

Cartografía de formas de alteración de la Catedral de Burgos

ROBERTO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ (*)
JOSÉ NAVARRETE LÓPEZ-COZAR (**)
MÓNICA AÑORBE URMENETA (***)
JOSÉ MARÍA MARTÍN POZAS (****)

RESUMEN En este trabajo se estudian las características petrológicas y texturales de la piedra de construcción de la Catedral de Burgos y se reproducen en el laboratorio los factores climáticos de la ciudad con el fin de evaluar la durabilidad del material y contribuir al conocimiento de los mecanismos de alteración que inciden en el monumento.

Se efectúa una descripción y clasificación de las formas de alteración presentes en la catedral. Esta clasificación constituye la base para la realización de una cartografía detallada de patologías sobre tres de las fachadas del monumento con diferente situación y orientación.

Finalmente, se lleva a cabo un estudio de la "costra negra", una de las formas de alteración más importantes a causa de sus efectos destructivos y del negativo impacto visual que implica.

MAPPING OF WEATHERING FORMS IN BURGOS CATHEDRAL

ABSTRACT In this paper the petrological and textural properties of the Burgos Cathedral stone are studied and the climatic factors of the city are artificially reproduced in order to contribute to the knowledge of the weathering mechanisms affecting this monument.

A description and classification of the weathering forms, that are present at the monument, is carried out. This classification is used as the basis of a detailed mapping of pathologies. Three façades are selected depending on different situation and orientation.

Finally, the "black crust" is studied. This is one of the most important pathology because of its destructive effects and its negative visual impact.

Palabras clave: Formas de alteración; Cartografía; Deterioro; Caliza; Costra negra; Catedral de Burgos.

1. INTRODUCCIÓN

La Catedral de Burgos, una de las más conocidas del gótico universal y declarada en 1984 por la UNESCO "Patrimonio de la Humanidad", presenta actualmente un alto grado de deterioro debido al desarrollo de diversas formas de alteración. Estas formas tienen su origen en la interacción entre la piedra de construcción y los factores ambientales a los cuales se encuentra sometido el monumento.

Las características climatológicas de la ciudad de Burgos son las que se muestran en la Tabla I. El clima es típicamente continental de inviernos fríos, con heladas frecuentes, y veranos suaves. Las precipitaciones en forma de lluvia son más abundantes en los meses de invierno y primavera con

un elevado número de días de lluvia al mes. Es importante resaltar la elevada humedad relativa existente en invierno y la presencia de días de nieblas a lo largo de todos los meses del año, especialmente en diciembre y enero. El monumento, localizado en el centro de la ciudad, se ve afectado por la contaminación producida por el intenso tráfico rodado existente en las calles adyacentes (aunque en la actualidad ha sido restringido), y por las emisiones de humos de calefactores e industrias próximas.

El presente estudio pretende dar a conocer la localización preferente de las lesiones existentes en diversas fachadas del edificio con el fin de contribuir al conocimiento de los mecanismos de alteración que actúan sobre la piedra así como a la elección de los métodos de limpieza y restauración más adecuados.

Las fachadas que han sido elegidas para llevar a cabo este estudio han sido, en función de su situación a diferentes alturas y orientaciones, las siguientes:

- **Portada de la Coronaría.** Orientada al N, es la única de las tres fachadas seleccionadas que se encuentra situada a nivel del suelo y, por tanto, la que más directamente sufre las consecuencias de la contaminación por

(*) Licenciado en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.

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

(***) Doctora en Ciencias Geológicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, MOPTMA.

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

	DATOS CLIMÁTICOS											
	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
TEMPERATURAS												
Media de las máximas	6,0	7,7	11,2	13,1	16,8	21,6	25,8	25,6	22,7	16,5	10,2	8,4
Medias de las mínimas	-1,9	-0,7	0,7	2,5	5,3	8,3	10,7	10,7	8,8	5,3	1,4	-0,3
Ta mínima $\leq 0^\circ$ (DÍAS)	20	16	14	7	2	0	0	0	0	2	12	16
PRECIPITACIÓN												
Lluvia mensual	50,4	47,5	49,8	59,4	62,2	45,3	28,2	26,6	41,1	50,2	60,2	51,6
Nº de días de lluvia	10	9	10	12	12	9	6	6	8	11	11	11
HUMEDAD RELATIVA												
Medio de la H. R.	85	80	72	72	69	67	61	60	65	74	80	83
Días de niebla	8	3	2	1	1	2	1	2	3	3	3	7
VIENTOS	Los vientos dominantes son del SW y W con rachas más fuertes superando los 47 km/h en todos los meses.											
AMBIENTE Y CONTAMINACIÓN	Intenso tráfico rodado en las calles adyacentes al monumento. Hornos procedentes de las calefacciones. Industrias próximas.											

TABLA I. Características climatológicas de la ciudad de Burgos.

tráfico rodado. Se encuentra resguardada de la acción de los vientos dominantes y de la radiación solar directa.

- **Linterna del Sarmental.** Es la fachada de la cúpula o cimborrio que se halla orientada al S-E, hacia la portada del Sarmental. De las tres fachadas es la más expuesta a la acción del viento y la más soleada. Por estar situada en la zona alta del edificio, la influencia directa del tráfico rodado debiera ser menor que en las fachadas situadas a nivel del suelo.
- **Linterna del Condestable.** Al igual que la anterior, se encuentra localizada en la parte alta de la catedral, con una orientación N-E mirando hacia la capilla del Condestable. Está protegida de la acción de los vientos dominantes y en ella la incidencia de la radiación solar es menor que en el caso de la linterna del Sarmental.

El estado general de deterioro más avanzado lo presenta la portada de la Cornería, mientras que en las linternas del Sarmental y del Condestable el estado de alteración varía dependiendo de cada uno de los cuerpos que las constituyen. Los cuerpos tercero y cuarto, así como las pirámides de las torres que flanquean dichas fachadas fueron restaurados a principios de los años ochenta, por lo cual, las zonas que presentan un mayor grado de alteración son los cuerpos primero y segundo.

2. EL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

La Catedral de Burgos está construida prácticamente en su totalidad con piedra de Hontoria, material que ha sido ampliamente estudiado por su extendido uso en numerosos monumentos de la zona norte-centro de España (Marcos, 1992 y Marcos, et al., 1993). Además de esta roca, en algunas partes del zócalo pueden encontrarse sillares constituidos por piedra de Carcedo (caliza del Páramo) (Sánchez, 1993) correspondientes a reposiciones.

Se han estudiado las características petrológicas y texturales de Hontoria con el fin de conocer los factores intrínsecos que condicionan su alterabilidad. Además se ha tratado de simular en el laboratorio, mediante experiencias de enve-

jecimiento acelerado, algunos de los factores externos que inciden en su deterioro y reproducir las patologías que aparecen en las fachadas del monumento.

