

## Una visión actualizada sobre la reacción álcali-sílice en Argentina y el diseño y construcción de estructuras de hormigón

C. Milanesi<sup>a\*</sup>, G. Giacco<sup>b</sup>, D. Falcone<sup>b</sup>, A. Giovambattista<sup>c</sup> y R. Zerbino<sup>d</sup>

<sup>a\*</sup>Cementos Avellaneda S.A. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. CP C1065AAA, Buenos Aires, Argentina. [cam@cavellaneda.com.ar](mailto:cam@cavellaneda.com.ar)

<sup>b</sup>Investigador. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires - Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, CP 1900, La Plata, Argentina. [ggiaccio@ing.unlp.edu.ar](mailto:ggiaccio@ing.unlp.edu.ar), [durabilidad@lemit.gov.ar](mailto:durabilidad@lemit.gov.ar)

<sup>c</sup>Consultor. CP 1900, La Plata, Argentina. [agiovambattista@gmail.com](mailto:agiovambattista@gmail.com)

<sup>d</sup>Investigador. CONICET, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires - Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. CP 1900, La Plata, Argentina. [zerbino@ing.unlp.edu.ar](mailto:zerbino@ing.unlp.edu.ar)

Recibido: 27 de abril de 2021

Aceptado: 19 de mayo de 2021

### RESUMEN

Argentina posee una vasta extensión geográfica y, por ende, una enorme variedad de agregados pétreos con los cuales es posible construir estructuras de hormigón seguras y durables. Sin embargo, bajo determinadas condiciones, ciertos agregados son capaces de reaccionar con los componentes químicos presentes en la solución de poros del hormigón y generar movimientos expansivos que pueden comprometer la aptitud en servicio de la estructura, su seguridad o la durabilidad del material. En el presente trabajo se hace un repaso de la experiencia adquirida en nuestro país sobre la reacción álcali-sílice (RAS), a 60 años del primer antecedente publicado a nivel local en esta temática. En particular se hace foco en los avances registrados en los últimos años en materia de normas y reglamentos con relación a las estrategias disponibles para el proyecto de estructuras de hormigón, con el propósito de controlar los efectos deletéreos de esta reacción.

**PALABRAS CLAVE:** Reacción álcali-sílice, métodos, ejemplos de obras, detección y prevención de la RAS

### ABSTRACT

Argentina has a vast geographical extension and a huge variety of natural aggregates with which it is possible to build safe and durable concrete structures. However, under certain conditions, some aggregates are capable of reacting with the chemical components present in the concrete pore solution and generating expansive movements that can compromise the serviceability of the structure, its safety or the durability of the material. This paper reviews the experience acquired in our country about alkali-silica reaction (RAS), 60 years after the first paper was locally published on this subject. It focusses on the progress made in recent years in matter of standards and specifications in relation to the available strategies for design of concrete structures, in order to control the deleterious effects of this reaction.

**KEYWORDS:** Alkali-silica reaction, methods, examples of structures, ASR detection and prevention

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Milanesi, C., Giacco, G., Falcone, D., Giovambattista, A., y Zerbino, R. (2021). Una visión actualizada sobre la reacción álcali-sílice en Argentina y el diseño y construcción de estructuras de hormigón. *Revista Hormigón*, 60, 16–35.

## 1. Introducción

Han pasado unas siete décadas desde que se verificó en Argentina el primer caso de una estructura de hormigón dañada por la reacción álcali-sílice (RAS). Se trató de las losas de pavimento del camino que une la ciudad de La Plata con Punta Lara, que había sido construido entre 1949 y 1950, y en las cuales pasados pocos años comenzaron a aparecer signos de alteración que provocaron el cierre de juntas y fisuras características. Más adelante el aumento de volumen llegó a provocar la superposición de losas, lo que obligó a realizar mantenimientos y reparaciones. La combinación de cementos con alto contenido de álcalis (> 1% en peso de cemento), arenas reactivas del Río Paraná y condiciones de humedad favorables dieron lugar a la reacción (Fig. 1). Esta situación hizo que se iniciaran en el LEMIT, en 1956, los primeros estudios sistemáticos sobre la RAS en nuestro país [1].

La RAS ha sido estudiada durante más de 60 años y se han informado casos de deterioro en más de 50 países en todo el mundo. En Argentina, después de la corrosión de las armaduras, constituye la principal causa de los problemas de durabilidad que afectan las estructuras de hormigón, pudiendo afectar su aptitud en servicio y su seguridad. El plazo de aparición de los daños varía entre unos pocos meses y varias decenas de años; existiendo ejemplos de edificios, puentes, presas, pavimentos y bases de hormigón dañado por la RAS, particularmente en países con clima húmedo y caluroso. Pero para que la RAS pueda desarrollarse, además de condiciones favorables de humedad, es necesario que exista en el hormigón un contenido mínimo de álcalis solubles y que los materiales silíceos que constituyen el agregado se encuentren en estado amorfo, criptocristalino o hayan estado sometidos durante su historia geológica a estados de deformación importantes.

La composición mineralógica de los agregados es uno de los principales factores que afectan a la RAS, la sílice amorfa (ópalo), la calcedonia, la cristobalita, la tridimita y el vidrio volcánico aparecen como los principales componentes reactivos



**Figura 1.** El camino La Plata - Punta Lara en 1988, según consta en los Anales del LEMIT [55].

que conducen a una velocidad de reacción rápida o normal y en estos casos, dependiendo de las condiciones ambientales, aparecen signos visibles de reacción en el hormigón a edades tan pequeñas como 1 año. También existen otros agregados procedentes de rocas graníticas y metamórficas, que incluyen especies minerales como el cuarzo tensionado y/o microcristalino, que necesitan períodos de inducción mucho más largos, generalmente superiores a 10 años [2-5].

Ha sido comprobado que conforme la cinética de la RAS se generan diferentes niveles de daño y fisuración en el interior del hormigón. Los agregados de reacción rápida, como los que contienen ópalo o calcedonia, inducen tensiones en las interfaces produciendo microfisuras. En el caso de los agregados considerados de reacción lenta, como aquellos con cuarzo tensionado, las reacciones se localizan dentro de los agregados en zonas intercristalinas donde puede llegar la solución de poros; es un proceso lento y el ataque no se generaliza alrededor de la superficie de las partículas [2-7].

En Argentina se ha verificado la existencia de una gran variedad de agregados potencialmente reactivos y se han documentado más de 100 ejemplos de estructuras dañadas ubicadas en diferentes climas. Desde la primera detección de la RAS se han aplicado diversos ensayos, tanto sobre rocas, morteros u hormigones, con el fin de encontrar las condiciones más adecuadas para evaluar a cada tipo de agregado; las metodologías exploradas incluyen diferentes temperaturas, contenidos de álcalis, tamaños de probetas y condiciones de exposición.

Este artículo trata sobre la experiencia sobre la RAS en Argentina y los criterios actuales para evitar o mitigar dicha reacción en las estructuras de hormigón. Inicialmente se realiza un breve recorrido histórico sobre los métodos de ensayo empleados y los reglamentos en los cuales la RAS ha sido considerada, para luego describir y ubicar geográficamente los principales agregados potencialmente reactivos en Argentina. En tercer lugar, se discuten unos pocos casos que fueron seleccionados con el fin de poner en evidencia cuáles son los criterios que debe tener un profesional al proyectar una estructura de hormigón. Finalmente se plantea una propuesta superadora para la detección y prevención de la RAS.

## 2. Un poco de historia

### 2.1. Aplicaciones de métodos normalizados

Pocos años después de haber detectado y comenzado a estudiar la RAS, en 1964, el Proyecto Argentino de Regulación de Estructuras de Hormigón (PRAEH) estableció los primeros métodos de ensayo para evaluar la aptitud de los agregados frente a la RAS y las prescripciones para evitarla. En los años posteriores se fueron incorporando nuevos métodos con el fin de mejorar los criterios de evaluación y prevención. Desde 2012, el CIRSOC 201-2005 actualmente en vigencia [8] admite la evaluación de estructuras en servicio como un elemento de referencia para evitar daños por RAS. Sin embargo, las normas IRAM 1512 (2013) y 1531 (2012) [9-10], aún vigentes, introdujeron nuevos criterios sobre el tema a nivel de los reglamentos más actuales, que no están reflejados en el CIRSOC 201-2005 [9-15].

Por años, la búsqueda de un ensayo ideal, de carácter universal (aplicable a cualquier tipo de agregado, confiable y rápido), ha mantenido ocupados a numerosos investigadores en todo el mundo haciendo que los métodos y los límites de aplicación deban ser revisados con frecuencia [16-20].

En este apartado, se resume el desarrollo histórico de las reglamentaciones y métodos utilizados para la detección y prevención de la RAS en Argentina.

