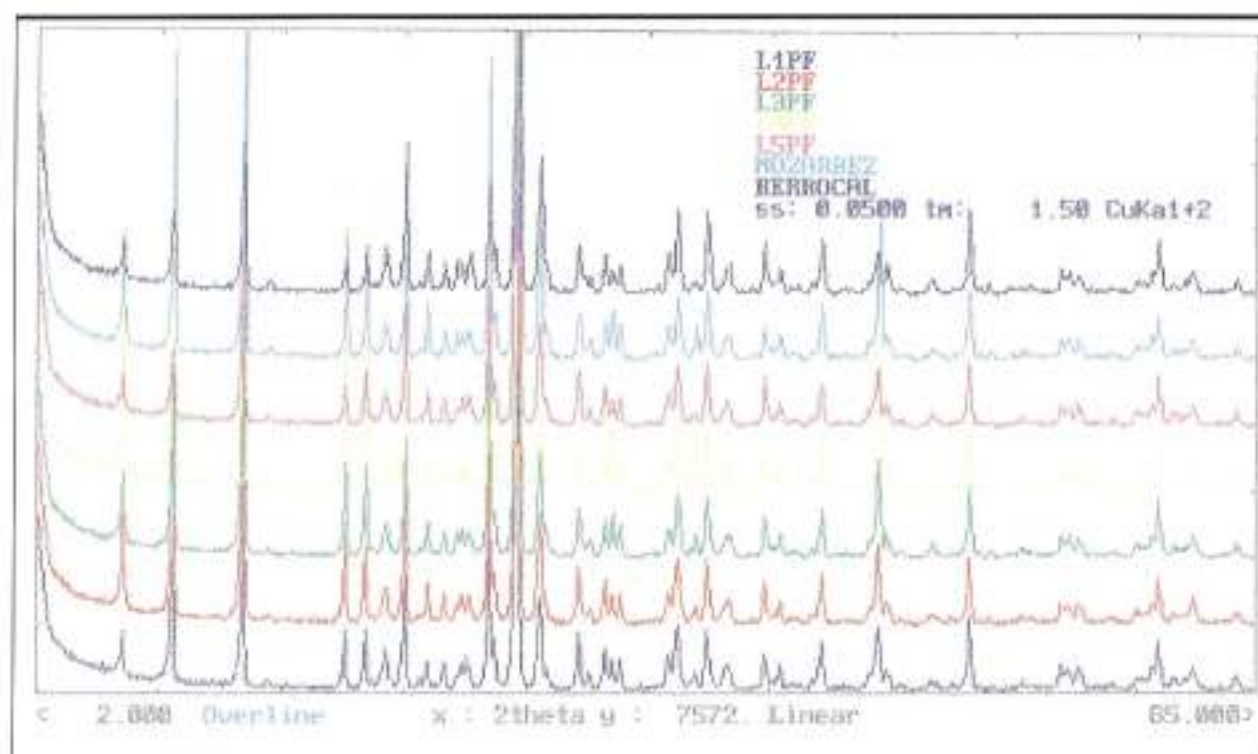


FIGURA 2. Difractogramas de las cinco losas de pizarra en comparación con muestras tomadas en las localidades de Mozárbez y Berracal de Huebra con vistas a identificar las canchales de origen. Los componentes principales son: cuarzo, clorita, sericita y feldespatos.

A partir de estos resultados se puede deducir que la alteración de las losas de pizarra que se encuentran en el crucero es exclusivamente superficial, no afectando al interior de la losa por debajo de una capa del orden de medio centímetro.

3.3. ESTUDIO DE LOS MORTEROS

Los resultados de los ensayos realizados a las cinco muestras de mortero tomadas bajo las losas aparecen en las tablas adjuntas (Tablas 2 y 3).

ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE PIZARRA

MUESTRA	1	2	3	4	5
PESO ESPECÍFICO (g/cm ³)	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
POROSIDAD (%)	1,9	3,1	2,7	2,1	2,0
MÓDULO DE ROTURA A FLEXIÓN (Kg/m ²)	152	134	158	418	118
DESGASTE POR ROZAMIENTO (mm)	3,2	2,2	2,4	1,4	1,4

TABLA 1. Resultados de los ensayos de estructura y físico-mecánicos efectuados a las probetas de pizarra.

