

## Reactividad potencial de las rocas andesíticas de Cabo de Gata (SE de España)

*Potential reactivity of the andesitic rocks from Cabo de Gata (SE Spain)*

J. Soriano<sup>1</sup>, A. La Iglesia<sup>2</sup>, M.A. García Calleja<sup>1</sup>, J. López-Ruiz<sup>3</sup>

### RESUMEN

Las rocas andesíticas producen una reacción álcalis-sílice con los componentes de la fase intersticial del hormigón. Esta reacción puede encuadrarse dentro de las de cinética lenta, ya que la disolución incongruente de los minerales constituyentes de las rocas, da lugar a la formación tardía de geles silico-calco-alcalinos. En consecuencia, la utilización convencional del método de ensayo de barras de mortero no detecta la reacción hasta transcurridos al menos 90 días.

**Palabras clave:** áridos, andesitas, reacción álcalis-sílice, reactividad potencial, Cabo de Gata.

### ABSTRACT

Andesitic rocks produce an alkali-silica reaction with the components of the interstitial phase of concrete. This reaction can be considered as belonging to the slow-kinetic type, since the incongruent dissolution of the rock-forming minerals leads to the late formation of siliceous calc-alkaline gel. As a consequence, the conventional mortar-bar method does not detect such reaction until 90 days later.

**Key words:** aggregates, andesites, alkali-silica reaction, potential reactivity, Cabo de Gata.

## Introducción

La durabilidad de un material se puede definir como la capacidad de mantener un adecuado comportamiento, propiedades y condiciones de seguridad, durante el tiempo y las condiciones de servicio previstas para su empleo. En el caso del hormigón, la durabilidad es la capacidad para resistir ataques físicos, fisicoquímicos y químicos tanto de origen interno como externo (ACI Committee 201, 2007).

Cuando hay que evaluar la influencia ejercida por diversos factores en la durabilidad del hormigón nos encontramos con el grave problema de la importancia relativa que los diferentes autores prestan a cada uno de los factores indicados. Así, los de

formación más técnica tiende a conceder mayor importancia a los aspectos mecánicos y físicos que a los químicos y fisicoquímicos. Por el contrario, los de formación más científica tienden a considerar principalmente los factores de tipo químico o fisicoquímico tales como composición del cemento, reactividad de los áridos, etc.

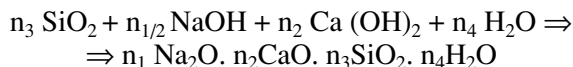
Algunos áridos de naturaleza silíceo pueden tener una elevada reactividad potencial, ya que reaccionan con los álcalis de la fase intersticial del hormigón, dando lugar a la formación de geles y compuestos de sílice. En general, estos compuestos tienen capacidad para generar en presencia de agua una elevada presión osmótica, lo que da lugar a un aumento de volumen y a importantes presiones disruptivas.

<sup>1</sup> Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX-Ministerio de Fomento. Alfonso XII, 3. 28014 Madrid (jsoriano@cedex.es) (magarcia@cedex.es).

<sup>2</sup> Departamento de Petrología y Geoquímica, Instituto de Geología Económica, CSIC-UCM. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid (iglesia@geo.ucm.es).

<sup>3</sup> Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid (lopezruiz@mncn.csic.es).

El esquema general de este mecanismo es el siguiente:



Según la práctica general de la química del cemento, el NaOH representa al Na<sub>2</sub>O equivalente (es decir, Na<sub>2</sub>O + 0,66 K<sub>2</sub>O). A su vez, el gel formado será o no de carácter expansivo en función del contenido en CaO.

La sílice de las rocas y minerales susceptibles de ser utilizados como áridos reactivos, interacciona con el NaOH produciendo, en primer lugar, una reacción ácido-base entre los grupos silanol Si-OH y los iones OH<sup>-</sup> de la solución alcalina, después de la neutralización por un ión Na<sup>+</sup> de la carga negativa formada. Posteriormente se produce una segunda reacción consistente en un ataque de puentes siloxanos por iones OH<sup>-</sup>, lo que provoca una destrucción de la estructura y el paso de la sílice a SiO<sub>4</sub>H<sub>2</sub><sup>-</sup>. Hay que señalar que ambas reacciones se producen casi simultáneamente, dando lugar a la formación de un gel de silicato sódico de fuerte carácter expansivo.

