

La microscopía electrónica de barrido aplicada al estudio de partículas sólidas de contaminación depositadas sobre la piedra monumental

FRANCISCO DÍAZ-PACHE (*)

F. JAVIER ALONSO (*)

ROSA M. ESBERT (*)

RESUMEN Las partículas sólidas de contaminación intervienen de forma significativa en el deterioro de la piedra monumental. La microscopía electrónica de barrido (SEM), asociada al microanálisis (EDX), constituyen una herramienta muy útil en su estudio. En este trabajo se pone especial atención en la toma y preparación de este tipo de muestras y se presentan algunos ejemplos de partículas, que pueden informar sobre el origen del deterioro.

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY APPLIED TO THE STUDY OF SOLID POLLUTION PARTICLES DEPOSITED ON MONUMENTAL STONE

ABSTRACT *Solid pollution particles play an important role in the decay of monumental stone. Scanning electron microscopy (SEM) in conjunction with microanalysis (EDX) are a very valuable study tool. In the present paper, particular attention is paid to sample collection and preparation. Examples of particles providing information on the source of decay are submitted.*

Palabras clave: Partículas sólidas de contaminación; Aerosoles; Microscopía electrónica de barrido; MEB; SEM; Microanálisis; EDX; Alteración; Deterioro; Costra; Piedra; Monumento.

I. INTRODUCCIÓN

Las partículas sólidas de contaminación, generadas por los diversos procesos de combustión que tienen lugar en las zonas urbanas o en sus proximidades, suelen depositarse en sus edificaciones, especialmente en los paramentos protegidos de la acción de la lluvia directa. Estas partículas son responsables, en gran medida, de las costras y pátinas negras que suelen mostrar dichos edificios.

Así, se cree que la acción de las partículas de contaminación no es pasiva, sino que juegan un importante papel en el desarrollo de las lesiones generadas en la piedra que les sirve de soporte. Con frecuencia su depósito lleva asociados fenómenos de degradación del material pétreo subyacente.

Sin embargo, hasta el momento, no es bien conocido el modo de actuación de los diversos tipos de partículas, en el deterioro de la piedra sobre la que se depositan. Por dicho motivo, el análisis de las partículas de contaminación que aparecen en un determinado monumento, puede aportar datos útiles, tanto para conocer las posibles fuentes de emisión de las partículas —en conservación preventiva—, como para ver la reactividad de dichas partículas con el sustrato pétreo

concreto en el que se han depositado y su cota de participación en el deterioro del mismo.

Debido a su pequeño tamaño —generalmente son menores de 50 micras—, la microscopía electrónica de barrido (SEM) asociada al análisis de rayos X por energía dispersiva (EDX), resultan técnicas muy válidas en la caracterización de las partículas, tanto en lo referente a su morfología como a su composición química. Ambos aspectos constituyen un punto de partida fundamental para deducir posteriormente su contribución al deterioro.

II. FUNDAMENTOS DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA Y EL MICROANÁLISIS

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es uno de los instrumentos más útiles y extendidos en el estudio de características microestructurales de los objetos sólidos. Esto es debido a su elevado poder de resolución, su gran profundidad de campo y la formación de imágenes punto por punto. Además, en microscopía electrónica se generan gran cantidad de señales, que aportan información de diferentes características del material, permitiendo el desarrollo de diversas aplicaciones (Fig. 1).

Sus principales ventajas, respecto a la microscopía óptica, son: la relativa facilidad en cuanto a la preparación de la muestra, ya que requiere escasa manipulación; el au-

(*) Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica), Universidad de Oviedo.



FIGURA 1. Distintos tipos de señales emitidas por una muestra cuando es bombardeada por un haz electrónico y sus correspondientes aplicaciones.

mento en el poder de resolución, que mejora aproximadamente 100 veces; y la gran profundidad de campo, que permite obtener imágenes nítidas en huecos de cierta profundidad.

El límite de resolución de la microscopía electrónica de barrido viene determinado por dos factores: la penetración de los electrones en el objeto a estudiar y las leyes de la óptica electrónica. La resolución teórica se aproxima a 1 nm, lo que supone hacer observaciones hasta con 100.000 aumentos.

Mediante esta técnica, el área de estudio de la muestra se bombardea con un haz de electrones cuidadosa y finamente focalizados, el cual puede mantenerse quieto o moverse por la superficie de la muestra. Al impactar, el haz electrónico genera ondas electromagnéticas y señales electrónicas de una capa muy superficial y con un rango de energías amplio, que comienza en 1 eV. Las señales emitidas varían tanto su energía como su localización, dependiendo de la forma, composición química y orientación de los cristales que se encuentran en la zona afectada por el haz de electrones. Este hecho permite realizar análisis morfológicos y composicionales.

En concreto, cuando el haz incide en la superficie de la muestra, provoca la emisión de varios tipos de señales: electrones secundarios, electrones retrodispersados, electrones Auger y rayos X entre otras. Los electrones secundarios y los rayos X son los que proporcionan mejor información en el estudio morfoquímico de las partículas sólidas de contaminación.

ELECTRONES SECUNDARIOS Y RETRODISPERSADOS

Los electrones secundarios se producen por las interacciones del haz electrónico incidente con el núcleo o los electrones corticales de los átomos, de la superficie de la muestra (Golstein, 1975). Cuando las colisiones inelásticas tienen lugar con electrones susceptibles de escaparse, dichos electrones son expulsados con energías inferiores a 50 eV, siendo fácilmente absorbidos por la muestra. Por ello, los electrones secundarios informan de una zona extremadamente superficial de la misma (0.05 micras).

