



Estado de alteración del granito en edificios monumentales en Santiago y La Coruña

Stages of granite weathering in historical buildings of Santiago and La Coruña

CASAL PORTO, M.; SILVA HERMO, B. M.; GUITIAN OJEA, F.

Se trata de determinar el estado de alteración en que se encuentran los granitos utilizados en la construcción de algunos edificios monumentales de Santiago y La Coruña, para lo cual se analizan comparativamente con las rocas de las canteras de las que presumiblemente proceden.

De los resultados obtenidos se deduce que el grado de hidrólisis es similar en ambos tipos de muestras y que el mayor deterioro que presentan las piedras de los monumentos se relaciona con efectos físicos o mecánicos y, en especial, con el fenómeno de cristalización de sales en el interior de sus poros.

Palabras clave: Alteración, granitos, edificios monumentales.

The aim of the study was to know the state of alteration of the granites used to build some of the monumental buildings in Santiago and La Coruña, by comparative analyses with rocks from the quarries where, probably, those granites were taken.

The results showed a similar hydrolysis degree in both types of samples, the greater damage of the rocks from the monuments is related to physical or mechanical effects and, mainly, to salt crystalization phenomena into rock pores.

Key words: Alteration, granites, monumental buildings.

CASAL PORTO, M.; SILVA HERMO, B. M.; GUITIAN OJEA, F. (Dpto. Edafología y Q. Agrícola, Fac. Farmacia, Univ. Santiago de Compostela).

INTRODUCCION

Se trata de caracterizar y cuantificar el proceso de alteración que afecta a los granitos de algunos edificios de interés histórico-artístico de Santiago y La Coruña, intentar conocer las causas de dicho proceso y sentar las bases de cara a posibles medidas de conservación o restauración, que es la finalidad última de un trabajo de este tipo.

Es importante determinar si estas causas son las naturales, es decir, las mismas que provocan la alteración del granito en el medio natural o si la particular ubicación de las piedras en una estructura arquitectónica introduce nuevos factores que aceleran la velocidad del proceso o modifican su tendencia.

MATERIAL Y METODOS

Se ha comenzado por investigar la procedencia de los granitos utilizados en la construcción de los edificios estudiados, para poder disponer así de roca fresca que nos sirva de referencia a la hora de evaluar la cuantía de la alteración o realizar la comparación entre el proceso que ocurre en las construcciones y en el medio natural.

Los edificios seleccionados son:

En Santiago, las Iglesias de Sta. María Salomé y San Paio, el Convento de Huérfanas y el muro Sur de la Cabecera de La Catedral, que da a la Plaza de la Quintana; en La Coruña, las Iglesias de S. Jorge, Santiago, Sta. María y el Convento de M. M. Bárbaras.

El procedimiento de muestro, igual en todos ellos, ha consistido en:

— Recogida de placas o plaquetas: se denomina así a las capas de piedra que se van separando paralelamente a la superficie de los sillares e independientemente de la estructura de la roca; constituyen la forma de alteración más llamativa y frecuente en las construcciones graníticas. Estas placas o plaquetas se han muestreado en diversos

muros, seleccionados en función de su orientación y exposición a los factores ambientales y en cada uno de ellos se han tomado a distintas alturas respecto del suelo.

— Recogida de material bajo las placas: se han tomado muestras a distintas profundidades (dos o tres niveles según la dureza de la piedra), desde la parte superficial al interior de la masa del sillar.

Tanto las muestras de cantera como las de los monumentos se han sometido a:

- Análisis petrográfico.
- Estudio mineralógico por Difracción de Rayos X y Análisis Térmico Diferencial.
- Análisis químico total.
- Determinación y cuantificación de sales solubles. Se realiza una extracción acuosa de las muestras y sobre el filtrado se determinan:
 - pH y conductividad.
 - Aniones - Cl^- y NO_3^- , mediante electrodos de ión selectivo y SO_4^{2-} por turbidimetría.
 - Cationes - Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} y K^+ por espectrometría de absorción atómica.