Los primeros métodos empleados en la evaluación de la reactividad alcalina potencial de los agregados fueron el examen petrográfico (IRAM 1649) [21] y el método de la barra de mortero (IRAM 1637) [22]. El examen petrográfico debe ser el primero a realizar para identificar si un agregado contiene componentes reactivos; en la actualidad tanto el CIRSOC 201-2005 [8] como las normas IRAM 1512 e IRAM 1531 vigentes [9-10] lo posicionan como un criterio definitorio, en caso de contener componentes deletéreos por encima de los límites establecidos el agregado se define como potencialmente reactivo más allá de cual fuere su desempeño posterior en los ensayos de mortero u hormigones. La tendencia mundial actual, como algunas propuestas recientes [23-25] lo ubican como un método complementario (esto es, necesario pero no suficiente) que no define la reactividad del agregado pero ayuda a seleccionar los métodos físicos más convenientes para su evaluación.

El método de la barra de mortero IRAM 1637 (similar a la norma ASTM C227) [22] se redactó siguiendo las recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation y del ACI; en 1964 se incorporaron al PRAEH los criterios para prevenir la RAS. Cabe destacar que la norma IRAM 1637 posee gran importancia histórica, su metodología se aplicó durante muchos años para evaluar estructuras relevantes como el dique Salto Grande (1963) en el río Uruguay, el túnel subfluvial Paraná-Santa Fe (1965), la presa de El Nihuil, la presa de El Chocón y el aeropuerto de Ezeiza, entre muchos otros. Los resultados del método de la barra de mortero se correlacionan bien con la experiencia práctica en el caso de los agregados de reacción rápida pero, como limitación, no detecta los casos de reacción lenta. Además, demanda mucho tiempo (6 a 12 meses) para definir el grado de reactividad de un agregado [1,4,26].

Más adelante, en la década del 80, se detectaron en Sudáfrica evidencias de la RAS en presas de hormigón luego de más de 50 años en servicio. Dichas estructuras se habían construido con agregados graníticos que cumplieron satisfactoriamente los requisitos de la norma ASTM C227. Los estudios realizados en el National Building Research Institute (NBRI, por sus siglas en inglés), mostraron que la RAS fue producto de la presencia de cuarzo tensionado contenido en agregados graníticos. El método acelerado de la barra de mortero (NBRI) se aplicó en Argentina desde mediados de la década del 80 [18,27,28] y corresponde a las normas IRAM 1674 [29] y ASTM C1260 [30].

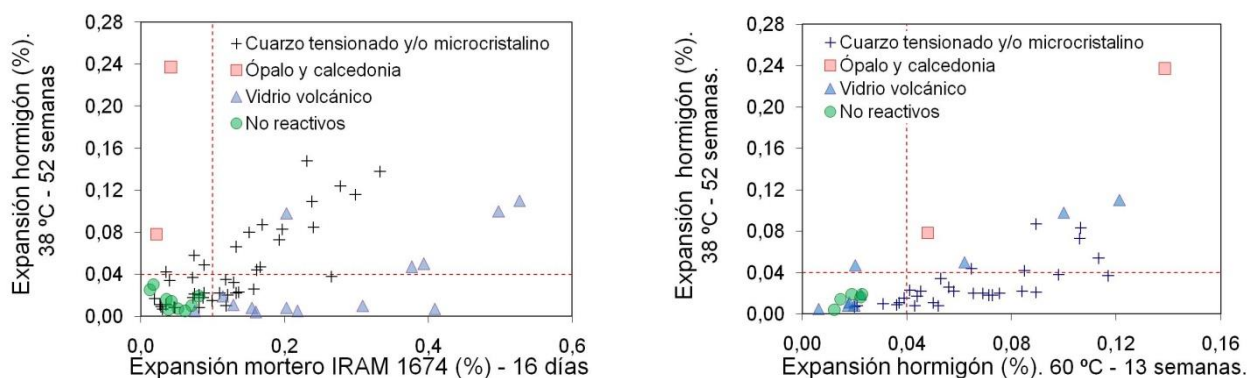
Si bien el método NBRI es seguro y detecta casos de reacción lenta, también puede clasificar como potencialmente reactivos a algunos agregados inocuos [19]. Por tal motivo en los años siguientes se propusieron métodos alternativos [31]. Uno de ellos es el método del prisma de hormigón que fuera desarrollado en Canadá y luego adoptado por las normas IRAM 1700 [32] y ASTM C1293-95 [33]. En Argentina se ha generalizado la aplicación de los métodos IRAM 1674 e IRAM 1700.

En la Fig. 2 (izquierda) se comparan resultados obtenidos en el LEMIT a través de ensayos de expansión realizados sobre una gran variedad de agregados de Argentina, siguiendo los métodos establecidos por las normas IRAM 1674 y IRAM 1700. Es interesante notar que el ensayo de la barra de mortero puede dar resultados falsos negativos

para algunos agregados con minerales con ópalo, calcedonia o cuarzo tensionado.

En 2007 se inició en el LEMIT [34] un amplio programa de estudios destinado a evaluar el desempeño de un método acelerado para determinar la reactividad alcalina potencial de los agregados, basado en el método tradicional del prisma de hormigón (IRAM 1700). Este método consiste, básicamente, en acelerar el proceso de reacción a través de un incremento de la temperatura de almacenamiento de los prismas de ensayo (60 °C), bajo condiciones de alta humedad. Las conclusiones de este estudio [35], luego de ensayar más de 50 muestras de agregados gruesos y finos, de muy diversa reactividad (con ópalo, calcedonia, vidrio volcánico y cuarzo tensionado, entre otros), permiten afirmar que esta alternativa es de sencilla implementación y permite calificar la reactividad alcalina potencial de un agregado en 13 semanas, reduciendo los plazos del método tradicional del prisma de hormigón, con una confiabilidad muy superior a la del método NBRI (IRAM 1674). La cantidad de aciertos es significativamente mayor y se reduce sensiblemente la cantidad de falsos negativos.

La Fig. 2 (derecha) compara las expansiones medidas a 52 semanas siguiendo el método tradicional de prismas de hormigón (38 °C) con las expansiones a 13 semanas de prismas similares almacenados a 60 °C. Esta prueba acelerada ha sido incluida en la última versión de la norma IRAM 1700. Cabe destacar que, si bien la norma IRAM 1700 es



**Figura 2.** Relaciones entre las expansiones medidas en diferentes ensayos acelerados para diferentes agregados característicos de diversas regiones de Argentina.

muy similar a la ASTM C1293, existen algunas diferencias en el acondicionamiento de los prismas adoptado en la norma argentina, las cuales han sido en busca de prevenir cuestiones vinculadas con los cambios de humedad y la posibilidad de evitar la lixiviación de álcalis, en línea con lo indicado por el comité AAR-3 de RILEM [34].

El CIRSOC 201-2005 [8], aún vigente, considerando la recomendación de la Portland Cement Association y la de la American Concrete Pavement Association de 1998, incorporó como criterios para valorar la potencialidad de la RAS la evaluación de estructuras en servicio, el análisis petrográfico (presente en la norma IRAM 1649 [21] y que tiene su correlato en la norma ASTM C295 [37]) y la medida de expansiones mediante el uso de los métodos previstos en las normas IRAM 1674 e IRAM 1700.

Es de destacar que la norma IRAM 1874-02 [38], "Agregados para hormigones. Evaluación de estructuras en servicio. Parte 2: Reacción álcali-sílice", fue desarrollada localmente y no existe una norma ASTM equivalente. En la misma se establecen las condiciones para las cuales se pueden emplear los antecedentes del comportamiento en servicio de los agregados utilizados en una estructura existente para evaluar si agregados de la misma composición y origen producirán RAS potencial en una nueva estructura a construir.

Además de los métodos mencionados, se investigaron muchos otros en Argentina, aplicados tanto sobre roca, mortero u hormigón, que con el tiempo fueron desestimados por su limitado desempeño [39-41].

Para finalizar este recorrido histórico, cabe destacar que actualmente existe una decidida tendencia a nivel internacional en encarar el estudio de la RAS en base al desempeño de prototipos de hormigón, con el fin de profundizar en el mecanismo de la RAS. En efecto, de este modo se procede a comparar los métodos estimados como más confiables a nivel laboratorio con lo que ocurre en la realidad sobre un elemento de hormigón. Como se verá en algunos ejemplos que serán

presentados más adelante, existen muchos factores que tienen que ver con las características de las estructuras y las condiciones de exposición que resultan determinantes para la RAS; en particular, cuando existe un cambio de escala en las dimensiones de las probetas de ensayo fenómenos como la lixiviación de álcalis o la anisotropía de expansión del hormigón con relación a la dirección de colado se manifiestan en forma diferente [42-43]. Argentina, afortunadamente, ha acompañado esta tendencia desde hace años y sus resultados han sido informados oportunamente [44-48].