ENSAYOS SOBRE MUESTRAS DE MORTEROS

MUESTRA	1	2	3	4	5
HUMEDAD (%)	13,7	6,2	8,9	22,3	16,7
PERDIDA AL FUEGO 900° C (%)	14,5	5,8	12,6	8,0	6,9
RESIDUO INSOLUBLE EN CH (%)	65,3	85,7	71,6	79,2	84,0
SULFATOS	no	no	trazas	no	no
EQUIVALENTE en CO ₂ /Ca aproximado (%)	34	14	28	19	16
CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	1,6	1,0	1,7	1,0	0,5
SALES SOLUBLES (%)	2	1,4	2	1,4	—

TABLA 2. Resultados de los ensayos realizados a las muestras de mortero.

ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MORTEROS* Y DE SUS SALES SOLUBLES (RESÍDUO SECO)										
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
M-1	1,038	0,298	6,307	4,685	35,077	0,247	37,300	1,337	2,245	0,363
M-2	0,000	0,953	13,953	9,860	28,186	0,395	17,110	1,488	4,256	1,116
M-3	0,000	0,343	7,795	6,525	34,650	0,412	26,560	1,459	2,850	0,361
M-4	0,000	0,701	11,659	8,224	35,561	0,467	16,330	1,028	3,645	0,561
M-5	0,000	0,760	13,197	10,183	17,517	0,593	21,750	1,282	4,106	0,736
SS-1	0,000	0,000	0,000	0,000	73,723	0,000	0,030	9,827	10,405	2,312
SS-3	0,000	0,000	0,000	0,146	70,160	0,000	0,110	13,537	14,119	0,437
SS-4	0,000	0,000	0,000	0,348	72,474	0,000	0,060	4,530	18,467	1,394
SS-5	0,000	0,000	0,000	0,110	52,250	0,000	0,510	11,745	30,187	0,110

* hevia ataque con CH 1:1 a 60° C y filtrado para eliminar el residuo sólido.

TABLA 3. Análisis químico de las muestras de mortero y de sus sales solubles. Destacan los altos contenidos en Mg.

Curiosamente las muestras tomadas bajo las losas menos alteradas (4 y 5) presentaban mayor contenido en humedad que las muestras tomadas bajo las losas 1, 2 y 3 pertenecientes al crucero y más alteradas. En las condiciones anteriores a la restauración, estas últimas debieron presentar

mayor humedad al tener debajo la cripta encharcada, pero al descubrirse ésta, dando salida al agua y saneando el barro existente se produciría la desecación de los materiales inmediatamente por encima.

Con respecto al análisis químico cabe destacar los altos contenidos en Mg y Ca de las muestras de mortero y de Mg, Na y K de sus sales solubles. Este hecho justificará la naturaleza de las sales que precipitan en la superficie de las pizarras y entre las lajas de las mismas.

La difracción de rayos X refleja un mortero de arena y cal con pobre dosificación de ésta última. Cualitativamente la composición de las cinco muestras de mortero es totalmente homogénea, existiendo cuarzo como elemento mayoritario, feldespatos, algo de calcita y destacando la total ausencia de yeso y sulfato magnésico en los diagramas, dato que tendrá también su importancia en el mecanismo de precipitación de sales.

3.4. CRISTALIZACIÓN DE SALES

Las losas 1, 2 y 3, pertenecientes a la zona del crucero, presentaban un mayor grado de alteración, observándose en ellas una cristalización de sales blanquecinas que recubría más del 80% de su superficie, con espesores del orden de 1mm llegando en zonas de máxima acumulación a alcanzar de 5 a 10 mm (Fot.6).

Estudiadas estas sales mediante lupa binocular y difracción de rayos X, fueron identificadas como hexahidrita y epsomita, sulfatos de Mg con 6 y 7 moléculas de agua respectivamente ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$ y $MgSO_4 \cdot 7H_2O$) (Fig.3), cristalizando según un hábito fibroso-radiado (Fot.7).

Del mismo modo se estudiaron las sales que aparecían entre las escamaciones y desplazaciones de las pizarras (Fot.8), hacia el interior de las losas (subeflorescencias), resultando ser en este caso yeso, sulfato de calcio con 2 moléculas de agua ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Fig.4).