RESULTADOS

En cuanto al origen del material de construcción de los monumentos de Santiago, las vagas referencias bibliográficas que existen al respecto aluden a que proceden de los alrededores de la ciudad, por lo cual se han muestreado y analizado las canteras de Aradas, Vidán y Casalonga. En ellas se han recogido dos tipos de muestras, unas de roca aparentemente fresca y otras de roca que ya en cantera, presentaba una ligera alteración, procurando que el muestreo fuese lo más representativo posible.

Estas tres explotaciones pertenecen al macizo granítico de Vilardoa que agrupa a un conjunto muy heterogéneo de rocas, en cuanto a textura, tamaño de grano o porfíndismo, pero que tienen en común su com-

posición, pudiendo clasificarse como granitos de dos micas (IGME, 1976).

En el caso de La Coruña, los edificios estudiados están contruidos con un leucogranito de grano muy fino, procedente de la zona de San Pedro de Visma, donde se ha muestreado y analizado una cantera en el Monte San Pedro (IGME, 1976).

Estudio petrográfico

El estudio petrográfico en lámina delgada de las muestras de cantera ha permitido constatar que es el granito tipo Aradas el que presenta una mayor similitud con el empleado en la construcción de los monumentos de Santiago, y confirmar que el de los monumentos de La Coruña, procede de la zona de Monte S. Pedro.

El granito tipo Aradas se corresponde con un granito migmatítico de dos micas, tamaño de grano medio-fino, perteneciente a la serie alcalina, dentro del esquema propuesto por CAPDEVILA y Col. (1970) para los granitos hercínicos de Galicia. Los minerales esenciales son: cuarzo, feldespato potásico, glagioclasa, moscovita y biotita, que con frecuencia aparece cloritizada, y como accesorios, circón, apatito y opacos.

El cuarzo, heterométrico, se presenta en agregados o como cristales individuales y sus características más destacables son la extinción ondulante, la formación de mirmequitas con las plagioclasas o la inclusión en el feldespato potásico.

La microclina puede presentar pertitas difusas, la plagioclasa se encuentra ya en la roca aparentemente fresca, ligeramente anubarrada y la biotita aparece en ciertas zonas parcialmente decolorada y debilmente pleocroica y en otras, total o parcialmente, transformada en clorita.

La roca de cantera que consideramos ligeramente alterada exhibe a simple vista un cambio de coloración hacia el gris acaramelado o empardecido. Al microscopio puede observarse:

— Una mayor proporción de plagioclasas en las que el anubarramiento y picoteado es considerable, pudieron en ocasiones ocupar más de la mitad de la superficie total del grano.

— Decoloración en bandas, intensa pérdida del pleocroismo, cloritización y ligero abombamiento de los paquetes de la biotita.

— Una evidente red de microfisuración inter o intragranular coincidente con direcciones de exfoliación o planos de debilidad de los cristales, que afecta fundamentalmente a los minerales más fácilmente alterables.

La roca de la cantera de Monte San Pedro es un granito de grano muy fino, blanquecino o amarillento, en el que la ausencia de biotita y la gran proporción de plagioclasa es lo más característico.

Al microscopio se observan pocas diferencias entre las muestras frescas y ligeramente alteradas. Lo más destacable es la mayor destrucción de los granos minerales en las muestras alteradas, producida por una marcada red de microfisuración inter e intragranular.

El estudio petrográfico de las muestras de los monumentos indica que el estado de alteración químico-mineralógico es comparable al de las muestras ligeramente alteradas de cantera. Sin embargo, la destrucción o deterioro físico-mecánico de los granos, evidenciado por una marcada red de microfisuración inter, intra o transgranular de recorrido variable es mucho mayor, lo que justifica el aspecto mucho más deteriorado del granito de los monumentos.