## 2.2. Agregados potencialmente reactivos en Argentina

Por su extensa geografía, Argentina dispone de una gran variedad de agregados que se emplean para la fabricación de hormigón. Muchos de ellos contienen materiales que pueden reaccionar con los álcalis. Se describen a continuación algunos de los ejemplos típicos de agregados potencialmente reactivos que pueden encontrarse a lo largo de las diferentes regiones del país.

- Basaltos (Mesopotamia): estas rocas contienen bajos porcentajes de vidrio volcánico y arcillas del tipo de la montmorillonita distribuidos en su masa. Es de notar que esta última genera otro tipo de patología, pero no incide en la RAS, contrariamente a lo que indica el CIRSOC 201-2005. El derrame de la Mesopotamia de basaltos toleíticos, a diferencia de otras zonas con basaltos olivínicos como los de la provincia de Córdoba, se considera potencialmente reactivo porque además del vidrio volcánico contiene variedades de sílice micro y/o criptocristalina (cristobalita y tridimita). Cabe comentar que algunos basaltos de la Mesopotamia también tienen tridimita y calcedonia. Estos son productos secundarios y su presencia es independiente de que sean toleíticos u olivínicos, siendo estos últimos los denominados alcalinos.

- Arenas y gravas de los ríos Uruguay y Paraná: estos agregados pueden contener partículas que incluyan ópalo o calcedonia, muchas veces con estructuras bandeadas alrededor de un núcleo de cuarzo; dichas bandas micro o criptocristalinas se alternan frecuentemente con bandas de ópalo. También se han detectado areniscas cementadas con ópalo.

- Ortocuarcitas (provincias de Chaco y Corrientes): estas rocas muy reactivas poseen grano fino a medio y consisten en granos de cuarzo cementados por ópalo, calcedonia y cuarzo microcristalino.

- Migmatitas (centro de la provincia de Buenos Aires): se trata de rocas de reacción lenta compuestas por feldespatos (ortoclasa y plagioclasa), cuarzo, micas, epidoto, circón y minerales opacos. Los cristales de cuarzo microcristalino y los que presentan extinción ondulante son los principales responsables de la potencial reactividad.

- Arenas y gravas (oeste y sur de Argentina): Esta área está influenciada por las rocas de la Cordillera de los Andes, son ejemplos los agregados procedentes de ríos como el Salí en Tucumán, el Negro, el Limay y el Neuquén, entre otros. El componente reactivo más significativo es el vidrio volcánico presente en las pastas de las rocas volcánicas, pero también se pueden encontrar agregados que contienen cristobalita, tridimita o cuarzo tensionado.

- Agregados del litoral marítimo: los yacimientos de arenas y gravas en la meseta patagónica y su litoral marítimo tienen su origen en las rocas que constituyen la Cordillera de los Andes y fueron transportados por los ríos que bajan de dichas montañas hacia el océano. Al sur de la provincia de Buenos Aires, en la zona de influencia de Bahía Blanca aparecen, entre los casos relevantes, arenas que son moderadamente o altamente reactivas (como las próximas a la localidad de Médanos) por presencia de vidrio volcánico.

### 2.3. Casos seleccionados

En Argentina la mayoría de las obras de infraestructura de hormigón fueron construidas durante la segunda mitad del siglo XX; por entonces, las reglamentaciones (PRAEH, 1964) ya contenían regulaciones e indicaciones para evaluar la reactividad de los agregados y prevenir la RAS [49-54]. En este sentido, la ingeniería argentina ha sido pionera en la aplicación de criterios rigurosos para garantizar la vida en servicio de las estructuras de hormigón cuando existen agregados potencialmente reactivos. Sin embargo, y aunque existían prescripciones reglamentarias, se produjeron casos de estructuras con daños importantes por RAS. Este apartado tiene como propósito mostrar a partir de la descripción de algunos ejemplos de estructuras dañadas cuáles son los criterios que un ingeniero debe utilizar al momento de proyectar una estructura de hormigón [55-61]. Complementariamente, se comentan brevemente dos casos exitosos: el de una presa muy importante donde se tomaron precauciones poco comunes para prevenir la RAS y el de un pavimento donde se adoptó como estrategia inhibidora, la limitación en el contenido de álcalis del hormigón.

#### 2.3.1 Estructuras dañadas por la RAS

Las bases de las torres de la línea de alta tensión Salto Grande - Ezeiza, ubicadas en la provincia de Entre Ríos, consisten en grandes bloques de hormigón armado con una resistencia a la compresión de 18 MPa. Se pusieron en servicio a partir del año 1978 y en menos de diez años (1984) mostraron un alto nivel de daño por el desarrollo de la RAS [57]. A pesar de que el contenido estimado de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  en el cemento osciló entre 0,2% y 0,6%, la alta humedad y las importantes temperaturas reinantes, el uso de gravas y arenas que contenían ópalo, calcedonia, areniscas cementadas con ópalo y cuarzo tensionado, brindaron condiciones suficientes



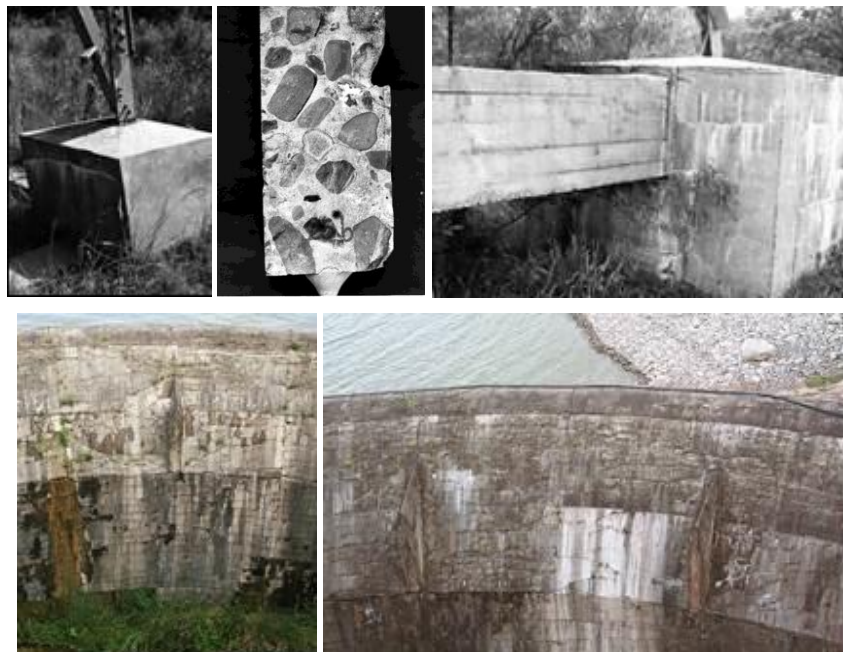
para el desarrollo de la RAS que se tradujo en una patología clásica con numerosas fisuras erráticas.

En 1996, las grietas alcanzaron aberturas que variaron entre 0,01 mm y 0,9 mm, en algunas bases superaron 0,9 mm y en tres casos alcanzaron espesores de 4 mm a 9 mm. En los años sucesivos las fisuras siguieron creciendo. La RAS fue confirmada mediante observaciones visuales de las bases y evaluaciones de testigos a través de microscopía, difracción de rayos X y ensayos de expansión residual. Cabe destacar que los mayores daños se produjeron en las bases de mayores dimensiones, seguramente por la acción sinérgica derivada de su carácter masivo y una probable fisuración térmica inicial que favoreció el ingreso de agua. Estas bases también sufrieron el efecto de la inundación del Río Paraná entre los años 1982 y 1983. En la actualidad, algunas bases muy afectadas fueron reconstruidas mientras que el resto sigue en servicio recibiendo un mantenimiento periódico (Fig. 3).

Por sus características las bases representan estructuras altamente susceptibles a la RAS, ya que es frecuente el acceso de humedad no solo por el contacto con el suelo sino porque

por otras causas pueden generarse fisuras que faciliten el acceso de agua.

Un caso emblemático en Argentina de estructuras en contacto con agua lo representa el Dique El Cadillal, sito al norte de la ciudad de Tucumán, alimentado por las aguas del río Salí (Fig. 3). Los agregados del río Salí son potencialmente reactivos ya que sus componentes principales incluyen cuarcitas y areniscas silíceas, y rocas con abundante vidrio volcánico. Sin embargo, es interesante notar que se han registrado casos de bases fabricadas con dichos agregados y cementos que no eran resistentes a los álcalis (con contenidos de álcalis solubles mayores al 1 % en peso de cemento) donde el grado de reacción y los consecuentes daños fueron muy diferentes, conforme las dimensiones y la disponibilidad de humedad del hormigón. Bajo condiciones de contacto con la capa freática, la aparición de fisuras térmicas o debidas a la contracción por secado que facilitaron la entrada de agua de lluvia dieron lugar al desarrollo de la RAS mientras que, otras estructuras de hormigón ubicadas muy próximas no resultaron afectadas, a pesar de tratarse del mismo tipo de hormigón en cuanto a sus materiales componentes. Este



**Figura 3.** Arriba: Bases de las torres de alta tensión de la línea Salto Grande, Entre Ríos. Registro del año 1987 según consta en los Anales del LEMIT [55]. Abajo: Vistas del Dique El Cadillal donde el hormigón incorpora agregados del Río Salí en Tucumán.

