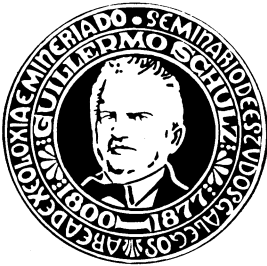


ALTERACION DE LOS MONUMENTOS GRANITICOS EN LA PROVINCIA DE LA CORUÑA:
DATOS PRELIMINARES .

GUITIAN OJEA, F.; CASAL PORTO, M.; SILVA HERMO, B.
Departamento de Edafología. Fac. Farmacia. Univ. Santiago .



Resumen:

Se estudian una serie de edificios monumentales de la provincia de la Coruña construidos con materiales graníticos distribuidos por todo su territorio, tanto en el interior como en la zona costera.

El objeto del trabajo es el de evaluar el estado de alteración de dichos edificios y conocer las principales causas y mecanismos que la producen.

Se ha encontrado que presentan diferentes formas de alteración según la parte del edificio que se considere y el tamaño de grano del material .

Résumé:

On á étudié une serie de bâtiments monumentales á la province de la Coruña construits avec des matériels granitiques distribués dans tout le territoire tant à l'interieur comme á la zone de la côte.

L'objet du travail c'est l'évaluation de l'état d'altération de ces bâtiments et connaître les principaux motifs et mécanismes qui la produisent.

On á trouvé qu'ils présentent différents formes d'alteration selon la part du bâtiment qu'on considère et la grandeur des grains du matériel.

Introduccion.

Vamos a presentar aquí los resultados de los primeros análisis realizados durante el estudio de la alteración de los monumentos graníticos de la provincia de La Coruña, que estamos llevando a cabo en nuestro Departamento, dentro de un plan subvencionado por la Excm. Diputación Provincial de La Coruña.

La primera fase del trabajo ha consistido en la observación de los principales monumentos de la provincia que se han escogido siguiendo, por una parte, el criterio de su interés artístico o turístico y por otra el de su estado de deterioro.

Se han visitado un total de 56 monumentos, cuya situación se refleja en el mapa de la fig. nº 1, de los que hemos seleccionado 14 para su muestreo y análisis.

La Iglesia de St^a. M^a Salomé, el Convento e Iglesia de Huerfanas y el Convento de S. Paio de Antealtares, de Santiago, se han estudiado con especial detalle debido por una parte a su proximidad a nuestros laboratorios y por otra a que presentan de forma manifiesta las principales formas de alteración observadas.

Este estudio preliminar nos ha permitido diferenciar las siguientes modalidades de alteración :

- Desagregación arenosa
- Costras y eflorescencias salinas
- Alveolizaciones
- Placas y exfoliaciones
- Colonización por seres vivos

Toma de muestras.

El muestreo se ha realizado sobre 14 monumentos que presentaban de forma manifiesta, alguna de las modalidades de alteración anteriormente citadas. En función de las mismas se han recogido:

- Placas y morteros, que se extraen facilmente con ayuda de una espátula
- Arena y material pulverulento, se recoge con ayuda de un cepillo de púas de alambre .

- Testigos cilíndricos, se extraen de los muros, utilizando un taladro industrial, con el fin de obtener muestras en profundidad. Estos testigos una vez obtenidos, se cortan diametralmente para someter a análisis las diferentes secciones.
- Sales. Cuando afloran a la superficie, se toman directamente con ayuda de un cepillo o una espátula, según su grado de encostramiento y cuando no afloran se obtienen por extracción acuosa de las muestras sólidas.
- Agua de lluvia. Se ha recogido mensualmente, mediante sistemas captadores colocados en las torres de algunas iglesias, que aparecen especialmente deterioradas.

Análisis realizados.

Las placas, testigos cilíndricos y material suelto, se han analizado mineralógicamente, mediante técnicas de difracción de rayos X, y, en ciertos casos, por análisis térmico diferencial.

El estudio de estas mismas por microscopia electrónica de barrido y microsonda electrónica, nos ha permitido visualizar a nivel submicroscópico su estado de alteración y determinar su composición química puntual, a fin de conocer la dinámica de los elementos en el interior de los sillares.

Las aguas de lluvia y las soluciones obtenidas por extracción acuosa de las muestras sólidas, se han analizado químicamente, determinando su pH, conductividad eléctrica y contenido en sales solubles. Los cationes más frecuentes (Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Mg^{++}) se han analizado por espectroscopia de absorción atómica y los aniones utilizando dos técnicas diferentes; los nitratos y cloruros con electrodos de ión selectivo y los sulfatos mediante espectrometría.

La naturaleza de estas sales minerales se ha determinado cualitativa- por difracción de rayos X, o mediante test microquímicos y microscópicos cuando estaban en cantidades inferiores al nivel de detección de esta técnica (Arnold, 1, 1981).

También se ha determinado el contenido en elementos solubles de algunos morteros, ya que pueden resultar altamente perniciosos.

Resultados.

Vamos a exponer a continuación las teorías, que a nuestro juicio explican de la manera más adecuada, las diferentes formas de alteración encontradas.

Desagregación arenosa.

Este fenómeno , que se da en mayor o menor grado en la totalidad de los monumentos observados, se puede considerar como la modalidad normal de alteración, puesto que se produce igualmente en todos los granitos situados en sus emplazamientos naturales.