En este trabajo se estudia la reactividad potencial de rocas andesíticas. Aunque es bien sabido que estas rocas pueden ser reactivas frente a los componentes de la fase intersticial del hormigón, sin embargo su cinética de reacción no es suficientemente conocida. Para abordar este último aspecto se han seleccionado rocas calco-alcalinas de la región volcánica de Cabo de Gata, en donde estos materiales están bien representados.

## La región volcánica de Cabo de Gata

La región volcánica de Cabo de Gata se localiza en la parte oriental de la Cordillera Bética. Forma parte de una provincia más extensa, la denominada provincia volcánica del SE de España, que se extiende a lo largo de una banda que abarca desde el Cabo de Gata hasta el Mar Menor, aunque también pertenecen a ella los afloramientos de rocas ultrapotásicas (lamproítas) localizados más al interior, en el dominio externo de la Cordillera Bética (por ej., López-Ruiz *et al.*, 2002).

Las rocas volcánicas de Cabo de Gata se pueden clasificar en andesitas basálticas, andesitas piroxénico-anfibólicas y dacitas. Esta clasificación está basada en criterios geoquímicos, como el contenido

en K<sub>2</sub>O frente a SiO<sub>2</sub>, ya que los caracteres petrológico-mineralógicos de estas rocas no son los suficientemente diagnósticos como para permitir su correcta clasificación.

Observadas al microscopio las lavas andesítico-basálticas y andesíticas están constituidas esencialmente por grandes cristales de plagioclasa (An<sub>95-68</sub>), ortopiroxeno (En<sub>79-55</sub> Fs<sub>18-43</sub> Wo<sub>3-2</sub>) y clinopiroxeno (En<sub>50-41</sub> Fs<sub>9-17</sub> Wo<sub>41-42</sub>), si bien en las más silíceas de estas últimas aparecen también cristales de anfíbol, biotita y cuarzo, que están incluidos en una matriz vítrea o poco cristalina que puede representar hasta el 50% de la roca, en la que aparecen además magnetita (Usp<sub>29-11</sub>) e ilmenita (Ilm<sub>80-74</sub>) (fig. 1). Las lavas dacíticas presentan, además de plagioclasa (An<sub>90-67</sub>) y ortopiroxeno (En<sub>58-55</sub> Fs<sub>40-43</sub> Wo<sub>2</sub>), proporciones mayores de anfíbol (hornblenda-cummingtonita), biotita y cuarzo, incluidos asimismo en una matriz vítrea o poco cristalina en la que cristalizan además magnetita (Usp<sub>26-21</sub>) e ilmenita (Ilm<sub>80-73</sub>) (fig. 2). Un detallado estudio de los aspectos mineralógicos y petrológicos de estas rocas se puede encontrar en López-Ruiz & Rodríguez Badiola (1980).

En lo que concierne a su composición química, las rocas de Cabo de Gata exhiben un relativamente amplio rango de SiO<sub>2</sub>, así como altos contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO, moderados de Na<sub>2</sub>O y bajos de K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Asimismo, presentan un típico enriquecimiento en elementos traza de elevado radio iónico (que es más alto en Rb y Th que en Ba) y tierras raras ligeras y un característico empobrecimiento en Sr, Nb, Ta y Ti. Con el incremento del contenido en SiO<sub>2</sub> (esto es, al pasar de las andesitas basálticas a las riolitas) se produce un progresivo enriquecimiento de K<sub>2</sub>O, Rb, Th, Zr y tierras raras, así como un empobrecimiento en FeO, MgO, CaO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Co, Ni y V.

## Muestras estudiadas y métodos experimentales

Se han seleccionado dos muestras representativas de la región de Cabo de Gata (figs. 1 y 2). Una andesita piroxénica de la Mesa de Roldán (AMR) y una dacita anfibólica de Punta Baja (DPB). La andesita piroxénica corresponde a una roca porfídica, constituida por abundantes fenocristales de plagioclasa y ortopiroxeno (y en menor proporción y de menor tamaño de clinopiroxeno y hornblenda),



Fig. 1.—Andesita piroxénica (AMR). Fenocristales idiomorfos de ortopiroxeno (centro), clinopiroxeno (izq.) y plagioclasa (parcialmente sericitizados), en una matriz microcristalina en la que aparecen además cuarzo, magnetita e ilmenita.

