

Degradación de rocas graníticas empleadas como material de construcción en edificios históricos de A Coruña (NW España)

Degradation of granitic rocks used as construction material in historic building of A Coruña (NW Spain)

SANJURJO, J.¹ and ALVES, C.A.S.²

Abstract

Granitic rocks are exposed to weathering processes determined by intrinsic and extrinsic factors. That weathering process increases the granite porosity and is the main forerunner of erosion. The research of weathering and decay of rocks used as construction material in buildings belonging to the Monumental Heritage also implies the consideration of factors related to each building and their environment, as well. In this work, decay of two types of granitic rocks (San Pedro leucogranite and Bregua granodiorite) used in the building of historic monuments from A Coruña (NW Spain) is studied. The field study of decay of ashlars of the buildings and the quarry surfaces, and the later research of the surface mechanical strength and porosity of both rock types suggest that the high decay of ashlars in monuments is related to the use of rock types weathered in the natural massifs. Also, there exist different factors related to the building of those monuments that increase the decay process.

Key words: granite, monuments, decay, weathering, erosion.

(1) Instituto Universitario de Xeoloxía "Isidro Parga Pondal" Universidade da Coruña. Campus de Elviña. 15071 A Coruña, España (jsanjurjo@udc.es)

(2) Departamento de Ciencias da Terra. Universidade do Minho. Campus de Gualtar. Braga, Portugal.

1. INTRODUCCIÓN

Las rocas graníticas se ven sometidas a procesos de meteorización determinados por factores intrínsecos propios de la roca y extrínsecos propios del medio que las rodea. Esa meteorización es el precursor esencial de la erosión. La porosidad y permeabilidad en granitos son muy bajas pero aumentan según la fisuración y fracturación de la roca que constituye la penetrabilidad o permeabilidad secundaria, que añade la capacidad de transmitir fluidos, a través de aquella. La penetrabilidad aumenta debido al número, tipo y conexión de estas fisuras por unidad de volumen.

1.1. Factores intrínsecos de alteración de rocas graníticas

Se refieren a sus características mineralógicas, textura, discontinuidades, y estructuras minerales que condicionan la meteorización (TWIDALE and VIDAL ROMANÍ, 2005). La fracturación es la vía de penetración del agua y de meteorización. El patrón regular de fracturas y diaclasas es la fracturación más importante que tiende a formar redes continuas. La porosidad controla igualmente las propiedades mecánicas de la roca (resistencia a compresión) pero incluso rocas con similar porosidad difieren totalmente en la distribución del tamaño de poros.

El volumen total de poros se incrementa con el grado de meteorización (YATSU, 1988). Algunos autores diferencian entre poros y fracturas. De acuerdo con ello las fracturas se localizan a lo largo de la división entre granos de minerales y los poros son cavidades equidimensionales (ALVES, 1997). Los procesos de absorción y evaporación de agua se ven directamente afectados por estas características, y el estudio de la porosidad puede así cuantificar los poros, su forma y distribución, así determinar si estos poros son el resultado de la propia formación de la roca o de procesos diagenéticos posteriores.

1.2. Factores relacionados con el granito empleado como material de construcción

El estudio de la meteorización de rocas empleadas como material de construcción se considera un caso particular de meteorización debido a la influencia de factores antropogénicos y a los cortos períodos de tiempo considerados (DELGADO RODRIGUES, 1977). Su estudio requiere considerar las características intrínsecas de las rocas, las condiciones ambientales derivadas del ambiente antrópico, los períodos de tiempo considerados, y la interacción con materiales aglomerantes.

La extracción de rocas en una cantera interrumpe el proceso natural de evolución de la alteración de estas, que comienza con su propia génesis (DELGADO RODRIGUES, 1977). El empleo de roca de mala calidad o defectuosa (con abundante fisuración), consecuencia de su historia petrogenética/tectónica, facilitan su degradación (IÑIGO et al., 1994). Es muy frecuente el empleo de rocas en procesos de meteorización incluso avanzados, debido a su mayor facilidad de labrado (MATIAS, 2001). Otras circunstancias como el empleo de rocas con heterogeneidades estructurales e incluso mineralógicas favorecen la aparición de erosiones diferenciales en materiales o capas más blandas provocando una prematura degradación (MATIAS, 2001).

Es, también, importante conocer la historia de cada construcción: cambios de arquitectos, proyectos, reconstrucciones, etc. debidos a malas cimentaciones, fatiga de materiales, etc., originan problemas en las cimentaciones al ceder éstas. En algunos casos el reparto de cargas entre sillares es irregular, produciéndose concentración de cargas en unos puntos, y defeción en otros (creándose fisuras).

Un factor importante para algunos tipos de degradación es el empleo de materiales pétreos aglomerantes (ÁLVAREZ DE BUERGO and FORT-GONZÁLEZ, 1994) que comprenden los materiales artificiales (hormigones, morteros, enfoscados, revocos y enlucidos), con

características físicas y químicas muy diferentes a las de las rocas graníticas.

1.3. Factores extrínsecos a la alteración del granito.

El clima es el principal factor externo que determina el tipo y tasa de meteorización. Su influencia se relaciona con la acción que producen la temperatura y la humedad. El tiempo durante el que actúa la meteorización es también importante pues permite el desarrollo de los procesos de alteración lentos.

La meteorización física debida a los cambios de temperatura, que originan ciclos de calentamiento-enfriamiento con expansión-contracción y rotura de la roca (VIDAL ROMANÍ and TWIDALE, 1998), se suele considerar importante en edificios debido a la orientación de las fachadas. En este caso los ciclos térmicos afectan también a los morteros separándolos de los sillares e incrementando la fisuración, porosidad y permeabilidad de la construcción (ARNÁIZ and MARTÍN, 1977).