La caliza de Hontoria es una caliza bioclástica del Cretácico muy homogénea que en corte fresco es blanca (figura 1),



FIGURA 1. Aspecto de visu de la caliza de Hontoria de cantera.

pero que cuando se expone a la intemperie adquiere el color grisáceo que tiene en el edificio. A escala microscópica su textura presenta notables variaciones (figura 2), estando compuesta fundamentalmente por fragmentos de moluscos con un tamaño de clasto muy variable. Estos bioclastos se disponen con un alto grado de empaquetamiento y están unidos principalmente por cemento de tipo sintaxial y espartítico. La roca presenta una alta porosidad así como pequeñas concentraciones de óxidos de hierro y núcleos de recristalización de calcita (figura 3). Las variaciones texturales en la observación de visu son más acusadas en el monumento que en cantera, pudiéndose diferenciar tamaños de clasto muy diferentes de unos sillares a otros, lo que condiciona en algunas zonas del edificio su estado de conservación.



FIGURA 2. Aspecto de la caliza de Hontoria al microscopio petrográfico.

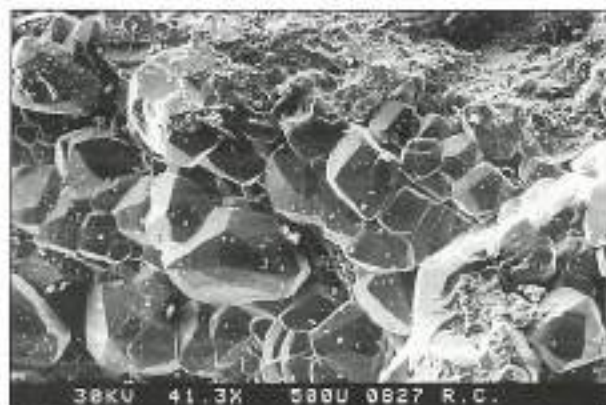


FIGURA 3. Imagen de S.E.M. de la caliza de Hontoria.

El análisis por difracción de rayos X (figura 4) y los análisis químicos (Tabla II) indican que el componente casi exclu-

CeO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	P. V. (%)
55,71	0,9	0,06	0,04	0,1	0,01	43,02

TABLA II. Análisis químicos de la roca de cantera.

sivo es la calcita (89%). Como minerales minoritarios aparecen el cuarzo y feldespato potásico.

Las propiedades texturales y estructurales relacionadas con el sistema poroso de la piedra han sido determinadas mediante los ensayos recomendados por la RILEM (1980):

- Densidad real y aparente.
- Porosidad abierta o accesible al agua.
- Contenido en humedad de saturación y coeficiente de saturación.

- Coeficiente de adsorción de agua por capilaridad.

El ensayo de permeabilidad al vapor de agua se ha realizado según la recomendación CNR-ICR (1985) NORMAL 21/85.

El ensayo de resistencia a la compresión uniaxial se ha realizado sobre cubos de piedra de 5 cm de arista secados a 105° C.

Para los ensayos de envejecimiento artificial acelerado se han seguido las recomendaciones de la RILEM (1980). Estos ensayos son los siguientes:

- Ensayo de cristalización de sales por inmersión total.
- Ensayo de hielo-deshielo.
- Ensayo de humidificación-secado.

En la Tabla III se muestran los valores de las propiedades texturales y estructurales de la roca fresca. Además, se comparan con los datos de aquellas propiedades que se consideran más significativas (porosidad abierta y resistencia a la compresión uniaxial) tras haber sometido las muestras a los ensayos de envejecimiento acelerado.

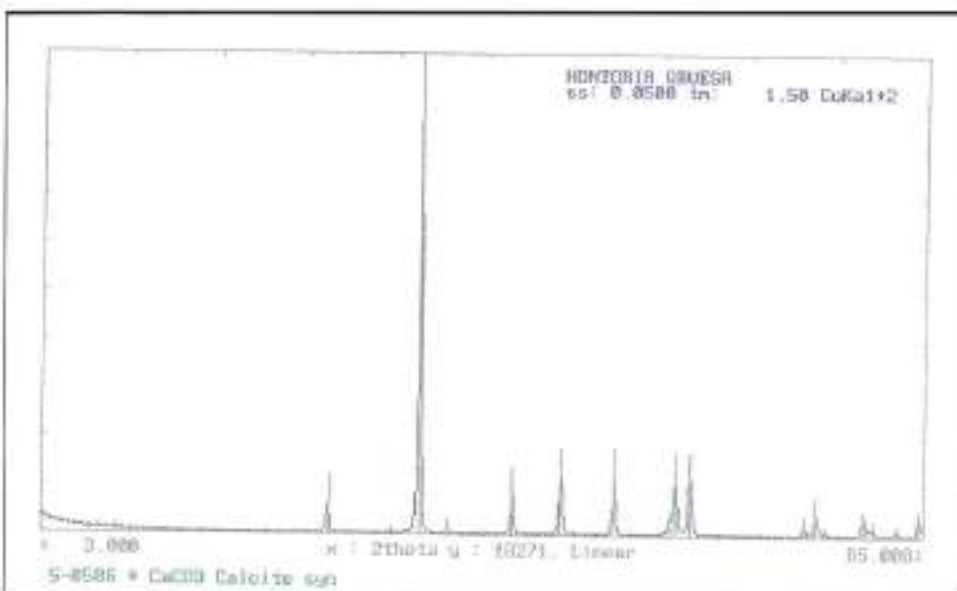


FIGURA 4. Difractograma de la caliza de Hontoria.

	ROCA CANTERA	CRISTAL. SALES	HIELO DESHIELO	HUMEDAD SEQUEDAZ
δ_r (kg/m ³)	2694	—	—	—
δ_a (kg/m ³)	2004	—	—	—
Mo (%)	25,7	26,3	25,5	25,7
Ws (%)	9,7	—	—	—
S (%)	76,0	—	—	—
A [kg/m ² s ⁻²]	0,1964	—	—	—
P _{cm} [gr/m ² x 24 h]	248	—	—	—
R (kp/cm ²)	156	—	137	152

TABLA III. Resultados de los ensayos para la determinación de las densidades real (δ_r) y aparente (δ_a), porosidad abierta o accesible al agua (Mo), contenido en humedad de saturación (Ws), coeficiente de saturación (S), coeficiente de absorción de agua por capilaridad (A), permeabilidad al vapor de agua (P_{cm}) y resistencia a la compresión uniaxial (R).

Los datos de las densidades real y aparente y los de la porosidad abierta que aparecen en la Tabla III revelan la elevada porosidad que presenta este tipo de piedra, corroborando las observaciones de microscopía óptica.

De los datos del contenido en humedad de saturación y coeficiente de saturación se deduce que este material presenta una elevada comunicación entre sus espacios vacíos. Los altos valores del coeficiente de capilaridad y la curva de absorción capilar de agua (figura 5) indican la gran capacidad de esta piedra para el ascenso capilar de agua, de forma que alcanza rápidamente la saturación (30 minutos).