Una peculiaridad de la arenización que se da en los monumentos, es que aquí la cantidad de arcilla detectada es mínima, al contrario de lo que sucede en el medio natural, donde esta fracción constituye el principal producto de alteración de los minerales primarios.

Efectivamente los análisis por difracción de rayos X de placas superficiales, polvillo y testigos cilíndricos, solo han revelado la presencia de ínfimas cantidades de caolinita en contadas ocasiones (Tabla nºI) mientras que en la mayoría de los casos los únicos minerales que se identifican son los propios del granito.

Pensamos que la cantidad de arcilla presente en las muestras está por debajo de los límites de detección de la técnica; ya que si se hace una concentración de las fracciones finas mediante una molienda suave de las muestras (Delgado,1976) aumenta la proporción de arcilla encontrada (Fig. nº2).

Por microscopia electrónica se han identificado dentro de las placas, precipitados de Alúmina y Sílice no cristalinos (Tabla nº II), Fotos nº 1 y 2 , lo que justifica la posibilidad teórica de neoformación del filosilicato 1:1.

De todas formas las condiciones existentes en los muros no deben ser ni mucho menos las mas favorables para su cristalización, pues se trata de un medio eminentemente drenado.

El proceso de arenización es debido a la acción del tiempo y de los agentes atmosféricos sobre la roca, por lo que lo consideramos como natural e irremediable. Viene gobernado fundamentalmente por la composi-

ción de la roca y por el clima.

Ahora bien, como este proceso es, químicamente hablando, una hidrólisis, su intensidad será tanto mayor, cuanto mayor es el tiempo de contacto del agua con la roca; es decir que en un monumento puede agudizarse peligrosamente en aquellas partes que permanecen húmedas largo tiempo

Costras y eflorescencias salinas.

En todas las muestras en las que se han analizado, han aparecido sales extrañas a la piedra: cloruros, nitratos y sulfatos. Los primeros son particularmente abundantes en las iglesias próximas a la costa, por lo que parece evidente su procedencia marina, siendo transportados hasta las paredes de los edificios por la lluvia o simplemente por la niebla o el aire húmedo. Los análisis de las precipitaciones caídas sobre varias iglesias costeras, revelan efectivamente que su contenido en estos iones es considerable, si se comparan con las recogidas en zonas del interior (Tabla III).

La presencia de sulfatos en las piedras de los monumentos se atribuye normalmente a la acción de la polución atmosférica (Cameran, 1948; Winkler, 1975). El SO_2 desprendido en las combustiones , se combina con el oxígeno y el vapor de agua de la atmósfera para dar lugar a ácido sulfúrico, el cual actúa sobre los minerales de la roca y al tiempo que acelera su degradación, se une a los cationes básicos dando sulfatos.

En Galicia el nivel de contaminación atmosférica es bajo. El servicio de Sanidad Ambiental de la Xunta , proporciona datos sobre el contenido de SO_2 del aire del orden de 60 microgramos por metro cúbico. Así mismo los análisis realizados en nuestro laboratorio, del agua de lluvia (tabla III) dan unos niveles de $\text{SO}_4^{=}$ que no justifican por si solos la presencia de este anión en cantidad considerable, en los extractos acuosos de las muestras de piedra (Fig. 3).

Todo esto nos llevó a analizar los morteros de las juntas , encontrando que la mayoría contienen yeso en su composición, por lo que lo consideramos como la principal fuente de anión sulfato (Tabla I).

Los nitratos se han detectado también en todas las muestras analizadas aunque en cantidades mucho menores. Su origen se atribuye, de acuerdo

con la bibliografía (Jaton, 1972) a la descomposición de la materia orgánica (musgos, algas, líquenes) y a la acción de las bacterias nitrificantes. En algunos casos en los que aparece en cantidades anormalmente altas. (Fig.3c) puede atribuirse a la actividad humana (restos de orines)

Las sales procedentes de la atmósfera penetran en una pared a través de su superficie, las que proceden del suelo o de las aguas subterráneas se introducen en ella a través de los cimientos y las que proceden de los morteros de unión difunden en todas direcciones.

El movimiento del agua y soluciones salinas se rige por las leyes de la capilaridad y la dirección del transporte viene determinada por el gradiente de humedad dentro de la pared.

Cuando una pared húmeda se seca se produce un movimiento de las soluciones salinas hacia el exterior y cuando se alcanza la superficie el soluto se evapora y la sal disuelta cristaliza o precipita, formando eflorescencias. Las sales muy higroscópicas tienden a absorber la humedad ambiental, disolviéndose en su propia agua de hidratación; estas sales solo llegan a cristalizar cuando la humedad relativa del aire es lo suficientemente baja (Arnold, 1981).

 Tabla : Humedades relativas de equilibrio a 25°C de algunas soluciones salinas saturadas , que son frecuentes en las paredes.

Sal	H.relativa 25° (%)
K_2SO_4	97
KNO_3	92,5
KCl	84,3
Na_2SO_4	81
NaCl	75,3
NH_4NO_3	61,8
$(NO_3)_2Ca \cdot 4H_2O$	50,0
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29,0

=====

Como puede verse en la tabla , una solución cloruro sódico solo puede cristalizar cuando la humedad relativa es menor del 75%. Los nitratos

en general son sales muy higroscópicas por lo que pocas veces aparecen formando eflorescencias. Los sulfatos, por el contrario son sales relativamente poco solubles.