Los electrones secundarios proporcionan imágenes muy similares a las de la microscopía óptica, aunque sin color y con mayores resoluciones y profundidades de campo. También permiten observar discontinuidades planares sin efectos de sombra, aunque estas imágenes tienen la desventaja

de que el contraste topográfico no se corresponde con la estructura de la superficie.

Los electrones retrodispersados —electrones primarios o del haz incidente, reflejados por la muestra— suministran información procedente de una profundidad mayor que la de los secundarios (1 micra), aportando además información composicional. La imagen generada por estos electrones depende de la topografía y del número atómico de los elementos de la muestra afectados, permitiendo diferenciar distintos componentes cuando su contraste de números atómicos es suficientemente elevado.

En general, los electrones secundarios suministran buenas imágenes de la morfología de superficies rugosas, mientras los retrodispersados son una buena alternativa cuando la muestra es plana (Wells, 1974). De acuerdo con esto, los electrones secundarios aportan información de mayor interés en el estudio de costras y patinas.

RAYOS X

La colisión del haz de electrones con la muestra sólida también produce transiciones electrónicas en los átomos de la muestra bombardeada, y puede dar lugar a la emisión de fotones. Cuando un electrón de las capas internas es expulsado de un átomo, deja una vacante en el orbital; entonces, el átomo queda en estado de excitación y la vacante se cubre rápidamente por relajación electrónica, estando acompañada de la emisión de un fotón de rayos X (Blaschke, 1976).

En dichas interacciones haz-sólido se producen dos tipos de señales:

- De espectro continuo, generada por dispersiones en el núcleo; en este caso la intensidad de la señal es función del número atómico y del voltaje de aceleración.
- De espectro característico, producida por la ionización de la capa interna de electrones; ahora la radiación emitida es característica de cada elemento: su longitud de onda es inversamente proporcional al número atómico.

La existencia de esta relación —simple y única— entre la longitud de onda de los rayos X emitidos por un elemento y su número atómico, ha hecho que gran parte de los microscopios electrónicos actuales presenten acoplada una sonda para la detección de rayos X, posibilitando la obtención de análisis a nivel de microscopía electrónica.

En el SEM, las sondas para la detección de rayos X son de energía dispersiva, siendo conocidas como EDX. Dichas sondas trabajan generalmente a la temperatura del nitrógeno líquido. El equipo utilizado en este estudio es un JEOL JSM 6100 con sistema de microanálisis LINK eXL1000. Dicho equipo dispone de una ventana de berilio para el trabajo normal —en el análisis de muestras con elementos de peso atómico superior al del sodio (23)—, y también puede trabajar con ventana ultrafina o sin ventana en el análisis de elementos ligeros.

Pueden realizarse análisis cualitativos y semicuantitativos, con la posibilidad de que la imagen captada sobre la pantalla del ordenador, sea rastreada a voluntad mediante un puntero manejado con un ratón y analizada punto a punto. Entonces, para cada punto o campo seleccionado en la pantalla, se puede obtener un diagrama de picos o un histograma de barras (Fig. 5 a 12), representativo de la concentración de los elementos previamente considerados.

También pueden realizarse análisis cuantitativos con un límite de detección teórico de hasta un 0.1 %, para los elementos pesados de muestras inorgánicas, homogéneas, pulidas y masivas, con una precisión del 1 % del valor hallado; en elementos ligeros el límite de detección es del 1 %, con una precisión del 5 %. El análisis elemental puede ser la media de toda la superficie de la imagen (modo RASTER), o de uno o varios puntos seleccionados sobre ella (modo BEAM POINT).

III. METODOLOGÍA DE MUESTREO DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

Las partículas de contaminación pueden ser estudiadas al microscopio electrónico sobre diferentes soportes, dependiendo del sistema empleado para recogerlas. En los estudios sobre contaminación es habitual analizar el material particulado recogido sobre filtros, procedentes de diversos tipos de captadores, principalmente de impacto en cascada o de membrana (Lefevre, 1993). Otra posibilidad es colocar muestras de material pétreo en lugares más o menos protegidos de la lluvia y retirarlas a intervalos de tiempo variables. En ambos casos las partículas estudiadas se están generando en el momento del muestreo.

Una tercera opción, más compleja, es muestrear zonas donde estas partículas han ido acumulándose a lo largo del tiempo (decenas o centenares de años), provocando generalmente lesiones en el material pétreo subyacente al depósito. En este caso, la caracterización de las partículas de contaminación depositadas sobre rocas monumentales, requiere un muestreo representativo de las lesiones en las que se encuentran, que son habitualmente pátinas y costras.

Ambas formas de alteración presentan peculiaridades que deben ser consideradas en la toma de muestra, y que pasan a describirse seguidamente:

Pátinas: Debido a que por definición son extremadamente finas en cuanto a su espesor, el método más sencillo de muestreo consiste en raspar cuidadosamente la superficie sobre la que aparecen con un bisturí, intentando recoger solamente esta capa superficial y no la piedra del sustrato. Esta operación tiene gran importancia ya que si se añade sustrato los análisis no van a ser representativos de la pátina. En algunas ocasiones la pátina se desprende del sustrato a modo de pequeñas escamas peluculares, lo cual facilita enormemente el muestreo y elimina casi por completo los problemas de contaminación.

