

Reactividad árido-álcali en áridos empleados para hormigón

The alkali–aggregate reaction for various aggregates used in concrete

J. Gadea^(*), J. Soriano^(**), A. Martín^(*), P. L. Campos^(*), A. Rodríguez^(*), C. Junco^(*),
I. Adán^(*), V. Calderón^(*)

Recepción/Received: 22-VII-2008
Aceptación/Accepted: 27-III-2009
Publicado online/Online publishing: 11-VIII-2010

RESUMEN

Este trabajo pretende contribuir al conocimiento de las reacciones de interacción entre los áridos y los componentes de la fase intersticial del hormigón y determinar si estos áridos, empleados posteriormente en la fabricación del hormigón, son reactivos y por tanto susceptibles de provocar una disminución progresiva de sus propiedades iniciales.

Para la caracterización de cada árido se ha realizado un estudio petrográfico, fundamental a la hora de determinar su posterior comportamiento en términos de reactividad frente a diversos factores. Seguidamente, se ha analizado la reactividad potencial de diferentes áridos silicatados (pizarras, gneis, corneanas, granitos, cuarcita y serpentina) mediante los dos métodos normalizados existentes: el método químico para la determinación de la reactividad potencial de áridos y el método acelerado en probetas de mortero; y para contrastar ambos hemos seguido el método de la reactividad superficial.

Los resultados determinan que algunos áridos son susceptibles de reaccionar con los componentes de la fase intersticial de hormigón. La observación de su textura antes y después del ataque denota la existencia de esta interacción.

Palabras clave: reacción álcali-sílice, degradación, expansión, mortero, SEM.

SUMMARY

The aim of this work is to contribute to the knowledge of the interactions between aggregates and the components of the interstitial phase of concrete and to determine whether those aggregates that are subsequently used in the manufacture of concrete are reagents and are therefore likely to undergo a progressive deterioration of their initial properties.

An initial petrographic study of each aggregate is performed in order to be able to determine its subsequent behaviour and reactivity under the influence of various factors. The potential reactivity of different siliceous aggregates (slates, gneiss, hornfels, granites, quartzite and serpentine) is then determined by a chemical method for evaluating the potential reactivity of aggregates and an accelerated method in mortar specimens, and finally the surface reactivity is investigated.

The results of these studies suggest that some aggregates are able to react with the components of the interstitial phase of concrete. The existence of this kind of interaction is confirmed by the results of the surface investigations before and after the basic reaction.

Keywords: alkali–silica reaction, degradation, expansion, mortar, SEM.

^(*) Universidad de Burgos (Burgos, España).

^(**) Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX-Ministerio de Fomento) (Madrid, España).

1. INTRODUCCIÓN

Una reacción álcali-silicato se produce cuando interactúan áridos, que contienen minerales silicatados potencialmente reactivos, con los álcalis del cemento. Esta reactividad lleva consigo la formación de geles que en presencia de humedad se expanden, manifestándose en agrietamientos y movimientos diferenciales y con ello, una disminución drástica de la durabilidad (1-5) Por tanto, este proceso viene determinado en gran medida con la humedad relativa del ambiente y la tensión mecánica a la cual esta sometida cada elemento estructural (6-11).

Las fases de la reacción árido-álcali se pueden dividir en dos: el primer paso de neutralización de los radicales Si-OH a través de una reacción tipo ácido-base, donde las cargas terminales son equilibradas por iones Na^+ , teniendo en cuenta que la accesibilidad de los OH^- y el Na^+ está limitada por la dimensión de estas zonas y por lo separadas que se encuentren de la superficie de la partícula, y el segundo paso consiste en el ataque de los puentes siloxano (Si-O-Si) por parte de los iones OH^- , reacción que lleva implícita una progresiva desintegración de la estructura (Figura 1).

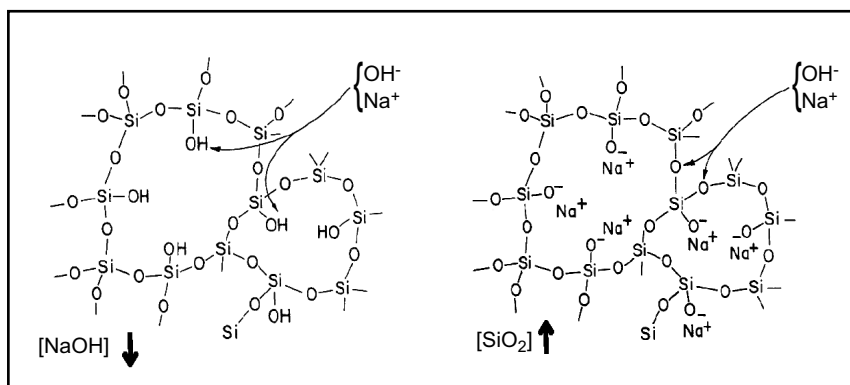


Figura 1. Fases de la reacción árido-álcali.
Figure 1. Phases of the alkali-aggregate reaction.

Antes de comenzar con los ensayos de reactividad se realizó la descripción petrográfica (clasificación, textura y mineralogía) de cada árido, que nos ayudará a justificar si son o no susceptibles de reaccionar frente a compuestos alcalinos.