Análisis mineralógico

De los resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X se deduce lo siguiente:

— En las rocas de cantera frescas, se identifican unicamente los componentes

principales del granito perfectamente cristalizados.

— En algunas muestras ligeramente alteradas de cantera aparecen, además de los minerales mencionados, pequeños efectos de difracción a 14.01, 7.1 y, a veces, 3.5 Å que hacen pensar en la existencia de trazas de clorita y/o caolinita. En ciertos casos parece bastante clara la presencia de caolinita, pero en otros debido a la debilidad de los efectos, el calentamiento de las muestras no resulta concluyente y queda dudosa su existencia.

— Para las muestras de los monumentos, los difractogramas son básicamente similares a los de las rocas ligeramente alteradas de cantera, pero hay una diferencia importante con respecto a ellas y es la aparición de efectos a 7.5, 3.05 y 4.27 Å, atribuibles al yeso, mineral ajeno a la composición del granito (Fig. 1).

Ante la escasez o ausencia de minerales de neoformación, en algunas muestras de monumentos bastante deterioradas se realizó un método de concentración de arcilla (DELGADO RODRIGUES, 1978) consistente en una molienda suave (de modo que sólo los granos alterados se deshagan) y una dispersión en medio básico. En los difractogramas obtenidos, a partir de agregados orientados de estas muestras, de nuevo el único mineral arcilloso que se detecta es caolinita, a nivel de trazas.

Se ha realizado análisis térmico diferencial de algunas muestras representativas y no han aparecido efectos dignos de mención.

Tratando de confirmar estos resultados, se ha realizado un examen al microscopio electrónico de barrido y tampoco se han observado arcillas cristalinas. Sin embargo han podido visualizarse abundantes recubrimientos no cristalinos (geles amorfos), que analizados con la microsonda han resultado estar compuestos mayoritariamente por sílice y alúmina, y numerosos cristales de yeso perfectamente cristalizados, que aparecen

rellenando fracturas o huecos y depositados sobre los minerales (Fotos 1 y 2).

Análisis químico total

Los resultados del análisis químico total de las rocas de cantera, ponen de manifiesto que las diferencias entre las muestras que consideremos frescas y las ligeramente alteradas son mínimas e indican, en términos generales, una ligera pérdida de bases y un débil incremento de los elementos residuales, Fe y Al, siguiendo las pautas normales en un proceso de meteorización.

Las piedras de los monumentos presentan un estado de deterioro aparente mayor que las rocas alteradas de cantera y por lo tanto cabría esperar una clara pérdida de bases y un aumento de Fe y Al con respecto a las rocas frescas tomadas de referencia.

Sin embargo, los resultados obtenidos indican que los contenidos de elementos experimentan en la mayoría de los casos ligeras oscilaciones sin una tendencia clara y cuando ésta existe es en el sentido de un incremento de bases debido sobre todo a un aumento, a veces muy significativo, de los niveles de Ca^{++} (Tabla 1). Este hecho, que supone una distorsión de la tendencia normal en un proceso de alteración, solo puede ser atribuible a un aporte externo.

La representación gráfica de los resultados según los modelos propuestos por CHESWORTH (1973) y KORMBERG y NESBITT (1981) ha sido poco útil pues todas las muestras aparecen concentradas en la zona correspondiente a los granitos frescos. La forma de representación más ilustrativa resultó ser la de los índices de PARKER (1970) que al tener en cuenta únicamente los elementos solubles, permite visualizar las pequeñas variaciones que sufren los contenidos de estos elementos (Fig. 2).

