

1. INTRODUCCIÓN

La reacción árido-álcali es una patología que puede producirse en las estructuras y elementos de hormigón con el tiempo, dependiendo de los componentes de este y de las condiciones medioambientales a las que esté expuesto. Dentro de la reacción árido-álcali se incluye la reacción sílice-álcali, que se produce entre los áridos de naturaleza silíceo y los álcalis del hormigón y la reacción carbonato-álcali, que se produce entre los álcalis del hormigón y áridos de naturaleza dolomítica. Sin embargo, la reacción carbonato-álcali prácticamente no tiene incidencia y en muchos casos se considera que no está bien diagnosticada y que se trata de reacción silicato-álcali, por la presencia de inclusiones de partículas silíceas en áridos de naturaleza calcárea.

Si se analiza estadísticamente la aparición de fallos en el proceso de construcción, estos se asocian fundamentalmente con la fase de proyecto. En segundo lugar, se asocian con la ejecución y, en me-

nor medida, con las características de los materiales y su uso. Estas estadísticas son similares a nivel español y europeo, como se puede observar en los valores medios, recogidos en la Figura 1.

La fisuración del hormigón es atribuible a numerosas causas. Las fisuras pueden afectar solo a la apariencia o pueden indicar fallos estructurales significativos o problemas de durabilidad. Las fisuras pueden representar la totalidad del daño, pero también pueden señalar problemas de mayor magnitud. Su importancia depende del tipo de estructura, así como de la naturaleza de la fisuración. Por ejemplo, fisuras que pueden ser aceptables para un edificio residencial pueden no serlo en el caso de una estructura para almacenamiento de líquidos.

Las reacciones expansivas de tipo árido-álcali se caracterizan por un tipo de fisuración ramificado, debido a que los procesos expansivos no tienen una dirección preferencial, salvo que estén influidos por otros factores como cargas, tensiones, etc. No obstante, es necesario definir qué se entiende por *fisura*. En las rocas naturales

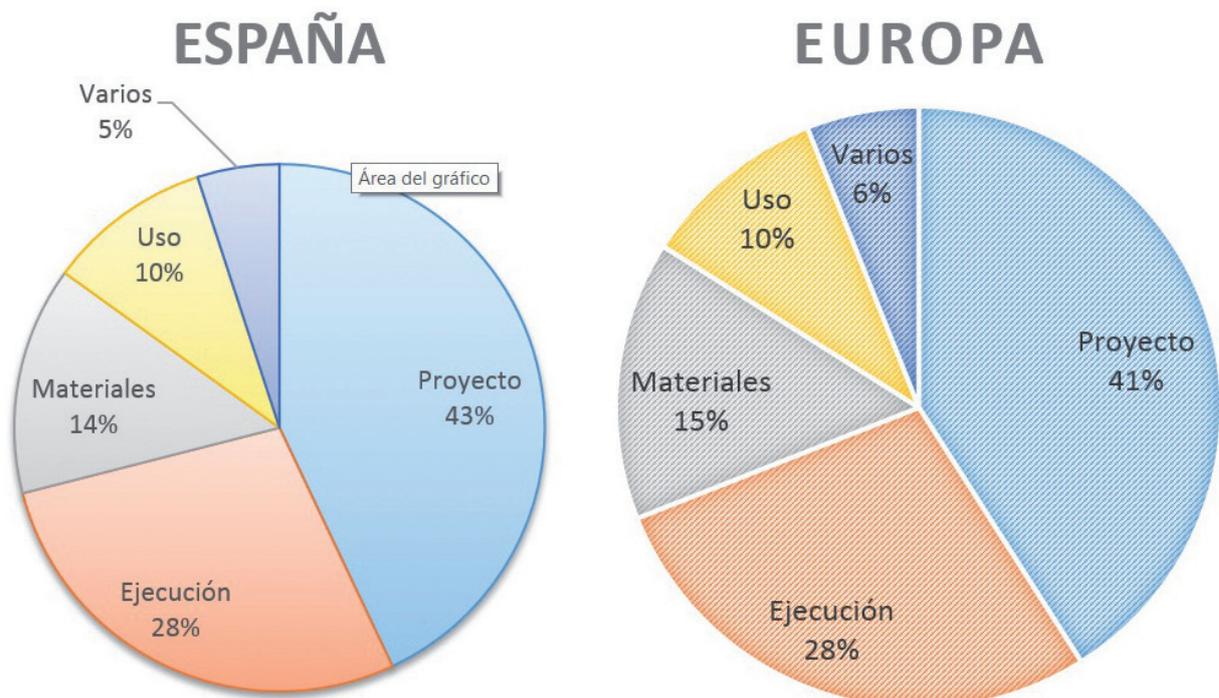


Figura 1. Proporción de fallos en construcción a nivel español y europeo (Bureau Veritas, 2013).

y en los materiales artificiales compuestos, como el hormigón, se pueden definir diferentes geometrías que constituyen los huecos presentes en el material, presentando cada tipo unas características propias en cuanto a dimensiones y aspecto. En materiales porosos pétreos se diferencia entre *poros*, *accesos* y *fisuras* de acuerdo con las dimensiones y características. Uno de los posibles criterios de clasificación es el que se recoge en la Tabla 1 (E. Menéndez, 2013a y 2013b).