Se ha estudiado el comportamiento de los áridos silicatados frente a disoluciones acuosas básicas de hidróxido sódico, $\text{Na}(\text{OH})$ en los métodos normalizados, y de hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el método de reactividad superficial. Los resultados de este ataque básico se han analizado mediante tres métodos:

- Método químico S/UNE-EN 146507-1 EX, que consiste en el ataque básico de los áridos y posterior medida

1. INTRODUCTION

An alkali-aggregate reaction occurs when aggregates interact with reactive silica-containing cements with high alkali content. This reactivity, which is associated with the formation of gels in the presence of moisture, produces an expansion that results in the formation of ruptures and differential movements, thereby causing a drastic reduction in strength and durability (1-5). This process is therefore strongly dependent on the environmental relative humidity and the mechanical stress to which each sample is exposed (6-11).

The alkali-aggregate reaction can be divided into two phases. The first of these involves neutralization of Si-OH radicals in an acid/base-type reaction, where the terminal charges are balanced by Na^+ ions and the accessibility of OH^- and Na^+ ions is restricted by the size of these cavities and by their separation on the particle's surface, and the second involves the attack of OH^- anions on the Si-O-Si bridges, which results in collapse of the structure (Figure 1).

Before starting the reactivity experiments was carried out petrographic description (classification, texture and mineralogy) of each aggregate, which will help us to determine the subsequent possible alkali reactivity.

The behaviour of siliceous aggregates (slates, gneiss, hornfels, granites quartzite and serpentines) in the presence of basic NaOH or $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solutions has been studied by three points of view:

- Chemical attack analysed by the S/UNE-EN 146507-1 EX method, which consist in quantify the residual

de la concentración de Na(OH) que se consume (expresado en forma de Na₂O) frente a la sílice que se solubiliza.

- *Ensayo acelerado en probetas de mortero S/UNE-EN 146508:99 EX* empleando como arena los áridos estudiados y relacionando su reactividad con la expansión producida en dichas probetas tras ser atacadas en las mismas condiciones y concentración que en el método anterior.
- *Método de reactividad superficial*, utilizando difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido (SEM) para comprobar posibles cambios en la superficie del árido antes y después del ataque, y así poder comparar con los resultados de los métodos normalizados.

Los áridos estudiados en este trabajo se encuentran reflejados en la Tabla 1, todos ellos procedentes de la zona noroeste de la Península Ibérica.

alkali in solution (expressed in terms of Na₂O concentration) versus silica solubilised in the process.

- *Accelerated method in mortar bars (S/UNE-EN 146508:99), which compares the reactivity of aggregates with the expansion results produced by the same basic solutions employed in the chemical method.*
- *Surface reactivity method, by X-ray diffraction and scanning electron microscopy (SEM) to detect possible changes in the aggregate's surface before and after the attack.*

The aggregates studied in this work are listed in Table 1, all from the northwest area of the Iberian Peninsula.

Tabla 1 / Table 1
 Áridos estudiados.
 Aggregates studied.

Corneana azul 1 / <i>Blue hornfel 1</i>	Pizarra 1 / <i>Slate 1</i>
Corneana azul 2 / <i>Blue hornfel 2</i>	Pizarra 2 / <i>Slate 2</i>
Serpentina / <i>Serpentine</i>	Pizarra 3 / <i>Slate 3</i>
Cuarcita / <i>Quartzite</i>	Pizarra 4 / <i>Slate 4</i>
Gneis / <i>Gneiss</i>	Pizarra 5 / <i>Slate 5</i>
Granito 1 / <i>Granite 1</i>	Pizarra 6 / <i>Slate 6</i>
Granito 2 / <i>Granite 2</i>	Pizarra 7 / <i>Slate 7</i>
Granito 3 / <i>Granite 3</i>	

2. ESTUDIO DE LOS ÁRIDOS. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA

La clasificación petrográfica de los áridos se ha realizado en base al anexo A de la norma UNE-EN 932-3: *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos.*

Teniendo en cuenta la extensa variedad de áridos objeto de este estudio, no se reproducen sus descripciones petrográficas en detalle pero realizaremos a continuación un resumen de la composición fundamental mineralógica.

Debemos destacar la presencia en casi todos los áridos no pizarrosos de feldespato potásico, cuarzo con extinción ondulante y varios tipos de micas (biotita y moscovita), minerales todos ellos de gran relevancia (por su inestabilidad) en la posterior reactividad álcali-silicato.

En cuanto a las denominadas de manera genérica pizarras, se han clasificado como filitas o esquistos en función de su grado de metamorfismo, de menor a mayor

2. ANALYSIS OF AGGREGATES. MINERALOGICAL DESCRIPTION

Mineralogical classification of the aggregates was carried out based on UNE-EN 932-3. Annex A: Tests to determine the general properties of aggregates.

Due to volume and variety of aggregates we do not give complete petrographic descriptions in detail, but we make a summary with a fundamental mineralogical composition of all of them.

We have in almost non-slate aggregates, potassium feldspar, quartz with wavy extinction and several types of micas like minerals, all of them very important (because of its instability) in the subsequent alkali-silicate reactivity.