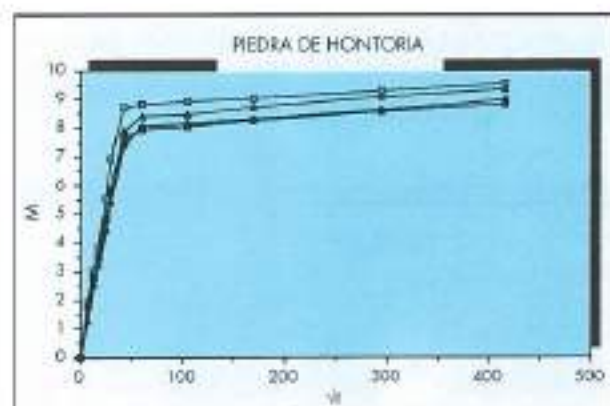


FIGURA 5. Curvas de absorción capilar de agua.

Los resultados de las experiencias de envejecimiento, expresados en tanto por ciento en peso respecto de la muestra inicial seca, se reflejan en la Tabla IV.

Del examen de estos datos se concluye que, lógicamente, los mayores efectos destructivos se han generado en el ensayo de cristalización de sales. Del seguimiento visual de las probetas llevado a cabo durante este ensayo se deduce que el mayor deterioro desarrollado corresponde al levantamiento y abombamiento de pequeñas placas, principalmente

CRISTALIZACIÓN DE SALES (%)	HIELO-DESHIELO (%)	HUM.-SEC. (%)
3,4	0,4	0,1

TABLA IV. Pérdida en peso tras las experiencias de envejecimiento acelerado.

en las aristas de las probetas, que al desprenderse dejan arenizada la superficie interior; hecho que conlleva una notable pérdida de materia. Además, se originan fisuras y se produce pérdida de materia en la superficie de las probetas por desprendimiento grano a grano.

Por otro lado, los ciclos de hielo-deshielo no ocasionan pérdidas de peso y deterioro superficial significativos, pero sí fracturaciones de algunas probetas en los últimos ciclos aprovechando la existencia previa de pequeñas discontinuidades. Los ciclos de humedad-sequedad no inducen deterioro aparente en las probetas.

Los resultados obtenidos tras la realización de las experiencias de envejecimiento acelerado indican que las muestras sometidas a cristalización de sales han experimentado un significativo incremento medio en la porosidad abierta de un 2,3%. Esto puede ser debido al aumento del tamaño de los poros y/o la comunicación entre los poros que previamente se encontraban cerrados y, consecuentemente, no eran accesibles al agua.

Los valores de la resistencia a la compresión uniaxial tienden, de forma general, a disminuir tras los ensayos de envejecimiento, lo cual indicaría que los agentes y mecanismos de alteración simulados mediante dichos ensayos podrían afectar negativamente a la estructura de los sillares disminuyendo su capacidad resistente.

3. INVENTARIO Y CARTOGRAFÍA DE ALTERACIONES

3.1. INVENTARIO DE FORMAS DE ALTERACIÓN

La cartografía de alteraciones que se presenta en este trabajo se ha obtenido mediante observación directa en el monumento y con la ayuda de un programa informático de tratamiento digital de imágenes.

La leyenda de los mapas de formas de deterioro ha sido elaborada en base a un inventario de las formas de alteración existentes en las tres fachadas, el cual ha sido efectuado teniendo en cuenta las terminologías de Ordaz y Esbert (1988) y de Martín (1990). Dichas formas de alteración son las siguientes:

3.1.1. Modificaciones superficiales

- **Costras negras.** Son láminas (o películas) endurecidas generadas por la transformación química del material pétreo original. Están formadas generalmente por sulfatos (yeso) y ennegrecidas por los productos de combustión de hidrocarburos y carbones. Estas costras suelen estar relacionadas con placas que se desprenden dejando el material subyacente muy arenizado (figura 6).
- **Depósitos superficiales o pátina de enmugrecimiento.** Son acumulaciones de materiales tales como polvo, hollín, cenizas volantes, etc. de color gris-negruzco que ensucian las fachadas. En los mapas de alteraciones la costra negra y las pátinas de enmugrecimiento se han cartografiado de forma



FIGURA 6. Aspecto de la costra negra en la portada de la Coronera.

conjunta dado que estas últimas podrían constituir los estadios iniciales de la costra (Alonso et al., 1994).

- **Biodepósito.** Son acumulaciones de microorganismos, restos orgánicos, excrementos de aves, etc.
- **Líquenes (costra biogénica), musgo y plantas superiores.** La proliferación de estos organismos es muy frecuente en las zonas altas y expuestas de los monumentos. Pueden relacionarse con términos tales como biocrustación o moteado descritas por Ordaz y Eibert (1988).
- **Eflorescencias.** Forma de alteración que consiste en la cristalización de sales de diversa naturaleza en la superficie de la roca. Presentan habitualmente un aspecto blanquecino y escasa coherencia (figura 7). Los análisis efectuados sobre diversas eflorescencias indican que están constituidas fundamentalmente por yeso. Además, se han encontrado algunas en las que uno de los componentes principales es la nitrocalcita (KNO_3). La figura 8 muestra un difractograma de una de estas sales tomada en la linterna del Condestable.



FIGURA 7. Eflorescencias en la base de la linterna del Sarmiental.

- **Tinción o pátina de tinción.** Es una alteración cromática cuya causa estriba en el lavado y oxidación de estructuras metálicas presentes en la edificación.

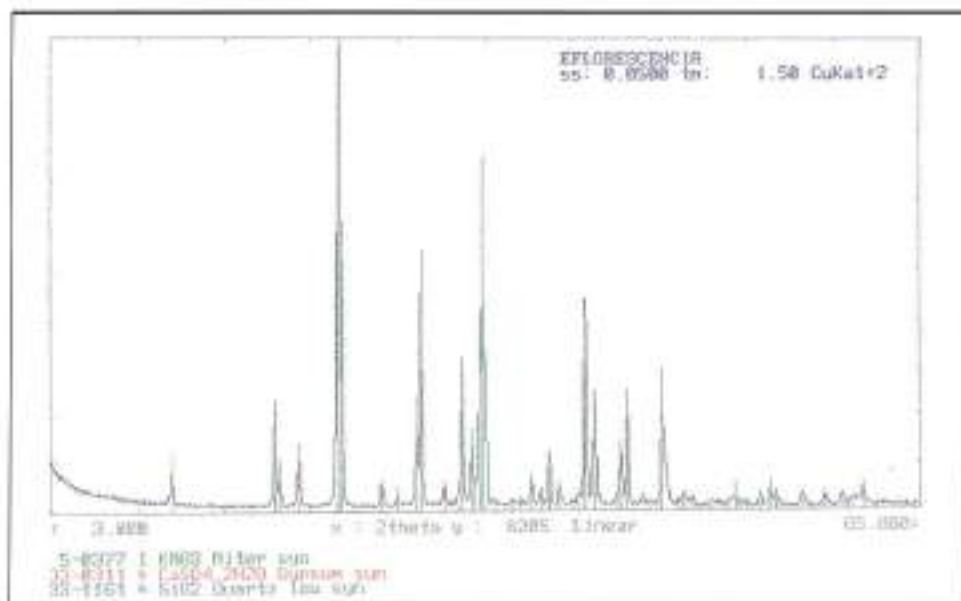


FIGURA 8. Difractograma de una eflorescencia con presencia mayoritaria de KNO_3 y Yeso.