La fisuración juega un papel importante en la respuesta del hormigón a las cargas, tanto en tracción como en compresión. En los materiales de construcción se definen los tipos de fisuras en función de la dimensión de su diámetro, según se clasifican en la Tabla 2 (E. Menéndez, 2010, 2012a y 2013a).

Los poros de aire en el hormigón tienen generalmente una forma esférica o un aspecto irregular, dependiendo de la zona en la que se forman, por ejemplo, en interfases árido-pasta. Sin embargo, en el caso de las reacciones expansivas se forman fisuras ramificadas. En la Figura 2 se pueden observar numerosos poros de aire, en la imagen de microscopía electrónica de la izquierda, y pequeñas fisuras debidas a reacción árido-álcali en la imagen de esteomicroscopía de la derecha.

En el caso de la reacción árido-álcali, los poros actúan como cámaras de expansión cuando se produce la formación de geles expansivos en su proximidad. Sin embargo, para que se produzca la formación de fisuras, es necesario superar la resistencia a tracción del hormigón.

La microfisuración del hormigón, debido a la reacción árido-álcali, forma una redícula originada en el interior o en la superficie de los áridos reactivos, dependiendo de la morfología y de la porosidad de los áridos reactivos. Así mismo, dependiendo de si los áridos reactivos son finos o gruesos, se formará una redícula de fisuras característica, como las que aparecen en la Figura 3.

La fisuración microscópica del material se manifiesta a nivel de elementos de hormigón como una fisuración también reticular, si no está influenciada por acciones mecánicas específicas. El espesor de las fisuras visibles puede variar desde décimas de milímetros hasta centímetros. No obstante, es necesaria una adecuada diagnosis del origen de la fisuración, puesto que diferentes tipos de alteraciones pueden conllevar la aparición de fisuras con un aspecto similar. La expansión asociada a la reacción puede inducir la formación de importantes grietas y efectos adicionales como la apertura de juntas, desalineación de bloques y acodamiento de elementos mecánicos. En la Figura 4 se pueden ver algunos ejemplos de estos efectos en la presa de Fontana (Estados Unidos).

Tabla 2. Clasificación de fisuras en los materiales de construcción

Clasificación de fisuras	
Microfisuras	Menores de 0,2 mm
Pequeñas fisuras	Entre 0,2 mm y 0,5 mm
Fisuras	Entre 0,5 mm y 2 mm

Tabla 1. Clasificación de poros, accesos y fisuras en materiales pétreos porosos

Clasificación de huecos				
Poros	Tamaño	Microporo < 60µm	Mesoporo 60µm-2mm	Macroporo > 2mm
	Forma	Equidimensionales ($x \approx y \approx z$)		
Accesos	Tamaño	Microacceso < 7,5µm	Macroacceso > 7,5µm	
	Forma	Cilíndricas y cónicas ($x > y \approx z$)		
Fisuras	Tamaño	Longitud	Microfisura < 1mm	Fisura > 1mm
			Espesor	Microfisura < 1µm
	Densidad lineal	Nº. fisuras/longitud (μm^{-1})		
	Forma	Planares ($x \approx y > z$)		

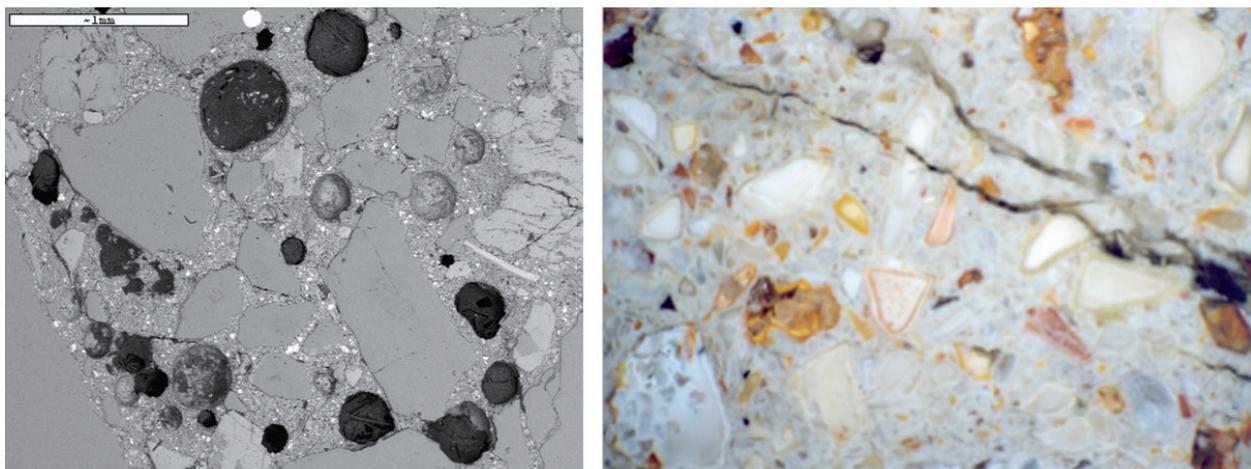


Figura 2. Poros y microfisuras en el hormigón.