Concerning slates have been classified as phyllites or schists according to metamorphism degree, from low to high intensity, respectively. This difference will be

intensidad, respectivamente. Esta diferencia será importante a la hora de explicar posteriores comportamientos frente a la reactividad química. Se ha determinado que los componentes minerales fundamentales de estas filitas y esquistos son el cuarzo, micas (biotita y moscovita) y clorita (en diferentes proporciones según el material), lo que se corresponde en términos de elementos principales con la presencia mayoritaria de silicio, aluminio, hierro y potasio en todos los casos.

Como ejemplo se muestran los resultados de fluorescencia de todas las pizarras (Figura 2).

important to explain subsequent behaviours towards chemical reactivity. It has been determined that essential minerals of phyllites and schists are quartz, micas (muscovite and biotite) and chlorite (in different proportions depending on the material), which corresponds with the majority presence of silica, aluminium, iron and potassium in all cases.

As an example, we show the fluorescence of slates (Figure 2).

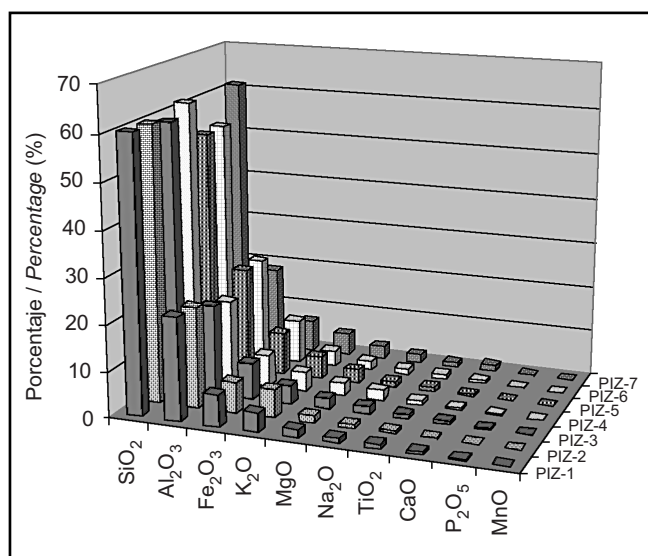


Figura 2. Resultados de fluorescencia para las pizarras ensayadas.
Figure 2. Fluorescence tests of the slates.

3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

3.1. Método químico para la determinación de la reactividad potencial de áridos S/UNE-EN 146507-1 (12)

Procedimiento experimental: se hacen reaccionar 25 g de cada muestra pulverizada (tamaños de partícula menores de 0,315 mm) con 25 mL de una disolución de Na(OH) $10^3 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$, a 80 °C y durante diferentes periodos de tiempo (1, 2, 3, 5 y 7 días). Transcurrido el tiempo la mezcla se filtra, determinando en la fase líquida tanto la concentración de sílice que se ha solubilizado en el proceso (mediante colorimetría) como la cantidad de Na(OH) que queda sin reaccionar (con espectrofotometría de emisión atómica de llama).

El resultado de este ensayo se expresa como el cociente o la relación molar de ambos valores: la concentración de SiO₂ solubilizada proveniente del árido silicatado

3. EXPERIMENTAL PROCEDURES AND RESULTS

3.1. Chemical method for determining the potential reactivity of aggregates (S/UNE-EN 146507-1 EX) (12)

Experimental procedure: A powdered, 25 g sample of each aggregate (particle size of less than 0.315 mm) was mixed with 25 mL of a $10^3 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ of NaOH solution at 80 °C for different times (1, 2, 3, 5 and 7 days). The mixture was then filtered and the concentration of soluble silica in the process and the amount of unreacted NaOH remaining in the liquid phase determined by spectrophotometry and flame atomic emission spectroscopy, respectively.

The results of this test are expressed as the coefficient, or molar ratio, of these two results, in other words the concentration of SiO₂ present in solution divided by

frente a la concentración de Na(OH) que se consume en el proceso (expresada en todos los casos en términos de concentración de Na₂O). La cinética de reacción, o lo que es lo mismo, la variación de dicha relación en función del tiempo se encuentra normalizada por lo que, incorporando los resultados de los áridos en estudio en la gráfica de la norma, determinaremos si cada árido resulta "no reactivo", "potencialmente reactivo" o "potencialmente reactivo con efecto pésimo". Las gráficas resultantes para todos los áridos los clasificaron como materiales "no reactivos" frente al método químico. Como ejemplo se muestran las gráficas obtenidas para las 7 pizarras ensayadas (Figura 3).

Sin embargo, resulta interesante estudiar por separado la concentración de sílice que se solubiliza en el proceso, ya que en todos los casos el aumento de SiO₂ que se va obteniendo en disolución es directamente proporcional al tiempo de ataque básico y se encuentra en concentraciones nada despreciables. Es decir, si analizamos únicamente los resultados de concentración en disolución de sílice a lo largo del tiempo en este método químico, podría estimarse que la reactividad de estos áridos es elevada. Este hecho puede verse en la Figura 4, donde se representan como ejemplo las edades de reacción de las 7 pizarras frente a la concentración de sílice soluble presente en el medio y proveniente del árido correspondiente.