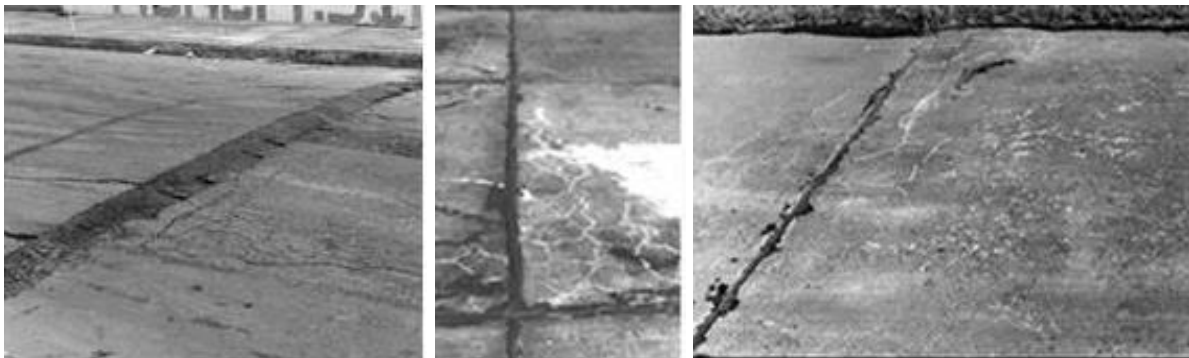
punto no puede desconocerse al momento de adoptar criterios de diseño frente a la RAS.

Los pavimentos constituyen las otras estructuras particularmente sensibles a la RAS, la exposición a la lluvia y el contacto con el suelo proporcionan condiciones para el desarrollo de la reacción. La Fig. 4 muestra un pavimento severamente dañado en la ciudad de Concepción de Uruguay, Entre Ríos, donde se usaron gravas y arenas del río Uruguay.

Las losas del aeropuerto de Camba Punta (Corrientes) constituyen un ejemplo típico del deterioro por la RAS producido por el uso de agregados de la Mesopotamia [59]. Fueron puestas en servicio a partir de 1960 y ya aparecieron signos preocupantes de deterioro en 1978. Entre otras patologías observadas se incluyen levantamiento de bordes de losas, grietas erráticas, desprendimiento de hormigón y cierre de juntas. El nivel de

deterioro alcanzó niveles muy importantes en 1985 (Fig. 4 centro y derecha). En estas construcciones se utilizaron cementos pòrtland normales de diversas fuentes, y se estima que el contenido de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  debió oscilar entre 0,6 y 1%; como agregados gruesos se emplearon basaltos, cuarcitas, areniscas y gravas, mientras que las arenas contenían ópalo y calcedonia. Todo indica que el principal material reactivo fue proporcionado por las cuarcitas y areniscas cementadas con ópalo y calcedonia.

Otro ejemplo en la zona son los pavimentos de la RN 127 (Fig. 5) entre Federal (Entre Ríos) y Cuatro Bocas (Corrientes) [60]. Si bien esta ruta presenta muchos sectores en buenas condiciones, otras partes muestran importantes daños por la RAS, donde los rasgos patológicos se manifiestan en losas que contienen abundantes grietas y cierre de juntas. En este caso se utilizó basalto



**Figura 4.** Izquierda: Losas de pavimento en Concepción del Uruguay, Entre Ríos, en el año 1998, donde la expansión generada por la RAS provocó un cuadro de fisuras mapeado y la alteración de las losas adyacentes. Centro y derecha: Losas de pavimento en el Aeropuerto de Camba Punta, Corrientes, en 1985 y 1993 respectivamente [55].

Cemento < 0,6%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$

Cemento > 1%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$



**Figura 5.** Diversos sectores de la RN 127 entre Federal (Entre Ríos) y Cuatro Bocas (Corrientes). Gentileza Cementos Avellaneda S.A.



triturado como agregado grueso, siendo los principales minerales reactivos vidrio volcánico, tridimita y cristobalita. Las diferencias en los niveles de daño se atribuyen a las variaciones en el contenido de álcalis del cemento utilizado en los diferentes sectores.

La aparición de daño por la RAS en las columnas interiores de un edificio construido entre los años 1940 y 1950 en la ciudad de Buenos Aires representa un ejemplo singular [61]. El edificio tiene un área total de aproximadamente 100000 m<sup>2</sup> distribuidos en 10 niveles. El Hall Central de la planta baja posee columnas cuya sección transversal y altura son mayores a 1 m y 9 m respectivamente y que continúan hacia los pisos subterráneos con dimensiones similares. Dichas columnas por motivos arquitectónicos fueron recubiertas con mampostería de ladrillo cerámico y revestimiento de piedra granítica. A principios de los años '90 se verificó que la capacidad de carga de la estructura era satisfactoria. En 1998 se desprendió el revestimiento de piedra que cubría algunas de las columnas del Salón Central en el nivel del suelo; al eliminar la mampostería que recubría estas columnas se puso en evidencia un cuadro de fisuración significativo en su superficie. Sin embargo, las fisuras solo se encontraron en la zona del Hall Central y el resto del edificio no mostró fisuras visibles o solo fisuras menores a 0,05 mm de espesor. Inicialmente, el hecho de que algunas placas de piedra se desprendieran y existieran fisuras en las columnas se atribuyó a causas estructurales; en 1999 un nuevo estudio concluyó que las fisuras habían sido causadas por la RAS (Fig. 6). En este caso los agregados reactivos fueron areniscas de grano fino cementadas con sílice amorfa, calcedonia y cuarzo tensionado en menores proporciones. Los álcalis fueron aportados por el cemento (oscilando el contenido unitario de cemento entre 255 kg/m<sup>3</sup> y 306 kg/m<sup>3</sup> y el contenido de álcalis equivalentes entre 0,42 % y 1,18 % en peso del cemento). Se calculó que en las columnas fisuradas el contenido de álcalis debió variar entre 0,99 % y 1,16 % lo que representa 2,93 kg/m<sup>3</sup> en el hormigón. El daño más severo ocurrió en las



**Figura 6.** Detección de la RAS en las columnas interiores de un edificio en la ciudad de Buenos Aires.

columnas con una sección transversal mayor a 1 m<sup>2</sup> que estuvieron cubiertas con mampostería de ladrillo cerámico y revestimiento de granito. La conclusión es que el volumen de hormigón y la presencia del revestimiento fueron suficientes para mantener las condiciones de humedad requeridas para el desarrollo de la RAS, y que la misma se produjo durante los primeros años de construida la estructura según lo inferido a partir del análisis del cuadro de fisuración y las observaciones al microscopio. Actualmente la RAS no progresa, ya que la humedad disponible no es suficiente para desencadenar el proceso.

Este último aspecto (aporte de humedad que no proviene del exterior), que no era tenido en cuenta en el pasado, es un concepto relativamente nuevo que ha sido incorporado en las normas argentinas actualmente vigentes (IRAM 1512, IRAM 1531) y en otra propuesta reciente [24].

### 2.3.2. Medidas de inhibición de la RAS

La central hidroeléctrica de la presa de Piedra del Águila, ubicada sobre el río Limay en la provincia de Neuquén, constituye un ejemplo de prevención extrema contra la RAS en una estructura con altas implicaciones estratégicas, con un volumen total de hormigón de 3,5 millones de m<sup>3</sup>. Los agregados gruesos disponibles eran potencialmente reactivos debido a la presencia de vidrio volcánico en tobos, andesitas y basaltos, y de cuarzo tensionado

en granitos, cuarcitas y areniscas. Las arenas contenían clastos de cuarzo tensionado, vidrio volcánico y calcedonia. Ante ello, se especificó el empleo de cemento puzolánico de bajo calor de hidratación. Pero como una vez iniciada la construcción se observaron significativas expansiones a los 18 meses en el método de la barra de mortero (ASTM C227) se analizó nuevamente el riesgo de RAS y se optó por utilizar un cemento con 30% de puzolana, con la restricción adicional de que el clínker tuviera un contenido medio de álcalis menor a 0,5 %. Cabe confirmar que esta presa, construida entre 1985 y 1992, no muestra signos macro o microscópicos de RAS en la actualidad.