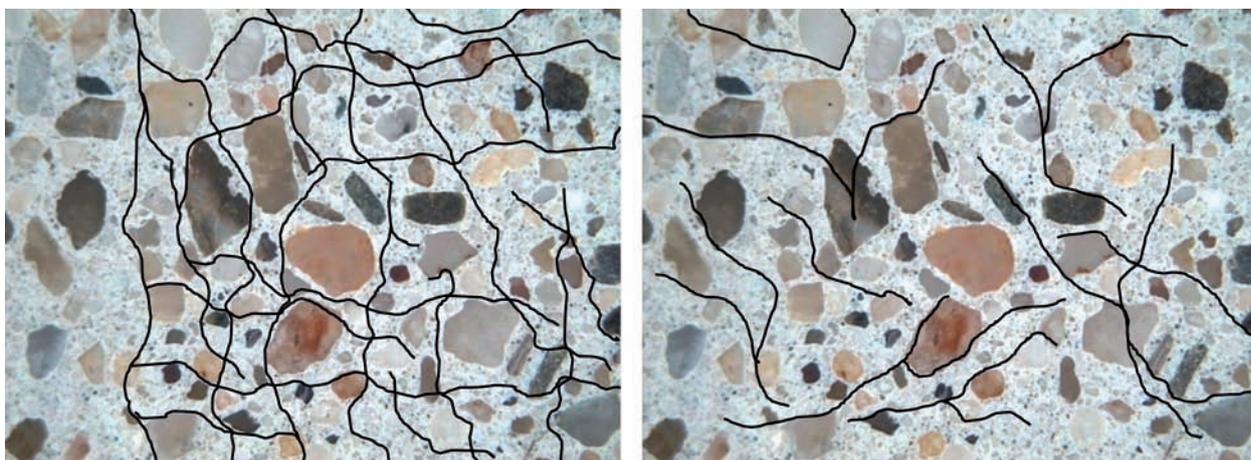


Figura 3. Patrón de fisuración por reacción árido-álcalis de áridos finos (izquierda) y de áridos gruesos (derecha) (BCA, 1998 y E. Menéndez, 2010).



Figura 4. Fisuración, desalineaciones y formación de grietas en la Presa de Fontana (Estados Unidos).

1.1. Incidencia de la reacción árido-álcali y su evolución en el tiempo

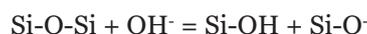
Las reacciones álcali-sílice y álcali-silicato son consecuencia de la reacción que se produce en los áridos síliceos (amorfos, poco cristalizado o policristalinos con cristalizaciones de sílice deformadas) por la acción de los álcalis. Por su parte, la reacción álcali-carbonato se considera que tiene una incidencia poco significativa en las estructuras de hormigón, y actualmente se cuestiona la incidencia de este tipo de reacción. En general, se asocia la reacción álcali-carbonato de áridos dolomíticos con la presencia de inclusiones de sílice reactiva o a la presencia de algunos tipos de arcillas [Katayama *et al.*, 2016]. Debido a esto las principales aportaciones en prevención de la reacción árido-álcali están relacionadas con la reacción sílice-álcali.

El esquema general del proceso fue establecido por Plum *et al.*, (1958), de acuerdo con la siguiente reacción:



En cuanto al mecanismo de expansión fue propuesto por [Chatterji *et al.*, 1986 y 1989, E. Menéndez, 2010]. La expansión se produce en seis pasos:

1. Con un pH igual o superior a 7, los iones hidroxilo penetran en las partículas reactivas. La penetración de iones se incrementa con un mayor pH y la fuerza iónica; si bien decrece la absorción de iones OH^- con el tamaño del catión hidratado asociado (K^+ , Na^+ , Li^+ , Ca^{2+}). Esto implica que se produce una menor penetración de iones OH^- cuando estos están asociados con el calcio.
2. Los cationes asociados con los iones OH^- entran en los granos de sílice reactiva con mayor facilidad cuanto más pequeños son (p.ej. Na^+ hidratado).
3. Los iones de OH^- que entran en los áridos atacan las cadenas de siloxanos, de acuerdo con la siguiente ecuación:



y producen una mayor apertura de los granos de sílice reactiva, lo que permite la difusión de la sílice fuera de estos.

4. La ratio de sílice difundido de los granos reactivos está en función del Ca^{2+} que se en-

cuentra en las zonas próximas, de tal manera que una mayor concentración de iones Ca^{2+} produce una disminución en la difusión de sílice.

5. El hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] incide de tres formas en el desarrollo de la reacción sílice-álcali:
 - a. acelera la penetración de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- y H_2O en el grano reactivo,
 - b. favorece la penetración preferente de Na^+ , OH^- y H_2O en el grano reactivo en presencia de disoluciones de NaCl , e
 - c. impide la difusión de los iones de silicato fuera del grano.
6. Cuando la cantidad neta de materiales (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- y H_2O) que entran en el grano de sílice reactiva excede a la cantidad de materiales que salen (SiO_2^-), se produce la expansión.