La hidratación, o penetración de agua en la roca, y la alternancia de humectación y desecación también es un factor muy importante en la alteración del granito, produciendo desagregación granular o descamación superficial (VIDAL ROMANÍ and YEPES, 2004). En los edificios la humedad puede tener varias procedencias (GARCÍA MORALES, 1993; CHAROLA, 2000): humedad higroscópica atmosférica, humedad procedente de la lluvia, y humedad procedente del suelo, absorbida por capilaridad.

El efecto de la humedad en rocas de monumentos se asocia, generalmente, a meteorización por sales, considerándose éstas como el principal mecanismo de alteración de materiales pétreos en monumentos (AMOROSO and FASSINA, 1983). Las dos sales más comúnmente encontradas en los monumentos son la halita y el yeso (AMOROSO and FASSINA, 1983). Las sales suelen provenir de varias fuentes según la

mayor parte de investigadores (CABRERA GARRIDO, 1979; CHAROLA, 2000):

- Cementos y morteros, por contener de yeso o por disolución de su matriz soluble y/o la reacción entre Ca del mortero y sulfatos contenidos en la atmósfera,.
- Ascenso capilar de aguas subterráneas salinas a través de los muros.
- Deposición de productos atmosféricos sobre todo en atmósferas contaminadas o de influencia marina, principalmente sulfatos y nitratos, y en áreas costeras cloruros.
- Formadas a partir de fuentes biogénicas (microorganismos, etc.), guano u orines (nitratos y fosfatos sobre todo).
- Diversos productos de limpieza, conservación y consolidación (fungicidas, anticongelantes, etc.), que pueden originar compuestos muy diversos.

Por otra parte, existen procesos químicos como la hidratación, hidrólisis, oxidación, carbonatación y sulfatación de minerales, que según algunos autores incrementan la meteorización química de los sillares en el monumento (CABRERA GARRIDO, 1979) aunque su influencia e importancia en su degradación no ha sido demostrada en rocas graníticas.

1.4. Factores ambientales. Contaminación y contaminantes.

El aumento de la contaminación del aire en áreas urbanas e industriales ha cambiado la proporción de compuestos en el aire (WARK and WARNER, 1990). Muchos estudios de meteorización de rocas en monumentos consideran que los contaminantes atmosféricos (sulfatos, nitratos y carbonatos) e impurezas sólidas (cenizas, polvo, etc.) se disuelven en agua atmosférica como iones, actuando sobre las rocas en forma de disoluciones ácidas (SCHIAVON et al., 1994; MCKINLEY et al., 2001).

La cantidad y calidad de contaminantes en una zona no depende sólo del tipo de polu-

cionante sino también de las características topográficas y de las condiciones meteorológicas que determinan su dispersión y transporte a nivel local y regional (LAZZARINI et al., 1986). Esta deposición de partículas sobre la roca explica la observación de fenómenos de ensuciamiento de fachadas, y muchos trabajos la han relacionado con la meteorización química de rocas, sobre todo en rocas calizas. Sin embargo, esta relación es dudosa en rocas graníticas a tenor de los resultados presentados en diversos trabajos. Aunque una concentración elevada de CO₂ en agua (la concentración de CO₂ en ambientes urbanos supera en unas 10 veces la concentración en ambientes naturales) incrementa la tasa de disolución de Ca, Mg, Na y K de feldespatos e incluso de Si a partir de cuarzo (KELLER et al., 1963) en ambientes aéreos y subaéreos no se observa esta meteorización. Algunos estudios mencionan la formación de caolín (SCHIAVON, 2000) aunque en proporciones muy bajas como para que este proceso sea considerado como causante del deterioro de fábricas de granito.

Según muchos autores, en grandes ciudades y zonas industriales, el problema dominante es la sulfatación, principalmente por SO₃ resultado de la oxidación de SO₂ (AMOROSO, 1995). Pero la sulfatación afecta en realidad a rocas carbonatadas y morteros, por descomposición del carbonato cálcico y formación de sulfato cálcico (O'BRIEN et al., 1995; SMITH et al, 2001;). También, generalmente se acepta que los nitratos, principalmente ácido nítrico, contribuyen a la corrosión de minerales, aunque su efecto no está claro si bien es un acidificante del agua de lluvia y cataliza la oxidación del S (SCHNEIDER and GRANT, 1982).

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS ESTUDIADAS

Los dos tipos de granito estudiados en este trabajo corresponden a los empleados en la construcción de tres monumentos de la ciudad

de A Coruña (NW España). El leucogranito del monte de San Pedro procede de una cantera situada en la misma localidad (aplita) y el granito de la localidad de Bregua (granodiorita) de una cantera localizada en el municipio vecino de Culleredo. Los monumentos estudiados son la Iglesia de las Capuchinas, construida únicamente con leucogranito de San Pedro, la Colegiata de Santa María del Campo y la Iglesia de Santiago, construidas estas últimas con ambos tipos de granito.

El granito de San Pedro es un leucogranito de grano fino, textura granuda y aspecto blanquecino, sin biotita. En ocasiones está deformado aplastándose ligeramente los feldespatos y observándose cierta orientación. En la cantera (situada en la localidad de A Coruña y cuya actividad se detuvo en la segunda mitad del siglo XX) se diferencian dos tipos de leucogranito en cuanto a la alteración:

- CSP1: en la zona más nororiental el granito tiene una tonalidad más clara (casi blanco) y aparece menos alterado y fracturado, y más duro.
- CSP2: en la parte sudeste el granito tiene un tono más amarillo, más fracturado y se deshace con cierta facilidad (arenizado en algunos casos).

El granito de Bregua es una granodiorita de grano grueso, con megacrístales de feldespato potásico y moscovita (que predomina sobre la biotita). En corte reciente tiene un color gris lechoso cuando no está alterada y rojo cuando lo está. En toda la superficie de la cantera el granito aparece oxidado, con una tonalidad rojiza. La cantera de Bregua (Culleredo) fue explotada hasta mediados del siglo XX.