La experiencia adquirida durante la construcción de grandes obras de ingeniería en Argentina ha demostrado que el uso de cementos con bajo contenido de álcalis o el uso de adiciones minerales activas son medidas muy efectivas para inhibir la RAS. Sin embargo, en muchos casos, estas soluciones pueden enfrentarse con limitaciones técnico-económicas y puede ser necesario buscar otras alternativas. En la construcción de la ruta RN 14, que recorre las provincias de Entre Ríos y Corrientes, se siguió la metodología propuesta por la Canadian Standards Association basada en el control en el contenido de álcalis en el hormigón y que será mejor detallada más adelante [62]. En este caso, los agregados disponibles eran similares a los utilizados en la RN 127, piedra partida basáltica y arena silíceo natural, y el cemento disponible contenía 0,67 % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . De acuerdo con la norma IRAM 1700, la combinación de agregados daba lugar a una expansión a 52 semanas de 0,047 %, lo cual clasifica al agregado como de reactividad moderada. Sabiendo que el pavimento estaría en contacto con un medio de alta humedad, se asumió un riesgo de RAS igual a 3 (IRAM 1512 e IRAM 1531).

En esta obra, para este nivel de riesgo y considerando una vida útil de 25 años, se adoptó un nivel de prevención "moderado", lo que implica limitar el contenido de álcalis en el hormigón a  $2,4 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . Para un

contenido de cemento de  $330 \text{ kg/m}^3$  el contenido de álcalis alcanzaba  $2,34 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ; estimando que solo el 60 % del contenido total de álcalis del cemento pasaría a la solución de poros [63] y que la contribución de los álcalis de los agregados era de  $0,54 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ; el total de álcalis solubles en el hormigón resultaría del orden de  $2,0 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . El presente ejemplo constituye el primer caso en Argentina donde se utilizó como estrategia inhibitoria la limitación en el contenido de álcalis del hormigón. Hasta el día de hoy no se observaron manifestaciones de la RAS; además, después de 10 años de construida la obra, se extrajeron testigos y tampoco se encontraron productos de reacción en observaciones sobre secciones delgadas.

Finalmente, y en relación con otras estrategias de inhibición, cabe mencionar que en Argentina las sales de litio solo se han usado en contados casos experimentales.

### 3. Criterios para la detección y prevención de la RAS

Las pautas generales de las normas ASTM C1778-16 [13] y CSA A23.2-27A [12], que fueron verificadas en el desempeño de la RN 14, representan una alternativa para la prevención de la RAS [23,64]. Se presenta a continuación un criterio recientemente propuesto [24] para la actualización de la reglamentación en Argentina, en cuanto a la prevención de la RAS y sus daños. El mismo se basa en la experiencia en estructuras construidas, los resultados de la evaluación de los agregados de la región y las normas citadas que consideran el nivel de reactividad del agregado, y el tipo, condiciones ambientales y tolerancia al daño de la estructura de hormigón a proyectar.

En primer lugar, se acepta que no hay riesgos de RAS si están disponibles los datos de obras en servicio sin expansiones u otras patologías asociadas a la RAS que cumplan con los siguientes requisitos: construidas con materiales similares (agregados, cemento, adiciones minerales, aditivos químicos), que posean la misma tipología estructural, y que

estuvieron expuestas a condiciones ambientales similares o más rigurosas y en servicio durante más de 15 años.

Si no existe tal información o quedan dudas sobre la reactividad potencial de algunos agregados (finos y/o gruesos), se deben seguir los siguientes pasos:

1. Análisis petrográfico (IRAM 1649): este análisis representa una buena herramienta para evaluar los riesgos de RAS y para la selección e interpretación de los ensayos de expansión. Sin embargo, no es concluyente y un agregado no puede ser aceptado o rechazado en base al mismo.

2. Ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, ASTM C1260): un agregado se considera potencialmente reactivo cuando la expansión de 16 días supera 0,10%. Este ensayo es rápido y confiable para muchos agregados, pero no debe aplicarse para aquellos que contienen partículas con cuarzo tensionado ni para gravas como las del Río Uruguay, que contienen alto contenido de ópalo y calcedonia.

3. Ensayo acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700 a 60 °C): este método representa una contribución de la experiencia argentina en la RAS. Si bien es similar al ensayo de la norma ASTM C1293, la temperatura de almacenamiento es de 60 °C y se reduce la duración del ensayo. Un agregado es potencialmente reactivo cuando la expansión a las 13 semanas excede 0,04 % para agregados que contienen ópalo, calcedonia, cristobalita, tridimita y vidrio volcánico, o cuando excede 0,08 % para aquellos que contienen cuarzo tensionado. Las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de este método son consistentes con aquellas que surgen de la aplicación de la norma IRAM 1700, y son muy bajos los porcentajes de falsos negativos (Fig. 2). Este ensayo representa una buena alternativa para evaluar agregados con baja velocidad de reacción.

4. Ensayo tradicional del prisma de hormigón (IRAM 1700, similar a ASTM C1293): en la actualidad el ensayo tradicional sobre prismas de hormigón expuestos a 38 °C, se sigue

considerando como el método más confiable. Un agregado es potencialmente reactivo cuando la expansión a 52 semanas supera 0,04 %.

Cuando luego de realizar estos pasos los agregados finos y/o gruesos se identifican como potencialmente reactivos, existe la posibilidad de usarlos en el hormigón si se adoptan acciones preventivas para la inhibición de RAS. Las mismas pueden consistir en requisitos prescriptivos o de performance.

La verificación del requisito de performance implica evaluar un prisma de hormigón (IRAM 1700) preparado con la totalidad de los materiales que se utilizarán en la obra. El hormigón se debe preparar con un contenido unitario de cemento igual a 420 kg/m<sup>3</sup>, relación agua/material cementante entre 0,42 y 0,45, y aumentando el contenido de álcalis de cemento hasta alcanzar 1,25% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>. Para controlar la RAS se ofrecen las siguientes alternativas: usar cementos para fines generales, combinar cementos para fines generales y adiciones minerales activas (AMA), agregar un aditivo a base de litio o realizar una sustitución parcial de agregados reactivos por no reactivos. El hormigón es adecuado si la expansión a las 104 semanas es inferior a 0,04 %.

Cabe notar que se pueden aplicar criterios similares a los indicados en el párrafo precedente si se emplea el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) en el caso de agregados que no se encuentren incluidos dentro de las excepciones indicadas en la Tabla 1 (ópalo, calcedonia o cuarzo tensionado). Para ello es menester demostrar previamente que existe buena correlación (Fig. 7) entre este método y el indicado en la norma IRAM 1700 en mezclas que no incorporen AMA.

También se pueden emplear agregados potencialmente reactivos adoptando medidas prescriptivas similares a aquellas incluidas en las normas canadienses [12]:

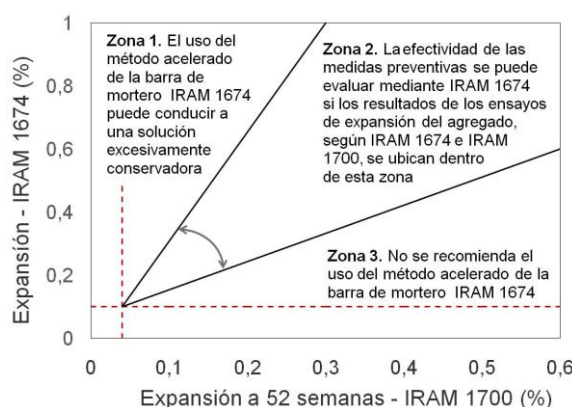
- usar un cemento resistente a la RAS (IRAM 50001)

**Tabla 1.** Determinación del nivel de reactividad del agregado a través de ensayos de expansión (E).

Clase de reactividad	Nivel de reactividad	Método de ensayo		
		IRAM 1674 Mortero a 16 días (%)	IRAM 1700, 60 °C Hormigón a 13 semanas (%)	IRAM 1700, 38 °C Hormigón a 52 semanas (%)
R0	No-reactivo	$E < 0,10$	$E < 0,04 (0,08^1)$	$E < 0,04$
R1	Moderado	$0,10 \leq E < 0,30$	$0,04 (0,08^1) \leq E < 0,12$	$0,04 \leq E < 0,12$
R2	Altamente reactivo	$0,30 \leq E < 0,45$	$0,12 \leq E < 0,24$	$0,12 \leq E < 0,24$
R3	Extremadamente reactivo	$0,45 \leq E$	$0,24 \leq E$	$0,24 \leq E$

<sup>1</sup> Para agregados conteniendo partículas de cuarzo tensionado

Ciertos agregados, a pesar de mostrar un comportamiento deletéreo en servicio o de expandir más de 0,04 % en un año según IRAM 1700, no pueden ser detectados mediante el ensayo IRAM 1674 debido a la reducida expansión obtenida con este método. Entre ellos se encuentran algunos cantos rodados silíceos del río Uruguay y también agregados ígneos, metamórficos o sedimentarios (granitos, granodioritas, gneises, areniscas) que deben su reactividad al cuarzo tensionado. Por ello, estos tipos de agregados deben ser evaluados mediante el ensayo tradicional IRAM 1700 (38 °C) o el método acelerado del prisma de hormigón IRAM 1700 (60 °C).