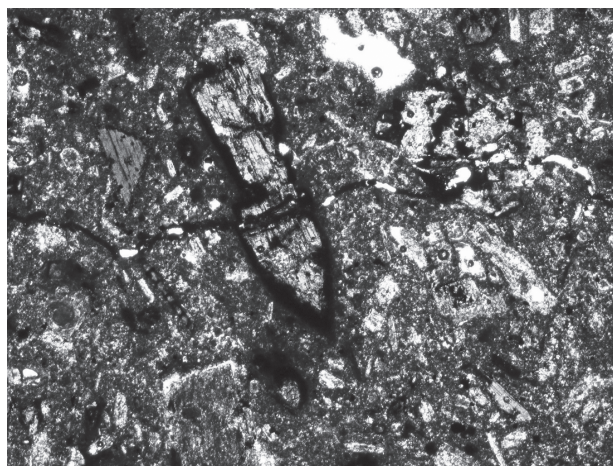


Fig. 2.—Dacita anfibólica (DPB). Fenocristales de anfíbol (con sus bordes oxidados), plagioclasa, biotita y cuarzo en una matriz intensamente alterada, constituida además por magnetita e ilmenita.

incluidos en una matriz microcristalina constituida además por cuarzo, magnetita e ilmenita. Los cristales de plagioclasa están transformados en sericita, excepto su borde más exterior (que es menos cálcico) que está fresco. La dacita anfibólica corresponde, asimismo, a una roca porfídica, con abundantes fenocristales de plagioclasa, en menor proporción de hornblenda y biotita, y muy escasos de ortopiroxeno, incluidos en una matriz microcristalina constituida por los mismos minerales, además de cuarzo, magnetita e ilmenita. Los cristales de plagioclasa y de piroxeno están completamente alterados, y los de hornblenda muestran sus bordes oxidados.

La caracterización mineralógica de las muestras se llevó a cabo por microscopía óptica convencional y difracción de rayos X (DRX). En este último caso se utilizó un difractómetro Bruker D8 Advance provisto de un detector Sol-X. Para el análisis cuantitativo se empleó el método Chung (1975), usando software EVA de Bruker.

Para estudiar la reactividad potencial, las muestras se pulverizaron a un tamaño inferior a 75 micrones. 5 g de esta fracción se trataron con 40 ml de disolución saturada de hidróxido cálcico o con disolución 1N de hidróxido sódico. Este procedimiento es similar al utilizado por Way and Cole (1982) con pequeñas diferencias; así, la temperatura de reacción se mantuvo a 25 °C en lugar de los 50 °C y el tiempo de reacción en 28 días en lugar de 40 días. Transcurrido ese tiempo se filtraron las disoluciones y se determinaron las concentraciones de Si, Al, Ca, P, Na y K en un espectrómetro ICP-OES Perkin

Elmer 4300DV. Los productos sólidos se lavaron dos veces con pequeñas cantidades de agua desionizada, se secaron en un desecador de  $\text{NO}_3\text{Ca} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y se molieron y tamizaron hasta 53  $\mu\text{m}$  para su estudio por microscopía electrónica de barrido (MEB), fluorescencia de rayos X (FRX) y (DRX).

La reactividad en superficie se estudió utilizando un microscopio electrónico de barrido Zeiss EVO-50. De acuerdo con el método descrito por Soriano (1987), se emplearon pequeños fragmentos de roca de un peso próximo a los 5 g, que se atacaron con 40 ml de una solución 1N de NaOH.

La composición química de las muestras se estudió por FRX utilizando un espectrómetro Philips PW-1404 con tubo de Sc-Mo, detector de escintilación de gas PR-10, cristales analizadores de LiF, PE y TLAP, y software analítico Súper-Q Manager.

Finalmente, el ensayo acelerado en probetas de mortero para la determinación de la reactividad álcali-sílice se realizó de acuerdo con la norma UNE 146508, si bien el ensayo se prolongó hasta los 180 días.