Costras: Este tipo de lesiones presentan mayor espesor, por lo que su muestreo es inicialmente más sencillo, hasta

con separar la costra del sustrato mediante un bisturí e introducirla cuidadosamente en un recipiente rígido. Cuando la costra presenta un espesor considerable, debe procurarse que no se desmorone, ya que frecuentemente aparece estratificada y es interesante poder estudiar cada una de sus capas. Para dicho estudio en muchos casos se impregna la muestra con resina y se corta transversalmente.

En la toma de muestras debe tenerse en cuenta lo que se define como "estrategia de muestreo", ya que la representatividad de los resultados obtenidos y su extrapolación, van a depender de la bondad de la estrategia empleada. Una correcta estrategia es la que toma en consideración el entorno general, la ubicación concreta de la muestra y ciertos aspectos específicos de las lesiones muestreadas.

En cuanto a la orientación es conveniente muestrear todas las fachadas del monumento. De este modo —al analizar los resultados— suelen apreciarse factores diferenciadores tales como focos generadores de partículas o la incidencia de vientos y de lluvias dominantes.

Dentro de cada fachada es importante diferenciar las zonas expuestas a la acción de los agentes atmosféricos, de aquellas otras más resguardadas, donde la posibilidad de acumulación de partículas es mayor. Debe ponerse especial atención en otros factores específicos en el entorno de la muestra, como por ejemplo la proximidad de morteros que puedan aportar elementos ajenos a la piedra, o la presencia de focos con humedad permanente.

En el análisis global de la incidencia de las partículas sólidas de contaminación en el deterioro de la piedra monumental, es de interés disponer de otros datos. En especial, de los datos climáticos de la zona y de la dirección del viento dominante, pues será éste el que transporte las partículas. También de un censo de los grandes focos emisores de contaminación (fábricas, incineradoras, industrias, etc.) y de su situación geográfica respecto al objeto de estudio.

IV. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La preparación de las muestras, para su observación y análisis al microscopio electrónico de barrido, comienza por el fijado de una parte representativa de las mismas sobre el portamuestras.

En el estudio de costras y pátinas puede resultar interesante poner sobre el mismo portamuestras 2 porciones de la misma muestra: una de la parte externa, en contacto con la intemperie, y otra de la interna, en contacto con la piedra subyacente. De esta manera, pueden compararse con facilidad las partículas encontradas en cada parte y observar sus diferencias en cuanto a abundancia, distribución y características morfoquímicas. En algunos casos este estudio permite conocer como han cambiado dichas partículas sólidas a lo largo del tiempo, así como sus posibles fuentes de emisión (Vázquez et al., 1992).

Las muestras —después de fijadas al soporte— deben secarse, recomendándose para ello que permanezcan en una estufa a 60° C un tiempo mínimo de 24 horas. El secado de la muestra es importante para obtener un óptimo metalizado, y también para prevenir problemas con el filamento y la óptica del microscopio electrónico, ya que al vaporizar el haz de electrones los líquidos residuales que puedan existir, los gases producidos tienen efectos negativos en el instrumental.

Es preciso que la muestra sea conductora, para ello se cubre su superficie con una fina película de oro o de carbono, escogiéndose una u otra opción dependiendo de los estudios a realizar con posterioridad. El metalizado con oro propor-

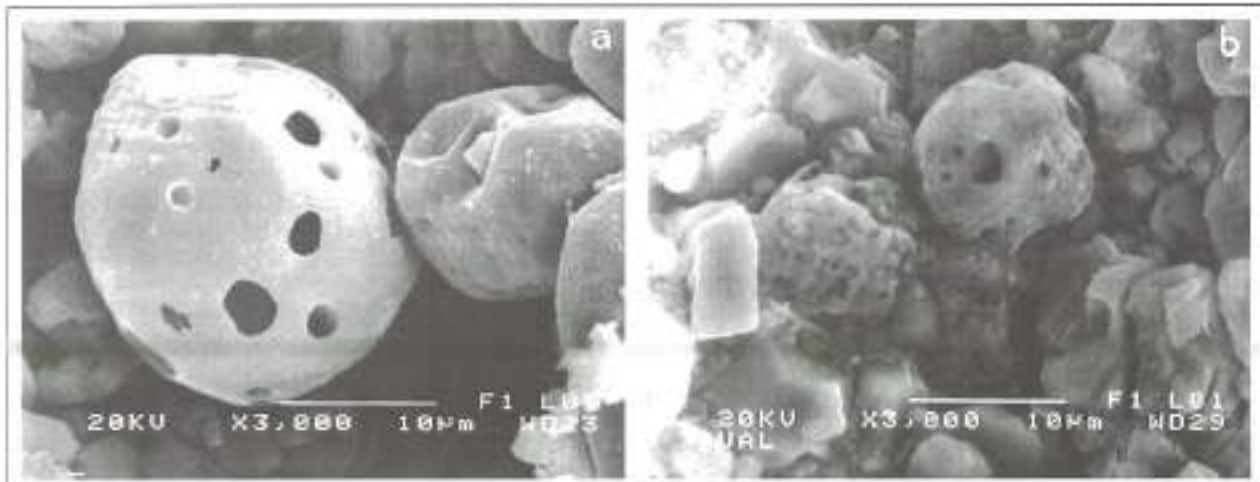


FIGURA 2. a) Partícula de contaminación en una muestra metalizada con oro; obsérvese la buena calidad de la imagen. b) Partícula con gran cantidad de calcio y sílice cubierta con carbono; en este caso la imagen es menos nítida.

ciona una mayor calidad de imagen (Fig. 2). Cuando se utiliza el microanálisis, como es el caso de este trabajo, la muestra debe recubrirse con carbono, ya que los picos del oro y del azufre (elemento frecuente e importante en las partículas) se superponen en los espectros de rayos X obtenidos.