3. ESTUDIO DE LA METEORIZACIÓN Y DETERIORO

Para la evaluación del estado de la meteorización de la roca en las canteras de procedencia y en los edificios estudiados se realizó en primer lugar un trabajo de campo. Después, se tomaron datos de resistencia mecánica superfi-

cial de las superficies de cantera y de las fachadas de los edificios estudiados (excepto en el caso de la Iglesia de las Capuchinas) y se tomaron probetas de roca de las canteras y de varios sillares de la Iglesia de las Capuchinas para el estudio de la porosidad.

3.1. Observaciones de campo

En las rocas empleadas como material de construcción son frecuentes una serie de alteraciones físicas características: formación de placas y escamas, desagregación granular, formación de fisuras o roturas y alveolizaciones en algunos casos. Sin embargo, la observación y recopilación de datos acerca de este tipo de alteraciones es más complejo que su simple observación en los sillares. En primer lugar, los edificios suelen presentar diferentes tipos litológicos correspondientes a distintas fases constructivas, reformas o al empleo de rocas de grano fino para el tallado elementos decorativos, lo que debe considerarse a la hora de evaluar la distribución, frecuencia e intensidad de alteraciones, que dependerán del tipo de roca.

Establecer una valoración cualitativa de la degradación entraña varias dificultades: interacción de varios tipos de alteración, diferente extensión de cada forma de deterioro, y valoración de la intensidad de la degradación. La interacción entre varios tipos de alteración es frecuente, lo que dificulta su evaluación. De esta forma, la formación de placas en sillares de leucogranito de San Pedro se superpone frecuentemente con la formación de escamas, y la formación de placas en granodiorita de Bregua está siempre ligada a desagregación granular. La extensión de superficie de un sillar afectada por un tipo de deterioro es también muy variable y puede llegar a comprender toda la superficie del sillar.

Los procesos de degradación del Leucogranito de San Pedro en el entorno de la cantera y en la misma, son similares a los observados en sillares de monumentos. Uno

de los principales es la formación de escamas, ligada a la estructura (orientación de minerales) de la roca. En algunos casos se observa también la formación de placas, relacionada con el mismo factor estructural. En casos excepcionales se observa la formación de alveolos asociados a la estructura de la roca. En el caso de la granodiorita de Bregua, el frente de cantera actual, permite observar que se trata de una roca bastante meteorizada con abundante fracturación y que presenta, en la mayor parte de los casos, un color rojo debido a oxidación.

El estado de alteración de los sillares de los tres edificios históricos estudiados permite hacer una diferenciación entre la Iglesia de las Capuchinas, que es sin duda la peor conservada (a pesar de no ser la más antigua) y la Colegiata de Santa María del Campo y la Iglesia de Santiago.

El estado de conservación de los sillares de la fachada principal de la Iglesia de las Capuchinas (con orientación sur), construida íntegramente con sillería recta de leucogranito de San Pedro, es muy malo presentando placas muy desarrolladas, por toda la fachada. Estas placas afectan a la superficie de la mayor parte de sillares, son gruesas y duras. Pero, además, prácticamente toda la sillería está recubierta de pátinas y costras de yeso, gruesas y muy adheridas a la roca, y que se desprenden con las placas. En su interior se observa con frecuencia cristalización de sales (yeso). Las costras y revestimientos se deben a la aplicación de un enlucido de yeso (SANJURJO SÁNCHEZ et al., 2004), cuya disolución y lavado han propiciado la penetración de sales en la zona subsuperficial de los sillares. En algunos sillares aislados se observa una completa desagregación granular o arenización. En unos pocos sillares se observa alveolización que se produce sólo en ciertas caras de los bloques, debido a heterogeneidades estructurales por la orientación de minerales (fig. 1). También son frecuentes las pérdidas de masa por erosión en molduras y detalles arquitectónicos (fig. 2).



Figura 1. Alveolos en sillares de leucogranito de San Pedro en la Iglesia de las Capuchinas.



Figura 2. Erosiones y desplazamientos en sillares de leucogranito de San Pedro con detalles arquitectónicos de la Iglesia de las Capuchinas.

En el caso de la Colegiata de Santa María se pueden diferenciar dos situaciones diferentes. En el ala oeste del edificio, de construcción más moderna (año 1899) únicamente con leucogranito de San Pedro, la roca se ve afectada por descamación (fig. 3) sólo en algunos

sillares con formación de escamas duras. En detalles arquitectónicos se observan descamaciones y placas, pérdidas de masa e incluso desagregación granular, lo que no puede asociarse al uso de roca ya meteorizada, por su facilidad de trabajado y tallado (fig. 4).

Figura 3. Escamas en sillares de leucogranito de San Pedro en la zona mas moderna (1899) de la Colegiata de Santa María del Campo.



Figura 4. Erosiones y desplazamientos en leucogranito de San Pedro, en uno de los pórticos de la Colegiata de Santa María del Campo.

El resto del edificio está construido con ambos tipos de roca, al igual que ocurre en la Iglesia de Santiago, y ambas construcciones tienen similar antigüedad: entre 700 y 200 años, según diferentes tramos de las fachadas. En ambos casos los procesos de alteración son similares para ambos tipos de roca en cuanto a intensidad.