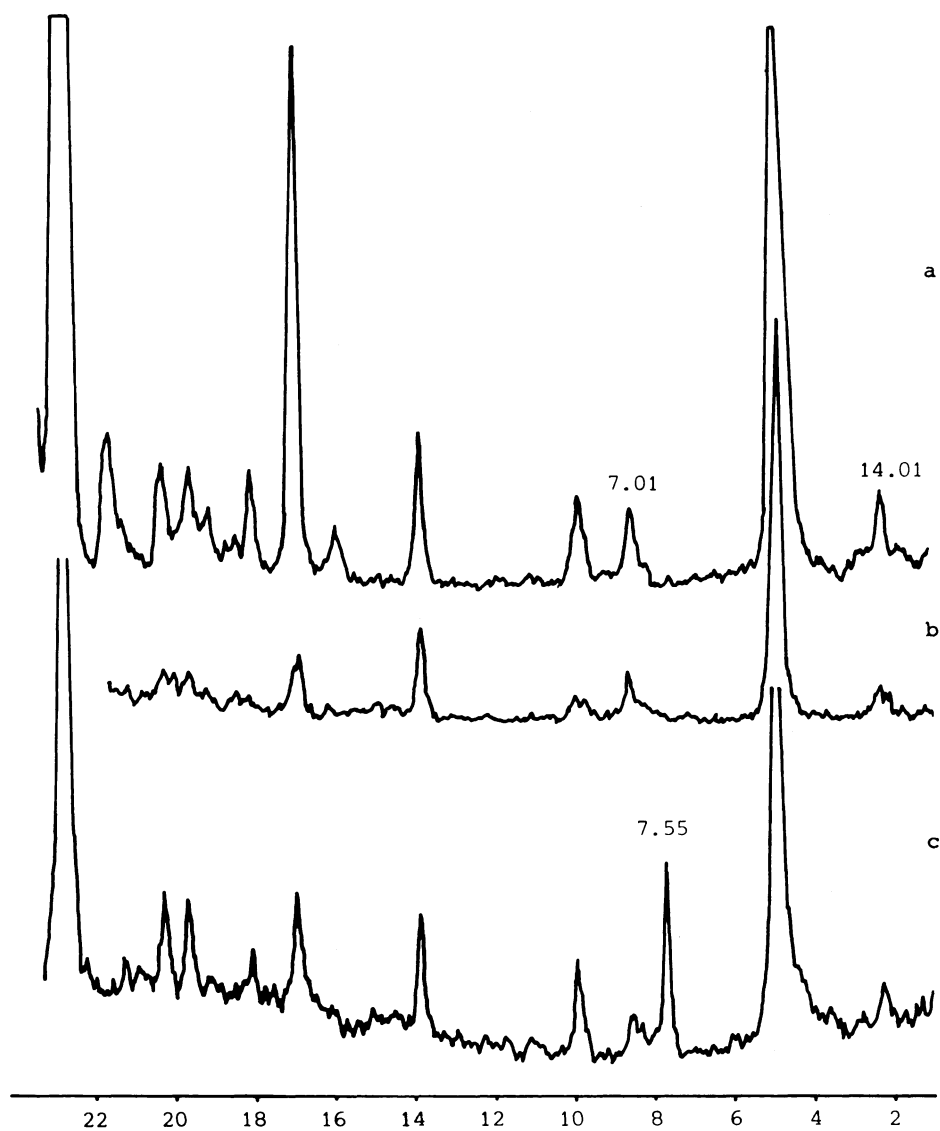


Fig. 1. Resultados del análisis por Difracción de Rayos X.

- a) muestra de la cantera de Aradas, ligeramente alterada P.C
- b) idem. después de calcinar a 550°
- c) muestra de Sta. M.^a Salomé.