Otro factor a considerar a la hora de metalizar la muestra es su rugosidad superficial: cuanto mayor sea ésta más largo debe ser el tiempo de metalización. Cuando la imagen obtenida en el microscopio no es nítida —tiene zonas con fuertes brillos o es imposible fijarla en el monitor—, es señal de que la muestra se carga eléctricamente debido a una metalización incorrecta y debe por tanto repetirse dicha operación.

En este tipo de muestras —costra y patinas—, un factor que puede generar problemas es la presencia de materia orgánica adherida (polen, hifas de hongos, restos de insectos, etc.). Al incidir el haz de electrones sobre estas partículas orgánicas, pueden sufrir bruscos hinchamientos y eclosiones (Fig. 3), y pueden enmascarar la óptica del microscopio. Cuando

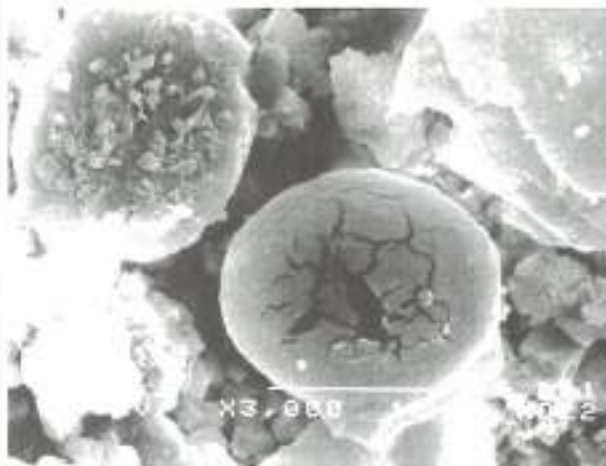


FIGURA 3. Catedral de Burgos. Grano de polen sobre el que incide el haz de electrones, mostrando agrietamiento superficial, consecuencia del desprendimiento de vapor de agua, lo cual puede dañar el microscopio. Cuando existe gran cantidad de materia orgánica estos fenómenos deben evitarse mediante la desecación total de los componentes orgánicos.

la cantidad de materia orgánica es importante, es preciso secar la muestra en estufa a mayor temperatura, o bien aplicar un proceso en el cual se sustituye todo el agua por acetona y luego se evapora ésta, conservándose las estructuras de los tejidos orgánicos. Soló en este segundo caso es posible conservar dichas estructuras, ya que un secado como el que se realiza habitualmente para muestras inorgánicas no lo permite.

Una vez seca la muestra es importante mantenerla en ambientes sin humedad: en un recipiente con gel de sílice herméticamente cerrado. De este modo se evita que con el paso del tiempo vuelva a tomar agua del ambiente por procesos higroscópicos, los cuales en algunos casos (en presencia de sales solubles) pueden generar problemas de conservación de la propia muestra.

Finalmente resaltar que una gran ventaja del EDX es que puede analizar superficies de sólo 1 micra cuadrada, lo cual permite diferenciar partículas muy pequeñas por su composición aun cuando se encuentren muy próximas entre sí.

V. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA: EJEMPLOS

En general, las muestras de patinas y costras negras que proceden de monumentos urbanos, cuando son observadas a suficientes aumentos (entre 500 y 5000), presentan una cantidad variable de partículas sólidas de contaminación. Estas partículas llegan al monumento formando parte del aerosol atmosférico y suelen presentar tamaños entre 0.005 y 50 micras (Fig. 4).

El aerosol atmosférico se genera en parte por procesos antrópicos entre los que destacan las combustiones que tienen lugar en los vehículos a motor (de gasolina, diesel), en las calderas domésticas (fuel-oil, carbón), en las plantas generadoras de electricidad (derivados del petróleo, carbón), en las actividades industriales o en la incineración de basura. A estas partículas procedentes de la combustión hay que añadir otras generadas por el tráfico —por procesos de abrasión de elementos metálicos, neumáticos, asfalto, etc.—, que se presentan con menor frecuencia que las anteriores.