Por tanto, este método químico tiene limitaciones que pueden deberse a un tiempo de ensayo corto (que no sea suficiente para liberar la cantidad de sílice que podrían aportar de continuarse la reacción), o a que existan minerales susceptibles de solubilizar álcalis en la disolución que puede falsear la medida del sodio en disolución, haciendo que ésta sea mayor a la esperada.

the concentration of NaOH consumed (expressed in terms of Na₂O). The reaction kinetics, in other words the variation of this ratio as a function of time, were standardized so that each aggregate could be classified as "unreactive", "potentially reactive" or "potentially reactive with serious effects" upon incorporation of its results into the graph. The plots obtained for the seven slates tested (Figure 3), and for the other aggregates, show that these materials are virtually unreactive according to this chemical method in all cases.

More interesting is to study the concentration of silica solubilized in the process separately, because increase of SiO₂ is directly proportional to the time of attack in all cases and this compound is present in solution in significant quantities. In other words, if we only analyse the soluble silica with time using this chemical method, we might consider that reactivity of these aggregates is high. This can be seen more clearly in Figure 4, which shows the concentration of silica formed with time for the seven slates.

Therefore, this chemical method is limited that may be due to a short experimental time (which is not sufficient to release the amount of silica that could be made if reaction continue the reaction), or because some aggregates have minerals capable of solubilise alkali which can distort the measurement of sodium in solution, making this bigger than expected.

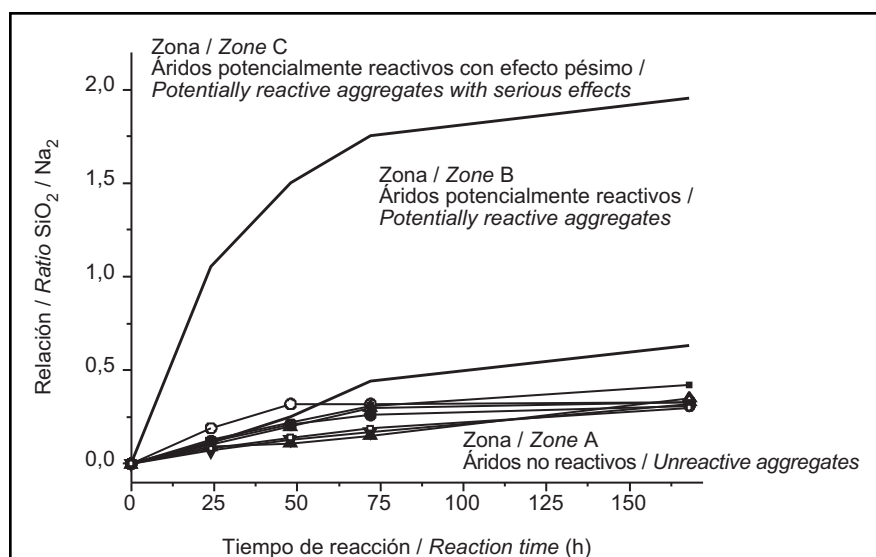


Figura 3. Reactividad alcali-silicato para todas las pizarras.
Figure 3. Alkali-silicate reactivity for the test slates.

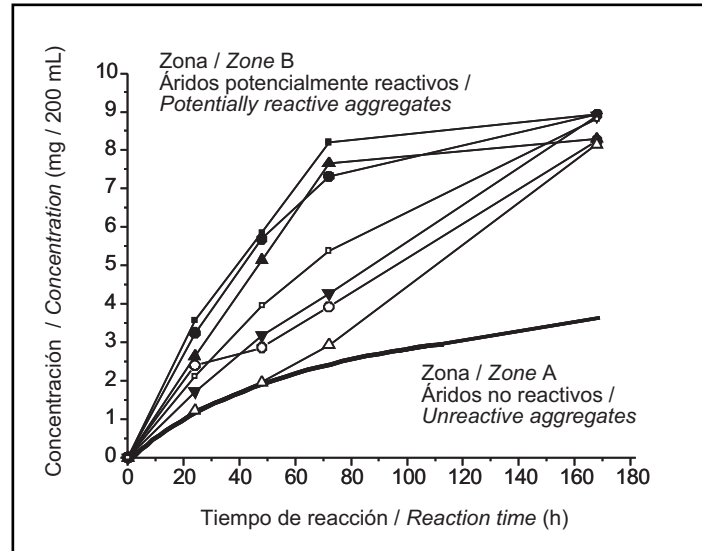


Figura 4. Concentración de sílice de las diferentes pizarras a lo largo del tiempo.
 Figure 4. Silicate concentrations in the different slates over time.

Por estas razones es necesaria la realización de un segundo ensayo (método acelerado en probetas de mortero) para poder concluir de manera definitiva si los áridos silicatados analizados son o no reactivos (13).