Esto explica el hecho de que en Galicia rara vez se encuentren eflorescencias distintas a las de sulfatos. Únicamente se han encontrado eflorescencias de otras sales, fundamentalmente de ClNa en las iglesias de Buen Suceso (Finisterre) y San Martín do Porto (Cabañas), apareciendo solo en días secos y ventosos, que es cuando la velocidad de evaporación es máxima. En muestras de estas iglesias también se han detectado ClNa perfectamente cristalizado por microscopia electrónica (foto nº 3) .

En el interior de las iglesias por el contrario, las eflorescencias son más frecuentes.

Alveolizaciones.

En ciertos casos la sobresaturación de las soluciones salinas se produce antes de alcanzar la superficie de la pared; en este caso la sal precipita dentro de los poros de la piedra, ejerciendo un efecto de cuña que produce la desagregación del material. Este es el efecto más pernicioso de las sales, que en casos extremos llega a producir la forma de alteración conocida como "alveolización" (Pauly,1975), caracterizada por una fuerte pérdida de material que da lugar a la aparición de profundos surcos en la superficie de la piedra.

Placas.

Las placas son una de las modalidades de alteración más llamativas y perniciosas. Consisten en la separación de la capa más externa de la piedra paralelamente a la superficie de la pared. Dicha capa presenta una consistencia más o menos grande, sin embargo por debajo de ella el material aparece pulverulento y desagregado.

Se localizan preferentemente en las partes bajas de los edificios, siendo más abundantes y bien formadas a la altura del 3er. ó 4º bloque (aprox. 1.5-2 m) . Parecen estar en relación con el microlima de la pared es decir son más abundantes en lugares poco airados y resguardados del

impacto de la lluvia.

Cuando ocasionalmente aparecen a mayor altura en la pared, se cumplen también estas condiciones de abrigo de los agentes atmosféricos.

La textura del material, parece ser determinante para su formación. Nuestras observaciones nos permiten afirmar que se dan casi exclusivamente en granitos de grano medio a fino. Cuando el granito es de grano grueso, en los lugares en que teóricamente podrían aparecer placas, solo se observa el material fuertemente desagregado. Obviamente parece mucho más difícil la compactación de una placa de grano grueso.

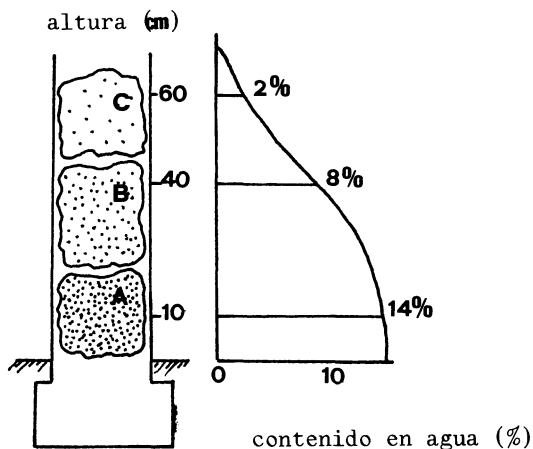
La formación de placas es un fenómeno poco estudiado y en el que no existe acuerdo unánime. En el caso del granito no hemos encontrado ninguna referencia bibliográfica al respecto.

Algunos autores consideran que en la separación de placas, deben tener una gran importancia los fenómenos de tensión. Una piedra en cantera está sometida a una enorme presión, cuando se extrae un bloque se produce un proceso de descompresión que hace que se presente una tendencia a la separación de capas paralelamente a la dirección del lecho. En este caso se trata en realidad de una exfoliación. Pero lo que en la nomenclatura de formas de alteración se denomina "placas", son las capas separadas en las superficies, orientadas a contralecho, sin ninguna relación con la estructura de la piedra (Arnold, 1980).

Los análisis de placas que hemos efectuado han demostrado que en ellas, existe siempre un enriquecimiento en sales con respecto a la zona interior del bloque (fig. 4). Es particularmente abundante el yeso, que se ha detectado tanto por análisis químico como ,perfectamente cristalizado por difracción de rayos X y microscopia electrónica (tablas I y II) Fig. 4 .

Esto nos induce a pensar que en el fenómeno de formación de placas debe jugar un papel fundamental, la dinámica de las sales. La acumulación de estas en la superficie daría lugar a un aumento de volumen de la capa externa produciendo, primero un abombamiento y luego su separación. El hecho de que sean más abundantes a una altura determinada, que coincidiría con el límite de la ascensión capilar (1,5-2 mm) , apoya nuestra hipótesis ya que a este nivel es máxima la cantidad de sales que alcanzan la superficie de la pared. (fig 5).

Fig. 5.- Cinética de la ascensión de agua en una pared .



En el proceso de secado de una pared, el agua, por una parte, tiende a escurrir hacia abajo obedeciendo las leyes de la gravedad y por otra tiende a salir hacia la superficie, en función del gradiente de humedad que se crea de fuera a dentro.

Esta pérdida de agua se compensa, en parte, con la entrada de agua a la pared a través de los cimientos, que va ascendiendo por capilaridad.

El límite de ascensión capilar se establece por el equilibrio de estas tres fuerzas: ascenso capilar, gravedad y evaporación. La altura alcanzada depende sobre todo de la porosidad del material (porcentaje de huecos) y del tamaño de los poros. En el límite de la ascensión es donde se evapora mayor cantidad de agua, con el consiguiente aporte de sales y eso explica que sea siempre la zona mas deteriorada.