**Figura 7.** Área de aplicación de IRAM 1674 para evaluar la efectividad de las medidas preventivas de la RAS.

- limitar el contenido de álcalis en el hormigón
- agregar adiciones minerales de eficacia reconocida y en cantidad suficiente, ya sea como parte del cemento o como un componente más del hormigón
- o, para las condiciones más exigentes, combinar un hormigón de bajo contenido de álcalis incorporando un dado contenido de AMA.

La elección de las medidas indicadas depende de la reactividad del agregado, del

riesgo de RAS para la estructura y del nivel de daño tolerable en la misma.

En primer lugar, se debe definir el grado de reactividad del agregado, el cual surge de algunos de los ensayos de expansión (Tabla 1). Si no estuvieran disponibles resultados de ensayos de expansión, el grado de reactividad se puede adoptar en base a la Tabla 2; si el agregado no figura en esta tabla se debe considerar como extremadamente reactivo (R3). La caracterización de los agregados incluida en la Tabla 2 representa una innovación en la materia ya que no existen tablas similares en otras normas nacionales ni internacionales, y forma parte de la propuesta de los autores [24,62].

Para determinar el grado de reactividad de una combinación de agregados se puede utilizar el ensayo previsto en la norma IRAM 1700 (a 38 °C o 60 °C). Si el resultado de esta combinación no estuviera disponible se debe considerar la expansión máxima de cada agregado. En caso de discrepancia, los resultados obtenidos según norma IRAM 1700 tienen prioridad sobre los de la norma IRAM 1674.

**Tabla 2.** Determinación del nivel de reactividad del agregado a través de ensayos de expansión (E).

Provincia	Zona / Región	Agregado	Reactividad debida a	Grado de reactividad esperado
Buenos Aires	Olavarría, Tandil, Azul, Mar del Plata, Pigüé	Piedra partida y arenas de trituración (principalmente granitos, migmatitas, ortocuarcitas, cuarcitas)	Cuarzo tensionado y/o microcristalino	R2
	Olavarría	Piedra partida (dolomías)	-	R1
	Bahía Blanca, Médanos y sur de la provincia de Buenos Aires	Arenas y cantos rodados	Vidrio volcánico	R3
Entre Ríos, Corrientes, Misiones	Mesopotamia	Piedra partida (basalto)	Vidrio volcánico, cristobalita, tridimita	R2
	Río Uruguay	Canto rodado	Calcedonia, ópalo y cuarzo microcristalino	R3
Chaco	Chaco	Piedra partida (arenisca)	Principalmente ópalo y calcedonia	R3
Mendoza	Río Mendoza (Potrerillo, Cacheuta, Anchoris)	Canto rodado	Vidrio volcánico	R1
	Río Diamante (San Rafael)	Canto rodado	Vidrio volcánico	R2
Tucumán	Río Salí	Canto rodado	Vidrio volcánico, cuarzo tensionado	R2
Córdoba	Berotarán, Los Córdobes	Piedra partida (basalto)	-	R1
	Alta Gracia	Piedra partida (mármoles calco-dolomíticos)	-	R1
San Luis	Justo Daract	Piedra partida (basalto)	-	R1
Patagonia	Patagonia	Arenas y cantos rodados	Principalmente vidrio volcánico, algunas rocas incluyen tridimita, cristobalita y cuarzo tensionado	R2

Después de calificar el grado de reactividad de los agregados, es necesario evaluar el tipo de estructura y las condiciones de exposición para definir el riesgo de RAS (Tabla 3). Obsérvese que se sugieren diferentes clases

de estructuras de hormigón en base al análisis de las consecuencias que tendría la RAS sobre la seguridad, la economía o el medio ambiente y su tolerancia al daño de RAS (Tabla 4).



**Tabla 3.** Riesgo de RAS.

Tamaño y condiciones de exposición del elemento estructural	Reactividad del agregado			
	R0	R1	R2	R3
No masivo y seco <sup>(1,2)</sup>	1	1	2	3
Masivo y seco <sup>(1,2)</sup>	1	2	3	4
Hormigón expuesto al aire húmedo, enterrado o sumergido <sup>(3)</sup>	1	3	4	5

<sup>1</sup> Un elemento masivo es aquel que posee una dimensión mínima > 1 m.

<sup>2</sup> Se considera ambiente seco si la humedad relativa ambiente promedio es < 60 %.

<sup>3</sup> Un elemento de hormigón, no masivo y seco, inmerso continuamente en agua de mar no presenta un riesgo de RAS mayor que el de un elemento similar expuesto al aire húmedo, enterrado en el suelo o sumergido en aguas no salobres.

No deben emplearse agregados potencialmente reactivos en hormigones expuestos a acetatos, formatos o hidróxidos alcalinos sin demostrar que es posible controlar la RAS.

**Tabla 4.** Clase de estructura en función de las consecuencias de la RAS sobre la seguridad, economía o el ambiente y el grado de aceptación del deterioro provocado.

Clase	Consecuencias de la RAS	Grado de aceptación del deterioro por RAS	Ejemplos
S1	Despreciables	Algún deterioro puede ser tolerado	Elementos no estructurales de edificios Elementos no expuestos a humedad Estructuras temporarias (vida útil < 5 años)
S2	Moderadas (si el daño es importante)	Un riesgo moderado de RAS es aceptable	Veredas cordones y cunetas Estructuras con vida útil en servicio < 40 años
S3	Considerables (si los daños son pequeños)	Un riesgo mínimo de RAS es aceptable	Pavimentos Elementos de fundación, muros de contención Alcantarillas, barreras de seguridad Caminos rurales de bajo tránsito Premoldeados con costos de reemplazo excesivos Estructuras con vida útil en servicio entre 40 y 75 años
S4	Graves (si los daños son pequeños)	La posibilidad de RAS no es tolerada	Puentes principales y presas Plantas de generación eléctrica. Instalaciones nucleares Túneles Elementos críticos cuya inspección o reparación resulta muy difícil Estructuras con vida útil en servicio > 75 años

En función del riesgo de RAS (Tabla 3) y la clase de estructura (Tabla 4), surgen los niveles de prevención requeridos (Tabla 5). Entonces, para cada nivel de prevención (crecientes de V a ZZ, en orden de menor a mayor exigencia) se dan soluciones alternativas conforme se detallan en las Tablas 6 a 8.

**Tabla 5.** Niveles de prevención requeridos.

Riesgo de RAS	Clasificación de la estructura			
	S1	S2	S3	S4
1	V	V	V	V
2	V	V	W	X
3	V	V	V	V
4	W	X	Y	Z
5	X	Y	Z	ZZ

**Tabla 6.** Contenido máximo de álcalis en el hormigón.

Nivel de prevención	Contenido máximo de álcalis en el hormigón (kg de Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> /m <sup>3</sup> )
V	No se requiere ningún límite
W	3,0
X	2,4
Y	1,8
Z	1,8 + AMA <sup>(1)</sup>
ZZ	

<sup>1</sup> Para los niveles Z y ZZ se debe limitar el contenido de álcalis y usar AMA (ver Tabla 8)

**Tabla 7.** Contenido mínimo de AMA en el total de material cementicio.

AMA	Álcalis de la AMA (% Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	Mínimo de AMA en el ligante según el nivel de prevención (% en masa) <sup>(2)</sup>				
		W	X	Y	Z	ZZ
Ceniza volante (CaO ≤ 18 %)	< 3,0	15	20	25	35	ver Tabla 8
	3,0 - 4,5	20	25	30	40	
Escoria granulada de alto horno	< 1,0	25	35	50	65	
Humos de sílice (SiO <sub>2</sub> ≥ 85 %) <sup>(1)</sup>	< 1,0	2,0 x AH	2,5 x AH	3,0 x AH	4,0 x AH	

<sup>1</sup> AH: Contenido de álcalis del hormigón (kg de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>/m<sup>3</sup>). El contenido mínimo de humos de sílice debe ser ≥ 7 %.

<sup>2</sup> Correcciones en contenido de AMA: cementos con Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> < 0,70 % usar el nivel de prevención inmediato inferior al recomendado en esta tabla; para Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> entre 1 % y 1,25 % usar el nivel de prevención inmediato superior; para Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> > 1,25% no se dan recomendaciones.

**Tabla 8.** Acción preventiva requerida frente a la RAS para los niveles Z y ZZ.

Nivel de prevención	Uso de AMA como único método preventivo	Limitar el contenido de álcalis en el hormigón e incorporar AMA en cantidad suficiente	
	Nivel mínimo de reemplazo	Contenido máximo de álcalis en el hormigón (kg de Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> /m <sup>3</sup> )	Nivel mínimo de reemplazo de la AMA
Z	Corresponde al nivel Z (Tabla 7)	1,8	Corresponde al nivel Y (Tabla 7)
ZZ	No está permitido	1,8	Corresponde al nivel Z (Tabla 7)

Cuando se utilicen cementos CPN o CPF se debe considerar su contenido total de álcalis determinado según equivalente a Norma ASTM C 114 [65].