En el leucogranito es relativamente frecuente la formación de placas en todas las fachadas. Los sillares presentan una gran proporción de placas en los niveles inferiores de la fachada (entre el suelo y 3 m de altura) y muchas de estas placas aparecen asociadas a

las juntas de los sillares (fig. 5). Sólo en algunos casos se observan eflorescencias cerca de las juntas de bloques y cristalización de sales (yeso) en la superficie interna de las placas (fig. 6). Además, las placas con sales son gruesas y duras. La formación de escamas es más uniforme, siendo mayor en la zona inferior de las fachadas (0-4 m de altura). Las escamas son finas, frágiles y se extienden, normalmente, unos pocos centímetros, apareciendo con frecuencia sobre la superficie de placas. Además, se observan casos puntuales de leves pérdidas de masa en molduras y sobre todo en los relieves de los pórticos.



Figura 5. Formación de una placa no relacionada con cristalización de sales en un sillar de leucogranito de San Pedro de la Colegiata de Santa María del Campo.



Figura 6. Formación de placas por cristalización de sales en un sillar de leucogranito de San Pedro en la Colegiata de Santa María del Campo.

Los sillares de Granodiorita de Bregua son menos frecuentes en ambos edificios, sobre todo a partir de una altura de unos 4 m. No presentan apenas escamas y éstas están asociadas a juntas de los sillares. La principal alteración erosiva en este tipo de roca es la formación de placas (fig. 7). Muchas de estas

placas presentan revestimientos, costras y pátinas en superficie que les dan consistencia, evitando su desagregación. También se desagregan fácilmente cuando son finas, pero, no cuando son gruesas (fig. 8). Son muy pocos los bloques de granodiorita que se encuentran en buen estado.



Figura 7. Estado de una de las fachadas de la Iglesia de Santiago con diversas placas en sillares de leucogranito de San Pedro y de granodiorita de Bregua.



Figura 8. Detalle de una placa gruesa en un sillar de granodiorita de Bregua en la Colegiata de Santa María del Campo.

4.2. Resistencia mecánica superficial.

La medición de la dureza superficial se realizó por medio del Martillo de Schmidt que proporciona una medida rápida aunque poco uniforme de la dureza de la superficie (el R-valor, Rebound value o valor de rebote). Esta evaluación de la dureza muestra una buena correlación con la resistencia a la compresión (GOUDIE et al., 1990). Se tomó un número variable de medidas en un área representativa por cada superficie y se calculó el R-valor medio y la desviación estándar. Las medidas en las canteras de leucogranito de San Pedro y de granodiorita de Bregua han proporcionado los siguientes resultados:

Superficie	Valor medio de Rebote	Desviación estándar
CSP-1	55,91	6,40
CSP-2	40,04	7,04
BRE-1	31,94	8,25

Tabla 1. Valor medio de rebote y desviación típica de los ensayos realizados con martillo de Schmidt en las superficies de cantera de Leucogranito de San Pedro en la variedad no meteorizada (CSP-1) y la meteorizada (CSP-2), y de la superficie de cantera de Granodiorita de Bregua (BRE-1).

Las medidas realizadas en los frentes de cantera permite establecer ligeras diferencias entre las dos variedades de Leucogranito. La más meteorizada presenta una resistencia mecánica superficial similar al frente de cantera de Granodiorita de Bregua, también meteorizado (fig. 9). El comportamiento de los datos de resistencia mecánica superficial obtenidos es similar para todas las superficies medidas independientemente de la edad o de la orientación de la fachada en los monumentos.

En los edificios, para el leucogranito de San Pedro, los valores de rebote medios (R-value) son ligeramente superiores en la zona más moderna de la Colegiata de Santa María, si bien el error en la medida es lo suficientemente importante como para poder afirmar que se trata de valores diferenciados. El valor medio en estas fachadas es, además, ligeramente inferior al valor obtenido en el frente de cantera correspondiente a la variedad no meteorizada. El valor medio en las fachadas más antiguas de los edificios son similares a los de la variedad meteorizada de la cantera de San Pedro y al del frente de la cantera de Bregua.

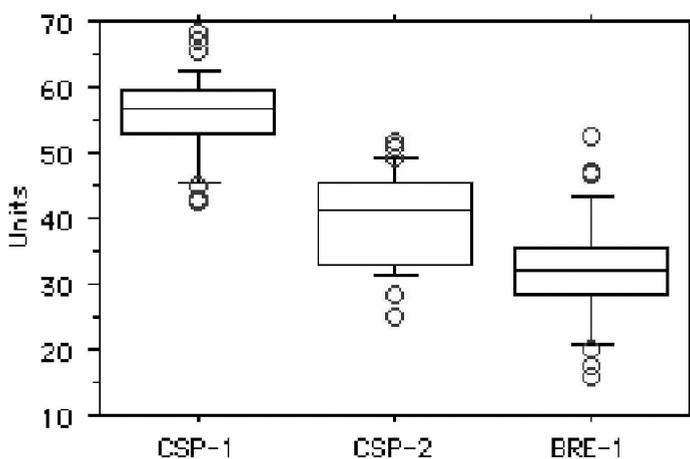


Figura 9. Diagrama de caja y bigote de los datos obtenidos por medio del Martillo de Schmidt (R-Valor) en las superficies de cantera de San Pedro y Bregua. CSP-1: superficie de la variedad no meteorizada de leucogranito de San Pedro; CSP-2: superficie de la variedad meteorizada; BRE-1; superficie de granodiorita de Bregua.

Otros valores como la altura a la que se realizan las mediciones, la orientación de las fachadas, o la antigüedad de éstas, no afectan al valor medio observado.

4.3. Porosimetría por absorción de agua.

La porosimetría estudia la distribución volumétrica de los poros abiertos, según su diámetro. Se expresa como porcentaje de volumen de poros con respecto al volumen total de la roca y permite caracterizar su estructura interna. Los métodos de succión se basan en la relación existente entre succión de agua y contenido de humedad de un material y permiten determinar su distribución de tamaños de poros (DULLIEN, 1992). La porosidad primaria es aquella que se genera durante la formación de la roca y la secundaria la que se genera por procesos de meteorización. La distinción entre poros y fisuras es importante en los estudios de transferencia de fluidos, ya que la existencia de uno u otro tipo de porosidad implica diferentes características de migración de fluidos (HAMMECKER et al., 1993; ALVES, 1997).