El SEM-EDX permite caracterizar de modo individual, tanto morfológica como químicamente, cada una de las par-

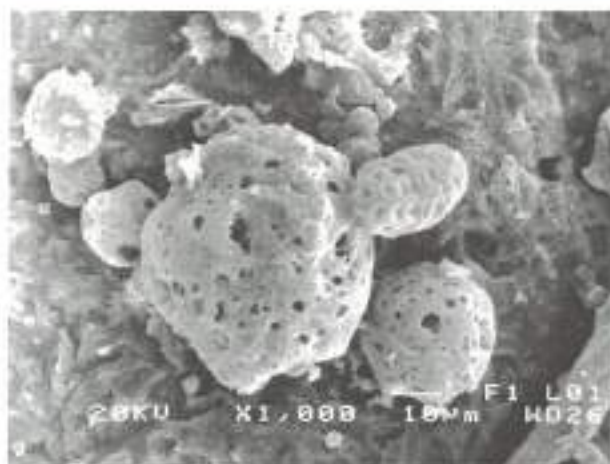


FIGURA 4. Catedral de Burgos. Grupo de partículas depositadas sobre la caliza de Hosteria, emplazada en la fachada de Coronaria. En la imagen puedes diferenciar hasta 10 partículas de distintas morfologías y tamaños. El EDX permite conocer la composición de cada una de ellas a pesar de su proximidad.

tículas encontradas en una determinada muestra de un monumento. Posteriormente, con información complementaria, es posible identificar las fuentes de emisión que las han generado.

Este conocimiento permite interpretar con mayor precisión las causas del deterioro de la piedra y de este modo actuar sobre sus fuentes, en un ejercicio de conservación preventiva que puede resultar muy importante a la hora de minimizar el deterioro de la piedra en el futuro. Como es bien sabido, la contaminación atmosférica acelera los mecanismos naturales de alteración de la piedra, en este sentido se ha calculado que multiplica por diez la velocidad del proceso (Sáiz-Jiménez, 1992).

A continuación, a modo de ejemplos, se presentan una serie de micrografías y análisis de partículas sólidas de contamina-

ción depositadas sobre diferentes sustratos de piedra, que proceden de diversos monumentos del patrimonio arquitectónico español. Dichas partículas se han agrupado de acuerdo con las fuentes de emisión que posiblemente las han generado:

- Partículas generadas por combustión de gasolinas: Su composición química se caracteriza por la elevada presencia de plomo, acompañado en ocasiones por zinc (Van Borm et al., 1989). Su morfología es subsférica y presenta oquedades, a veces con grandes poros. Un ejemplo de este tipo de partículas puede verse en la Fig. 5.
- Partículas generadas por motores diesel: Se caracterizan químicamente por presentar abundante azufre, junto a elementos como el silicio, aluminio o potasio (Connor, 1990). Son partículas de tendencia esférica con algunos poros, aparentemente huecas (Fig. 6).

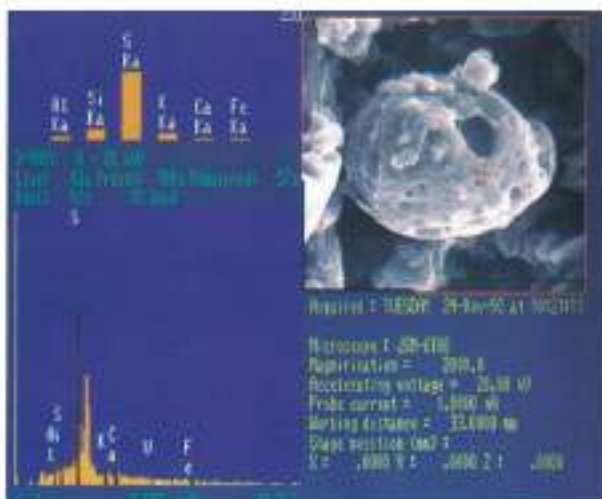


FIGURA 6. Catedral de Palma de Mallorca. Partícula de tendencia esférica, hueca y con algunos poros, encontrada sobre la caliza de la portada principal. Esta compuesta por gran cantidad de azufre, acompañada por silicio, potasio y aluminio. Generada posiblemente por la combustión de gasóleo en motores diesel (Connor, 1990).

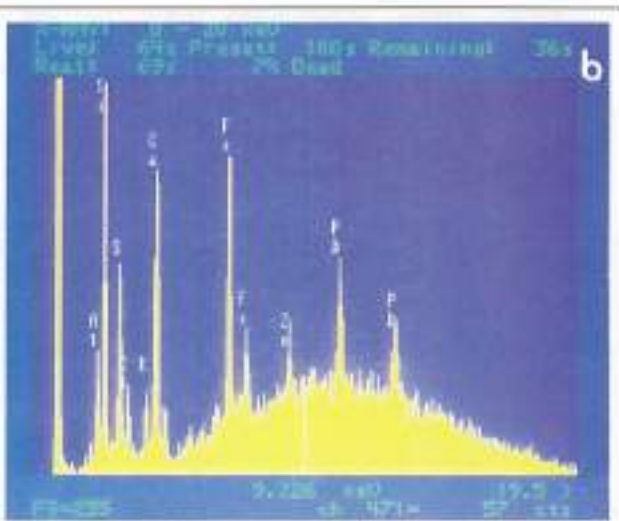


FIGURA 5. Catedral de Burgos. a) Partícula subsférica con abundantes poros, localizada en una costra. b) Su espectro EDX, caracterizado por la presencia de plomo y en menor grado de zinc, acompañadas por otros elementos. Procede de la combustión de gasolinas (Van Borm et al., 1989).

- Partículas generadas por combustión de fuel-oil: Las calefacciones domésticas producen partículas con gran cantidad de azufre junto a otros muchos elementos. Pueden presentar forma esférica, con poros escasos de pequeño tamaño, como se muestra en la Fig. 7.