3.2. Método acelerado en probetas de mortero S/UNE-EN 146508:99 EX (14-15)

Procedimiento experimental: Este análisis consiste en fabricar tres probetas de mortero de dimensiones 25 x 25 x 285mm, con cada uno de los áridos. El cemento utilizado es un CEM I 52.5R UNE 80301:1996, que contiene únicamente clínker y regulador de fraguado, sin ningún tipo de adiciones con carácter minoritario, de contenido en álcalis medio (Na_2O_{eq} 0,74%). La relación cemento/árido es 1/2,25, y la relación agua/cemento de referencia 0,47, aunque en varios casos ha debido aumentarse para lograr la consistencia requerida en el ensayo (105-120 mm según UNE 83811). Las fracciones de árido empleadas se encuentran entre los tamaños de partícula de 5 mm y 0,16 mm.

De la misma forma que en el método anterior, estas probetas se someten al ataque de una disolución de NaOH 10^3 mol·m⁻³ y a 80 °C de temperatura midiendo la elongación de cada probeta a diferentes edades. Se evalúa la dilatación lineal porcentual tanto a 14 como a 28 días, obteniendo mediante este método diferencias muy significativas de reactividad (16-18).

En concreto, todas las pizarras, las dos corneanas, el gneis y la cuarcita resultan áridos reactivos (expansión a los 14 días mayor del 0,1%, Figura 5).

It was therefore necessary to use a second method (accelerated method in mortar bars) to determine whether the aggregates were reactive or not (13).

3.2. Accelerated method in mortar bars (S/UNE-EN 146508:99 EX) (14-15)

Experimental procedure: Three mortar bars, in size 25 x 25 x 285mm, were prepared for each aggregate with a cement type CEM I 52.5R UNE 80301:1996, containing only clinker and retardant, without additions and alkali average content (Na_2O_{eq} 0.74%). The cement/aggregate relation is 1/2.25, and the reference water/cement 0.47, although in several cases has been increased to reach the consistency required normalized (105-120 mm according UNE 83811). Particle size of aggregates is between 0.5 mm and 0.16 mm.

In the same way that chemical method, we attack with a 10^3 mol·m⁻³ NaOH solution in an oven at 80 °C. The increase in the length of each specimen with time was measured at 14 and 28 days. Significant differences in chemical reactivity were observed (16-18) with all slates, two hornfels, the gneiss and the quartzite being found to be reactive (expansion at 14 days of more than 0.1%; (Figure 5).

La elevada reactividad de las pizarras podría deberse a la presencia de microcristales de cuarzo, que tienen gran superficie específica además de zonas con dislocaciones en la red cristalina, es decir, fases vítreas que facilitan el inicio y progreso de la disolución de sílice.

En el caso del gneis y de las dos corneanas, la presencia de feldspatos potásicos alterados a filosilicatos y en la cuarcita el cuarzo con extinción ondulante, podría ser la causa de la elevada reactividad.

The high slate reactivity could be due to the presence of microcrystal of quartz, which has large specific surface in addition to dislocations in the crystalline zone which means that amorphous phases allow an initial silica solution and later the progress of alkali attack.

Likewise, in the case of the gneiss and two hornfels, the presence of potassium feldspar changed to phyllosilicate, and in quartzite altered to quartz with wavy extinction, could be the reason of the high reactivity.