## Resultados y discusión

### Mineralogía

La difracción de rayos X confirma la existencia de plagioclasa, cuarzo, enstatita y caolinita en las muestras AMR (natural y atacadas) y de plagioclasa, cuarzo, anfíbol, biotita y esmectita en las muestras DPB

(tabla 1). Estos resultados indican que los tratamientos producen pocos cambios en la composición mineralógica de las muestras tratadas, ya que sólo se observa una ligera disminución en el contenido de anfíbol en la muestra DPB y de caolinita en la AMR. En ninguno de los difractogramas de las muestras tratadas aparecen nuevas líneas de difracción en el intervalo 7.9-7.6 Å, como ocurría en las experiencias de Way and Cole (1985), ni en ningún otro intervalo. Tampoco se aprecia ensanchamiento de picos ni aparición de hombros que pudiera corresponder a la formación de nuevas fases cristalinas. Sin embargo, aparece un pequeño abombamiento de la línea base, entre 25 y 40° 2θ (Cu Kα), que justificaría la presencia de geles en las muestras tratadas.

### *Composición química*

En lo que concierne a la composición química de las andesitas y dacitas estudiadas (tabla 2), las abundancias de todos los elementos mayores es la típica de estas rocas, ya que presentan altos contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO, moderados de álcalis y bajos de TiO<sub>2</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. El contenido en K<sub>2</sub>O de la dacita estudiada es anormalmente elevado, debido probablemente al intenso proceso de hidratación/desvitrificación que frecuentemente experimentan las rocas de esta región volcánica (López-Ruiz & Wasserman, 1991).

El porcentaje de elementos mayores se modifica poco con el tratamiento, ya que sólo se aprecia una relativamente importante disminución de MgO en la muestra AMR y una ligera pérdida de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las muestras tratadas con NaOH (alrededor del 2%) y en las tratadas con Ca(OH)<sub>2</sub> (alrededor del 1%). La variación en el contenido de K<sub>2</sub>O es similar, aunque la muestra AMR pierde más que la DPB.

En lo que concierne a los elementos traza, las variaciones más significativas se observan en el Ba y el Cr. El Ba se reduce del orden del 50% en la muestra tratada con NaOH y algo más en la tratada con Ca(OH)<sub>2</sub>. A su vez, la abundancia de Cr aumenta un 50% en la muestra tratada con Ca(OH)<sub>2</sub> y algo menos en la tratada con NaOH.

La disminución de los contenidos de MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Ba se puede explicar por la disolución incongruente de los piroxenos, anfíboles y, en menor medida, de las biotitas de las rocas. Esta disolución da lugar a la formación de geles silico-calco-alcalinos, los cuales a su vez podrían actuar de cambiadores catiónicos, favoreciendo, por ejemplo, el enriquecimiento en Cr.

### *Composición química de los filtrados*

Las concentraciones de Si, Al, Na y K liberadas por los ataques alcalinos después de 28 días de tratamiento, así como el porcentaje de óxido liberado respecto al total de la muestra, se presentan en la tabla 3. Estos resultados ponen de manifiesto que las concentraciones obtenidas son congruentes con los datos de FRX, tanto para las muestras naturales como para las tratadas. Por otra parte, la muestra AMR es más reactiva que la DPB. De la misma forma, las abundancias de Si, Al y K liberadas en ambas muestras por la disolución de Ca(OH)<sub>2</sub> son más bajas que las liberadas por la disolución de NaOH. Las razones molares SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las disoluciones de NaOH son respectivamente 1,71 y 2,19 para las muestras DPB y AMR, lo que está de acuerdo con sus contenidos respectivos de caolinita y esmectita.

### *Reactividad superficial*

El cambio de textura de los minerales de las muestras antes y después de ser sometidas a la acción de soluciones 1N de NaOH o saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>, pone de manifiesto que dichos minerales son susceptibles de reaccionar con los componentes de la fase intersticial del hormigón, lo que provoca la disolución parcial de aquéllos (fig. 3, 1-4).

### *Sólidos obtenidos por evaporación*

El residuo sólido obtenido por evaporación hasta sequedad de los líquidos de ataque está constituido por geles silico-alumínico-calco-alcalinos, geles silico-calco-alcalinos, y compuestos polimorfos, semejantes a los encontrados en un hormigón afectado por una reacción álcali-sílice (fig. 3, 5-6).