Para el cálculo de coeficientes de porosidad (MERTZ, 1991) se utilizan probetas cilíndricas de roca y se mide su masa en seco (Ws) y la masa después de dejarlas durante 1 hora en agua destilada hasta 1/4 de la altura total de las pro-

betas. Una hora después se adiciona agua hasta 1/2 de la altura de las probetas (t₂) y se deja reposar 23 horas. Pasadas esas horas se mide la masa (W48) y se añade agua hasta cubrir totalmente las probetas dejándose éstas en reposo durante 24 horas. Al cabo de este tiempo se retiran las probetas y se vuelve a medir la masa (W2) lo que será la masa de estas saturadas y después se mide su peso hidrostático (W1).

Se determinan dos coeficientes (según MERTZ, 1991) para conocer la porosidad. El coeficiente de porosidad total (N% en volumen):

$$N_t = (W_2 - W_S) * 100 / (W_2 - W_1)$$

Y el coeficiente de porosidad a 48 horas o libremente accesible (% en volumen), conociendo el volumen total de la probeta (Vt):

$$N_{48} = (W_{48} - W_S) * 100 / V_t$$

El coeficiente de Hirschwald (MERTZ, 1991) dado por S48 = N48/Nt., facilita información sobre la interconexión del medio poroso: cuanto mayor es S48 mejor será la interconexión del medio.

Los valores de porosidad total y libre son normalmente mayores en las muestras que presentan un aspecto más meteorizado (ALVES, 1997). La relación lineal entre Nt y N48 dará una pendiente característica de cada proceso de meteorización. El aumento de S48 con la meteorización implica también una dis-

Orientación	Edad (años)	R-value	Desviación estándar
Norte	700	38,44	6,94
Sur	700	33,33	8,40
Oeste	500	36,49	7,30
Norte	500	37,41	6,35
Norte	360	39,98	8,40
Norte	260	34,69	5,67
Este	260	33,57	1,99
Este	200	35,57	5,20
Sur	200	37,73	7,87
Norte	100	45,62	9,10
Oeste	100	49,51	2,43
Sur	100	48,02	10,14

Tabla 2. R-valor medio de las fachadas de los edificios de la Colegiata de Santa María del Campo y de la Iglesia de Santiago según su orientación y la edad.

minución de la porosidad de retención (1-N48) con la meteorización (MERTZ, 1991).

Para los estudios de porosidad se han extraído probetas de roca de las canteras de San Pedro, de la zona no meteorizada (CSP-1) y de la meteorizada (CSP-2), y de Bregua (BRE-1). También se han obtenido probetas de varios sillares de la Iglesia de Las Capuchinas (CAP-7, 8 y 9).

Los datos del leucogranito de San Pedro indican que la porosidad total de las muestras correspondientes a la variedad no meteorizada de la cantera (CSP-1) es mucho más baja que para el resto de muestras de leucogranito, lo que concuerda con la afirmación de que las muestras menos meteorizadas (con color similar pero una tonalidad menos amarillenta) son menos porosas. Además, la porosidad libremente accesible (N48) se incrementa con la porosidad total (Nt), es decir, con la meteorización, aunque para los coeficientes S48 no se observan variaciones relacionadas con la meteorización de las muestras.

La porosidad de las muestras de granodiorita de Bregua es similar a la de la variedad alterada del leucogranito de San Pedro. Esto se debe a que esta roca presenta ya una mete-

orización en cantera, lo que también se observa en la mayoría de los sillares de granodiorita de los monumentos.

Los datos de porosidad para estos dos tipos de roca se corresponden relativamente con los datos de resistencia mecánica superficial lo que indica la existencia de una correlación entre ambas magnitudes para un mismo tipo de roca. La comparación de todos los valores de porosidad libremente accesible (N48) con los de porosidad total (Nt) muestran una buena correlación en todas las muestras (fig. 10), similar a la encontrada para otros granitos (ALVES, 1997).

4.4. Ensayos de Desorción

La desorción se define como la pérdida por evaporación de agua en un cuerpo por migración de calor que produce evaporación en la superficie y el interior de ese cuerpo. La tasa de desorción depende de las condiciones ambientales (calor, humedad, dinámica del aire saturado y régimen de alimentación del agua) y de las características del material (porosidad y conductividad térmica) (ALVES, 1997).

MUESTRA	GRANITO	Nt (%)	N48(%)	S48
CSP-1A	San Pedro	1,111	1,101	0,991
CSP-1B	San Pedro	1,117	1,049	0,939
CSP-2A	San Pedro	3,981	3,782	0,950
CSP-2B	San Pedro	4,149	4,060	0,979
CAP-7A	San Pedro	3,654	3,251	0,890
CAP-7B	San Pedro	3,844	3,413	0,882
CAP-8A	San Pedro	3,645	3,635	0,997
CAP-8B	San Pedro	3,343	3,274	0,979
CAP-9A	San Pedro	4,453	4,429	0,994
CAP-9B	San Pedro	5,529	5,236	0,947
BRE-1A	Bregua	4,321	3,884	0,899
BRE-1B	Bregua	3,666	3,526	0,962

Tabla 3. Resultado de los ensayos de porosidad (MERTZ, 1991) realizados sobre las diferentes probetas de los dos tipos de granito

