

# ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE DESPLACADOS Y DESCAMADOS EN EL GRANITO DE LA PLAZA MAYOR DE MADRID

**D.M. Freire-Lista y R. Fort**

*Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), Madrid, y CEI Campus Moncloa, UCM-UPM y CSIC. Calle José Antonio Novais, 12. 28040 Madrid, España (d.freire@igeo.ucm-csic.es, rafael.fort@csic.es)*

## *Introducción*

A lo largo de la historia de la Humanidad, todas las grandes civilizaciones han construido templos, palacios, iglesias, murallas, monolitos y casas tallando sillares de granito. Estos sillares suelen sufrir deterioros, concretamente desplazados y descamados.

Los granitos de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español), denominados Piedra Berroqueña, han sido un material de construcción muy utilizado en fachadas, muros o zócalos de edificios, bases de grandes estructuras o pedestales de estatuas<sup>1</sup>. La colocación de la piedra en los edificios en base a su anisotropía<sup>2</sup> definirá el comportamiento mecánico y durabilidad ante procesos de deterioro, especialmente cuando están sujetas a cambios de temperatura<sup>3,4,5</sup> y existe presencia de agua o sales.

El objetivo de este estudio es la identificación del deterioro en columnas de granito de la Plaza Mayor de Madrid comparándolas con el granito fresco de la zona de procedencia que corresponde al granito de Alpedrete<sup>1</sup>. Esta piedra ha sido ampliamente utilizada como material de construcción en sillares y esculturas de edificios históricos<sup>6</sup> por sus características petrofísicas y de durabilidad. También por su estética, homogeneidad y posibilidad de distintos acabados.

La cartografía detallada de los sillares permite la identificación del deterioro y determinar su distribución espacial en la superficie del sillar, mientras que la comparación microscópica entre láminas delgadas de granito extraído de sillares y de cantera histórica, permite establecer los mecanismos de deterioro del granito. Las microfisuras<sup>7</sup> en sillares de monumentos tienen gran importancia, ya que pueden funcionar como vías de entrada de agentes de deterioro como agua o sales<sup>2</sup>.

## *Materiales y métodos*

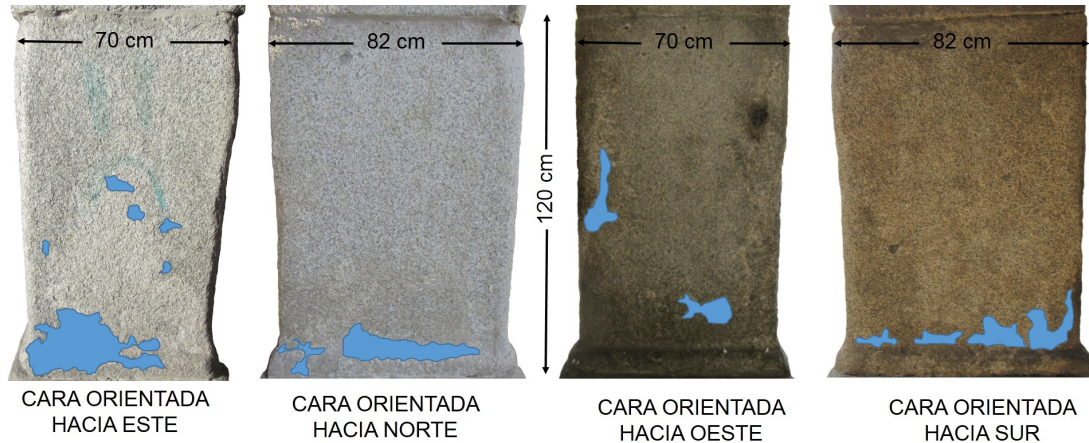
Alpedrete es un monzogranito de tamaño de cristal medio, hipidiomórfico, equigranular y ha sido utilizado en la construcción de importantes edificios históricos de Madrid. Este granito de construcción ha sido nominado como *Global Heritage Stone Resource*<sup>8,9</sup> por su importancia en el patrimonio tangible e intangible de la Comunidad de Madrid.