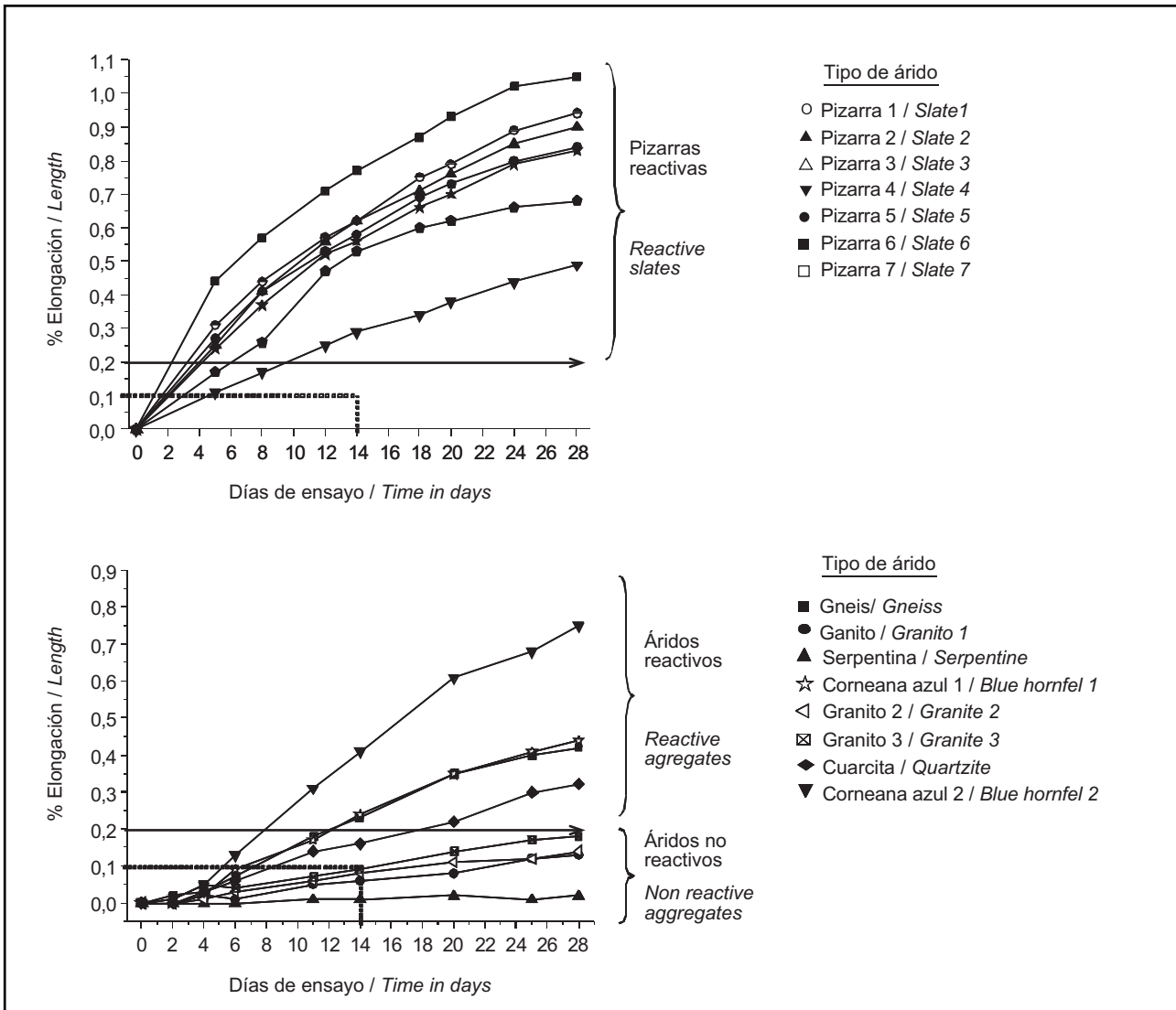


Figura 5. Resultados de expansión en probetas de mortero atacadas con NaOH.
 Gráfica superior: pizarras. Gráfica inferior: resto de áridos.
 Figure 5. Results of expansion in the mortar specimens attacked by NaOH.
 Graph (upper left): slates. Graph (lower left): other aggregates.

Los resultados obtenidos con este método resultan satisfactorios, aunque en el caso de áridos con expansiones próximas a la máxima establecida por la norma resulta conveniente prolongar el tiempo de ataque hasta los 28

Results obtained with this method are reasonable, although it is desirable to extend the time of attack further than standard required ensuring reliable results. Mainly due to the severity of the procedure and contrary

días para asegurar resultados fiables. Debido en gran medida a la severidad del procedimiento y en contrapartida con el método anterior, este método no admite dudas cuando clasifica los áridos como no reactivos, pero si el resultado es el de árido reactivo es conveniente confirmar el resultado.

3.3. Método de reactividad superficial: microscopía electrónica de barrido (SEM) y rayos X

Procedimiento experimental: consiste en atacar en superficie fragmentos de áridos con una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, es decir portlandita (compuesto alcalino liberado en el fraguado del cemento) estudiándose la misma superficie antes y después del ataque mediante microscopía electrónica de barrido acoplada a análisis por energías dispersivas de rayos X (SEM).

Así, podemos apreciar si los áridos son o no reactivos dependiendo de los efectos que la reacción árido-álcali ha causado en cada superficie en un punto determinado (19-22). Por ejemplo, en el estudio de una de las corneanas se aprecia como se disuelve el cristal de biotita después del tratamiento alcalino (Figura 6). Por otro lado, comparando las superficies de los diferentes áridos se observa que en las pizarras se disuelve una cantidad apreciable de sílice y en los granitos se produce una importante sustitución de sílice por hidróxido cálcico. También la albita (feldspato) demuestra una elevada reactividad.

Por tanto, la observación de la textura superficial de los áridos antes y después del ataque denota la existencia de la interacción básica.

to the chemical method, this analysis is beyond question when classified a material as non-reactive aggregate, but if the result is an aggregate reactive to confirm the result is required.

3.3. Surface reactivity investigation: scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction

Experimental procedure: The surface reactivity was examined by treating different surfaces of aggregate fragments with a saturated solution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandite, alkaline compound released in cement's setting), and examining the area before and after treatment by scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM).

The results obtained upon studying the surfaces of the aggregates allowed us to determine whether an alkali-aggregate reaction had taken place (19-22). For example, it was clear upon studying one of the hornfels that the biotite crystals had dissolved upon base treatment (Figure 6). Furthermore, the silica was found to have completely dissolved in the slates and an important replacement of silica by calcium hydroxide had occurred in granite aggregates. Albite (feldspar) also shows a high reactivity.

Therefore, the observation of the surface textures of the aggregates before and after the attack evidence the basic interaction.