Alteración biológica.

Los monumentos aparecen frecuentemente colonizados por seres vivos, vegetales o animales (larvas de insectos, arañas, bacterias, etc.) El

ataque biótico sobre la piedra es una cuestión compleja y muy poco estudiada . Por una parte las raicillas de las plantas y los animales colonizadores se incrustan en ella, ejerciendo un efecto mecánico sin duda perjudicial y por otra, pueden segregar sustancias cuyo pH y composición resulten corrosivos. Algunos organismos sintetizan oxálico y otros agentes complejantes que disuelven cantidades apreciables de filosilicatos y producen en otros transformaciones que los hacen mas lábiles frente a los agentes de alteración (Pochon 1968, Jatón 1972) . La agresividad de ciertos líquenes ha sido ampliamente probada sobre rocas calcáreas (Jones, Wilson & Tait ,1980) sin embargo parece ser que las rocas graníticas son menos susceptibles al ataque de estos mismos líquenes (Winkler 1975) .

Nuestras observaciones, a falta de estudios específicos sobre este fenómeno, nos hacen pensar que no son muy perjudiciales. De hecho algunas iglesias que aparecen totalmente cubiertas por líquenes (especialmente de los géneros Lecanora y Xantophila) están en un estado de conservación francamente bueno.

Pensamos, sin negar su efecto alterador, que este debe ser muy lento proporcionalmente menor que el efecto protector que se deriva de su acción permeabilizante .

Conclusiones.

Las ideas fundamentales pueden resumirse en los siguientes puntos :

- La alteración es tanto mayor cuanto mayor es el tiempo de contacto del agua con la roca. Esto explicaria la diferencia observada entre las partes altas y aireadas de los edificios y las umbrias y protegidas . Las primeras apenas presentan deterioro a pesar de recibir la misma o mayor cantidad de agua, mientras que las segundas se encuentran en peores condiciones .
- El ascenso del agua desde el suelo o el subsuelo a través del muro, es la principal causa de la alteración en las partes bajas de los edificios, donde se produce una de las formas de alteración mas llamativas " las placas " .

- El efecto del agua se ve incrementado cuando esta lleva sales en disolución . Su cristalización, a veces en formas muy hidratadas origina un aumento de volumen dentro de los poros, que puede llegar a causar la separación de los granos de la piedra. Este efecto es particularmente importante en las iglesias de la costa, que reciben un gran aporte de sales de procedencia marina.
- Tambien los morteros y otros materiales utilizados en la construcción se han revelado como una fuente importante de sales solubles, principalmente de sulfato cálcico .

Bibliografia.

- ARNOLD,A; JEANETTE,D and ZEHNDER,K (1980) - Proposal for a terminology of weathering phenomena on buildings stone. Centre de Documentation ICOMOS, 1982.
- ARNOLD,A (1981) - Nature and reactions of saline minerals in walls. The Conservation of Stone I, Preprints of the Contributions to the International Symposium. Bologna 1981 .
- CAMERMAN,C (1948) - Deterioration of buildings stone by fumes. Ann. Inst. Tech. Bâtiment et Travaux publics, t.14 (1948)
- DELGADO,J (1976) - Estimation of the content of clay minerals and its significance in stone decay. Proc. 2ad Int. Colloq on Deterioration of Building Stones, Athens 1976 .
- JATON, C (1972) - Aspects microbiologiques des alterations des pierres de Monuments. I Colloq Int. sur la Deterioration des pierres en oeuvre . la Rochelle 1972 .
- JONES, WILSON and TAIT (1980) - Weathering of a basalt by *Pertusaria corallina*. Lichenologist 12,3
- PAULY, J .P (1975) - Maladie alveolaire: conditions de formation et d'evolution. Conservation of Stone I. Proceedings of the Int Symposium Bologna 1975 .
- POCHON, J ; JATON, C (1968) - Facteurs biologiques de l'alteration des pierres. Proceedings of the I Intern. Biodeterioration Symposium . Southampton 1968 .
- WINKLER,E (1975) - Stone : properties, durability in man's environment Springer-Verlag 2^a ed. New York .

Tabla nº I .- Análisis mineralógico por difracción de Rayos X . Santa Maria Salomé.

Bloques	Alt. pared (cm)		Placas		Polvillo		Testigos		Morteros	
	izda.	decha.	Izda.	decha.	izda.	decha.	izda.	decha.	izda.	Decha
4	172	161	Q,F,M Y + K(tr)	Q,F,M, Y +	Q,F,M, Y ++	Q,F,M, Y ++	n.d.	n.d.	Q.F.m. K ++ Y +++	n.d.
3	128	118	Q,F,M,	Q,F,M, Y +	Q,F,M, Y +++	Q,F,M, Y +	Q,F,M,	n.d.	Q,F,M, Y ++ K (tr)	Q,F,M, Y (tr) K +
2	87	78	Q,F,M,	Q,F,M, Y +	Q,F,M,	Q,F,M,	n.d.	n.d.	Q,F,M, Y +	Q,F,M, Y ++ K (tr)
1	50	42	Q,F,M,	n.d.	n.d.	n.d.	Q,F,M,	Q,F,M,	Q,F,M, Ca	Q,F,M, Y

Q = Cuarzo

F = Feldespato

M = Mica

Y = Yeso

K = Caolinita

Ca = Calcita

Nota : Las cruces solo tienen un significado comparativo .