### *Barras de mortero*

La observación mediante MEB de la superficie de fractura de las barras de mortero indica que la expansión producida es debida a una reacción álcali-sílice. Así, se ha detectado la presencia de geles lisos (fig. 4, 1), geles rugosos (fig. 4, 2), agregados botroidales (fig. 4, 3), y productos polimorfos con texturas alveolar (fig. 4, 4), acicular (fig. 4, 5) y en pétalo de rosa (fig. 4, 6).



Tabla 1.—Composición modal de las andesitas y dacitas naturales y tratadas, obtenida a partir de los análisis de DRX

	Anfíbol	Plagioclasa	Biotita	Enstatita	Caolinita	Esmectita	Cuarzo
AMR	—	59	—	18	7	—	15
AMR-Ca	—	61	—	19	7	—	14
AMR-Na	—	61	—	19	5	—	15
DPB	12	49	12	—	—	10	17
DPB-Ca	11	49	13	—	—	11	16
DPB-Na	8	51	14	—	—	10	17

Tabla 2.—Composición química (elementos mayores en % y elementos traza en ppm) de las andesitas y dacitas naturales y tratadas

	AMR	AMR-Ca(OH) <sub>2</sub>	AMR-Na(OH)	DPB	DPB-Ca(OH) <sub>2</sub>	DPB-Na(OH)
SiO <sub>2</sub>	56,608	56,023	55,534	62,272	61,241	61,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,795	20,702	20,558	16,843	16,716	16,354
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (total)	4,473	4,564	4,244	3,776	3,925	3,919
MnO	0,113	0,102	0,091	0,071	0,083	0,085
MgO	3,131	2,751	2,705	3,431	3,418	3,403
CaO	3,604	4,748	3,713	1,512	2,361	1,574
Na <sub>2</sub> O	1,936	1,812	3,862	1,705	1,377	2,539
K <sub>2</sub> O	2,204	2,038	1,911	6,841	6,287	6,315
TiO <sub>2</sub>	0,484	0,418	0,392	0,508	0,497	0,512
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,082	0,082	0,07	0,122	0,124	0,117
P.C.	6,37	6,76	6,22	4,14	3,97	3,71
Zr	71,3	67,3	81	144,1	139,2	119
Y	13,3	10,6	14,4	12,9	13,4	12,1
Rb	33,3	28,1	31,1	281,8	267	240,5
Sr	165,5	155,9	184,3	94,0	95,7	85,3
Th	2,3	—	—	7,6	11,8	19,9
Nb	1,2	1,3	2,3	—	1	3,7
Cu	10,4	13,9	14,8	1,9	—	—
Ni	11,2	9,9	10,3	6,0	6	5,6
Co	17,2	15,1	15,1	12,6	11,7	10,2
Zn	43,6	36,1	37	56,2	50,4	51,1
Pb	10,6	7,6	13	58,7	41,6	38,8
Ce	25,9	26,1	35,6	41,9	50,1	37,9
Cr	5,4	10,9	10	18,1	22,8	17,1
V	117,5	108,5	96	91,4	81,4	82,5
La	15,7	9,2	13,5	29,9	30,7	34,7
Ba	459,1	141,9	230,5	410,3	242,6	151,1
Cs	3,9	4,4	7,3	14,8	11,5	8,9

Tabla 3.—Concentraciones de Si, Al, Na y K (en ppm) en el filtrado después de 28 días de ataque y porcentaje de óxido liberado respecto al total de muestra (entre paréntesis)

Muestra	Solución de ataque	Si	Al	Na	K
AMR	Ca(OH) <sub>2</sub>	16,0 (0,05)	1,1 (0,00)	47,5 (2,52)	4,3 (0,19)
AMR	NaOH	595,0 (1,79)	522,2 (3,91)	—	125,8 (5,50)
DPB	Ca(OH) <sub>2</sub>	22,1 (0,06)	0,0 (0,00)	42,6 (2,57)	30,3 (0,43)
DPB	NaOH	189,5 (0,52)	215,1 (1,99)	—	199,1 (2,80)