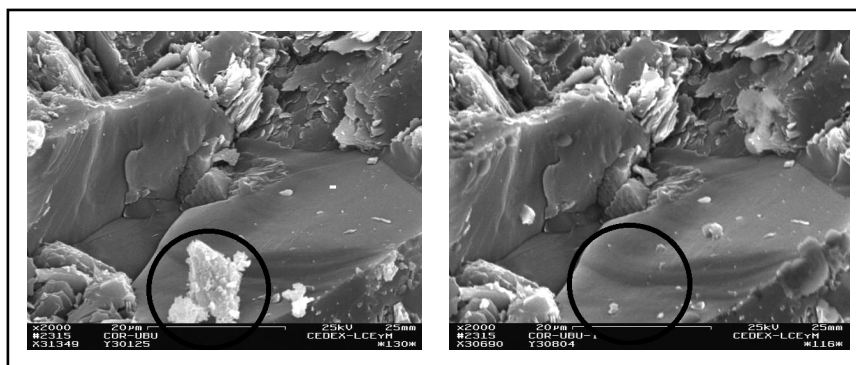


Figura 6. Resultado del ataque químico a una corneana, donde se observa la disolución del cristal de biotita después del tratamiento con una base.

Figure 6. Results of chemical attack on a hornfels showing biotite crystal dissolution after treatment with a base.

Se ha podido comprobar, tras observar fragmentos de las probetas de mortero con SEM, que el aumento de volumen obtenido en el método de las barras de mortero se debe a la aparición de geles (lisos o gruesos) calcoalcalinos producidos en el ataque básico. Como ejemplo, pueden verse en

The volume increase observed by the mortar bar method is due to the formation of calcoalcaline gels (smooth or coarse) during base treatment. As an example, Figure 7 shows two such structures, namely the "rose petals" and "calcoalcaline gels", found in all aggregates which undergo

la Figura 7 dos de los compuestos, el primero con forma de "pétalos de rosa" y el segundo un gel grueso, ambos de naturaleza calcoalcalina, encontrados en los áridos que han sufrido expansión lo que demuestra que son potencialmente reactivos en ambientes básicos.

Resumiendo, la observación al microscopio electrónico de las probetas de mortero y el método de reactividad superficial apoyan los resultados del método acelerado de probetas de mortero.

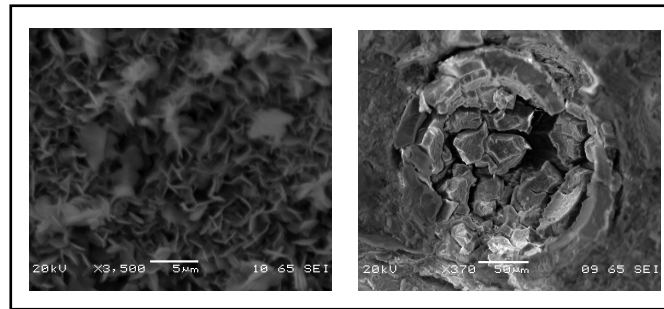


Figura 7. Geles silicoalcalinos encontrados en el análisis en superficie. Izquierda: pétalos de rosa. Derecha: gel grueso calcoalcalino.
Figure 7. Gels found on the surface. Left: Rose petals. Right: thick calco-calcine gel.

4. CONCLUSIONES

A la luz de los análisis realizados a tan amplio conjunto de áridos, podemos concluir que el método químico no supone una forma viable de evaluar la reactividad de áridos de naturaleza silicatada, pues ofrece resultados negativos de reactividad en áridos en los que se ha evidenciado la formación de geles expansivos y en definitiva de reactividad en el resto de métodos empleados.

La causa de esta disconformidad la encontramos en que este método de ensayo realiza la valoración de la reactividad en función de la relación de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, suponiendo que se solubiliza sílice del árido mientras que se consume NaOH en el ataque. Pero debe tenerse en cuenta que existen fases minerales capaces de liberar potasio, y que el silicio muestra una mayor tendencia a formar silicatos con el potasio que con el sodio, que por tanto no reduce su concentración básica en la proporción inicialmente estimada.

La observación de la textura superficial de los áridos antes y después del ataque denota la existencia del ataque básico. El método de reactividad superficial revela la inclusión de hidróxido de calcio en las estructuras cristalinas, producto del intercambio iónico entre los minerales de los áridos y la fase intersticial el hormigón, de forma que se produce una ganancia de calcio, a partir del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la disolución de ataque.

El método de las barras de mortero resulta sencillo y fiable para determinar la reactividad de los áridos silicatados. Debido a la complejidad de este tipo de procesos

expansion and are therefore potentially reactive under basic conditions.

In short, the observation of the surface mortar specimens and surface reactivity aggregates, both analysed by electron microscope, supports the results of the accelerated method in mortar bars.

4. CONCLUSIONS

The results obtained differ due to the wide variety of materials studied. However, in summary, it has been shown that chemical method is not the best way to determinate the basic reactivity of silica aggregates, because provide negative reactivity in aggregates that shown gel formation and expansive reactivity in the rest of employed methods.

Disagreement derive that the fact of this test method measure the aggregates reactivity in terms of $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ relation, assuming that silica is solubilised in the same way that $\text{Na}(\text{OH})$ is consumed in the reaction. But it should be considered that there are mineral phases capable of release potassium, and silica show a higher tendency to form silicates with potassium than with sodium, which means that initial alkali concentration does not decrease in the amount initially estimated.