Se han seleccionado muestras de granito fresco orientadas según los planos de corte en una cantera de Alpedrete (40°39'45.1"N 4°00'49.8"W) para la elaboración de láminas delgadas de 30 × 20 ± 3 mm y 30 µm de espesor a baja velocidad de corte (120 rpm) para minimizar la generación de fisuras. También se han estudiado láminas delgadas orientadas de acuerdo a las caras de cuatro sillares de las columnas que forman los soportales de la Plaza Mayor de Madrid. Estas láminas se han impregnado con fluoresceína. La petrografía se ha estudiado mediante observación microscópica (microscopía petrográfica-PM) con un microscopio de luz polarizada Olympus BX 51 (PM) equipado con una cámara fotográfica DP 12 (6 V/2.5 Å) y software Olympus DP-Soft (version 3.2). Las microfisuras se han caracterizado con el mismo equipo, utilizando un microscopio de fluorescencia con lámpara de mercurio Olympus U-RF-T.

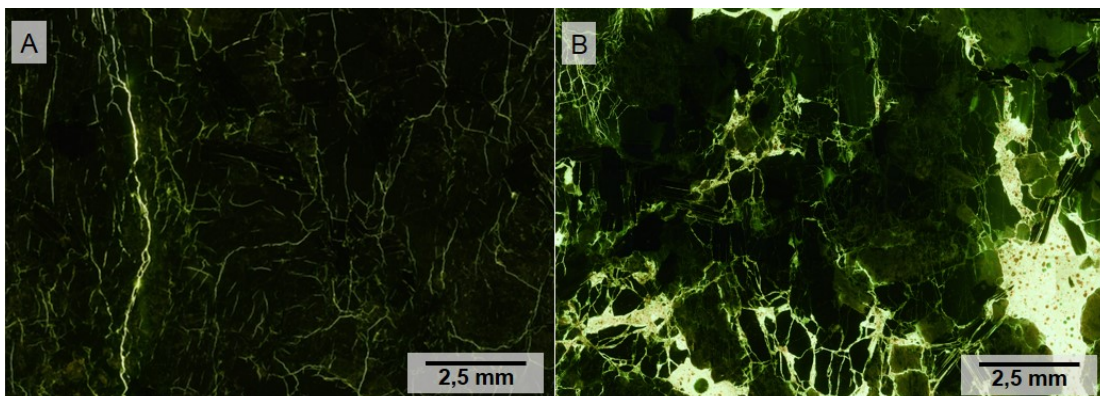
La cartografía de los sillares inferiores del fuste de las columnas de la Plaza Mayor de Madrid se ha realizado *in situ* sobre fotografías de cada una de las cuatro caras de las cuatro columnas seleccionadas. Una vez realizada la cartografía del deterioro, se ha calculado el área que ocupan los desplazados en el sillar con el software JMicrovision versión 1.2.7.

### Resultados

La cartografía del deterioro en el fuste de cuatro columnas de granito de la Plaza Mayor de Madrid indica que los desplazados se localizan en la parte inferior de los sillares (Figura 1). Estos desplazados tienen un espesor de hasta 4 mm y ocupan un 4,45 % de la superficie total del sillar. Si tenemos en cuenta la superficie con escamado este valor de deterioro asciende al 19,23 %.



**Figura 1.** Cartografía de los desplazados en las caras del primer sillar del fuste de una columna de la Plaza Mayor de Madrid.



**Figura 2.** Micrografía del granito de Alpedrete. (A) Con microscopía de fluorescencia, extraído de cantera histórica. (B). Micrografía con microscopía de fluorescencia del granito, extraído de sillar del fuste de la columna de la Plaza Mayor de Madrid.

La comparación microscópica de fracturas entre láminas delgadas de muestras extraídas en cantera histórica y de los sillares de granito de la Plaza Mayor de Madrid ha permitido observar un importante aumento en la anchura de las fisuras (Figura 2). El porcentaje de volumen que ocupan las fisuras en el granito fresco es de 2,48 % mientras que las microfisuras de la superficie del sillar ocupan un 16,45%.