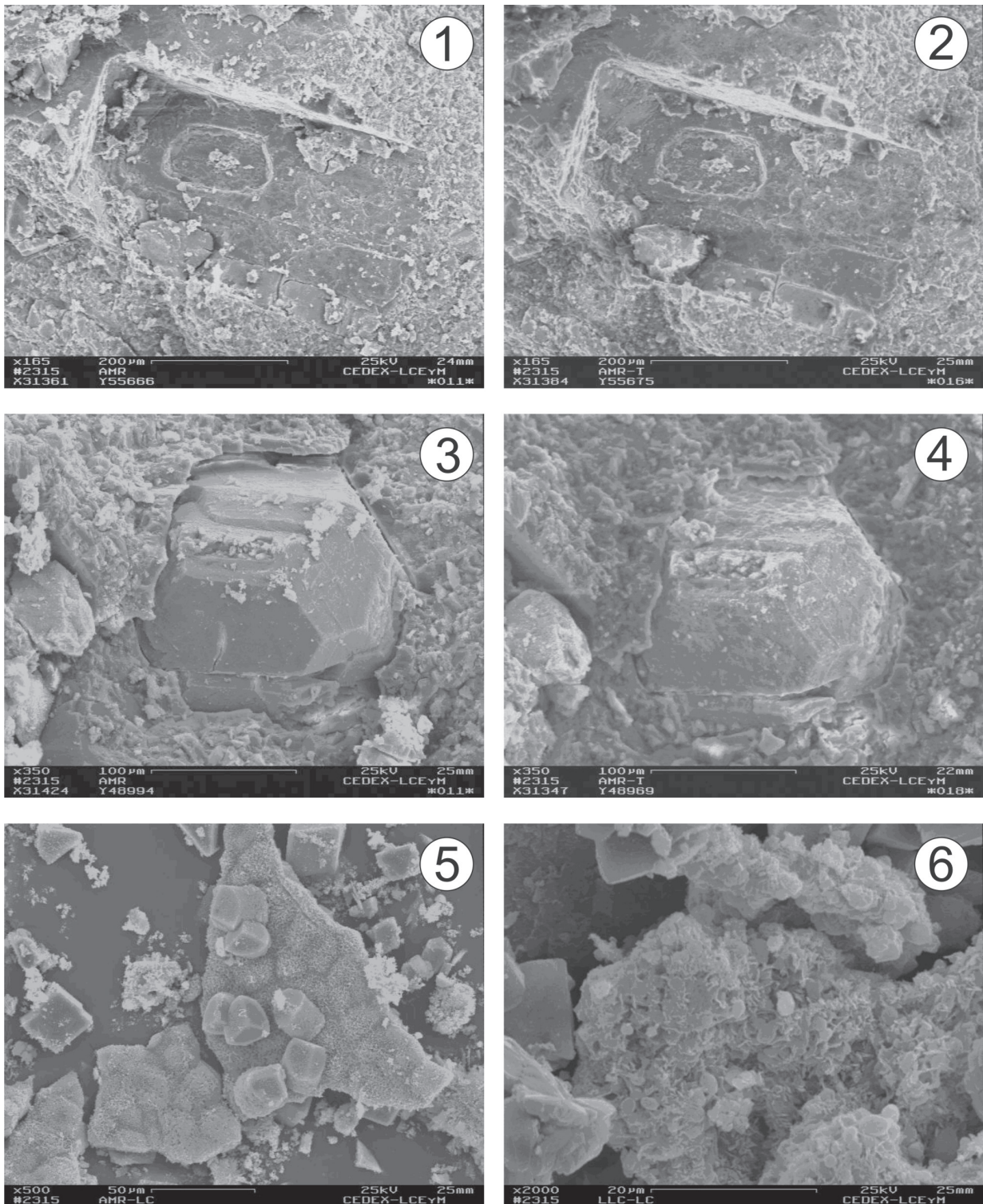


Fig. 3.—Reactividad superficial y residuo sólido. 1) Andesita piroxénica (AMR). Cristal de piroxeno antes de ser sometido a la solución de ataque; 2) Andesita piroxénica (AMR). Disolución parcial del cristal de piroxeno de la imagen anterior, después de ser sometido a la acción del líquido de ataque; 3) Andesita piroxénica (AMR). Cristal de anfíbol antes de ser sometido a la solución de ataque; 4) Andesita piroxénica (AMR). Disolución parcial del cristal de anfíbol de la imagen anterior, después de ser sometido a la acción del líquido de ataque; 5) Andesita piroxénica (AMR). Residuo sólido por evaporación. Productos polimorfos con textura alveolar. Geles rugosos; 6) Dacita anfibólica (DPB). Residuo sólido por evaporación.