The observation of the surface texture of aggregates before and after the experiment indicates the existence of the basic attack. Furthermore, a greater degree of surface attack and an increase in the inclusion of calcium hydroxide in the crystal structures are also produced by this surface-attack method.

In summary, it we can therefore conclude that the accelerated mortar bar is a simple and reliable way of determining the reactivity of aggregates. Due to the

álcali-silicato, es conveniente complementar este ensayo con un análisis petrográfico previo, y posteriormente el análisis de reactividad superficial, para finalmente predecir si un árido será o no reactivo frente a disoluciones alcalinas, es decir, si será o no alterable frente a posibles reacciones álcali-árido, y, por tanto, susceptible de reaccionar con la fase intersticial del hormigón.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Junta de Castilla y León la ayuda económica para el desarrollo del trabajo. Proyecto: BU 002A06, "Áridos reactivos. Acción del hidróxido cálcico sobre fases minerales silicatadas".

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Menéndez, E.; Soriano, J.: "Procesos expansivos del hormigón: ensayos árido-álcali, ataque por sulfatos, hielo deshielo. Sistemas de prevención y actuaciones" (CEMCO) (2007).
- (2) Rear, K.; Meinhart, D. F.: "Alkali-aggregate reactivity. A summary". PCI Committee on Durability, *PCI Journal*, Nov-Dec 1994.
- (3) Dent Glasser, L. S.; Kataoka, N.: "The chemistry of alkali-aggregate reaction", *Cem. Concr. Res.*, 11 (1981), 1-9. doi:10.1016/0008-8846(81)90003-X
- (4) Glasser, F. P.: "Chemistry of the alkali-aggregate reaction", in: R. N. Swamy (ed.), *The Alkali Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Son Ltd., Glasgow, UK (1992), pp. 30-53.
- (5) Soriano, J.: "Influencia de la naturaleza mineralógica de las adiciones en el comportamiento de la pasta endurecida de cemento Pórtland", *Revista de Obras Públicas* (1981).
- (6) Stanton, T. E.: "A study of alkali-aggregate reactivity", *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, vol. 66 (1940), pp. 1781-1792.
- (7) Menéndez, E.: "Deterioro de materiales artificiales I. Reacción álcali-árido". *La humedad como patología frecuente en la edificación*. Ed. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid (1993).
- (8) Hobbs, D. W.: "Alkali-silica reaction in concrete". Ed. Thomas Telford, London (1988).
- (9) Soriano, J.; Riesgo, L.: "Áridos reactivos". *Revista de Obras Públicas*, 967-972, 1984.
- (10) Soriano, J.: "Influencia de la naturaleza mineralógica de las adiciones en el comportamiento de la pasta endurecida de cemento Pórtland", *Revista de Obras Públicas* (1981).
- (11) Puertas, F.; Gutiérrez, R.; Fernández, A.; Delvasto, S.; Maldonado, J. "Alkaline cement mortars: chemical resistance to sulfate and seawater attack", *Mater Construcc.*, vol. 267 (2002), pp. 55-72.
- (12) Norma UNE 146507-1 "Método químico para la determinación de la reactividad potencial de áridos".
- (13) Durand, B.; Berard, J.; Roux, R.; Soles, J. A.: "Alkali-silica reaction: the relation between pore solution characteristics and expansion test results", *Cem. Concr. Res.* 20 (1990), pp. 419-428. doi:10.1016/0008-8846(90)90032-S
- (14) Norma UNE 146508:99 EX "Método acelerado en probetas de mortero".
- (15) ASTM C 1260-94, Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method), Annual Book of ASTM Standards v. 04.02, Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1999), pp. 650-653.
- (16) Yi, C. K.; Ostertag, C. P.: "Mechanical approach in mitigating alkali-silica reaction" *Cem. Concr. Res.*, 35 (2005), pp. 67-75. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.017
- (17) Clayton, N.: "The effects of alkali silica reaction on the strength of pre-stressed concrete beams", *Struct. Engr.* 68 (1990), pp. 287-292.
- (18) McGowan, J. K.; Vivian, H. E.: "Studies in cement-aggregate reaction, XXIII: The effect of superincumbent load on mortar bar expansion", *Aust. J. Appl. Sci.* 5 (1954), pp. 94-97.
- (19) Ben Haha, M.; Gallucci, E.; Guidoum, A.; Scrivener, K. L.: "Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis", *Cem. Concr. Res.* 37 (2007), pp. 1206-1214. doi:10.1016/j.cemconres.2007.04.016
- (20) Aardt, J. H. P. and Visser, S.: "Formation of hydrogarnets: calcium hydroxide attack on clays and feldspars", *Cem. Concr. Res.*, vol. 7 (1977), pp. 39-44. doi:10.1016/0008-8846(77)90006-0
- (21) Aardt, J. H. P.; Visser, S.: "Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement aggregated reactions", *Cem. Concr. Res.*, 7 (1977), pp. 643-648. doi:10.1016/0008-8846(77)90046-1
- (22) Way, S. J.; Cole, W. F.: "Calcium hydroxide attack on rocks", *Cem. Concr. Res.*, 12 (1982), pp. 611-617. doi:10.1016/0008-8846(82)90022-9

* * *