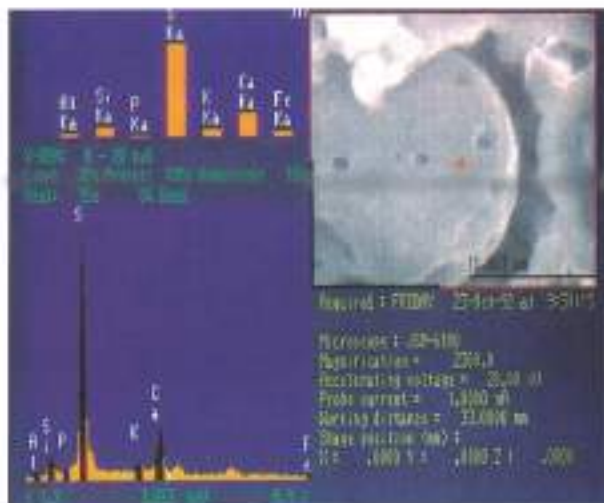


FIGURA 7. Catedral de Burgos. Partícula esférica con escasos poros circulares, encontrada en una costra. Su espectro muestra una composición mayoritariamente de azufre. Procede probablemente de la combustión de fuel-oil en calefacciones domésticas [Sabbioni y Zappia, 1993].

Otro tipo de partículas con este origen son las compuestas casi exclusivamente por hierro, típicamente de pequeño tamaño y morfología compacta y lisa (Sabbioni y Zappia, 1993), como puede verse en la Fig. 8. Estas últimas también pueden generarse en la combustión de carbón.

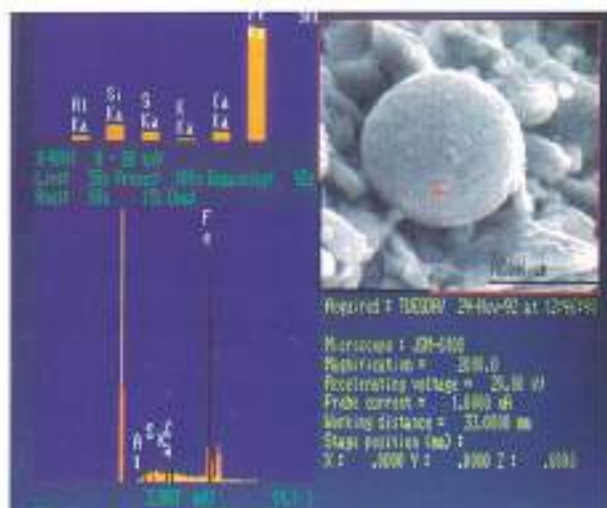


FIGURA 8. Catedral de Burgos. Partícula esférica, de aspecto macizo, de unas 10 micras de diámetro, localizada en una costra. Su espectro muestra gran cantidad de hierro. Este tipo de partículas puede generarse por la combustión de fuel-oil y también de carbón [Sabbioni y Zappia, 1993].

- Partículas generadas por combustión de petróleo: A nivel industrial la combustión de petróleo produce partículas elipsoidales con abundantes poros redondeados. También están compuestas mayoritariamente por azufre, acompañado de calcio y otros elementos minoritarios como el silicio, potasio, hierro y vanadio, considerándose este último como elemento característico (Connor, 1990). La partícula de la Fig. 9 posiblemente tiene este origen.

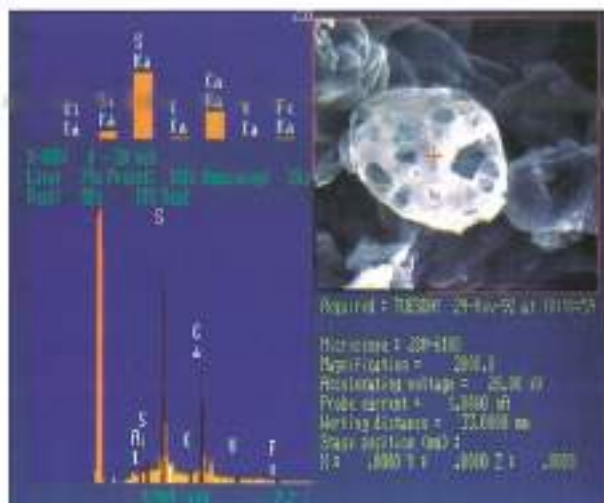


FIGURA 9. Catedral de Palma de Mallorca. Partícula de tendencia elipsoidal con poros más o menos redondeados. Sus componentes principales son el azufre y el calcio junto al silicio, potasio y hierro. Puede haberse generado en la combustión industrial de petróleo.

- Partículas generadas por combustión de carbón: Además de las partículas compactas, lisas y de naturaleza ferrosa, señaladas anteriormente (Fig. 8), aparecen en este caso otro grupo de partículas, parecidas morfológicamente, pero que están compuestas mayoritariamente por silicio y aluminio (Sabbioni, 1992), como se muestra en la Fig. 10. Cuando la combustión tiene lugar a nivel industrial se le atribuyen partículas macizas y sin poros, aunque con la superficie no tan lisa como las anteriores. En ellas, además de silicio y aluminio se presentan cantidades variables de potasio, titanio, calcio y hierro (Fig. 11).
- Partículas generadas por combustión de maderas: Suelen presentar gran cantidad de silicio, azufre y calcio, a las que acompañan otros muchos elementos: aluminio, hierro, potasio, fósforo y cloro. Su forma tiende a ser esférica, con grandes poros redondeados que en ocasiones les confieren un aspecto esquelético (Connor, 1990). Una partícula de estas características puede verse en la Fig. 12.
- Partículas de origen biológico: Suelen ser fácilmente reconocibles debido a su morfología no esférica, a la estructura de su superficie o a presentarse asociadas, encadenadas o formando racimos (Fig. 13).