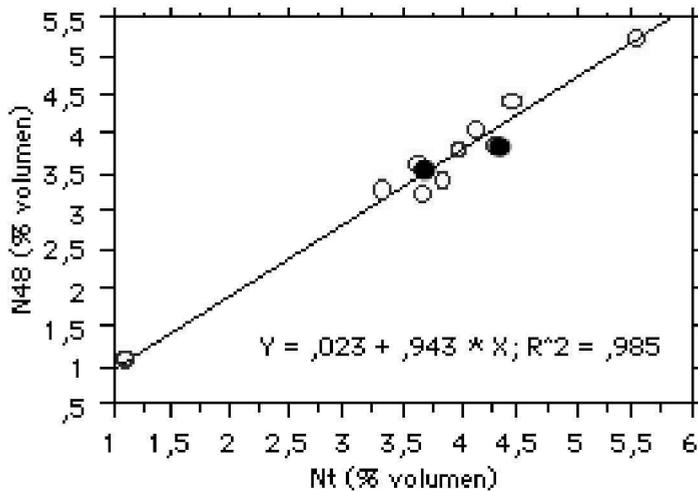


Figura 10. Comparación de los datos obtenidos (MERTZ, 1991) de porosidad total (Nt) y porosidad libremente accesible (N48) de las probetas estudiadas.

MUESTRA	N48(%)	Sc (%)	Tc (h)	qct (g/cm ² .h)
CSP-1A	1,101	57,021	4,5	0,001
CSP-1B	1,049	53,310	3,8	0,001
CSP-2A	3,782	62,150	6	0,003
CSP-2B	4,060	48,545	6	0,0036
CAP-7A	3,251	46,048	11	0,0028
CAP-7B	3,413	40,777	11,2	0,0027
CAP-8A	3,635	47,774	11,5	0,003
CAP-8B	3,274	47,460	12	0,0028
CAP-9A	4,429	43,193	12	0,0029
CAP-9B	5,236	43,566	11,5	0,0042
BRE-1A	3,884	61,096	7,5	0,0033
BRE-1B	3,526	54,802	8	0,0028

Tabla 4. Resultados de los ensayos de desorción (MERTZ, 1991) en las probetas estudiadas. Sc: saturación crítica; Tc: tiempo crítico; qct: flujo de desorción.

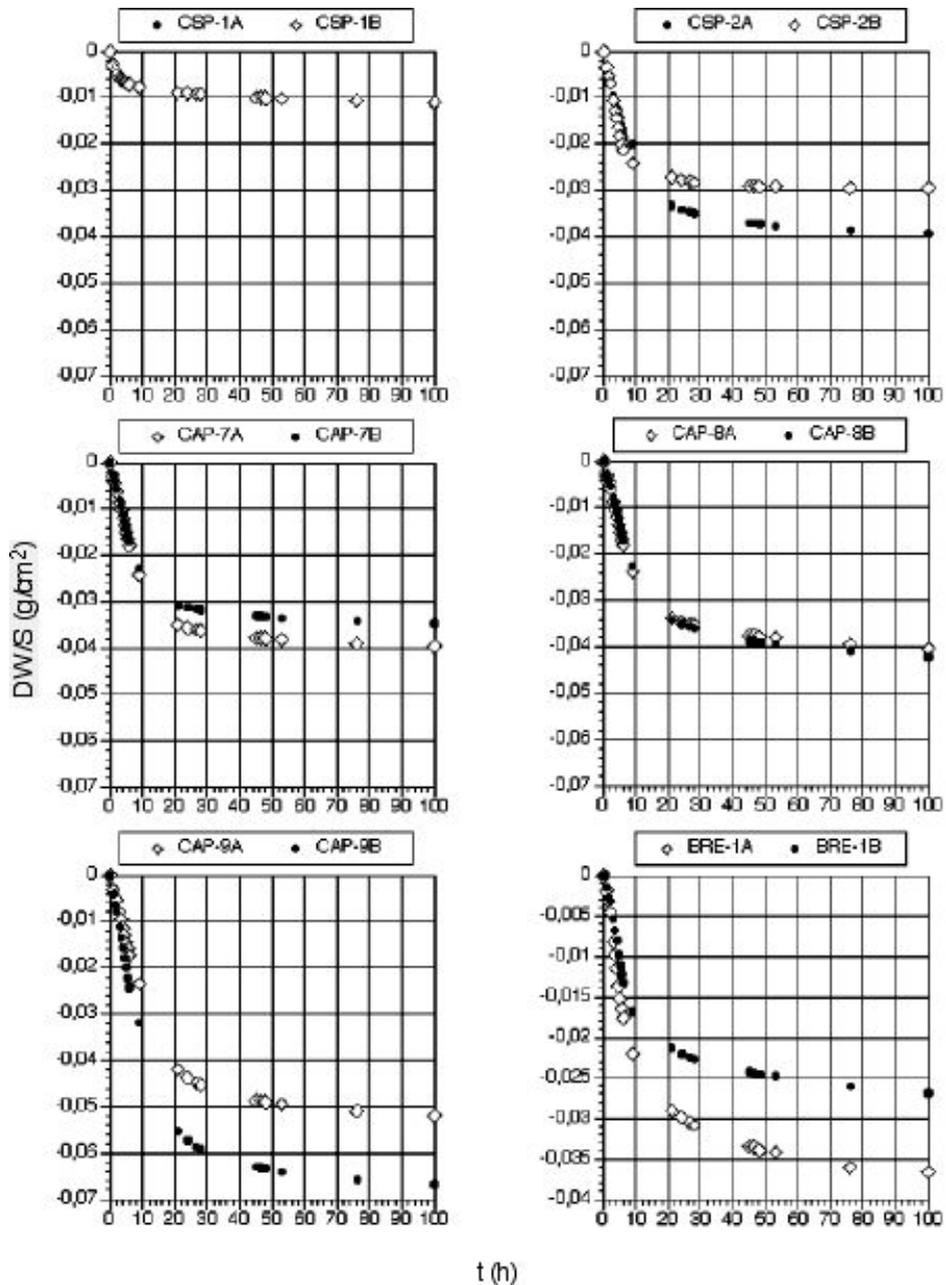


Figura 11. Representación gráfica de los datos (diferencia de peso frente a tiempo) obtenidos por medio de los ensayos de desorción (MERTZ, 1991) de las probetas estudiadas.