### Discusión

Los cambios térmicos sobre el granito generan un aumento de la densidad y grosor de las microfisuras<sup>4,5</sup>. Además la circulación de agua por capilaridad, cristalización de sales y diversos daños sufridos por el uso de la Plaza Mayor de Madrid a lo largo de la historia favorece el desplazado que ha sufrido.

Los desplazados se producen con mayor frecuencia en la zona inferior de los sillares, esto puede ser debido al ascenso capilar favorecido por una disposición vertical de las fracturas observada en lámina delgada. La zona superficial de los sillares está muy afectada por microfisuras debidas a factores extrínsecos al granito de Alpedrete, como es la labra y golpes sufridos.

El agua y la polución en contacto con la superficie del granito será más penetrativa cuanto más microfisurado esté el granito. Las microfisuras funcionarán como vías que aceleran el deterioro químico de los minerales y del conjunto de la roca. Los feldespatos microfisurados son mucho más susceptibles al deterioro debido a la meteorización química, que forma minerales de arcilla en granitos<sup>5</sup>.

La cristalización del agua en las microfisuras preexistentes y expansión térmica de minerales crea microfisuración en rocas graníticas que en su mayoría se propagan siguiendo planos microestructurales. Es decir, la microestructura de los feldespatos va a controlar en gran medida la propagación de microfisuras ya sea intercrystalina o intracrystalina, aprovechando defectos cristalográficos o microfisuras preexistentes<sup>10,11</sup>.

Cuando las microfisuras intracrystalinas se propagan en feldespatos siguiendo planos cristalográficos, lo hacen siguiendo los planos casi ortogonales de exfoliación o las maclas. Cuando las microfisuras intracrystalinas de las plagioclasas se propagan siguiendo su zonación, generan microfisuras pseudoconcéntricas. Además las plagioclasas tienen maclas y exfoliación casi ortogonal, por lo que en estos planos también se propagarán microfisuras. El control microestructural es distinto para cada uno de los minerales constituyentes del granito<sup>12</sup>.

La alteración hidrotermal ha producido que los núcleos de las plagioclasas estén seritizados estos núcleos son susceptibles de alojar agua que al congelarse crea tensiones y microfisuras produciendo deterioro. Las plagioclasas zonadas cuentan con mayor número de microfisuras en los núcleos debido a que sus centros más cálcicos son más susceptibles al deterioro<sup>5</sup>.

Si se comparan las Figuras 1 y 2 se puede observar cómo en el granito de cantera muchas de las microfisuras son intercrystalinas. En la Figura 2b se observa un considerable aumento de grosor de las fisuras y una mayor proporción de fisuras transcristalinas. La propagación de microfisuras en granitos no depende sólo de la mineralogía de la roca, sino también de las condiciones ambientales y del grado de interacción con fluidos.

El deterioro de un sillar está controlado por la porosidad primaria<sup>13</sup>, la cual no afecta a todo el volumen de la roca por igual, siendo normalmente más elevado en la zona superficial, en el entorno donde accede el agua y cristaliza hielo, incrementando las microfisuras preexistentes o porosidad primaria del granito. El aumento del tamaño relativo de microfisuras puede encontrar su causa en la aparición de porosidad secundaria debida a los fenómenos de capilaridad y posterior hielo deshielo o cambios térmicos, sobre todo en la superficie del sillar debido a la expansión térmica de los minerales<sup>14,15</sup>.

Los sillares de granito de las columnas de la Plaza Mayor de Madrid permiten ver una orientación en sus microfisuras, esta orientación es la responsable de la anisotropía<sup>16</sup> que presenta el granito de Alpedrete con respecto a la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido<sup>4</sup>. Esta lineación de las microfisuras contribuye a la generación de desplazados y escamados visibles en los sillares estudiados. Es decir, esta lineación se observa mejor en sillares alterados que sin deteriorar.