Existen, sin duda, otros muchos tipos de partículas, algunos de los cuales no pueden ser fácilmente asignados a una fuente generadora concreta. No obstante, en este trabajo no se ha pretendido realizar una revisión detallada de los distintos tipos de partículas sólidas de contaminación existentes, sino mostrar la utilidad de la microscopía electrónica y

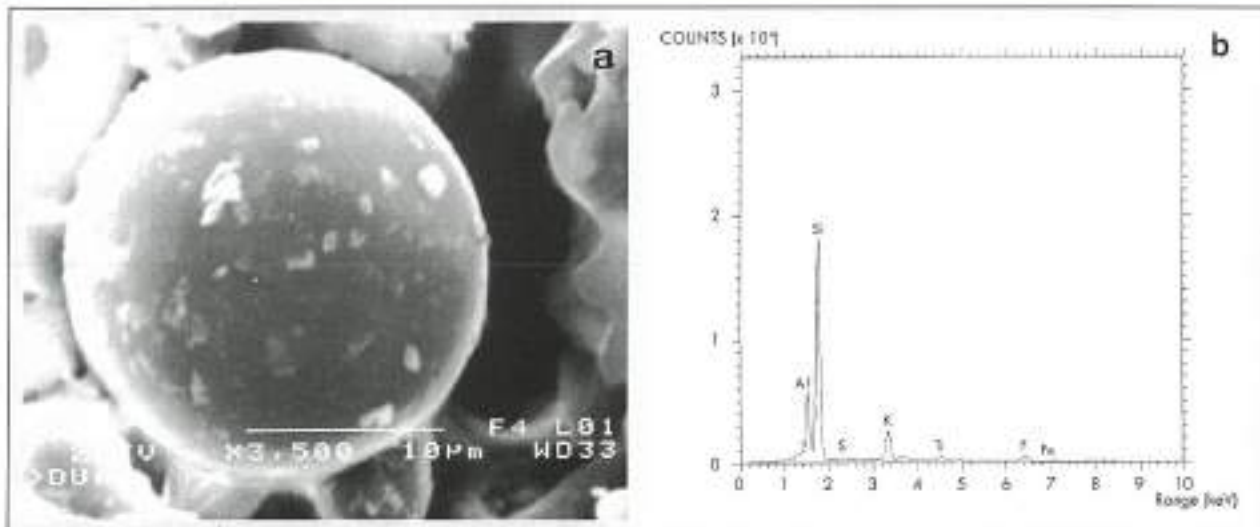


FIGURA 10. Ayuntamiento de Ponferrada (León). a) Partícula esférica de superficie lisa, encontrada en una costra de la fachada. b) Está compuesta mayoritariamente por silicio y aluminio. Es probable que proceda de combustión de carbón, posiblemente de la central térmica de Compostilla, situada pocos kilómetros del edificio [Sabbioni, 1992].

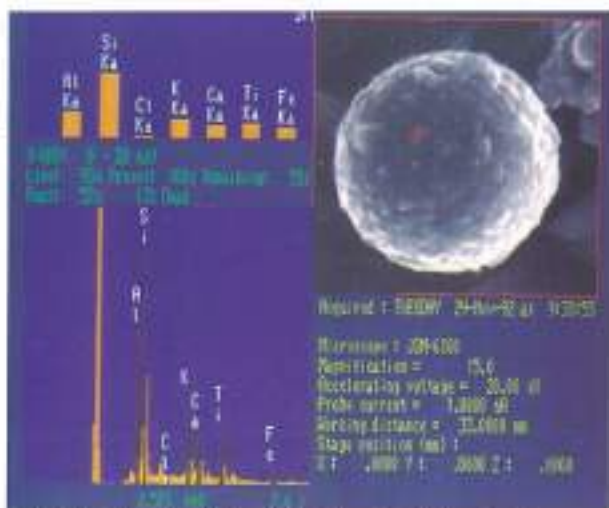


FIGURA 11. Catedral de Palma de Mallorca. Partícula esférica sin poros, localizada en una costra de la portada del Mar. Está compuesta por silicio y aluminio, con potasio, titanio, calcio, hierro y otros elementos en menores proporciones. Parece proceder de la combustión industrial de carbón [Sabbioni, 1992].