FIGURA 9. Patinatura de color ocre.

- **Patinatura.** Es una pátina cromática que se debe a la aplicación de un pigmento o tratamiento artificial a la piedra, y que en el caso de la Catedral de Burgos es de color ocre (figura 9).

3.1.2. Indicadores con pérdida de materia

- **Alveolización.** Consiste en la formación de una serie de cavidades o depresiones, normalmente interconectadas y de morfología muy característica, que suelen ir ligadas a



FIGURA 10. Alveolización que hacia la parte superior pasa a picado en la portada de la Coronera.

eflorescencias, depósitos superficiales, etc. Cuando estas cavidades son de menor tamaño que las anteriores y no interconectadas entre sí, se utiliza el término **picado** o **picadura** (figura 10).

- **Burilado o pulimento.** Alteración con pérdida de materia que se manifiesta en zonas del edificio donde el roce humano es continuado, tal y como suelen ser las esquinas del monumento y accesos al mismo.
- **Cancerización.** Martín (1990), lo define como un "estado muy generalizado de degradación con eliminación de materia".
- **Abrasión.** (Ordaz y Esbert, 1988) o **erosión** (Martín, 1990). Ambos términos nos dan idea de un proceso de reducción del relieve o redondeamiento de formas debidos a la acción de desgaste del viento y agua (figura 11). El término erosión está más relacionado con la reducción de relieve producida por agua de escorrentía sobre los sillares.



FIGURA 11. Abrasión en las górgolas del cimborio.

- **Decoherción.** Término que define la pérdida de cohesión entre los granos constituyentes de la roca y que se manifiesta por la pérdida de materia grano a grano. Dentro de este término se incluyen varias fases del proceso dependiendo del grado de decoherción, siendo la **desagregación** la más leve, **disgregación** y **arenización** indican pérdidas de materia más acentuadas y finalmente **pulverización** como la decoherción más grave.

En general, la arenización va asociada a desplazaciones, que dejan la superficie subyacente muy arenizada, y a eflorescencias.

3.1.3. Deformaciones

- **Ampollas.** Son abultamientos muy característicos y abundantes que suelen presentar un ahuecamiento interno y que pueden estar o no eclosionados. Cuando esto sucede, el material subyacente se encuentra muy arenizado.

3.1.4. Rupturas y disyunciones

Dentro de las rupturas se incluyen **fracturaciones**, **fisuraciones** y **pérdidas de fragmentos**.

En el grupo de las disyunciones se incluye la formación y desprendimiento de **placas** y **escamas** (**desplacación** o **desconchadura**), habitualmente asociadas a costra negra, ampollas, arenizaciones y cristalización de sales (figura 12).



FIGURA 12. Desplazación y desarrollo de nueva costra negra en los contrafuertes de la portada de la Coronera.

3.1.5. Otros indicadores

- **Zonas lavadas o pátinas de decoloración.** Son áreas de las fachadas por las que el agua escurre debido gene-

ralmente a rotura o mal funcionamiento de los sistemas de evacuación del agua (canalizaciones, gárgolas).

3.2. CARTOGRAFÍA DE ALTERACIONES

La leyenda de los mapas de alteraciones es la que se representa en la figura 13 y ha sido elaborada a partir de la anterior clasificación de formas de alteración. Los mapas resultantes son los que se muestran en las figuras 14, 15 y 16.

En el análisis de la cartografía de formas de alteración se pone de manifiesto que la zona más afectada de la portada de la Coronera es la parte más inferior del primer cuerpo mientras que las zonas que presentan un mayor grado de alteración en las dos fachadas del Cimborio son los cuerpos primero y segundo.

Como se aprecia en los mapas, el indicador cuantitativamente más extendido de las tres fachadas, y probablemente toda la catedral, es la costra negra asociada también a depósitos superficiales. En este sentido, la portada de la Coronera es la que presenta un mayor desarrollo de estos indicadores, mientras que la linterna del Sarmental, más expuesta al sol y a los vientos dominantes, es la fachada en la cual costra negra y depósitos superficiales adquieren una menor relevancia.

El grosor de la costra negra en la portada de la Coronera puede llegar a ser aproximadamente de 1 cm, mientras que en las fachadas del cimborio no sobrepasan los 3 ó 4 mm.

En general, en las partes inferiores de cada fachada estas costras son más abundantes y gruesas que en las zonas altas. El máximo desarrollo se alcanza en las áreas más res-

LEYENDA PARA LA CARTOGRAFÍA DE ALTERACIONES

MODIFICACIONES SUPERFICIALES

- Costra negra
- Depósitos superficiales
- Emugrecimiento

- Cristalización de sales
- Eflorescencias

- Tinción por óxidos

- Moho, líquenes, moteado
- Plantas superiores

- Biodepósito
- Excrementos de aves

- Patinadura reconocible

PÉRDIDA DE MATERIA

- Alveolización

- Picado

- Estado de ruina

- Burilado

- Abrasión. Erosión

- Decohesión. Arenización
- Desagregación

RUPTURAS, DISYUNCIONES Y DEFORMACIONES

- Descanchaduras (desplazaciones)
- Escamas. Ampollas

- Pérdidas de fragmentos

- Fisuras y fracturas

OTROS

- Áreas lavadas

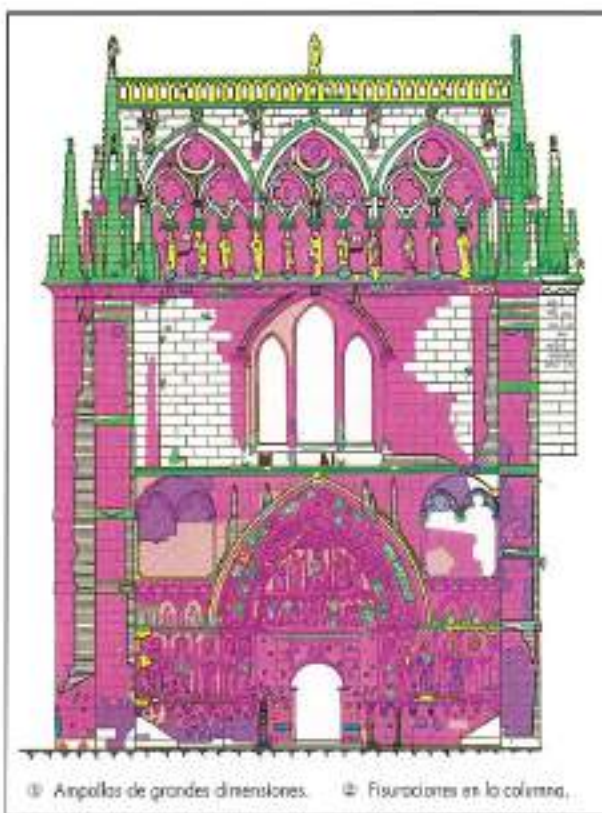


FIGURA 14. Cartografía de alteraciones en la portada de la Coronera.