En las curvas teóricas de un ensayo de desorción, las variaciones de masa de la muestra (W) y el grado de saturación (S) en función del tiempo (t) para una muestra saturada en agua pueden definirse las siguientes etapas:

- una primera etapa de aumento de la tasa de secado;
- una etapa de descenso de W o de S que definen una recta frente al tiempo (flujo de secado constante);
- una etapa final de flujo de desorción decreciente.

La primera etapa se explica como resultado del calentamiento de la superficie evaporante y comprende un intervalo muy corto de tiempo, pudiendo incluso no ocurrir (ALVES, 1997). La segunda etapa se refiere a la evaporación en la superficie saturada de la muestra, habiendo ésta alcanzado la temperatura húmeda atmosférica. El valor del flujo de evaporación aumenta con la porosidad (HAMMECKER et al., 1993). Cuando la alimentación de humedad en la superficie evaporante es insuficiente desciende la tasa de desorción. El grado de saturación en ese punto se designa por saturación crítica (Sc) y el tiempo necesario para alcanzar ese punto se conoce como tiempo crítico (tc). El valor de Sc depende de la estructura porosa del material, las condiciones ambientales y las dimensiones de la muestra (HAMMECKER, 1993).

Los valores obtenidos por medio de los ensayos de desorción indican que el valor de saturación crítica es mayor para las muestras de cantera de ambos tipos de granito que para las muestras de la Iglesia de las Capuchinas, y son similares para los dos tipos de leucogranito de San Pedro. Además, no se observa ninguna relación entre la saturación crítica (Sc) y la porosidad total (Nt). El tiempo crítico (tc) también es mayor para las muestras de los edificios.

La observación de las gráficas de desorción (fig. 11) de las muestras menos meteorizadas y porosas presentan una fase de secado mínima o casi inexistente (CSP-1). También se observa que en el leucogranito no meteorizado de cantera (CSP-1) la pendiente de este tramo es muy inferior a la calculada en el otro tipo y en la granodiorita de Bregua. El resto de las muestras presentan una pendiente similar para este tramo, si bien, la saturación crítica es mayor y el tiempo crítico es menor siempre para las muestras de cantera de ambos tipos de granito.

Para ambos tipos de roca se observa una correlación positiva entre el flujo de desorción (qct) y la porosidad de las muestras (Nt y N48). La comparación de todas las muestras indica que las muestras más porosas presentan mayores valores de flujo de desorción existiendo una buena correlación entre ambos valores (figs. 12 y 13).

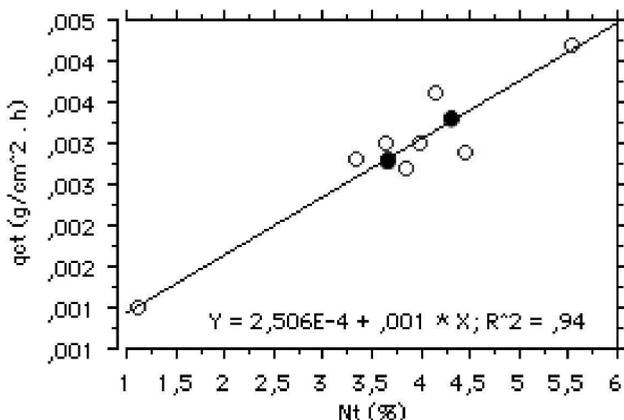


Figura 12. Comparación de los datos de flujo de desorción (qct) y de porosidad total (Nt) de las probetas estudiadas.

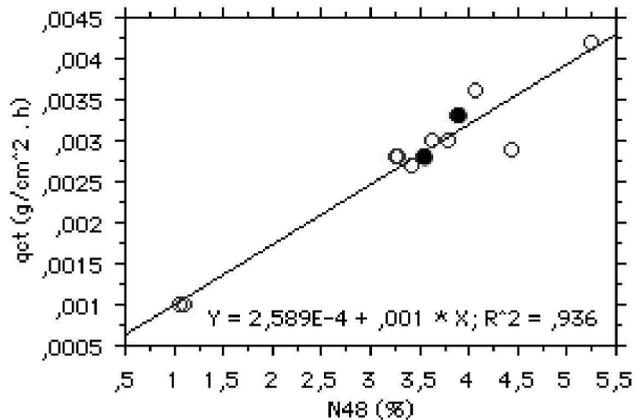


Figura 13. Comparación de los datos de flujo de desorción (qct) y de porosidad libremente accesible (N48) de las probetas estudiadas.

5. CONCLUSIONES

En edificios pertenecientes al Patrimonio Monumental la gran alteración erosiva existente se justifica por el empleo como material de construcción de tipos de rocas meteorizadas previamente en los macizos naturales. Los procesos erosivos en los edificios están, por tanto, condicionados por las características intrínsecas de la roca (estructura, deformación, meteorización y heterogeneidades,) y de manera secundaria por los agentes exógenos. Entre estos agentes exógenos, la alteración está asociada a efectos achacables a concentración de cargas en sillares, humedades y erosión originada por interacción con materiales aglomerantes (por cristalización de sales).

La valoración del grado de intensidad de un tipo de alteración erosiva es muy compleja ya que está condicionada por el tipo de roca,

su estructura y textura. Por ello, esta valoración debe realizarse de una forma cualitativa para cada tipo de roca. En general, no se han observado diferencias en los paramentos de los edificios estudiados construidos con el mismo tipo de granito. Las fachadas menos deterioradas son aquellas cuya edad de construcción es mucho más moderna, lo que es atribuible al empleo de materiales graníticos de mejor calidad (con menor grado de meteorización heredado de la cantera).