### *Conclusiones*

Para entender el deterioro en sillares y esculturas labradas en granito es esencial el estudio de la orientación y distribución de las microfisuras de descompresión que siguen una orientación determinada por la cantera. Las observaciones microscópicas han constatado una orientación preferencial vertical de las microfisuras en las columnas de granito de la Plaza Mayor de Madrid.

La superficie paralela a ellas, será la zona más susceptible de generar deterioro por desplazados y escamados. Estos planos de microfisuración ayudarán al ascenso capilar del agua y contribuirán al deterioro.

Los desplazados y escamados se producen con mayor frecuencia en la superficie inferior de los sillares y tienen un espesor de hasta 4 mm y ocupan un 4,45 % de la superficie total del sillar.

Las propiedades texturales entre el granito de la cantera y el de las columnas de la Plaza Mayor de Madrid son distintas. Las microfisuras preexistentes se han ensanchado y se han creado otras nuevas microfisuras, principalmente de tipo intracrystalinas y transcristalinas. El granito fresco de cantera

histórica tiene un volumen de microfisuras del 2,48 % mientras que las microfisuras de la superficie del sillar ocupan un 16,45%.

*Agradecimientos.* Este trabajo fue financiado por la Comunidad de Madrid en el marco del programa GEOMATERIALS-2CM (S2013/MIT-2914). Los autores son miembros del Grupo de Investigación “Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio” (ref. 921349).

Los análisis petrofísicos se realizaron en el Laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), afiliado al Campus de Excelencia Internacional de Moncloa (UCM-UPM) y a la Red de Laboratorios del Patrimonio (RedLabPat).

---

<sup>1</sup> D.M. Freire-Lista, R. Fort, M.J. Varas-Muriel, *Episodes*, **2015**, 38(2), 106-113.

<sup>2</sup> R. Fort, B. Fernández-Revuelta, M. J. Varas, M. Álvarez de Buergo, M. Taborda, *Mater. Construcc.*, **2008**, 58(289-290), 161-177.

<sup>3</sup> M. Gómez-Heras, B. J. Smith, R. Fort R. *Environ. Geol.*, **2008**, 56, 547-560.

<sup>4</sup> D.M. Freire-Lista, R. Fort, M.J. Varas-Muriel, *Cold Regions Science and Technology*, **2015**, 113, 40-51.

<sup>5</sup> D. M. Freire-Lista, L.S. Gomez-Villalba, R. Fort, *Periodico di mineralogia*. **2015**, en prensa.

<sup>6</sup> R. Fort, M. Alvarez de Buergo, E.M. Perez-Monserrat, M.J. Varas. *Engineering Geology*, **2010**, 115, 149-157.

<sup>7</sup> M.H. Anders, S.E. Laubach, C.H. Scholz, *Journal of Structural Geology*, **2014**, 69, 377-394.

<sup>8</sup> B.J. Cooper, *Episodes*, **2010**, 33(1), 38-41.

<sup>9</sup> B.J. Cooper, B.R. Marker, I. A. Thomas, *Engineering Materials*, **2013**, 548, 329-335.

<sup>10</sup> T. Reuschlé, S.G., Haore, M. Darot, *Tectonophysics*, **2003**, 370, 95-104.

<sup>11</sup> T. Reuschlé, S.G. Haore, M. Darot, *Earth and Planetary Science Letters*, **2006**, 243, 692-700.

<sup>12</sup> M.J. Wilson. *Clay Minerals*, **2004**, 39, 233-266.

<sup>13</sup> A.C. Íñigo, M.A. Vicente, V. Rives, *Mechanics of Materials*, **2000**, 32, 555-560.

<sup>14</sup> O. Alm, L.L. Jaktlund, S. Kou. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **1985**, 40(3), 161-179.

<sup>15</sup> F.F. Gorbatshevich, *Tectonophysics*, **2003**, 370, 121-128.

<sup>16</sup> R. Fort, M.J. Varas, M. Alvarez de Buergo, D.M. Freire-Lista, *Journal of Geophysics and Engineering*, **2011**, 8, 132-144.