En lo relativo a la reacción carbonato-álcali, esta se produce entre los áridos dolomíticos (carbonatos cálcico-magnésicos) y los álcalis presentes en el hormigón.

La reacción árido-álcali es un fenómeno lento que puede empezar a manifestar alteraciones después de décadas de construidas las estructuras. Se han detectado estructuras afectadas por este fenómeno en todo el mundo, si bien es complicado disponer de una estadística fiable, ya que muchas estructuras no están diagnosticadas adecuadamente o ni siquiera se ha investigado el origen del daño observado. A nivel internacional se han documentado decenas de casos de alteración debido a reacción árido-álcali. Las estructuras más documentadas, con relación a este fenómeno, son las estructuras hidráulicas. Diversos estudios internacionales documentan casos a nivel mundial, que constituyen aproximadamente el 15% de las presas afectadas por algún tipo de alteración. En cuanto a la incidencia a nivel mundial de la reacción árido-álcali, se han documentados casos en prácticamente todos los países de Europa, en mayor o menor medida, en América (Estados Unidos, Canadá, Brasil, México y Argentina), en Asia (India, Pakistán, China y Tailandia), en África (Sudáfrica, Nigeria, Mozambique, Kenia, Zimbabue, Ghana y Uganda) y en Australia. En general, hay un mayor número de casos documentados en los países con un control más estricto de las estructuras, por lo que no puede descartarse que la distribución a nivel mundial sea más homogénea. Particularmente en el caso de las

presas, el mayor número de estructuras documentadas con reacción árido-álcali corresponde a Estados Unidos, Canadá, Sudáfrica y varios países europeos (Gran Bretaña, Noruega y Francia). [Menéndez, 2011a, 2013c y 2016a, Hydroworl, 2012, Ialad, 2012 y Acres, 2013].

En España durante muchos años se consideró que no había potencialidad de reactividad en los áridos, limitándose los casos conocidos a algunas estructuras hidráulicas. Sin embargo, esta suposición no era correcta y en los últimos veinticinco años se han diagnosticado numerosos casos de reacción álcali-silicato en distintos tipos de estructuras y elementos de hormigón. Además de presas, se han identificado en puentes, losas, pavimentos y elementos prefabricados. Estas alteraciones se han observado en distintas zonas de la península, asociadas fundamentalmente con áridos de origen granítico, granitoides, gneis, cuarcitas, areniscas, diabasas y algunas pizarras metamórficas, si bien estas últimas no suelen utilizarse como áridos en el hormigón. Aunque no se dispone de una estadística sobre la incidencia de la reacción árido-álcali en España, se puede considerar que el 3 - 5% de las estructuras hidráulicas están afectadas por reacciones expansivas internas, especialmente por reacción árido-álcali.

La incidencia del fenómeno de la reacción árido-álcali se ha estudiado especialmente en las estructuras hidráulicas, tanto por su especial singularidad en cuanto a las consecuencias del daño, como por tener grandes volúmenes de hormigón, lo que favorece la manifestación de las alteraciones asociadas con este tipo de fenómenos. Analizando los casos de alteración a nivel mundial por reacciones árido-álcali en presas con relación a su fecha de construcción,

se puede ver que la mayor parte de los casos se producen en estructuras construidas entre 1920 y 1970 (Figura 5 izq.), lo que está relacionado tanto con los años transcurridos para que se observe la alteración como con la velocidad de reacción de los áridos. Este mismo análisis, en España muestra una incidencia claramente destacada en las presas construidas entre 1950 y 1980 (Figura 5 dcha.), lo que coincide con el periodo de mayor número de construcción de presas. Por otra parte, el tiempo transcurrido desde el año de construcción ha permitido que los áridos de reacción lenta hayan generado suficientes productos de reacción como para observar, de forma clara, síntomas de daño, habida cuenta de que en España la mayoría de los áridos identificados en las estructuras hidráulicas afectadas por RAA se consideran de reacción lenta, como los granitos y las granodioritas.

En cuanto al tiempo de aparición de los síntomas de la reacción árido-álcali, depende esencialmente de la velocidad de reacción de los áridos, pero también de las condiciones de exposición ambiental y de las cargas a las que está sometido el hormigón. Continuando con el ejemplo de las estructuras hidráulicas, a nivel mundial se observa una distribución relativamente homogénea, debido a la variabilidad de los áridos en cuanto a velocidad de reacción (Figura 6 izq.). Sin embargo, en España el tiempo transcurrido hasta la aparición de los síntomas se concentra mayoritariamente entre quince y veinticinco años, lo que es característico de los áridos de reacción lenta, como los granitos que, como se ha indicado, se han utilizado en la mayor parte de las estructuras hidráulicas afectadas por RAA. (Figura 6 dcha.).