Ni las pizarras, ni los morteros bajo ellas, presentaban yeso o sulfato magnésico en su composición por lo que cabe suponer que estas sales han debido precipitar a partir de soluciones acuosas que se han cargado de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} en el camino de ascensión, al atravesar los materiales de relleno existentes entre la cripta y el suelo de la iglesia.



FOTO 6. Extracción de sales cristalizadas en superficie. La acumulación puede alcanzar espesores de 5 a 10 mm.



FOTO 7. lupa binocular (25 aumentos). Detalle de las sales de Mg donde se observa su desarrollo en cristales fibroso-radiales.

4. CONCLUSIONES

Solamente las pizarras situadas en el crucero de la iglesia (justo encima de la cripta), presentaban un alto grado de alteración. El resto de las losas de la nave aparecían en buen estado.

Las pizarras proceden de antiguas canteras situadas en Mozárbez, municipio que se encuentra a 12 Km al sur de la capital salmantina.

La alteración sólo les ha afectado en superficie produciendo la separación de escamas y a lo sumo penetrando

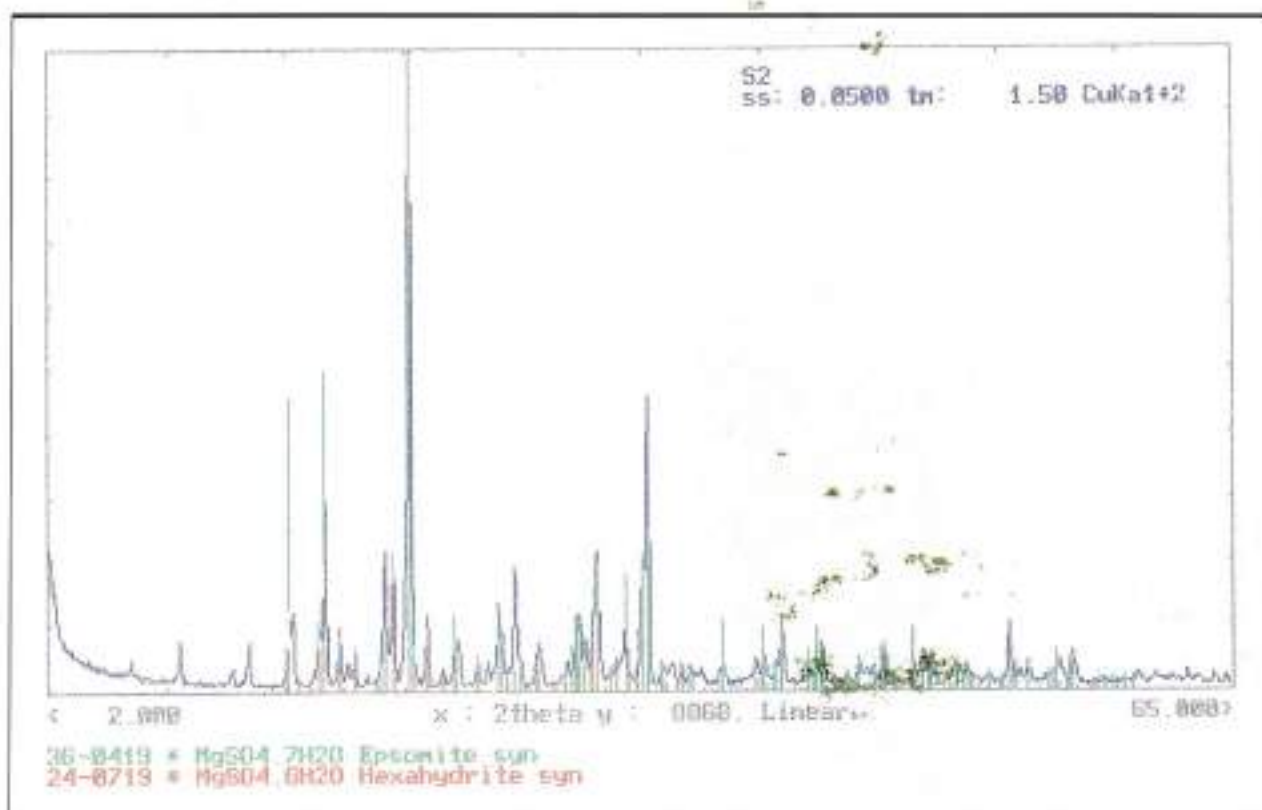


FIGURA 3. Difractograma de las sales superficiales obtenidas en la losa número 3. Además de los sulfatos de Mg se detectan restos de la composición mineralógica de la pizarra.