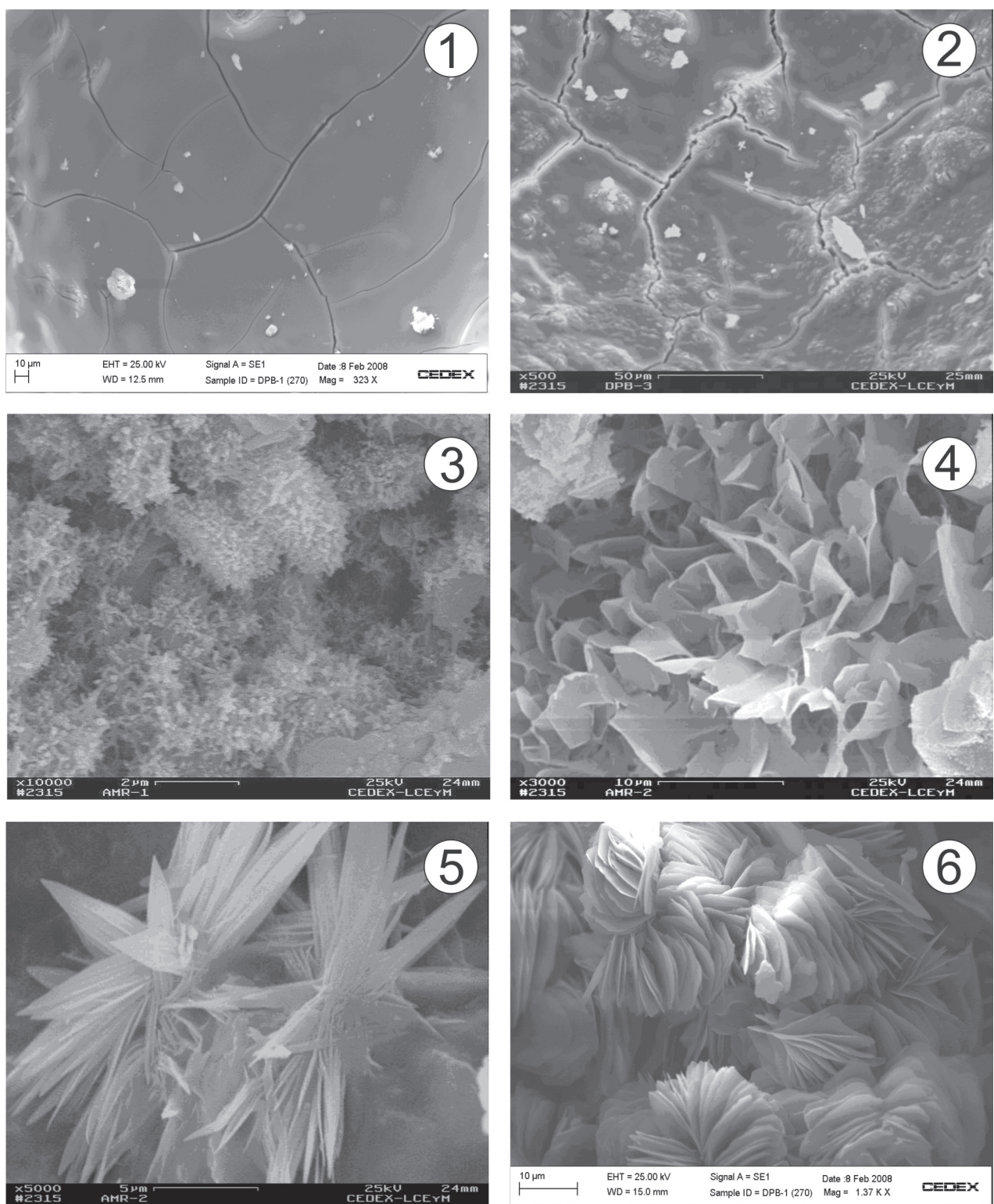


Fig. 4.—Superficie de fractura de las barras de mortero. 1) Dacita anfibólica (DPB). Barras de mortero. Geles lisos; 2) Dacita anfibólica (DPB). Barras de mortero. Geles rugosos; 3) Andesita piroxénica (AMR). Barras de mortero. Agregados botroidales; 4) Andesita piroxénica (AMR). Barras de mortero. Productos polimorfos con textura alveolar; 5) Andesita piroxénica (AMR). Barras de mortero. Productos polimorfos con textura acicular; 6) Dacita anfibólica (DPB). Barras de mortero. Productos polimorfos con textura en pétalos de rosa.