La evolución temporal de la reacción árido-álcali depende de varios factores que inciden en el

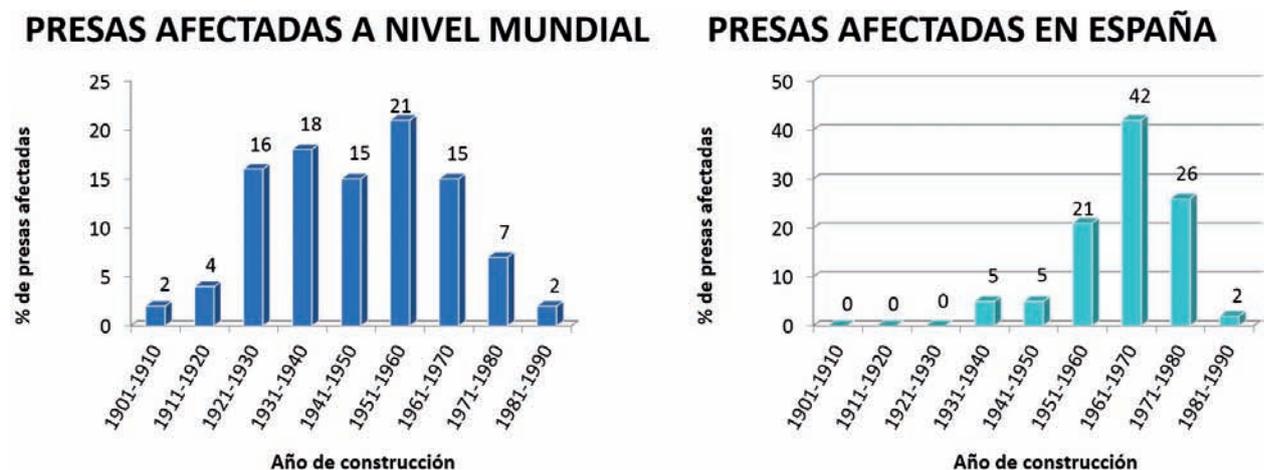


Figura 5. Presas afectadas por RAA a nivel mundial y en España, en función de la década de construcción.

tiempo transcurrido desde la aparición del daño, así como en el grado de alteración producido. Estos factores están asociados, principalmente, con el tipo, tamaño y distribución de los áridos reactivos, los álcalis libres presentes en el hormigón (procedentes fundamentalmente del cemento y, en menor medida, de otras fuentes como el agua de amasado, los álcalis extraídos de áridos o de adiciones, de otros componentes del hormigón o bien de un aporte externo), la presencia de agua o humedad y la forma en la que esta accede al hormigón (por capilaridad, filtrante, con presión o con arrastre), la temperatura, las cargas —especialmente la compresión— y de forma general, las condiciones a las que está expuesto el hormigón. En cuanto al tipo de exposición del

hormigón cabe destacar, además de la forma de acceso del agua o la humedad y de las cargas mecánicas, la incidencia que tienen factores como el viento o la insolación, que inciden sobre la temperatura del hormigón y que se produzcan ciclos de humedad-secado (Figura 7). [Menéndez, 2010 y 2016a].

1.2. La reacción árido-álcali en España

Durante años se ha considerado que la reacción árido-álcali no tenía una incidencia significativa en España. Sin embargo, esto era debido principalmente a que una gran parte de los áridos de la Península Ibérica son áridos de reacción lenta, por lo que mu-

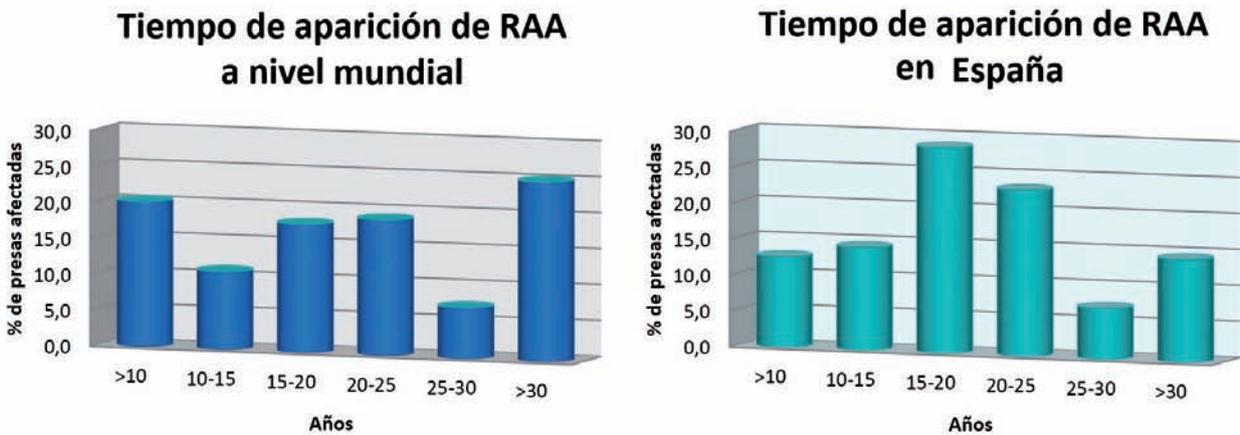


Figura 6. Tiempo transcurrido hasta la aparición de la RAA en presas a nivel mundial y en España.