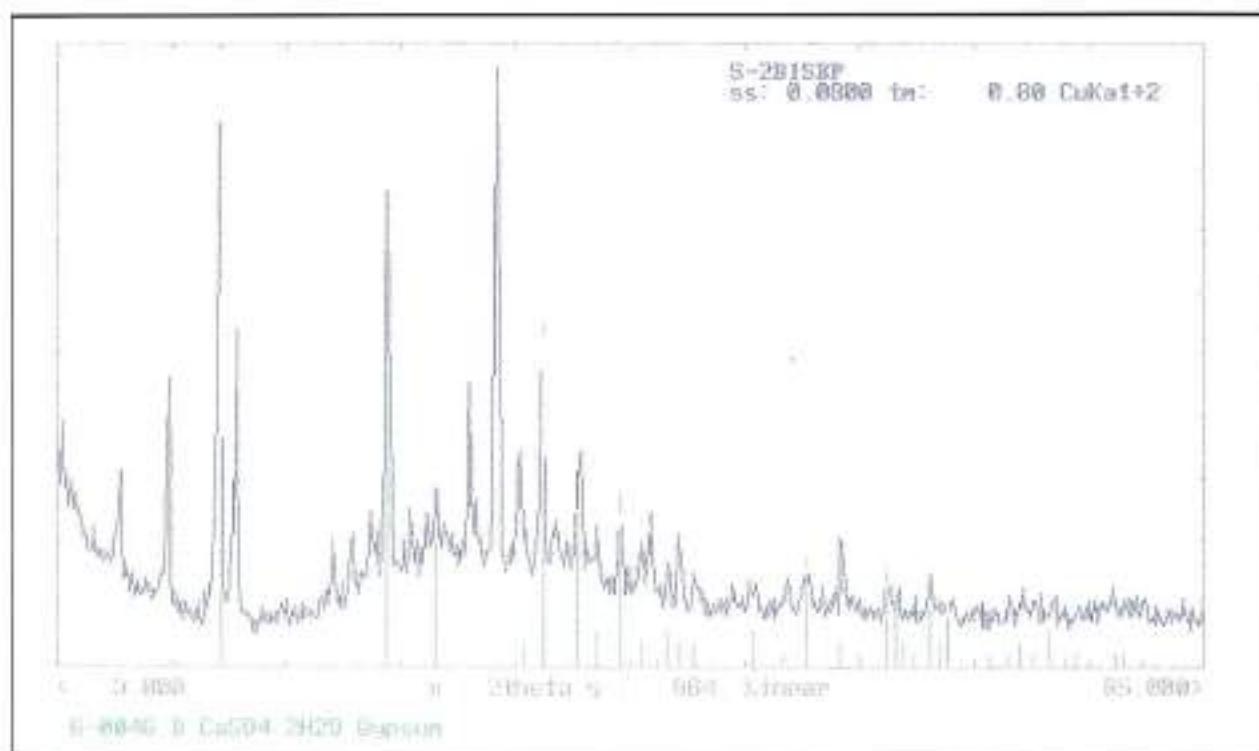


FIGURA 4. Difractograma de las sales obtenidas en la losa número 2 bajo una placa (Fat.8). La reflexión de mayor intensidad corresponde al yeso.



FOTO 8. El sulfato de calcio (yeso) cristalizó hacia el interior de la pizarra provocando en ocasiones el levantamiento de placas.

unos 0.5 cm, levantando placas y lajas de mayor tamaño, aunque éste último con menor frecuencia.