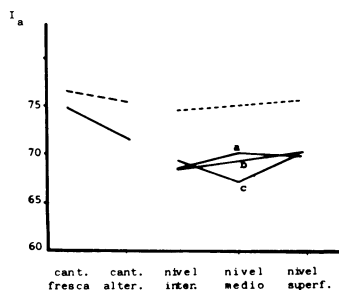


Fig. 2.- Representación de los índices de Parker

$$I_a : \left(\frac{Ca^{++}}{0,7} + \frac{Mg^{++}}{0,9} + \frac{K^+}{0,25} + \frac{Na^+}{0,35} \right) \cdot 100$$

Nota : en línea de trazos : cantera de Monte Sn. Pedro y Convento de M.M. Bárbaras de La Coruña

en línea continua : cantera de Arada y Monumentos de Santiago .
a) I. Salomé
b) I. Riberfanas
c) Catedral Muro Sur

Análisis de sales solubles

Los resultados de este análisis sobre muestras de cantera y monumentos (Tablas II y III respectivamente) sugieren los comentarios siguientes:

a) En las muestras de cantera, los porcentajes de sales solubles son muy bajos y no se observan variaciones significativas entre la roca fresca y la alterada.

b) En las muestras de los monumentos el análisis de los constituyentes nos permite constatar algunas diferencias:

Cuando lo que se analizan son muestras superficiales (placas o plaquetas) recogidas a distintas alturas en el muro, los elementos o iones mayoritarios son SO_4^{--} , Ca^{++} y NO_3^- seguidos por Cl^- y Na^+ (Tablas II a, II b, II c).

En general podemos decir que las concentraciones de los iones aumentan a medida que se asciende en el muro y que los máximos valores corresponden a los sillares que presentan un mayor deterioro (placas abundantes, acentuada arenización) que suelen ser los situados entre 1 y 1,5 m de altura.

Los iones mayoritarios (SO_4^{--} y Ca^{++}) están muy bien correlacionados, (Fig. 3) y, en función de las proporciones relativas con

que aparecen, se deduce que se encuentran, fundamentalmente, formando yeso.

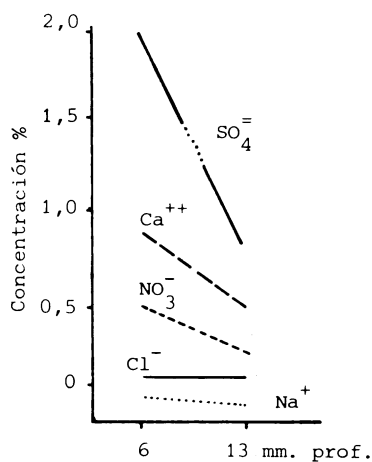
Cuando las muestras se toman en profundidad, desde la superficie al interior de la masa del sillar (Tablas IV a, b, c) las variaciones se observan fundamentalmente en dos componentes, el SO_4^{--} y el Ca^{++} , que tienden a acumularse en el nivel medio, es decir en los primeros milímetros muestreados bajo las placas o plaquetas, reduciéndose sus concentraciones hacia el interior (Fig. 4). El resto de los iones no presenta variaciones importantes, en relación a la profundidad.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

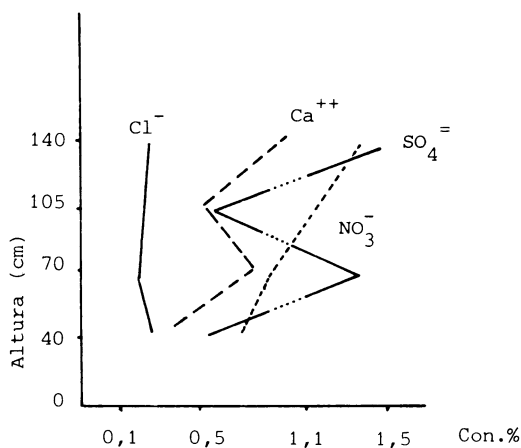
De los resultados obtenidos se deduce que al grado de hidrólisis que presentan los granitos de los monumentos es similar al de las muestras de cantera ligeramente alteradas y que muy probablemente éste era el estado de la roca cuando fue utilizada como material de construcción.