Hay que señalar que si el ensayo se hubiese detenido a los 14 días, la expansión hubiera sido en ambas muestras inferior al 0,10%, por lo que los áridos podrían haber sido considerados como no reactivos. Sin embargo, la expansión observada tanto a los 90 días (0,26%) como a los 180 días (0,40%) permite afirmar que el árido es reactivo y que el ensayo descrito en la norma UNE 146508 no es el adecuado para este tipo de rocas, como ocurre asimismo con algunos gneises y basaltos (Fournier & Berubé, 1991 y Ponce & Batic, 2006).

## Conclusiones

Los tratamientos de las muestras con NaOH o Ca(OH)<sub>2</sub> no producen importantes cambios ni en su composición mineralógica ni en su composición química.

Las concentraciones de Si y Al liberadas por los dos tipos de ataques se deben fundamentalmente a la disolución de los filosilicatos presentes (caolinita y esmectita), mientras que las de Na y K proceden de la disolución de los anfíboles y la biotita y sobre todo de la matriz.

El residuo sólido obtenido por evaporación hasta sequedad de los líquidos de ataque está constituido por geles y compuestos polimorfos, semejantes a los encontrados en un hormigón afectado por una reacción álcali-sílice.

La observación de la superficie de fractura de las barras de mortero indica que la expansión producida es debida a una reacción álcali-sílice.

La cinética de reacción álcali-sílice en las muestras estudiadas es muy lenta, por lo que la expansión detectada en las barras de mortero sólo sobrepasa los límites establecidos en la Normativa a partir de los noventa días.

## Referencias

- ACI Committee 201. (2007). *ACI Manual of Concrete Practice*, American Concrete Institute, 201.2R-1-201.2R-41.
- Chung, F.H. (1975). Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. III Simultaneous determination of a set of reference intensities. *Journal Applied Crystallography*, 8: 17-19. doi:10.1107/S0021889875009454
- Fournier, B. & Berubé, M.A. (1991). Application of the NBRI accelerated mortar bar test to siliceous carbonate aggregates produced in the St. Lawrence Lowlands (Quebec, Canadá). Part 1. Influence of various parameters on the test results. *Cement and Concrete Research*, 21: 853-862. doi:10.1016/0008-8846(91)90180-P
- López-Ruiz, J. & Rodríguez Badiola, E. (1980). La región volcánica Neógena del sureste de España. *Estudios Geológicos*, 36: 5-63.
- López-Ruiz, J. & Wasserman, M.D. (1991). Relación entre la hidratación/desvitrificación y el δ<sup>18</sup>O en las rocas volcánicas neógenas del SE de España. *Estudios Geológicos*, 47: 3-11. doi:10.3989/egeol.91471-2404
- López-Ruiz, J.; Cebriá, J.M. & Doblas, M. (2002). Cenozoic volcanism I: the Iberian peninsula. In: *The Geology of Spain* (Gibbons, W. & Moreno, T., eds.). Geological Society, London, 417-438.
- Ponce, J.M. & Batic, O.R. (2006). Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 36, 1148-1156. doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.022
- Soriano, J. (1987). Reactions d'interaction entre certains granulats et la phase interstitielle du béton. In: *Pore Structure and Materials Properties*. (Maso, J.C., ed.) Chapman & Hall Eds. London, 25-32.
- Way, S.J. & Cole, W.F. (1982). Calcium Hydroxide attack on rocks. *Cement and Concrete Research*, 12: 611-617. doi:10.1016/0008-8846(82)90022-9

Recibido el 16 de noviembre de 2009  
 Aceptado el 15 de enero de 2010  
 Publicado online el 22 de abril de 2010