Tabla II .- Microscopia electrónica de barrido . St^a Maria Salomé

Bloques (izda)	Altura pared (cm)	Placas	Testigos cilíndricos
4	172	Granito alterado Abundantes fracturas trans e intre minerales. Cristales de yeso muy abundantes recubri- mientos de geles de silice y alúmina . Geles de alumina y hierro .	Componentes del granito
3	128	Idem. Cristales de yeso abundantes Geles de silice y alumina .	idem.
2	87	Idem. Geles de silice y alumina muy abundantes.	idem.
1	50	Idem. Geles de sílice y alúmina recubrimientos de hierro hifas de hongos .	idem.

Tabla nº III .- Análisis del agua de lluvia . Abril 1985

Localización	pH	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁼ (ppm)	C.E. 25º (mmhos)
San Xulian (Moraime)	6,6	9,4	7,3	50	6,1	95,4	15,5	22,8	0,360
Nuestra Señª Barca (Muxia)	6,7	52,5	56	151,5	26	912	44,9	157,5	2,800
Buen Suceso (Finisterre)	7,0	5,8	1,4	24	1,7	30,9	15,5	5,0	0,130
Stª.Mª Salomé (Santiago)	4,4	0,2	0,1	2	0,4	7,2	3,9	1,8	2,20x10 ⁻²
Stª Leocadia (Frixe)	5,8	0,8	0,7	6,4	0,4	10	5,3	2,6	3,50x10 ⁻²
Stª Maria (Cambre)	5,8	0,8	0,2	3,4	0,5	8,7	2,3	1,4	3,30x10 ⁻²
Santiago (Cereixo)	5,9	1,7	1,9	26	0,9	10,3	n.d.	5,4	6,42x10 ⁻²

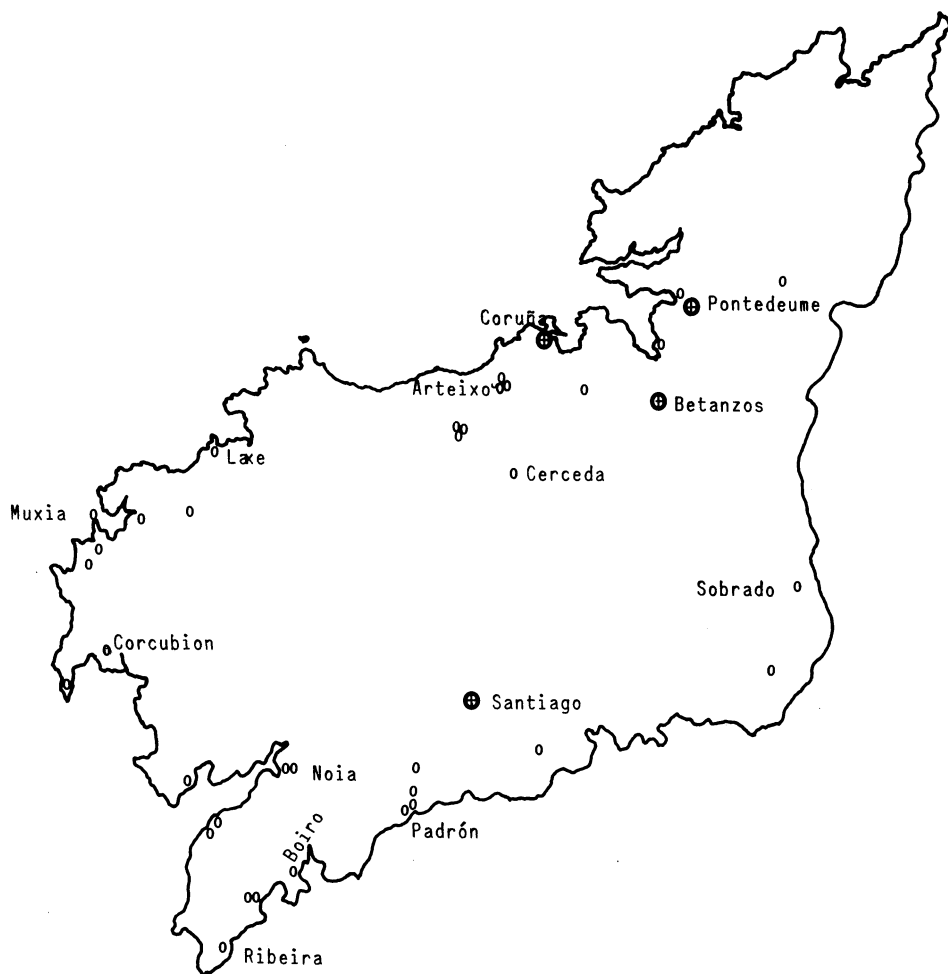


Fig. nº 1.- Distribución de los edificios monumentales graníticos visitados en la provincia de La Coruña .