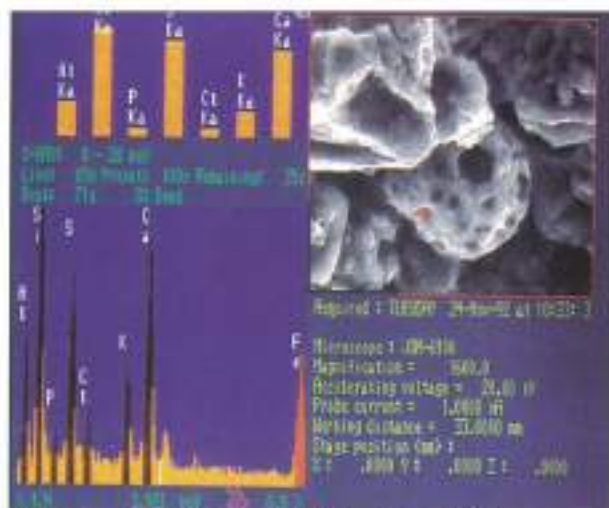


FIGURA 12. Catedral de Palma de Mallorca. Partícula esférica con poros redondeados, procedente de la portada principal. Presenta elevadas cantidades de silicio, azufre y calcio, con presencia menor de otros elementos. Su origen puede relacionarse con la combustión de madera [Comas, 1990].

el microanálisis puntual para la clasificación morfoquímica de dichas partículas. Este análisis es un paso previo imprescindible para establecer su participación en la alteración del sustrato pétreo sobre el que se localizan.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) por los proyectos PAT91-1093-CO3-01: "Modelos de interacción piedra-ambiente para el diagnóstico del deterioro de la piedra monumental" y SEC95-0501: "Protección de rocas monumentales emplazadas en ambientes urbanos frente al depósito de partículas sólidas de contaminación".

A la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Castilla y León, por la financiación de los trabajos titulados: "Incidencia del ambiente en el deterioro de la piedra de Hontoria de la Catedral de Burgos: cimborrio y fachada de Coronaría" (1992) y "Análisis y propuesta de tratamientos en la piedra de Hontoria: Fachada de Santa María (Catedral de Burgos)" (1995).

Al Ministerio de Cultura por la financiación del estudio titulado: "Diagnóstico de lesiones y análisis de los productos de alteración de la piedra de construcción de la Catedral de Palma de Mallorca" (1992).

A los cabildos de las Catedrales de Burgos y Palma de Mallorca, por las facilidades prestadas en las repetidas visitas a dichos monumentos.



FIGURA 13. Catedral de Burgos. Partículas de orígenes biológicos encontradas en una cimbra. Puede observarse que se trata de hifas de hongos y de restos de polen.

Al Dr. Jorge Ordaz y Dña. Angeles Pérez-Ortiz por su colaboración en los trabajos realizados en los mencionados monumentos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- BLASCHKE, R. (1976). *Signal excited by the scanning beam*. *Electron microscopy in mineralogy*. Ed. H. R. Wenk; P. E. Champness; J. M. Christie; J. M. Cowley; A. H. Heuer; G. Thomas y N. J. Tighe. Springer-Verlag, pp. 488-505.
- CONNOR, M. (1990). *Les aerosols antropogènes et l'alteration de la pierre*. Laboratoire de la Conservation de la Pierre, Ecole Polytechnique de Lausanne, 82 p.
- GOLSTEIN, J. I. (1975). *Electron beam-specimen interaction*. *Practical scanning electron microscopy*. Ed. J. I. Golstein y H. Yakowitz, Plenum Press, pp. 49-94.
- LEFEVRE, R. (1993). *Atmospheric sulphur-bearing particles: sources and impact on monuments stone*. In: *Stone material in monuments: diagnosis and conservation (Second Course)*. Crete, C.U.M. University School of Monument Conservation, pp. 93-100.
- SABBIONI, C. (1992). *Characterization of atmospheric particles on monuments by scanning electron microscopy / energy dispersive X-ray analyses*. *Electron Microscopy 92*, Granada, Vol. 2, pp. 773-777.
- SABBIONI, C. y ZAPPIA, G. (1993). *Characterization of particles emitted by domestic heating units fueled by distilled oil*. *Atmos. Environ.* 27A, 8, pp. 1331-1338.
- SAIZ-JIMÉNEZ, C. (1992). *Efectos de los aerosoles y materia particulada sobre edificios históricos y monumentos*. Encuentro europeo sobre: Patrimonio Histórico Artístico y Contaminación, pp. 107-112.
- VAN BORM, W. A.; ADAMS, F. C. y MAENHAUT, W. (1989). *Characterization of individual particles in the Antwerp aerosol*. *Atmos. Environ.* 23, 5, pp. 1139-1151.
- VÁZQUEZ, M.; ESBERT, R. M. y ALONSO, P. J. (1992). *Estudio de depósitos de contaminantes ambientales en superficies de rocas monumentales mediante S.E.M. y E.D.A.X*. *Microscopía Electrónica 92*. Universidad de Cádiz, pp. 295-296.
- WELLS, O. C. (1974). *Scanning electron microscopy*. Mc Graw Hill Book Company, 421 p.

Tecnología y métodos para la producción de hormigón de alta resistencia inicial



RETENCIONES

100



Buena trabajabilidad

Gran durabilidad

Inmediata puesta en servicio

Rápido endurecimiento

Sika, S. A.

Ctra. de Fuencarral, 72
Apto. Correos, 202
28100 ALCOBENDAS
Tel. 91 / 662 18 18 - Fax 662 19 38



Deseo recibir más información sobre el SIKA RAPID 1

Nombre

Empresa

Dirección

Cód./Población

Ingeniería Civil

Construir con Sistemas **Sika,**

GARANTIA Dragados



Presa de la Esperanza. Ecuador



CN VI, Madrid. Tramo Aravaca - Las Rozas



Dragados

P.º Alameda de Osuna 50 28042 Madrid
Tlno. 583 30 00 Fax 742 77 53