Con cementos con ceniza volante o escoria de alto horno como constituyente principal (CPC, CPE, CAH) el contenido de álcalis será el que corresponda a la fracción "clínker + yeso" y será aportado por el fabricante del cemento.

Finalmente, considerando los cementos de uso general, cabe mencionar que la evaluación del contenido de álcalis en cementos normal o fillerizado se debe realizar según norma ASTM C114 [65], mientras que en aquellos cementos que incorporen escorias u otro tipo de cementos compuestos con más de una adición mineral, el contenido de álcalis es aquel que corresponda a la fracción clínker + yeso.

#### 4. Conclusiones

Argentina tiene una larga experiencia en el estudio de la RAS en hormigón; se han informado más de 100 ejemplos de estructuras afectadas ubicadas en regiones con diferentes climas. A la vez, existe una gran diversidad de agregados disponibles donde aparecen numerosos componentes reactivos como ópalo, calcedonia, cristobalita, tridimita, vidrio volcánico asociados a casos de reacción rápida y también agregados con cuarzo tensionado o microcristalino propios de la RAS lenta.

Las normas y regulaciones argentinas han considerado el problema de la RAS durante décadas y en la actualidad existe un conocimiento claro de esta patología basada en evaluaciones de laboratorio y de campo.

En este artículo también se mostraron algunos ejemplos de estructuras dañadas por la RAS y otros donde se aplicaron con éxito medidas de inhibición, que alertan sobre los criterios que se deben aplicar en un proyecto con relación a la RAS.

Se presentó una propuesta para la detección y prevención de la RAS que no sólo considera la potencial reactividad de los agregados sino la tipología de la estructura y su sensibilidad al riesgo de reacción.

Entre otros avances, resalta la aptitud del método acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700 a 60 °C) para determinar el grado de reactividad alcalina potencial (GRA) de un agregado. Asimismo, en base a la experiencia existente en el país, se propone el GRA a adoptar para agregados de distintas regiones, ante la ausencia de información específica.

Se destaca que esta propuesta no solo se ubica dentro de las más modernas tendencias internacionales, sino que introduce innovaciones que las superan, sustentadas en la frondosa experiencia argentina sobre la RAS. Cabe observar que, si bien sigue los lineamientos de las normas IRAM vigentes, realiza nuevos aportes como un refinamiento del GRA, la clasificación de estructuras y las medidas a adoptar, en función del riesgo de

RAS, entre las que se incluye el uso de microsílíce.

Es intención de los autores que esta propuesta sirva de base a próximas actualizaciones de las normas y reglamentos en Argentina para el logro de estructuras más seguras.

## Referencias

- [1] Fava, A. S. C., Manuele, R. J., Colina, J. F., y Cortelezzi, C. R. (1961). Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el hormigón de cemento pórtland. *Revista Técnica del LEMIT*, Serie II(85), 313–349.
- [2] Fournier, B., y Bérubé, M. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Can. J. Civil Eng.*, Special Issue on Alkali-Aggregate Reactivity in Canada 27(2), 167–191. <https://doi.org/b22z4p>
- [3] American Concrete Institute (2008). *ACI 221.1R-98 (Reapproved 2008): State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity. ACI 2011 Manual of Concrete Practice.*
- [4] Batic, O. R., y Sota, J. D. (2001). Reacciones deletéreas internas. En E. F. Irassar (Ed.), *Durabilidad del hormigón estructural* (pp. 157–216). AATH.
- [5] Milanesi, C., Giaccio, G., Falcone, D., Giovambattista, A., y Zerbino, R. (2018). Alkali-silica reaction in concrete: the Argentinian experience. En *20th International Conference on Building Materials IBAUSIL* (pp. 489–498). Bauhaus-Universität Weimar.
- [6] Ponce, J. M., y Batic, O. R. (2006). Different manifestations of the ASR in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. *Cem Conc Res*, 36(6), 1148–1156. <https://doi.org/c2sb4s>
- [7] Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J. M., y Batic, O. R. (2008). Mechanical behavior of concretes damaged by alkali silica reaction. *Cem Conc Res*, 38, 993–1004. <https://doi.org/dbf27x>
- [8] Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación (2005). *INTI-CIRSOC. Reglamento argentino de estructuras de hormigón CIRSOC 201.* (<https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/vigencia-2013/area100/area100a/reglamento201completo.pdf>).
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2012). *IRAM 1531 Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos. Cuarta edición.*
- [10] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *IRAM 1512 Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos. Cuarta edición.*
- [11] Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing - Provisional Standards (2010). *AASHTO Standard practice for determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction.*
- [12] Test Methods and Standard Practices for Concrete (Canada) (2014). *CSA A23.2-27A Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete.*
- [13] American Society for Testing and Materials International (2017). *ASTM C1778-16 Standard guide for reducing of deleterious alkali-aggregate reaction in concrete.*
- [14] RILEM TC 106-AAR (2000). International Assessment of aggregates for alkali-reactivity. *Materials and Structures*, 33, 88–93. <https://doi.org/10.1007/BF02484161>
- [15] Office of Pavement Technology, Federal Highway Administration. (2008). *Report on determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction. Report FHWA-HIF-09-001.*
- [16] Grattan-Bellew, P. E. (1989). Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates. En K. Okada, S. Nishibayashi, y M. Kawamura (Eds.), *8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 279–294). Elsevier Applied Science.
- [17] Grattan-Bellew, P. E. (1996). A critical review of accelerated ASR tests. En A. Shayan (Ed.), *10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 27-38). CSIRO Division of Building Construction and Engineering Melbourne (Australia).
- [18] Milanesi, C. A., y Batic, O. R. (1995). Método de ensayo acelerado NBRI: Criterios a emplear en la evaluación de sus resultados.

En AATH (Ed.), *XII Reunión Técnica AATH Dra. Haydée V. Armándola* (pp. 179–190). AATH.

- [19] Falcone, D., y Milanesi, C.A. (2014). Evaluación de la reacción álcali-agregado: Posibilidades y limitaciones de los métodos de ensayos disponibles. En J. D. Sota (Ed.), *XX Reunión Técnica Ing. Alberto S.C. Fava* (pp. 319–326). AATH.
- [20] Falcone, D., y Milanesi C. A. (2017). Método acelerado del prisma de hormigón. Antecedentes para confirmar el límite de expansión de la RAS. *Cemento-Hormigón* 979(Marzo-Abril), 24–27.
- [21] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2008). *IRAM 1649 Agregados para hormigones. Examen petrográfico*.
- [22] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1992). *IRAM 1637 Reacción álcali-agregado Determinación de la reactividad alcalina potencial Método de la barra de mortero*.
- [23] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2013). Medidas de prevención frente a la reacción álcali-agregado: enfoques prescriptivo y prestacional. En C. Andrade, E. Menéndez, L. Lima, Y. Villagrán, y C. Luchtenberg (Eds.), *Diseño Prestacional para la Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado – Vida Útil de Estructuras Existentes – Monitoreo, Intervención y Rehabilitación* (pp. 131–162). LEMIT – Consolider SEDUREC – RILEM.
- [24] Giovambattista, A., Zerbino, R., Giaccio, G., Fava, C., Milanesi, C., Traversa, L., Falcone, D., Di Maio, A., Zega, C., Irassar, E., y Iloro, F. (2020). Bases de un código modelo para la tecnología de las obras de hormigón. *Anales LEMIT Serie IV*, año 6(13), 1–186.
- [25] Giovambattista, A. (2020). Bases para un Código de Tecnología del Hormigón. Ideas para futuros reglamentos. *Revista Hormigón*, 59, 3–14.
- [26] Falcone, D. (2013). *Antecedentes y Metodología de Ensayo para Evaluar la Reacción Álcali Sílice*. [Tesis para acceder al grado de Magister en Tecnología y Construcciones de Hormigón, Facultad de Ingeniería, UNCPBA]. Repositorio CIC Digital. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/136>
- [27] Batic, O. R., y Sota, J. D. (1989). Evaluación de la reactividad de rocas con cuarzo tensionado. En AATH (Ed.), *IX Reunión Técnica AATH Ing. Simón A. Delpech* (pp. 303–314). AATH.
- [28] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2016). Aplicación del método acelerado de la barra de mortero en el estudio de combinación de agregados. En F. Irassar (Ed.), *7º Congreso Internacional y 21ª Reunión Técnica AATH* (pp. 397–404). AATH.
- [29] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1997). *IRAM 1674 Agregados Determinación de la reactividad alcalina potencial Método acelerado de la barra de mortero*.
- [30] American Society for Testing and Materials International (2017). *ASTM C1260-14 Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*.
- [31] Batic, O. R., y Milanesi C. A. (1995). Consideraciones sobre el método de expansión de prismas de hormigón al estudio de la reactividad alcalina. En AATH (Ed.), *XII Reunión Técnica AATH Dra. Haydée V. Armándola* (pp. 149–162.). AATH
- [32] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *IRAM 1700 Agregados Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*.
- [33] American Society for Testing and Materials International (2008). *ASTM C1293-08 Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction*.
- [34] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2012). Método acelerado del prisma de hormigón Evaluación de la RAS con agregados de diversas regiones de la Argentina. En J. D. Sota, N. F. Ortega y J. M. Moro (Eds.), *XIX Reunión Técnica Ing. Oscar R. Batic* (pp. 215–222). AATH.
- [35] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2014). Método acelerado del prisma de hormigón – Antecedentes para confirmar el límite de expansión de la RAS. En J. D. Sota (Ed.), *XX Reunión Técnica Ing. Alberto S.C. Fava* (pp. 311–317). AATH
- [36] Sims, I., y Nixon, P. J. (2006). Assessment of aggregates for alkali-aggregate reactivity potential. RILEM international recommendations. En B. Fournier (Ed.), *Marc-André Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete* (pp. 69–89). RILEM.