Conjunto monumental ⊕

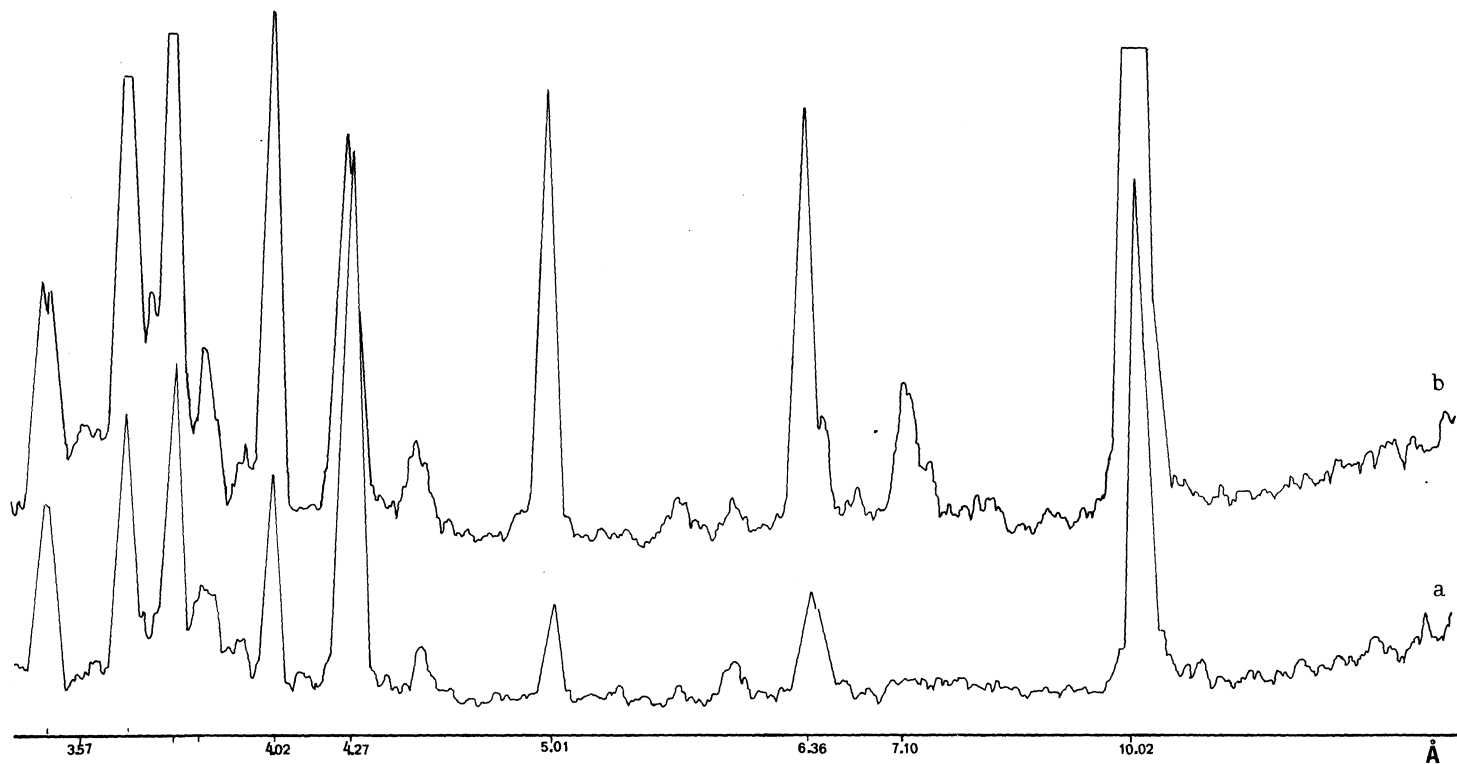


Fig.nº 2.- Difracción de rayos X sobre placas. Iglesia San. Jorge , La Coruña.

a) P.C. de muestra total molida

b) Fracción menor de 50 micras obtenida por molienda suave .