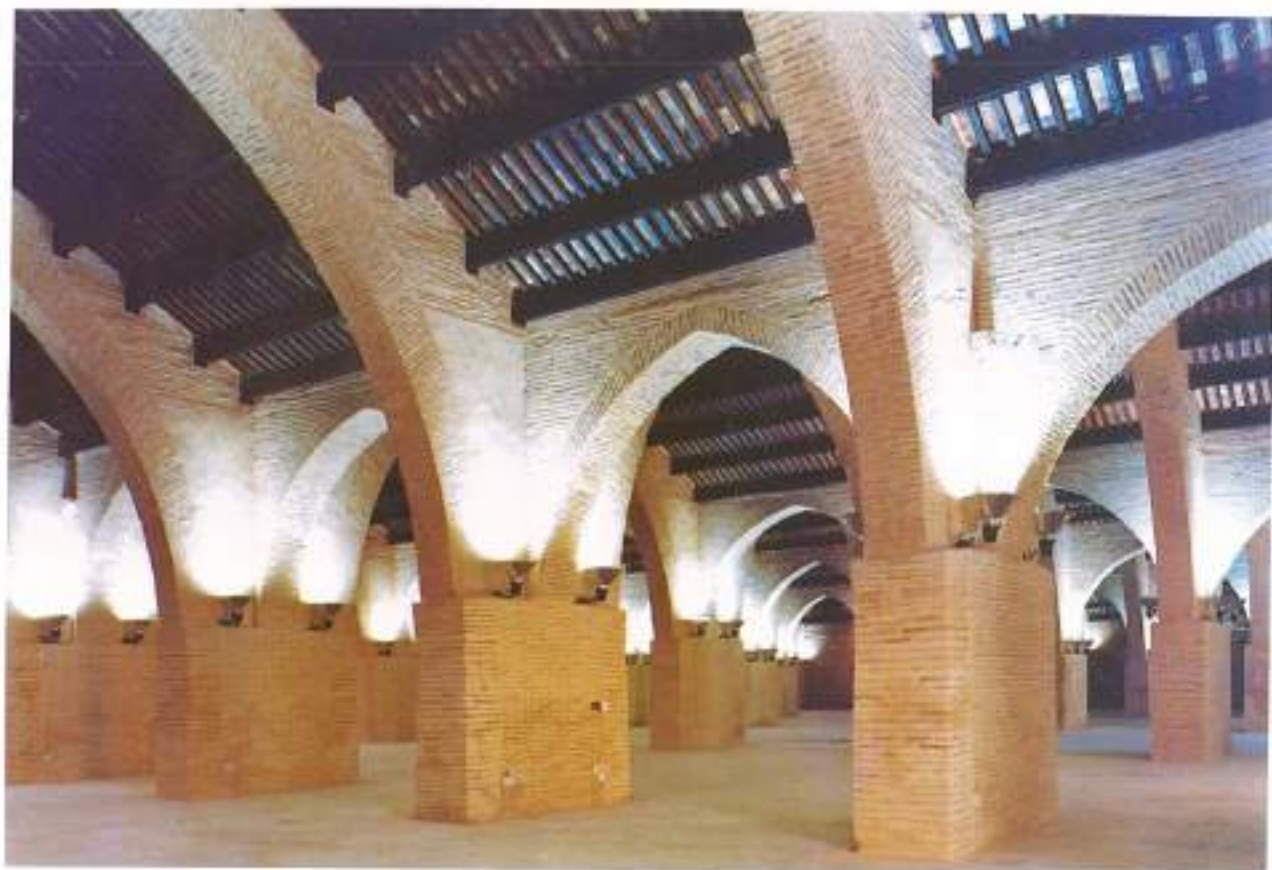
La causa del deterioro de las pizarras se debe a la cristalización de sales magnésicas (hexahidrita y epsomita) y cálcicas (yeso), en la superficie y hacia el interior, respectivamente.

El mecanismo de precipitación de las sales sería debido, según un esquema ya clásico, a la ascensión capilar de agua, que procedente de la cripta, se cargaría de iones (SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} , entre otros) aportados por las obras de fábrica y materiales de relleno bajo el enlosado. Este hecho queda corroborado con los altos contenidos en Mg y Ca que aparecían en el análisis químico de los morteros.

Los compuestos más insolubles (yeso) precipitan en la capa inmediatamente inferior a la superficie produciendo la separación entre placas y escamas, al actuar como cuña, y los más solubles (sulfatos de magnesio) afloran en la superficie exterior precipitando al producirse la evaporación del agua.