FIGURA 13. Leyenda de la cartografía de alteraciones.

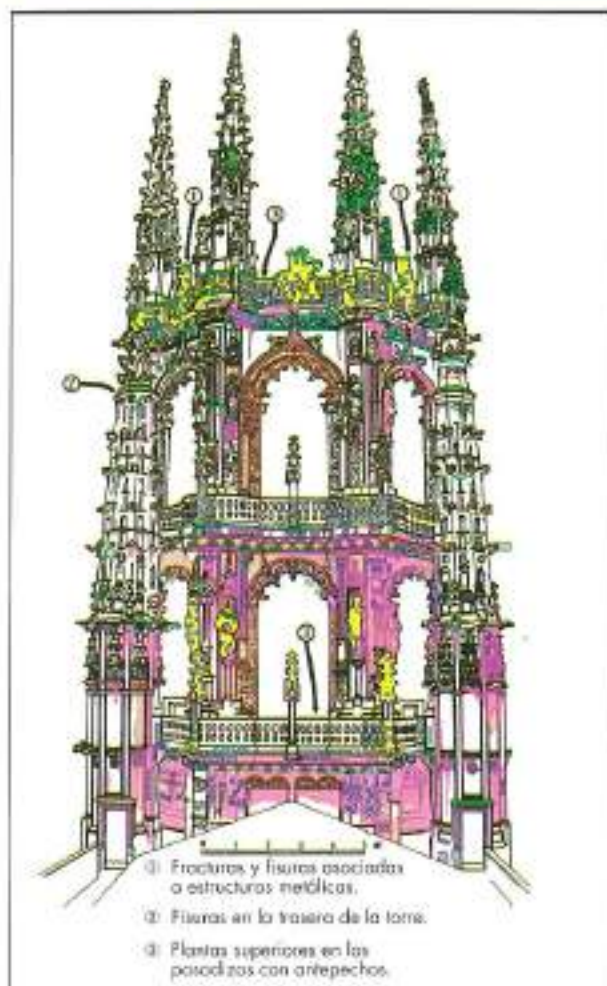


FIGURA 15. Cartografía de alteraciones en la linterna del Sarmental.

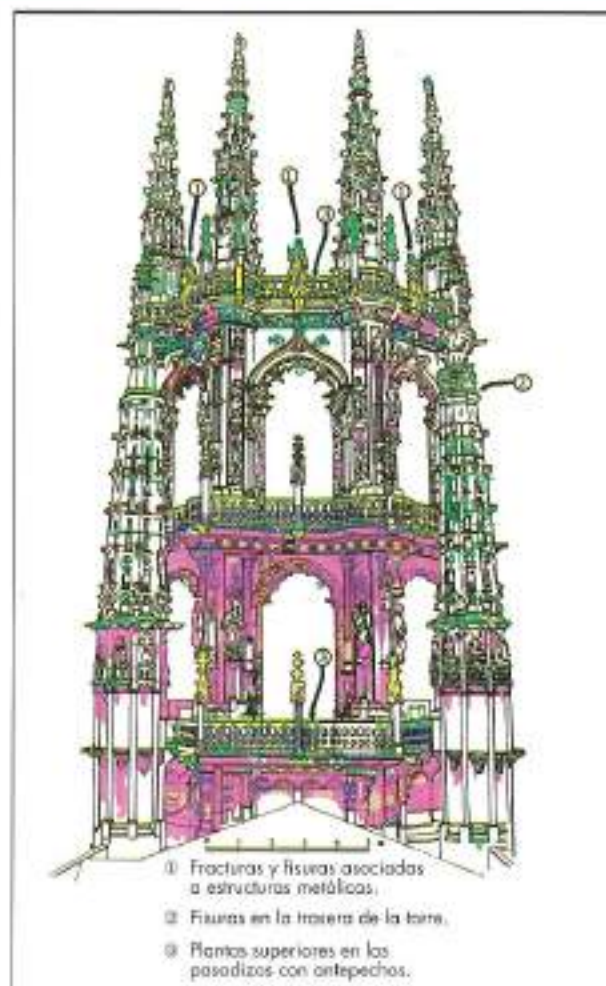


FIGURA 16. Cartografía de alteraciones en la linterna del Condestable.

guardadas. Por el contrario, se encuentran ausentes en puntos expuestos a la acción de los agentes atmosféricos y en las zonas lavadas. También se presentan con un elevado espesor en aquellos puntos donde existen juntas de unión entre sillares constituidas por mortero.

Estas costras negras aparecen íntimamente relacionadas con fuertes desplazaciones, arenizaciones y eflorescencias. Los depósitos superficiales, de color marrón y tacto esponjoso, son especialmente abundantes en la parte baja de la portada de la Coronaría donde son frecuentes las turbulencias de aire que arrastran todo tipo de partículas.

Las desplazaciones, muy ligadas a la costra negra, son uno de los indicadores de alteración que implican un mayor deterioro superficial. Por regla general, las placas están constituidas en su parte exterior por costra negra y en su parte interior por el material original de color blanco. Cuando estas placas se desprenden dejan la superficie subyacente con su color blanco original e intensamente arenizada, pudiendo desarrollarse de nuevo sobre esta superficie la costra negra. Este fenómeno, que genera un deterioro superficial y una pérdida de materia muy importante, se produce con una enorme rapidez. En este sentido se muestran las figuras 17 a y b pertenecientes a la linterna del Sarmental en las cuales se aprecia la diferencia existente en el es-

tado de conservación para diferentes épocas del presente siglo. La primera corresponde a una fotografía publicada en 1958 (Huidobro, 1958), mientras que la segunda fue realizada en 1992.

De la observación y comparación de ambas fotografías se deduce que en un período de aproximadamente treinta y cinco años, se han desarrollado costras y desplazaciones y, como consecuencia, arenizaciones y pérdidas de fragmentos. Este hecho es indicativo de la elevada velocidad de alteración que está sufriendo actualmente el monumento.

Las ampollas se presentan de forma aislada y con grandes dimensiones (como sucede en las partes altas de la portada de la Coronaría) o de forma muy generalizada asociadas a desprendimientos de costras (contrafuertes de la misma fachada).

Existe otro tipo de desplazación, de menor intensidad, no asociada a la costra negra que aparece principalmente en los primeros centímetros de las barandillas que hay sobre las cornisas en las diferentes cuerpos del cimborrio. La formación de dichas placas, que van asociadas a arenización y abrasión, podría estar relacionada con el ascenso capilar del agua que se acumula en las cornisas debido al deficiente funcionamiento de las estructuras de drenaje así como al efecto de las heladas y de las variaciones de temperatura,

La retención de agua se debe a que las gárgolas y canales se encuentran frecuentemente obstruidos por plantas superiores y depósitos de tipo orgánico.

La abrasión es importante en zonas expuestas sometidas a la acción erosiva del agua de lluvia. Fundamentalmente se da en los antepechos calados existentes en las fachadas del cimborrio y, con menor intensidad, en la estatuaría superior y antepecho que remata la portada de la Coronera.