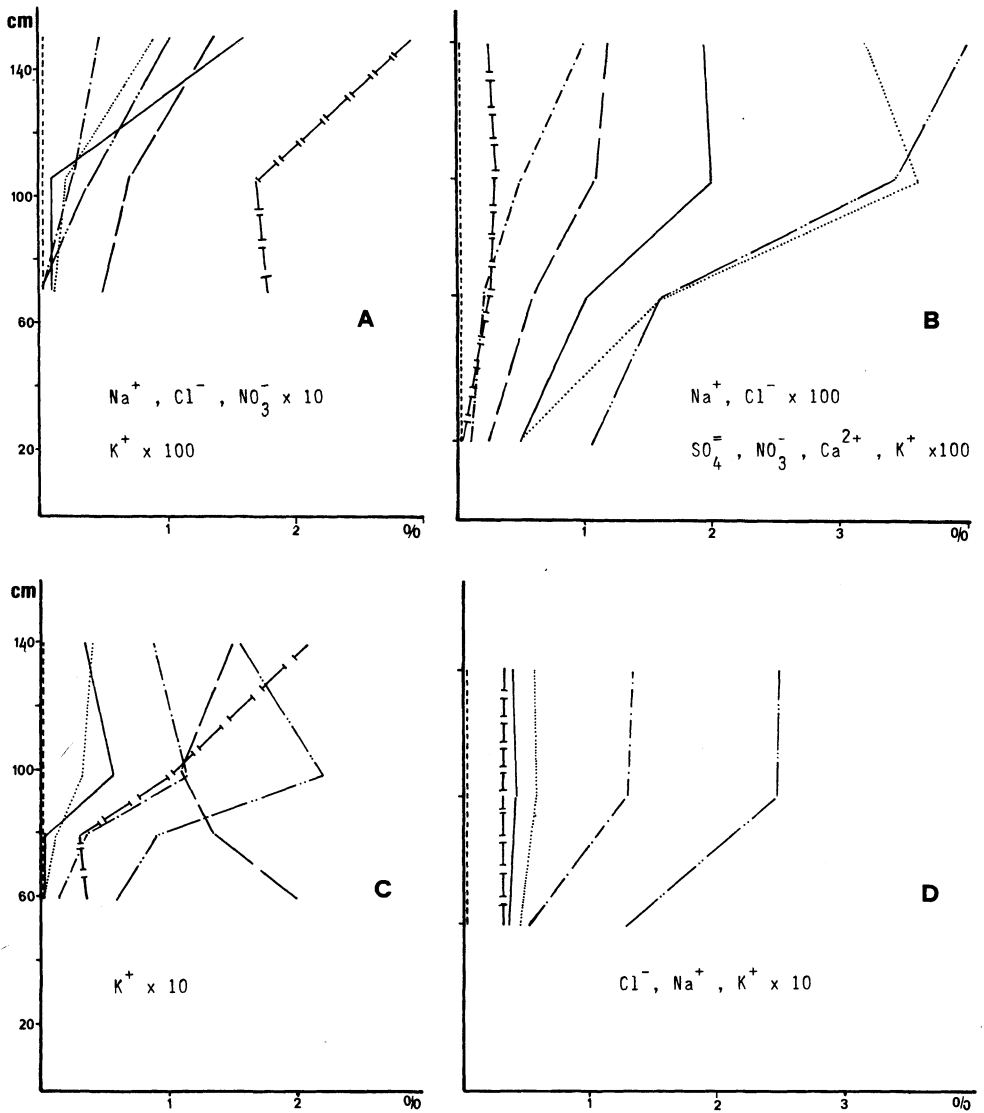


Fig.nº3.- Variación del contenido de iones con la altura de la pared .

A - Salomé febrero (Izda. pared)	K^+ —	Cl^-
B - Salomé abril (Izda. pared)	Na^+ —	Ca^{++} ----
C - Salomé abril (Decha. pared)	NO_3^- --	Mg^{++} ---
D - Huerfanas (Colegio)	$\text{SO}_4=$ ---	

A - Polvillo, el endoterma a 140° corresponde al agua de cristalización del yeso

B - Testigo cilíndrico, el endoterma a 105° corresponde al agua libre .

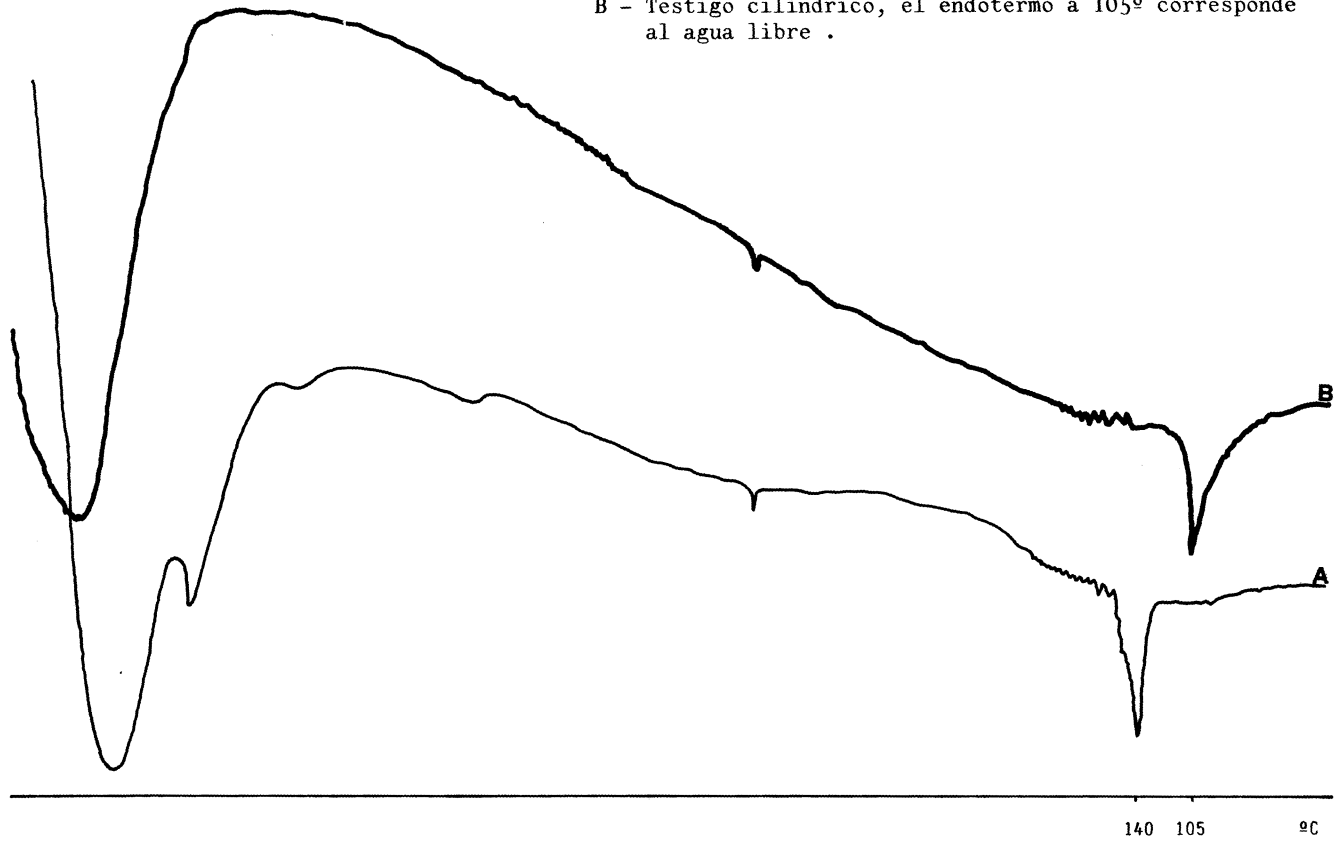


Fig.nº4.- Análisis termico diferencial.