- [37] American Society for Testing and Materials International (2008). *ASTM C-295-08 Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete*.
- [38] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2004). *IRAM 1874-02 Agregados para hormigones. Evaluación de estructuras en servicio. Parte 2: Reacción álcali-sílice*.
- [39] Bérubé, M. A., y Fournier, B. (1992). Accelerated test method for alkali-aggregate reactivity. En V. M. Malhotra (Ed.), *International Symposium on Advances in Concrete Technology* (pp. 583–627). CANMET/ACI.
- [40] Batic, O. R., Sota, J., y Franks, L. (1987). Experiencias realizadas para identificar agregados reactivos con el método de las celdas osmóticas. En AATH (Ed.), *VIII Reunión Técnica AATH* (pp. 11–18). AATH.
- [41] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2012). Avances en la aplicación de un nuevo método acelerado para la evaluación de la reacción álcali-agregado. En J. D. Sota, N. F. Ortega, y J. M. Moro (Eds.), *XIX Reunión Técnica Ing. Oscar R. Batic* (pp. 207–214). AATH.
- [42] Fournier, B., Ideker, J. H., Folliard, K. J., Thomas, M., Nkinamubanzi, P-C., y Chevrier, R. (2012). Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR). *Materials Characterization*, 60(7), 669–679. <https://doi.org/fhs26s>
- [43] Ideker, J. H., Drimalas, T., Bentivegna, A. F., Folliard, K. J., Fournier, B., Thomas M. D. A., Hooton, D. R., y Rogers, C. A. (2012). The importance of outdoor exposure site testing. En T. Drimalas, J. H. Ideker, y B. Fournier (Eds.), *14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, (pp. 1–10). University of Texas at Austin.
- [44] Batic, O. R., Milanesi, C. A., y Sota, J. D. (2004). Evaluación de la eficiencia de las adiciones minerales activas en el control de la reacción álcali-sílice en hormigones elaborados con agregados de reacción lenta o diferida. *Revista Hormigón*, 40, 19–29.
- [45] Zerbino, R., Giaccio, G., Bossio, M. E., Torrijos, M. C., y Milanesi, C. A. (2014). Efecto de la incorporación de fibras sobre la respuesta de hormigones afectados por la reacción álcali-sílice. En J. D. Sota (Ed.), *XX Reunión Técnica Ing. Alberto S.C. Fava* (pp. 119–126). AATH.
- [46] Giaccio, G., Torrijos, M. C., Milanesi, C., y Zerbino R. (2018). Reacción álcali-sílice en hormigones con fibras, En V. L. Bonavetti (Ed.), *22ª Reunión Técnica AATH* (pp. 379–386). AATH.
- [47] Milanesi, C., Falcone, D., Giaccio G., Zerbino R., y Torrijos M. C. (2018). Reacción álcali-sílice en condiciones de campo, En V. L. Bonavetti (Ed.), *22ª Reunión Técnica AATH* (pp. 293–300). AATH.
- [48] Giaccio, G., Torrijos, M. C., Milanesi, C., y Zerbino, R. (2019). Alkali-silica reaction in plain and fibre concretes in field conditions. *Materials and Structures*, 52, Artículo 31. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1332-2>
- [49] Klaric, M. E., y Galuppo, J. C. (1977). Determinación de la calidad del hormigón de estructuras ya construidas – Posibilidades y limitaciones. En AATH (Ed.), *III Reunión Técnica AATH* (pp. 1–49). AATH.
- [50] Giovambattista, A., Batic, O. R., y Traversa, L. P. (1981). Durabilidad de hormigones de cemento pórtland. *Revista Hormigón*, 5, 5–20.
- [51] Giovambattista, A., Batic, O. R., y Traversa, L. P. (1985). Reacción álcali-sílice Implicancias tecnológicas, ecológicas y económicas en la optimización de las soluciones ingenieriles En AATH (Ed.), *Proc. Colloquia 85*, Tomo 2 (pp. 453–462). AATH.
- [52] Batic, O. R., Sota, J. D., Cortelezzi, C., y Maiza, P. J. (1985). Observaciones realizadas en los productos de alteración obtenidos en hormigones afectados por la reacción álcali-agregado. En AATH (Eds.), *Proc. Colloquia 85*, Tomo 1 (pp. 275–289). AATH.
- [53] Maiza, P. J., Marfil, S. A., y Milanesi, C. A. (1999). Minerales desarrollados en hormigones deteriorados por la reacción álcali-sílice (Provincia de Córdoba). En Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa (Ed.), *VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales COPROCNA* (pp. 193–199). Facultad de Ciencias Naturales de la UN de La Pampa.
- [54] Maiza, P. J., y Marfil, S. A. (2000). Petrografía del hormigón endurecido – Estudio de un pavimento con patologías. *Revista Hormigón*, 35, 11–21.
- [55] Falcone, D., y Batic, O. R. (2012). Estudios y antecedentes sobre la reacción álcali-sílice (RAS) en el LEMIT. *Anales LEMIT Serie III*, año 1(2), 61–80.

- [56] Giovambattista, A. (2011). Durabilidad del hormigón y vida en servicio de las estructuras, Capítulo 4. En A. Giovambattista (Ed.), *Hormigón: materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005* (pp. 171–294). Ed. INTI CIRSOC, Bs As.
- [57] Giovambattista, A., Batic, O. R., y Traversa, L. P. (1986). Reactivity of alkalis and sandstone cemented with opal and chalcedony. En P. E. Grattan-Bellew (Ed.), *7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 408–412). Noyes Publications New Jersey (USA).
- [58] Klaric, M. E. (1992). Estudio de la reacción álcali-sílice en estructuras existentes. *Revista Hormigón*, 22, 19–31.
- [59] Batic, O. R., Sota, J. D., y Serrani, H. R. (1984). Estudio de las posibles causas de deterioro del hormigón de la pista de aterrizaje y zona de servicio del aeropuerto de Camba Punta, Corrientes. En AATH (Ed.), *VI Reunión Técnica* (pp. 249–270). AATH.
- [60] Milanesi, C. A., Souza, E., Marfil, S., y Maiza, P. J. (2008). Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra. En V. Rahhal, y J. Sota (Eds.), *XVII Reunión Técnica Ing. José Fermín Colina* (pp. 273–280). AATH.
- [61] Giovambattista, A. (2004). Research and repair of a concrete building affected by alkali-silica reaction. En M. Tang, y M. Deng (Eds.), *12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 1229–1234). International Academic Publishers – World Publishing Corporation.
- [62] Milanesi, C. A., y Violini, D. (2008). Prevención de la RAS a través del control de los álcalis aportados por el cemento al hormigón. Aplicación del criterio canadiense en la construcción de la ruta nacional N° 14. En V. Rahhal, y J. D. Sota (Eds.), *XVII Reunión Técnica AATH* (pp. 265–272). AATH.
- [63] Bérubé, M. A., Frenette, J., Rivest, M., y Vézina, D. (2002). Measurement of the alkali content of concrete using hot-water extraction. *Cem Concr and Aggreg*, 24(1), 28–36. <https://doi.org/10.1520/CCA10489J>
- [64] Milanesi, C., Pappalardi, M., y Violini, D. (2016) ¿Cómo prevenir la reacción álcali-agregado en los pavimentos de hormigón? Validación del nuevo enfoque propuesto por AASHTO en base a la experiencia Argentina para su aplicación en el campo vial. En *XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito* (pp. 1–27).
- [65] American Society for Testing and Materials International (2018). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, ASTM C-114-18*.