

¿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

Carlos A. Milanesi ⁽¹⁾, Mariano Pappalardi ⁽²⁾, Daniel Violini ⁽³⁾

Cementos Avellaneda S. A., Defensa 113 Piso 6, C. A. B. A.
TE: +54 11 4339 1209 – e-mail: cam@cavellaneda.com.ar

Palabras claves: Durabilidad, reacción álcali-agregado (RAA), reacción álcali-sílice (RAS), reacción álcali-carbonato (RAC), métodos de prevención, inhibición de la reacción.

RESUMEN

Entre las estructuras de hormigón más vulnerables a la reacción álcali-agregado (RAA), en cualquiera de sus formas conocidas (reacción álcali-sílice o álcali-carbonato), se cuentan los pavimentos de hormigón. Este aspecto cobra particular importancia en Argentina debido a la enorme variedad de agregados disponibles. Si bien las normas IRAM vigentes establecen medidas preventivas para hacer frente a la RAA, las mismas se basan en información proveniente de documentos publicados en 2004 por la Asociación de Normalización Canadiense (CSA) y el grupo RILEM.

En este trabajo se describen los avances registrados en esta temática, a nivel internacional, en los últimos 10 años, poniendo especial énfasis en el enfoque propuesto por AASHTO.

En base a los antecedentes existentes en Argentina de pavimentos de hormigón en servicio afectados por la RAS, se analiza la validez del criterio de AASHTO para su aplicación en el campo vial. Por último, se detalla el caso de la Ruta Nacional N° 14 como el primer ejemplo de aplicación de este nuevo enfoque en nuestro país.

El presente trabajo permite concluir que el criterio propuesto por AASHTO es confiable y permite optimizar los recursos disponibles en las proximidades de la obra, por lo cual, su inclusión en los pliegos de especificación es altamente recomendable.

1. INTRODUCCIÓN

En general, se acepta que la reacción álcali-agregado (RAA) se divide en dos tipos: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC) (1-3), aunque, en esto, existen algunas controversias (4).

La RAS es una reacción química que se produce entre los iones oxhidrilos (OH⁻), presentes en la solución de los poros del hormigón, y ciertos minerales silíceos (ópalo, vidrio volcánico, tridimita, etc.), que componen los agregados.

¹ Jefe Departamento de Asistencia Técnica

² Adjunto Asistencia Técnica - Responsable Obras Viales

³ Gerente de Desarrollo, Calidad y Asistencia Técnica

El producto de esta reacción es un gel alcalino, el cual, bajo determinadas condiciones (principalmente, en ambientes de alta humedad), es capaz de absorber agua y generar expansiones dentro de la estructura del hormigón, suficientes para producir la rotura del mismo, dentro de la vida útil de la estructura (figura 1).