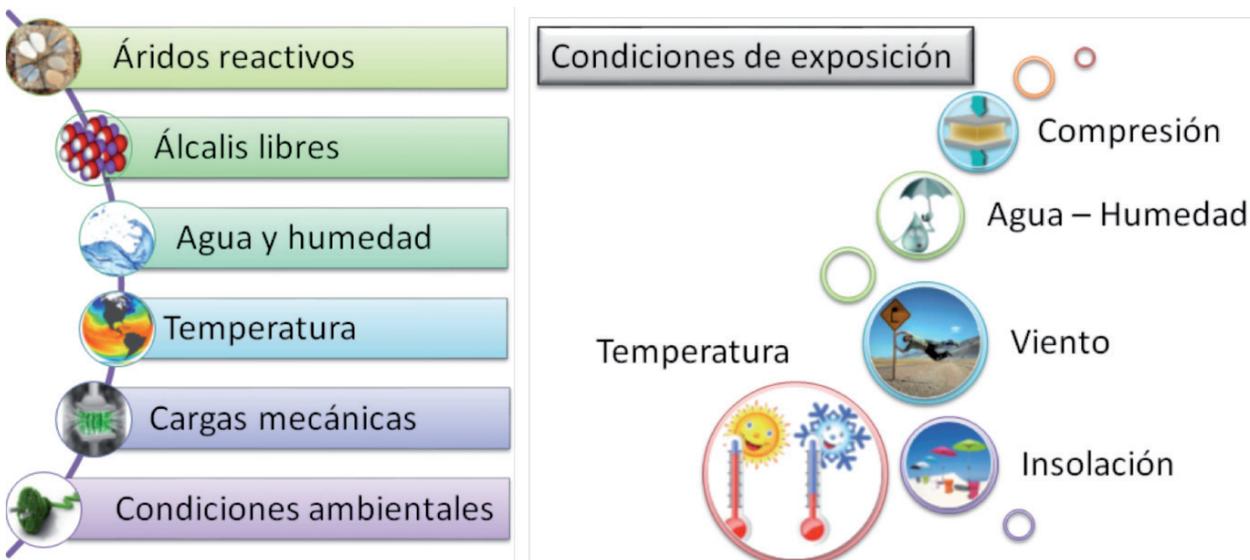


Figura 7. Factores que inciden en el tiempo de aparición y los efectos de la RAA.

chas de las alteraciones observadas han tardado en manifestarse más de 15-20 años, aunque también es debido a la deficiente identificación del fenómeno en algunas estructuras o elementos de hormigón.

Por otra parte, algunas de las primeras estructuras afectadas por reacción árido-álcali diagnosticadas corresponden a presas, en las que gran parte de los áridos son granitos. Estos áridos son de reacción lenta, sin embargo, el elevado volumen del hormigón de estas estructuras y la presencia constante de agua ha favorecido que se observasen las consecuencias de estos fenómenos expansivos y se identificase esta incidencia [Gil y Cajete, 1988, 1991; López *et al.*, 2002, Segarra, 2005 y Menéndez, 2011].

1.2.1. Tipología de áridos en la Península Ibérica

Si bien se analiza la incidencia de la reacción en España, la tipología de áridos es común en toda la Península Ibérica. En la Península hay tres tipos fundamentales de suelos y, por tanto, de áridos: silíceos, calizos y arcillosos (Figura 8). La zona silícea está situada principalmente en la mitad occidental de la Península, mientras que las zonas calizas y

arcillosas están inter-mezcladas en el sur, el norte y la zona oriental de la Península [IGME, 2018].

Las zonas silíceas se centran fundamentalmente en el Macizo Galaico Portugués, el Sistema Central, los Montes de Toledo y en Sierra Morena (Figura 9). En estas zonas silíceas es donde aparecen fundamentalmente los casos diagnosticados de reacción árido-álcali [IGME, 2018].

1.2.2. Áridos reactivos en España

Existen diversos listados de minerales y rocas potencialmente reactivas que contienen los áridos que han mostrado más frecuentemente problemas de reacción árido-álcali en el hormigón. Por otra parte, hay otros áridos que pueden contener en su composición algunos componentes susceptibles de reaccionar con los álcalis. Se distinguen *minerales* y *rocas potencialmente reactivas*. Los minerales corresponden a áridos de reacción rápida, mientras que las rocas normalmente contienen partículas reactivas en su composición. En las Tablas 3 y 4 se recogen a nivel internacional los principales minerales y rocas considerados potencialmente reactivos [Menéndez, 2010].