La porosidad e interconexión del sistema de poros están condicionadas por el grado de meteorización: granitos petrográficamente diferentes pueden mostrar porosidades similares que varían con la meteorización. Existe además una relación porosidad-resistencia mecánica y las superficies con mayor porosidad muestran menores valores de resistencia mecánica superficial.

Recibido: 30 / 3 / 2006

Aceptado: 14 / 5 / 2006

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ DE BUERGO, M.A. and GONZÁLEZ LIMÓN, T. (1994). *Restauración de edificios monumentales*. Madrid: CEDEX. 338p.

ALVES, C.A.S. (1997). *Estudo da deterioração de materiais graníticos aplicados em monumentos da cidade de Braga (Norte de Portugal). Implicações na Conservação do Património Constuido*. Braga: Universidade do Minho. 291p.

AMOROSO, G.G. and FASSINA V. (1983). *Stone decay and conservation. Atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection*. Amsterdam: Elsevier. 453p.

AMOROSO, G.G. (1995). *Il restauro della pietra nell'architettura monumentale. Posa in opera, degrado, pulitura*. Palermo: Dario Flaccovio Editore SRL. 215p.

ARNAIZ, M. and MARTÍN, A. (1977). *Alteración de materiales pétreos de obras monumentales. Acción de la contaminación ambiental*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja. CSIC. 62p.

CABRERA GARRIDO, J. M. (1979). Causas de alteración y métodos de conservación aplicables a los monumentos hechos con piedra. *Materiales de Construcción*, 174: 5-42.

CHAROLA, A.E. (2000). Salt in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39 (3): 327-343.

DELGADO RODRIGUES, J. (1977). Previsão da alterabilidade de materiais rochosos naturais. *Geotecnia*, 20: 53-68.

DULLIEN, F.A.L. (1992). *Porous Media. Fluid Transport and Pore Structure*. San Diego: Academic Press. 574p.

GARCÍA MORALES, S. (1993). *Comportamiento hidrico de paramentos. Clasificación de las humedades*. Madrid: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos de Madrid:37-51.

GOUDIE, A. (Ed.) (1990). *Geomorphological techniques* (2nd ed.). London: Unwin Hyman Ltd. 570p.

HAMMECKER, C.; MERTZ, J.D.; FICHER, C. and JEANNETTE, D. (1993). Geometrical model for numerical simulation of capillary imbibition in Sedimentary rocks. *Transport in Porous Media*, 12: 125-141.

IÑIGO, A.C.; VICENTE, S.; RIVES, V. and VICENTE, M.A. (1994). Porosidad libre en granitos alterados: comentarios a las normas. *Materiales de Construcción*, 45 (238): 47-53.

KELLER, E.; BALGOARD, T. and REESMAN, P. (1963). Dissolved products of artificial pulverized silicate minerals and rocks. *Journal of Sedimentary Petrographie*, 33: 191-204.

LAZZARINI, L. and LAURENZI TABASSO, M. (1986). *Il restauro della Pietra*. Padova: Cedam. 317p.

MATIAS, J.M. (2001). *Padrões de deterioração em monumentos e edificios graníticos da cidade de Braga (NW de Portugal). Durabilidade dos granitos em Arquitectura*. Braga, Portugal: Universidade do Minho. 195p.

MCKINLEY, J. M.; CURRAN, J. M. and TURKINGTON, A.V. (2001). Gypsum formation in non-calcareous building sandstone: a case study of Scarbo Sandstone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 869-875.

MERTZ, J.D. (1991). *Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès*. Strasbourg: Université Louis Pasteur. 149p.

O'BRIEN, P.J.; BELL, E., SANTAMARIA, S.P., BOYLAND, P. and COOPER, T.P. (1995). Role of mortars in the decay of granite. *The Science of Total Environment*, 167: 103-110.

SANJURJO SÁNCHEZ, J.; VIDAL ROMANÍ, J.R. and ALVES, C.A.S. (2004). Characterisation typology and origin of patinas in the church of Las Capuchinas, A Coruña (NW Spain). *6th International Symposium on the Conservation of*

Monuments in the Mediterranean Basin, Lisbon, Portugal, 202-206.

SCHNEIDER, T. and GRANT, L. (1982). *Air pollution by nitrogen oxides*. Amsterdam: Elsevier. 1092p.

SCHIAVON, N. (1993). Microfabrics of weathered granite in urban monuments. In: *Conservation of stone and other materials, vol I*, (THIEL, M.J., ed.). London: E&FN Spon, Chapman & Hal., 271-278.

SCHIAVON, N. (2000). Granitic building stone decay in an urban environment: a case of autigenic kaolinite formation by heterogeneous sulphur dioxide attack. *9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Venice, 411-421.

SMITH, B.J.; MAGEE, R.W. and WHALLEY, W.B. (1994). Breakdown patterns of quartz sandstone in a polluted urban

environment, Belfast, Northern Ireland. In: *Rock weathering and Landform evolution*, (ROBINSON, A. R. D. and Williams, R. B. G., eds.). Chichester, UK: John Wiley & Sons. 131-150.

TWIDALE, C.R. and VIDAL ROMANÍ, J.R. (1998). *Landforms and geology of granite terrains*. Leiden, The Netherlands: Balkema. 364 p.

VIDAL ROMANÍ, J.R. and YEPES TEMIÑO, J. (2004). Historia de la morfogénesis granítica. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 29: 331-360.

WARK, K. and WARNER, C.F. (1990). *Contaminación del aire*. Mexico: Ed. Noriega 625p.

YATSU, E. (1988). *The nature of weathering: an introduction*. Tokyo: Sozoshu 624p.