Esta abeasión produce una notable reducción del relieve y se asocia siempre con una ligera desagregación que es más intensa en aquellos paramentos constituidos por roca de textura más gruesa. Existe desgaste por erosión en algunos puntos donde el agua escurre (última archivolta del arco central del primer cuerpo de la Coronera) como consecuencia del mal funcionamiento de los sistemas de evacuación de agua.

Las eflorescencias son importantes en la parte inferior de las tres fachadas donde el deterioro es más acentuado. En la Coronera están también ligadas a alveolizaciones y picado.

4. ESTUDIO DE LA COSTRA NEGRA

La principal patología de alteración que se observa en la Catedral de Burgos es, conforme a los resultados expuestos en el apartado anterior, la denominada "costra negra", fun-

damentalmente debido al efecto destructivo al cual se asocia, así como por el negativo impacto estético que dicha forma de alteración implica junto a los depósitos superficiales.

Estas costras presentan un comportamiento muy frágil y se desprenden en forma de placas en cuya zona interna, como se indica en la figura 18 correspondiente a un corte transversal de una de estas placas, llevan adherido parte del material original alterado de la piedra.

En dicha figura puede apreciarse la parte externa, oscura y fina de estas placas correspondiente a la costra negra propiamente dicha. La parte interna, de color blanco y más gruesa que la anterior, pertenece a la roca original adyacente. Entre ambas partes existe una zona de color rojizo que corresponde, posiblemente, a una pátina artificial.

Desde el punto de vista morfológico, la superficie de la costra negra posee un color negro característico y, en las más desarrolladas presenta formas globulares de recristalización. Las imágenes S.E.M. obtenidas de la superficie de la costra negra indican que, en su mayor parte, se encuentra formada por yeso, el cual cristaliza con el típico hábito de rosa del desierto (figura 19). En dicha figura puede observarse la existencia de microporos en el interior de los cristales. El análisis realizado mediante energía dispersiva de rayos X sobre los mencionados cristales revela los altos contenidos en S y Ca propios de la composición del yeso. Asimismo, se aprecian estructuras produ-



FIGURAS 17 A y B. Diferencia en el estado de alteración entre los años 1958 (A) y 1992 (B).



FIGURA 18. Aspecto en corte transversal de la costra negra (longitud aproximada de la figura, 3 cm).



FIGURA 19. Imagen S.E.M. de cristales de yeso precipitados en la superficie de la costra negra.

cidas por hongos, partículas de polvo de diversa naturaleza y partículas carbonosas con un tamaño aproximado de 30 μm (figura 20) y con un alto contenido de S y Ca en ellas según indica el microanálisis. Dichas partículas carbonosas proceden de la quema de combustibles en automóviles y calefacciones y son las responsables del color negro de la costra.

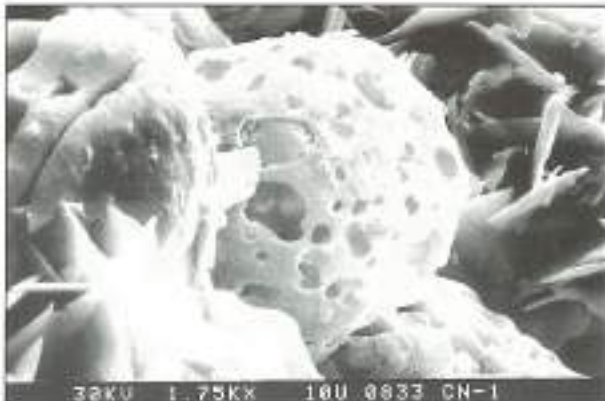


FIGURA 20. Partícula carbonosa de la superficie de la costra (S.E.M.).

descenso del contenido en CaO en la costra negra respecto de la roca fresca, hecho que es debido a la disolución de calcita y por la presencia de yeso, cuarzo, micas y otros componentes que forman parte de la composición de la costra. Por el contrario, el contenido en SiO_2 es mayor en la costra negra que en la roca de cantera, lo cual puede ser explicado, tal y como se indica en el estudio por microscopía electrónica, por la existencia de cuarzo y otras partículas silicatadas (micas, feldespatos,...) del polvo atmosférico transportadas por el viento y adheridas a la costra. En este sentido, el ligero aumento de K_2O , Al_2O_3 y MgO en la costra negra respecto de la roca sana podría deberse también a la presencia de micas y feldespatos procedentes del mencionado polvo atmosférico.

La costra negra posee un contenido en P_2O_5 mayor que el de la roca de cantera como resultado posiblemente de la actividad orgánica que existe en las fachadas del edificio.

El análisis químico de elementos menores y traza se expone en la tabla VI en la que puede apreciarse cómo el S pasa de tener 1.300 ppm en la roca de cantera a ser un elemento mayor en la costra negra a consecuencia de que dicha costra, como se ha visto anteriormente en el análisis por difracción de rayos X, está compuesta principalmente por cristales de yeso. Asimismo, la costra presenta una mayor cantidad de Cu, Pb, Zn y Ni que la roca de cantera. Es-

La calcita es también frecuente en la superficie de la costra. En la figura 21 se muestra un cristal de calcita que presenta formas de disolución y que se encuentra rodeado de cristales de yeso. Además, se han identificado numerosas partículas de cuarzo redondeado (figura 22) probablemente de origen alóctono al material calizo original.

A la vista de los difractogramas obtenidos, se puede afirmar que el componente cristalino mayoritario de la costra negra es el yeso (figura 23). Sin embargo, también entran en su composición, en menores proporciones, la calcita y el cuarzo por este orden de abundancia. También se hallan presentes, como componentes minoritarios, minerales del grupo de las micas incluidas entre las partículas que arrastra el viento.

En la Tabla V se recoge el análisis químico de elementos mayores de la costra negra. En ella se evidencia un notable

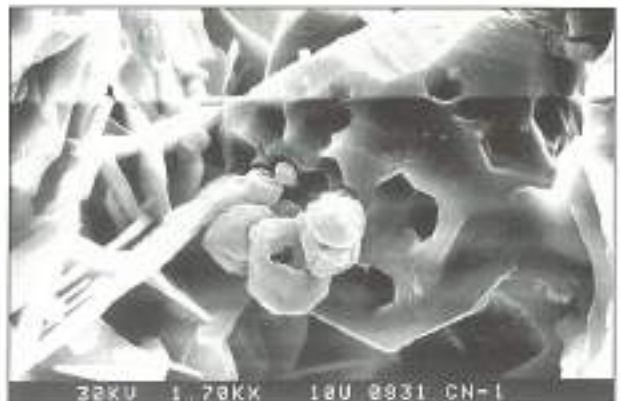


FIGURA 21. Cristales de calcita con signos de disolución (S.E.M.) y cristales de yeso.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P. V.
Hort.	0,62	0,02	0,02	0,00	0,12	56,70	0,33	0,00	0,00	0,01	42,87
C. N.	7,99	1,35	0,67	0,01	0,31	32,56	0,32	0,45	0,06	0,68	32,88

TABLA V. Análisis químico de la costra negra y la roca de canchales (elementos mayores). Los datos se expresan en % (los datos del contenido en S se exponen en la tabla VI de elementos traza).