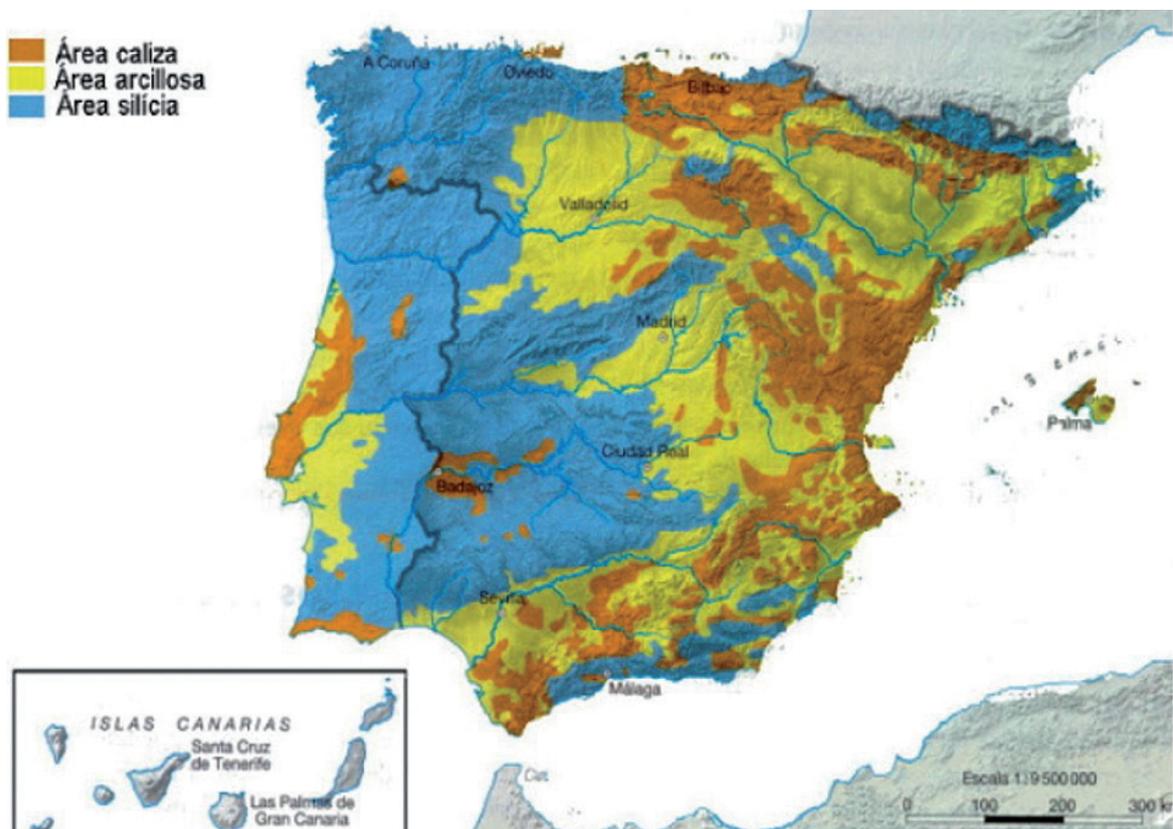


Figura 8. Tipología de suelos en la Península Ibérica [IGME, 2018].



Figura 9. Distribución de suelos en las distintas zonas de la Península Ibérica [IGME, 2018].

En España se ha observado reacción árido-álcali en estructuras de hormigón con distintas tipologías de áridos. Los áridos en los que se ha detectado reactividad son los que se indican a continuación.

- Áridos de tipo silíceo:
 - Granitos y granodioritas
 - Gneises graníticos
 - Cuarzitas
 - Areniscas
 - Feldespatos
 - Basaltos
- Áridos de tipo calizo: calizas con inclusiones de partículas silíceas, que contienen cuarzo con extinción ondulante.

Según la distribución de explotación de canteras en España, en el año 2012 había 4.200 canteras. De estas, las explotaciones relacionadas con

los áridos silíceos que han presentado reactividad, corresponden al 14,12% del total de explotaciones [ANEFA, 2012]. La distribución de estas canteras se distribuye de acuerdo con los porcentajes que se recogen en la Tabla 5.

Por su parte, el porcentaje de explotaciones de áridos calizos constituye el 28,14%, y de dolomitas el 1,46% [ANEFA, 2012]. De acuerdo con estos resultados, en España los áridos reactivos son fundamentalmente rocas polifásicas con partículas reactivas de sílice, por lo que estos se consideran de velocidad lenta.

1.2.3. Tipología de estructuras afectadas por reacción árido-álcali en España

Las principales estructuras afectadas por reacción árido-álcali en España están relacionadas fundamentalmente con los factores que afectan al desarrollo de la reacción. Estos factores son la presencia de agua o humedad, la temperatura y la exposición a condiciones ambientales sensibles. A partir de estos

Tabla 3. Listado de minerales potencialmente reactivos

Minerales potencialmente reactivos	Materiales reactivos
Ópalo	Contiene sílice amorfa
Calcedonia	Sílice microcristalina a criptocristalina, generalmente fibrosa
Algunas formas de cuarzo	- Microcristalino a criptocristalino - Cristalino, pero fuertemente fracturado, vetado y/o con inclusiones rellenas
Cristobalita	Cuarzo cristalino
Tridimita	Silíceos con pequeñas cantidades de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , tierras alcalinas y álcalis
Riolita, vidrio andesítico, productos desvitrificados criptocristalinos	Vidrio o material criptocristalino como la matriz de rocas volcánicas o fragmentos en tobas
Vidrios silíceos sintéticos	Vidrio