Foto n.º 1.—Geles de alúmina y sílice ($\times 2500$)

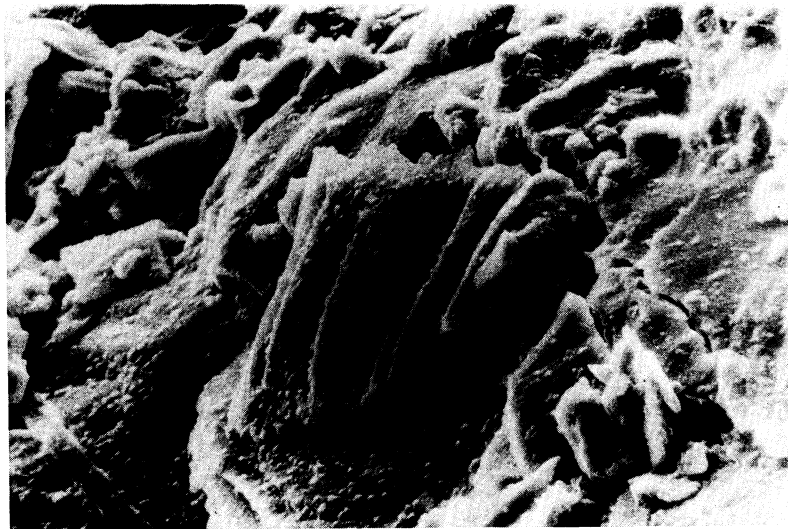


Foto n.º 2.—Granito desagregado con abundantes precipitados no cristalinos ($\times 1000$).

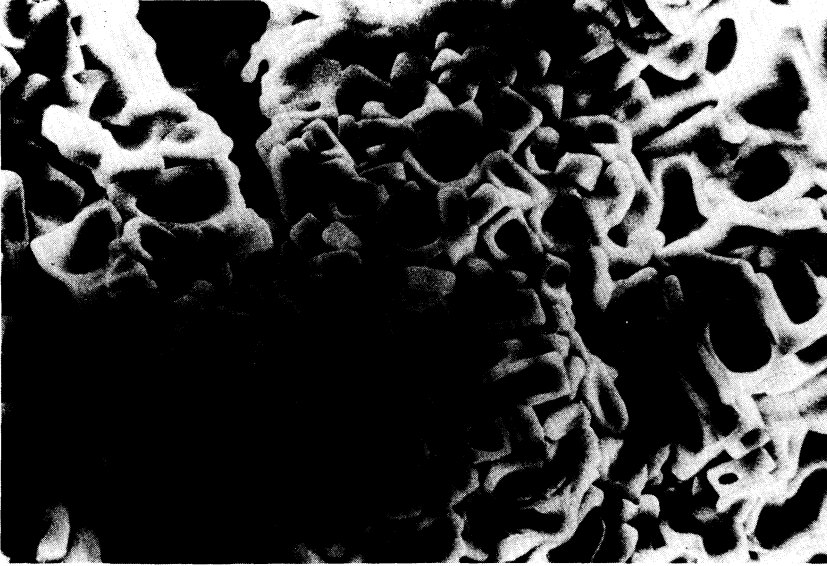


Foto n.º 3.—Cristales de Cloruro sódico ($\times 1000$)

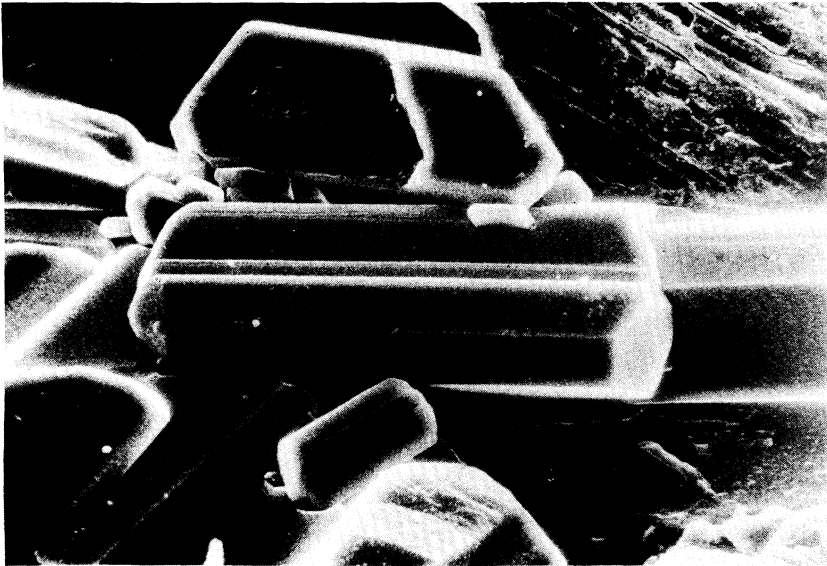


Foto n.º 4.—Cristales de yeso ($\times 750$)