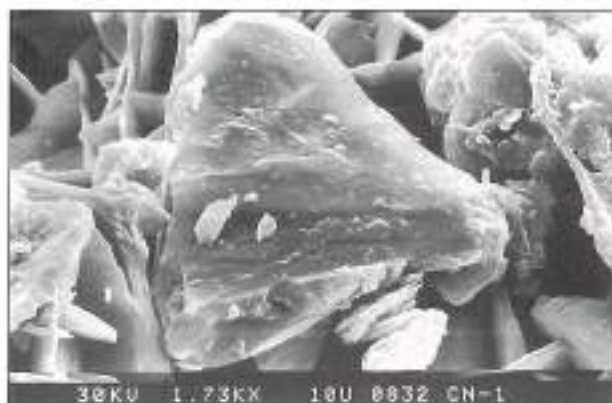


FIGURA 22. Partícula de cuarzo redondeada depositada sobre la superficie de la costra (S.E.M.).

	S	Cu	Pb	Zn	Ni
Hort.	1.300	n.d.	n.d.	12	4
C. N.	11,5*	335	65	170	22

(* Resultado expresado en %)
(n.d. = no detectado)

TABLA VI. Análisis químico de la costra negra y la roca de canchales (elementos menores y traza). Los datos se expresan en ppm.

tos elementos proceden de la quema de carburantes y combustibles fósiles (Aires Barros y Alves, 1988), hecho éste indicativo de la influencia que tienen los contaminantes atmosféricos en la formación de dichas costras.

El estudio llevado a cabo en la cara interna de la placa, es decir, la superficie de desprendimiento de la misma, indica que en su mayoría dicha superficie está constituida por cristales de calcita y yeso. Además, también se han detectado por S.E.M. formas de cristalización poco abun-

dantes a modo de fibras que crecen perpendicularmente a la superficie de la placa (figura 24). Los resultado del microanálisis practicado sobre una de estas fibras nos revela un alto contenido en Na, interpretándose la naturaleza de estas formas de cristalización como nitronatrita (NaNO₂) a raíz de su composición y morfología (Arnold y Zehnder, 1990).

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) por la financiación del proyecto "Modelos de interacción piedra-ambiente para el diagnóstico del deterioro de la piedra monumental" (Proyecto PAT 91-1093-CO3).

Al Cabildo de la Catedral de Burgos por las facilidades concedidas para llevar a cabo el estudio.

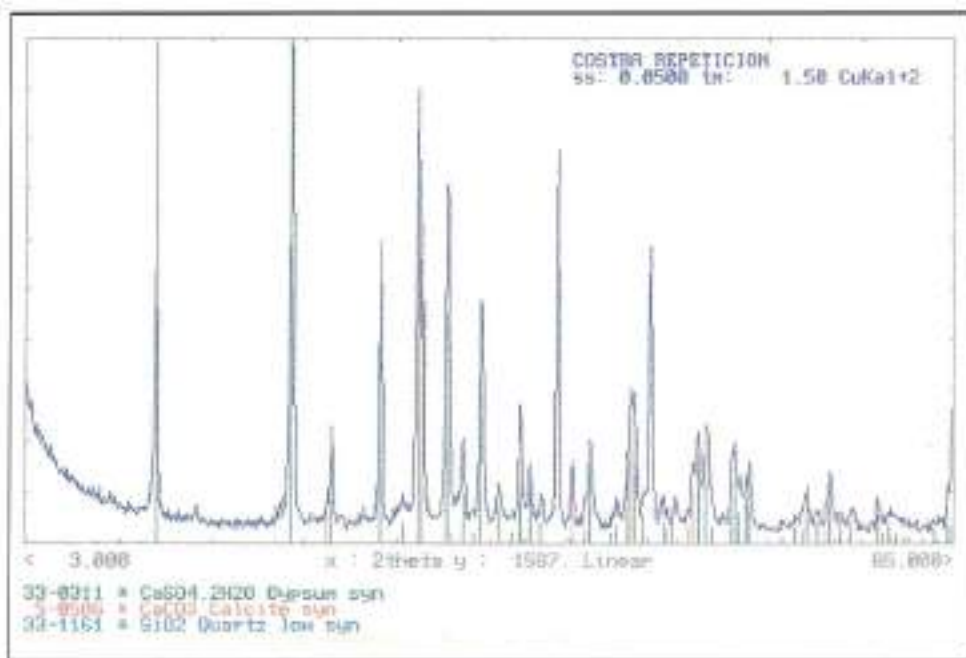


FIGURA 23. Difractograma de la costra negra

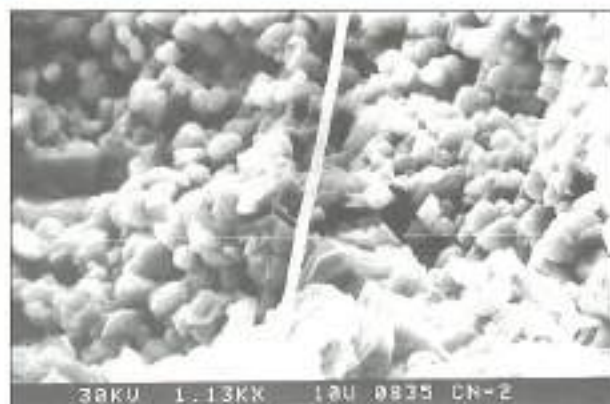


FIGURA 24. Fibras de nitrato que crecen en la superficie interior de las placas desprendidas [S.E.M.].

BIBLIOGRAFÍA

AIRES BARROS, L. y ALVES, L. M. (1988). "Geoquímica e génesis das «castras negras» dos calcários dos portais do Mosteiro dos Jerónimos". Geociencias, Aveiro; vol. 3, fase. 1-2, pp. 217-222.

ALONSO, F. J.; DÍAZ-PACHE, F. y ESBERT, R. M. (1994). "Interacción piedra ambiente, 1ª parte: formas de alteración desarrolladas sobre la piedra de la Catedral de Burgos". Informes de la Construcción, Vol. 46, nº 433, septiembre-octubre 194.

ARNOLD, A. y ZEHNDER, K. (1990). "Salt weathering on monuments". En "Analytical methods for the investigation of damaged stones. Advanced Workshop", Pavia (Italy), Sept. 1990, 58 pp.

C.N.R.-I.C.R. (1985). NORMAL 21/85. "Permeabilità al vapore d'acqua". Roma, 5 pp.

HUIDOBRO, L. (1958). "La Catedral de Burgos". Ed. Plus Ultra, 155 pp.

MARCOS, R. (1992). "Tratamientos de conservación aplicados a rocas carbonatadas: Catedral de León". Tesis Doctoral; Universidad de Oviedo, 273 pp.

MARCOS, R.; ESBERT, R. M.; ALONSO, F. J. y DÍAZ-PACHE, F. (1993). "Características que condicionan el comportamiento de la caliza de Hontoria (Burgos) como piedra de edificación". Boletín Geológico y Minero, Vol. 104-5, pp. 587-597.