Tabla 4. Listado de rocas con minerales potencialmente reactivos

Rocas potencialmente reactivos	Materiales reactivos	
Magmáticas	Granito Granodionita	Cuarzo de red deformada que presenta extinción ondulante Minerales feldespáticos alterados, juntas de granos abiertas
	Riolita Dacita Andesita Traquiandesita Basalto	Presencia de vidrios silíceos o de vidrios basálticos más o menos desvitrificados, presencia de tridimita, cristobalita y ópalo
	Obsidiana Tobas volcánicas Retinita	Vidrios ricos en sílice más o menos desvitrificados con frecuencia microfisurados
	Metamórficas	Gneis Mica-esquistos
Cuarcitas Corneana		Presencia de vidrios silíceos o de vidrios basálticos más o menos desvitrificados, presencia de tridimita, cristobalita y ópalo
Sedimentarias	Arenisca Cuarcitas	Matriz silícea mal cristalizada. Juntas de granos alargadas
	Grauvaca, vacia gris Siltita Esquistos cuarzosos	Minerales filíticos asociados. Presencia de ópalo y de cuarzo microcristalino
	Radiolanitas	Presencia de calcedonia y de ópalo
	Sílex	Presencia de sílice tipo ópalo en micronódulos o diseminados en la red, asociados o no a sulfuros de origen sedimentario y a filitas
	Calizas Calizas dolomíticas Dolomitas	Dolomía, filosilicatos expuestos por desdolomitización

Tabla 5. Porcentaje de canteras con los distintos tipos de áridos reactivos utilizados en España [ANEFA, 2012]

Tipo de árido	Porcentaje de canteras con relación al total de canteras en España
Granito	6,54 %
Areniscas	3,37 %
Sílice	2,24 %
Cuarcita	0,64 %
Basalto	0,50 %
Feldespato	0,31 %
Arenas silíceas	0,26 %
Cuarzo	0,26 %

factores se detectan estructuras especialmente sensibles al desarrollo de la reacción árido-álcali, por su exposición a determinados factores que hacen que la reacción se desarrolle en mayor medida que para hormigones similares expuestos a otro tipo de condiciones.

Algunas de las estructuras sensibles que han desarrollado daños por reacción árido-álcali son las que se indican a continuación.

- *Obras hidráulicas:* Este tipo de estructuras está sometido a condiciones especialmente sensibles al desarrollo de la reacción árido-álcali debido a los siguientes aspectos:
 - Grandes volúmenes de hormigón: Favorece la acumulación de tensiones debido a la formación de productos expansivos
 - Presencia constante de agua: La presencia de agua hace que se produzca una mayor expansión en caso de formarse productos de reacción.
 - Presión hidrostática de agua: El agua accede a todo el volumen de hormigón por la presión hidrostática de la misma.
 - Zonas con distintas condiciones ambientales: Hay zonas con mayor insolación, viento, etc. que pueden incidir favoreciendo el desarrollo desigual de la reacción.
- *Elementos prefabricados de hormigón:* estos elementos de hormigón ven favorecido el desarrollo de la reacción árido-álcali debido fundamentalmente al incremento de temperatura durante el curado inicial. Si bien se han limitado las temperaturas de curado en los últimos años, un incremento inicial de la temperatura hace que se active la reacción y que el ambiente agresivo llegue con mayor facilidad a las partículas reactivas. Adicionalmente, las tensiones generadas durante el proceso de desmoldeo puede ocasionar la formación de pequeñas fisuras, lo que facilita la entrada de agresivos. En el caso de curados a temperaturas superiores a los 65-70° C puede producirse, simultáneamente, la formación de ettringita diferida y de reacción árido-álcali, favoreciendo una reacción a la otra. Si estos elementos están expuestos a la lluvia, ciclos de humedad-secado y temperatura elevada durante su vida útil, se favorece el desarrollo de la reacción árido-álcali.
- *Puentes:* se han observado alteraciones por reacción árido-álcali en pilas, tableros y pilonos. Al igual que en los elementos prefabricados, estos elementos están expuestos a la lluvia, a ciclos de humedad-secado y a temperatura elevada durante su vida útil, lo que puede favorecer el desarrollo de la reacción árido-álcali. En algunos casos la reacción árido-álcali ha aparecido asociada con el uso de sales de deshielo.
- *Pavimentos recubiertos con resina:* en este tipo de pavimentos se produce una concentración preferencial de álcalis cerca de la superficie, como consecuencia de la evaporación del agua superficial, quedando posteriormente confinado por la aplicación de una resina impermeable. Como consecuencia se forman expansiones localizadas cerca de la superficie que hace que salten conos (llamados *pop-outs*) de aproximadamente 1 cm de profundidad.