Es evidente, sin embargo, el mayor deterioro de las piedras de los monumentos en comparación con las canteras; este hecho debe estar relacionado, por un parte, con efectos de tipo físico-mecánico producido en gran medida, durante las operaciones a que es sometido el material para su puesta en obra (extracción, corte, acabado), pero quizás también promovidos por su situación particular en una estructura arquitectónica, donde está sometido a fuerzas de tensión y compresión importantes e, incluso, a variaciones de temperatura mucho más acusadas que en un emplazamiento natural (WINKLER, 1975; BALENCI *et al.* 1981).

Pero parece indudable que el papel fundamental en el deterioro de la piedra de los edificios lo ejercen las sales solubles, punto en el que coinciden los diversos autores (KIESLINGER, 1967; ARNOLD, 1983). Estos componentes extraños al granito y de procedencia diversa (polución atmosférica, morteros de unión, aguas del subsuelo, etc.), son movilizadas en solución acuosa a



Catedral



I. Sta. Mª Salomé

Fig. 3 y 4. Resultados de la extracción de sales solubles muestreros en profundidad (Fig. 4) y altura, (Fig. 3), respectivamente.

través de la masa de los sillares. Al evaporarse el agua, y si las condiciones de temperatura y humedad ambiental son las adecuadas, las sales precipitan, bien en superficie (eflorescencias) o en el interior de la piedra provocando su fisuración o incluso su arenización.

Las sales de solubilidad media, como el yeso, tienden a precipitar antes de llegar al exterior produciéndose su acumulación en los primeros milímetros superficiales. En consecuencia esta capa superficial sufre una modificación de sus propiedades físico-mecánicas y tiende a desprenderse.

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD, A. (1981). Nature and reactions of saline in walls. Reprints of the contributions to the international symposium. «The conservation of stone II». 13-25 Bologna.
- BALENCI, P., PIETRAMELLARA, C., TAMPONE, G., VANNUCCI, S. (1981). Investigation on the degradation of stone: Historical research on the techniques of working. Reprints of the contributions to the Int. Symp. the conservation of stone 165-195. Bologne.
- CAPDEVILLA, R., FLOOR, P. (1970). Les differents types de granites herciniens et leur distribution dans le nordouest de l'Espagne. *Bol. Geol. Min.* 81-82 p. 215-225.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1978). About the quantitative determination of rock weatherability. A case history LNEC 499. Lisboa.
- IGME (1976). Memoria de la hoja n.º 94 (Santiago) del mapa Geológico de España 1:50.000.
- IGME (1976). Memoria de la hoja n.º 21 (La Coruña) del mapa Geológico de España 1:50.000.
- KIESLINGER, A. (1967). Les principaux facteurs d'alteration des pierres à bâtir. Colloques sur l'alteration des pierres. Vol. I. Bruxelles.
- KROMBERG, B. I., NESBITT, M. W. (1981). Quantification of weathering soil geochemistry and fertility. *J. Soil. Sci.* 32 (3) 453-459.
- PARKER, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Mag.* V. 107. 501-504.
- WINKLER, E. M. (1975). Stone: properties, durability in man's environment. Springer-Verlag (New York.).

TABLA I. Resultados del análisis químico total

	Muestra	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	OCa	OMg	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O
A	Fresco	2,12	16,45	70,91	0,79	0,65	4,98	3,04	1,03
	Alter.	1,61	16,57	72,10	0,41	0,47	4,98	2,83	1,04
B	Nivel Superf.	2,68	15,33	71,68	1,02	0,47	4,83	2,83	1,08
	Nivel Medio	2,93	14,85	70,05	1,77	0,52	4,59	2,65	2,60
	Nivel Interno	3,03	12,75	75,40	0,93	0,49	4,02	2,43	0,91
C	Nivel Superf.	1,40	15,08	69,77	2,22	0,30	5,15	2,58	3,47
	Nivel Medio	1,21	14,38	73,78	0,98	0,26	5,11	2,60	1,65

Nota : A - Cantera de Aradas

B - Iglesia de Sta. M^a Salomé (Santiago)