En este caso la cripta encharcada, descubierta bajo el crucero de la iglesia, habría sido el origen del deterioro del enlosado de pizarra situado sobre ella.

GARANTIA Dragados



Rehabilitación de Las Atrazanas. Valencia

Promotores: Ministerio de Cultura
Ayuntamiento de Valencia
Arquitecto: D. Manuel Portaceli Roig

Premios de Rehabilitación

*** REHABITEC 94**

Concedido por el Instituto de
Tecnología de la Construcción
de Cataluña.

*** II Premio FIBES a la Rehabilitación**

Concedido por la
Feria Iberoamericana Sevilla

*** TERRITORIO 94**

Concedido por el diario
Levante EMV



Dragados



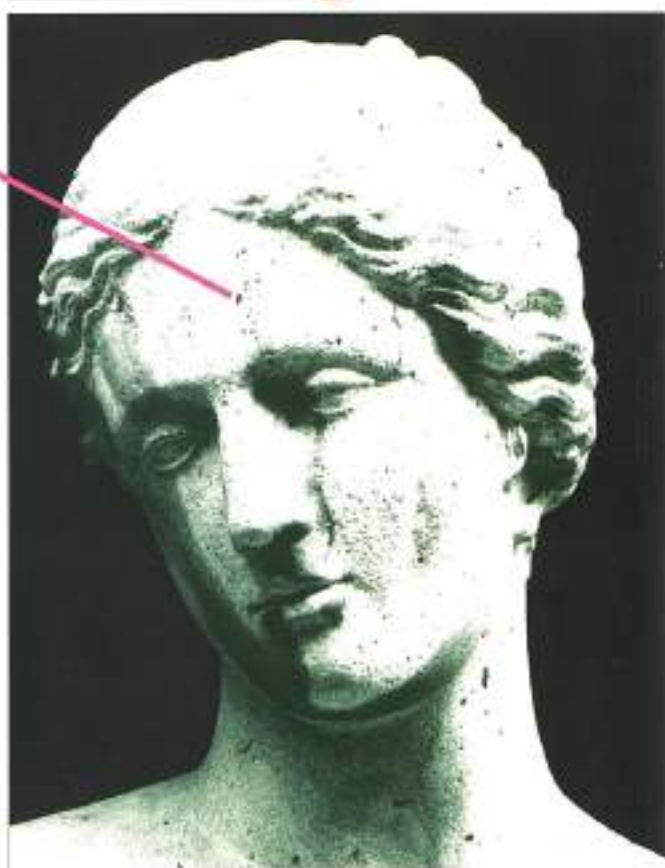
El arte y la ciencia

La restauración de **esculturas y obras de arte** expuestas a la contaminación atmosférica requiere técnicas innovadoras.

Para ello contamos con un sistema único en España: la limpieza con **rayo láser**.

Este procedimiento ofrece la enorme ventaja de pulverizar las costras negras formadas sobre **distintos soportes pétreos**, aún sin consolidar, sin producir ninguna alteración en los mismos y con una alta velocidad de ejecución.

El **haz láser** libera, en cada disparo, un pulso extremadamente corto. La energía liberada por el pulso genera un mecanismo de resonancia ultrasónica que desincrusta los elementos extraños depositados con el transcurrir del tiempo.



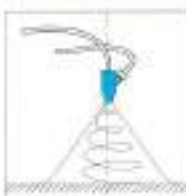
Restauración y protección integral de edificios

TÉCNICA J. O. S.

Limpieza a base de proyección de **polvo micronizado** mediante torbellino rotativo a baja presión.

CLAR ES PIONERA EN ESPAÑA DEL SISTEMA J.O.S. para la limpieza **ecológica** de fachadas y monumentos.

Este sistema, revolucionario en su campo al no precisar aditivos químicos, no ensucia el medio ambiente y permite prescindir de las medidas de seguridad que con otros procesos serían necesarias.



Hotel Ritz



Palacio Medina de las Torres



Castillo de Villavieja



NEW STONE

Restauración de la piedra a base de mezclas de polvo de piedras escogidas en función del aspecto deseado y sales metálicas seleccionadas.

Se comercializa y se aplica desde 1912.