MARTÍN, A. (1990). "Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico-artístico". Ed. Centro de Estudios Ramón Areces, 609 pp.

ORDAZ, J. y ESBERT, R. M. (1988). "Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción". Materiales de Construcción. Vol. 38; nº 209; pp. 39-45.

R.I.L.E.M. (REUNION INTERNACIONAL DE LABORATORIOS DE ENSAYOS DE MATERIALES) (1990). "Recomendaciones provisionales de la comisión P.E.M. - 25 para la protección y erosión de los monumentos". I.N.C.E.

SÁNCHEZ HERNÁNDEZ, R. (1993). "Caracterización y alterabilidad de la piedra monumental de la Catedral de Burgos". Tesis de Licenciatura. Universidad de Salamanca, 152 pp.



GEOTEYCO

LABORATORIO ACREDITADO

- Asistencia Técnica.
- Control de Calidad.
- Estudios Geotécnicos.
- Ensayos de Campo.
- Ensayos de Laboratorio.

AREAS DE ACREDITACION

Área de ensayos de laboratorio de perfiles y barras de acero para estructuras.

Área de control "in situ" de la ejecución de la soldadura de elementos estructurales de acero.

Área de control de hormigón en masa o armado y sus materiales constituyentes: cemento, áridos, agua, acero para armaduras, adiciones y aditivos.

Área de ensayos de laboratorio de mecánica del suelo.

Área de toma de muestras inalteradas, ensayos y pruebas "in situ" de suelos.

Área de suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales.

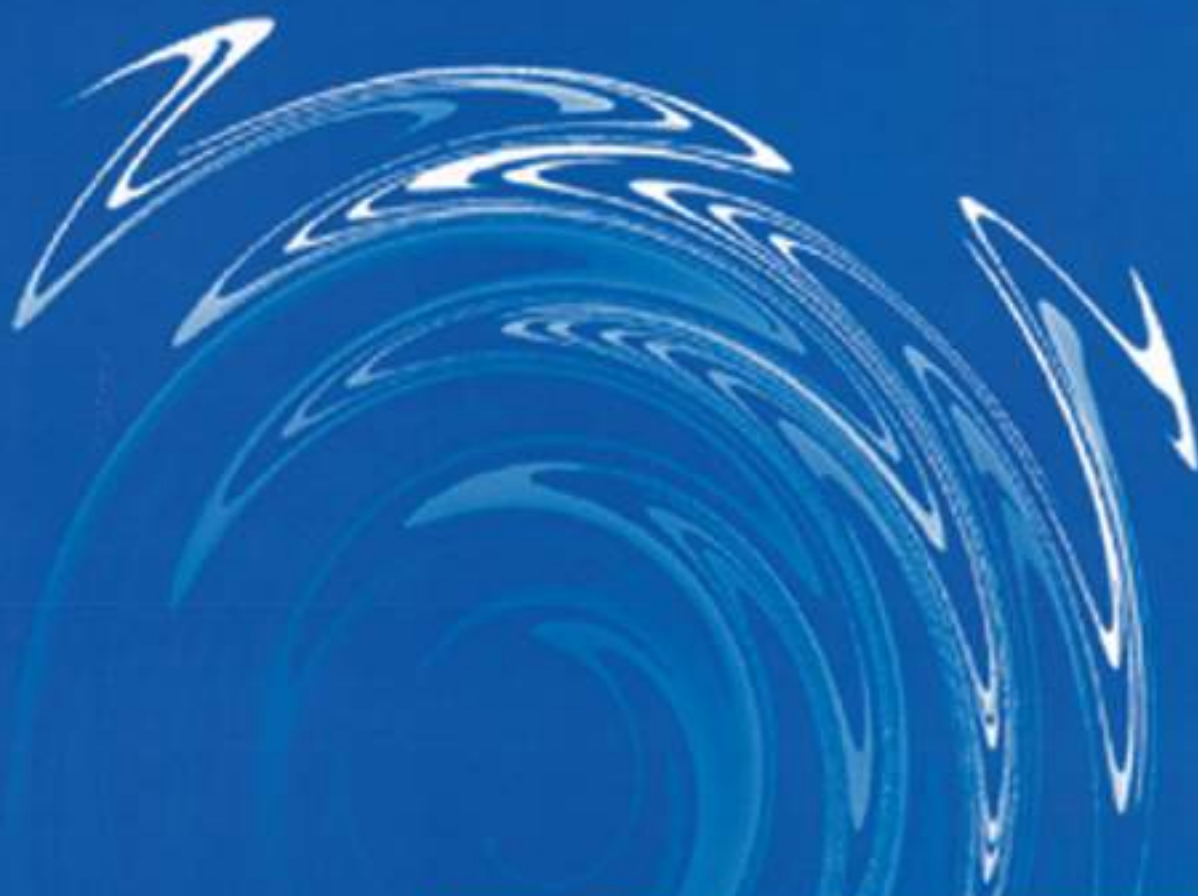
Paseo de la Habana, 81, Pab. Pinnedo - 28004 MADRID
Tel.: (91) 497 00 20 (5 líneas)
Fax: (91) 497 43 33

GEOTEYCO

Polígono Industrial Valdebarro
Nave 216-218
28940 FUENLABRADA (Madrid)
Tel.: (91) 890 11 86 / 890 50 11
Fax: (91) 890 24 62

PREMIOS **URALITA** OBRA-CIVIL '96

CONDUCCIONES
Y TRATAMIENTOS
DE AGUAS



COLABORAN

Escuelas de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos
convocantes.

PATROCINA

Colegio de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos.

URALITA
PRODUCTOS Y SERVICIOS S.A.



URALLITTA



POLYFELT TS®

EL GEOTEXTIL DE LA CARRETERA

POLYFELT TS, se ha convertido en el geotextil líder de la carretera.

Es la alternativa mejor y más sencilla. Sus excepcionales características como geotextil "no tejido" de filamentos continuos de polipropileno agujeteado por ambas caras, le confieren unas muy elevadas prestaciones como geotextil anticontaminante y de drenaje.

■ ALTAS PRESTACIONES

- Elevada resistencia a la tracción
- Óptima resistencia a perforación
- Alta elongación
- Gran permeabilidad vertical y horizontal (ausencia de colmatación)



■ FUNCIONES

El efecto filtrante de POLYFELT TS impide la penetración de los finos del subsuelo y estabiliza el sistema, subsuelo, geotextil y material de relleno, al dar salida al agua sobrante. POLYFELT TS aumenta la resistencia de corte y disminuye la posibilidad de deslizamiento. Actúa contrarrestando la tracción y aumenta la estabilidad del terraplén debido a sus características ideales de tracción-dilatación.

■ GARANTÍA

3.500.000 m² de POLYFELT TS instalados en carreteras durante 1994 y la pertenencia al Grupo URALITA.

POLYFELT TS®
La Tecnología en vanguardia.

Solicite información
llamando al teléfono
91-448 10 00

URALITA
PRODUCTOS Y SERVICIOS S.A.



OBRA CIVIL