C - Muro S. de la cabecera de la Catedral (Santiago)

TABLA II. Análisis cuantitativo de sales solubles (%). Muestras de cantera

Muestra	pH	$\mu S/cm$ Cond.	$SO_4^{=}$	Cl^{-}	NO_3^{-}	Na^{+}	K^{+}	Ca^{++}	Mg^{++}
ARADAS Fresco	6,10	24	0,017	tr.	tr.	0,006	tr.	0,003	0,0005
ARADAS Lig.Alt.	6,51	22	0,018	tr.	tr.	0,005	tr.	0,003	0,0005
M.S.PEDRO Fresco	6,43	22	0,018	tr.	tr.	0,005	tr.	0,004	0,0006
M.S. PEDRO Lig.Alt.	6,31	20	0,014	tr.	tr.	0,005	tr.	0,003	0,0005

TABLA III. Análisis de sales solubles (%). Muestreo en relación con la altura.

- A) Muro S. Catedral de Santiago.
 B) Iglesia Sta. M.^a Salomé, Santiago.
 C) Colegiata Sta. M.^a, La Coruña.

Monumento	Altura (cm)	pH	Cond. $\mu S/cm$	$SO_4^{=}$	Cl^{-}	NO_3^{-}	Na^{+}	K^{+}	Ca^{++}	Mg^{++}
A	29	7.53	240	0,106	0,076	0,312	0,051	0,176	0,073	0,000
	38	7.12	680	0,666	0,191	0,750	0,180	0,100	0,032	0,002
	40	6,74	850	0,573	0,264	0,750	0,126	0,080	0,373	0,004
	70	6,90	1400	1,386	0,210	0,902	0,090	0,191	0,816	0,004
	105	6,98	1000	0,586	0,230	1,135	0,101	0,208	0,550	0,002
	140	7,15	1600	1,520	0,252	1,365	0,156	1,41	1,016	0,003
B	60	6,30	400	0,586	0,051	2,066	0,035	0,034	0,140	0,001
	80	5,76	740	0,906	0,121	1,365	0,073	0,030	0,340	0,002
	100	6,80	1900	2,206	0,333	1,135	0,533	0,100	1,146	0,009
	140	7,13	1500	1,513	0,400	1,567	0,333	0,213	0,893	0,013
C	50	6,51	178	0,260	0,012	0,016	0,005	0,005	0,083	0,004
	65	6,80	915	1,228	0,054	0,130	0,026	0,015	0,583	0,013
	160	6,20	832	0,944	0,105	0,130	0,050	0,030	0,186	0,012

TABLA IV. Análisis cuantitativo de sales solubles (%). Muestreo en profundidad.

A) Iglesia de Sta. M.^a Salomé, Santiago.

B) Iglesia de Huérfanas, Santiago.

C) Iglesia de S. Jorge, La Coruña.

Monumento	Muest.	pH	Cond. us/cm	SO ₄ ⁼	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
A	Nivel Superf.	5,94	800	1,236	0,003	0,002	0,005	0,008	0,566	0,003
	Nivel Medio	5,68	1800	3,051	0,006	0,010	0,008	0,008	1,000	0,002
	Nivel Interno	6,00	330	0,353	0,001	0,010	0,006	0,008	0,180	0,003
B	Nivel Superf.	6,22	250	0,191	0,105	0,130	0,068	0,010	0,106	0,004
	Nivel Medio	6,32	450	0,513	0,115	0,184	0,071	0,013	0,266	0,006
	Nivel Interno	6,32	200	0,084	0,087	0,103	0,055	0,010	0,073	0,004
C	Nivel Superf.	6,50	202	0,068	0,076	0,116	0,040	0,008	0,200	0,005
	Nivel Medio	6,66	499	0,531	0,078	0,116	0,040	0,013	0,253	0,007



Foto 1. Recubrimientos no cristalinos (x 750).



Foto n.º 2. Cristales de yeso (x 2500).