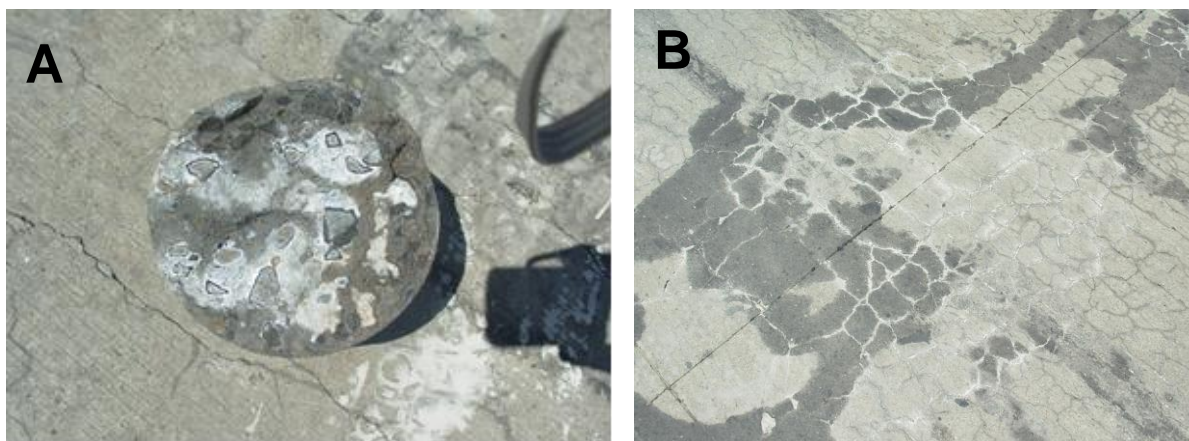


Figura 1. Manifestaciones de RAS en una losa de pavimento (Ruta Nacional N° 127) (22):

- a) geles blanquecinos y bordes de reacción de coloración oscura
- b) Fisuras en forma de “mapa” con exudación de geles

La RAC, en ciertos aspectos similar a la RAS, es una reacción química entre los componentes alcalinos del hormigón (OH^- , Na^+ y K^+) y un mineral denominado “dolomita” ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), presente en algunas rocas de naturaleza carbonática (calizas dolomíticas, dolomías, etc.). A diferencia de la RAS, no genera gel y sus mecanismos de expansión son materia de debate actual. Es una reacción deletérea que sólo afecta los agregados gruesos y es de muy rara ocurrencia (5).

Argentina posee una vasta extensión geográfica, con una inmensa variedad de agregados pétreos, muchos de los cuales han demostrado ser potencialmente reactivos frente a la RAS (6). Por ello, no sorprende que esta patología se conozca en nuestro país desde hace más de 50 años (7) y constituya un tema de investigación frecuente.

Felizmente, no se conocen en Argentina antecedentes de obras en servicio que hayan resultado afectadas por la RAC (8). Si bien estudios realizados por Milanesi y colaboradores (9,10) han permitido detectar una dolomía, en la zona de Valcheta (provincia de Río Negro), que presenta esta patología, la mayoría de los agregados dolomíticos de nuestro país poseen características inocuas y adecuadas propiedades físicas (11).

En 1999, Adam Neville (12) afirmaba que ciertos problemas de durabilidad del hormigón, entre los que incluía a la RAA, a pesar de presentarse en la “realidad” de manera esporádica, eran magnificados por el ambiente académico, fuera de toda proporción, en su afán de publicar los resultados de sus investigaciones de “laboratorio”, dando al hormigón una mala e injustificada reputación. Mehta (13), en cambio, reconoce que, en EEUU, la RAA ocupa el tercer lugar del ranking de patologías, después de la corrosión de armaduras del hormigón y la congelación y deshielo.

En la opinión de los autores, la RAS no es un problema grave, pero sí uno al que debe prestarse atención. Para ello, es menester iniciar los estudios correspondientes a cada obra con la anticipación suficiente, de modo de poder evaluar la aptitud de los materiales componentes del hormigón y las medidas preventivas que el caso requiera.

En Argentina, la RAS fue descrita, por primera vez, por Fava y colaboradores (7), en 1961, después de haber estudiado las causas que motivaron la destrucción progresiva del pavimento que unía la ciudad de La Plata con la localidad de Punta Lara (Buenos Aires). Desde entonces, nuevos casos de RAS fueron detectados, incluso en pavimentos (14-23).

Afortunadamente, en la actualidad, el conocimiento adquirido sobre la RAS pone a disposición del tecnólogo distintas alternativas de prevención (24-26), posibilitando así la construcción de estructuras de hormigón con un grado razonable de seguridad.

Con relación a la RAC, en cambio, el escenario es diferente, ya que los métodos probados para inhibir la RAS no resultan efectivos para controlar las expansiones generadas por la primera (8). Por esta razón, cuando se está en presencia de agregados gruesos potencialmente reactivos debido a la RAC, las normas recomiendan evitar su uso (27).

En lo que sigue, se discuten las estrategias disponibles para el control de la RAS, los aspectos normativos vigentes en nuestro país y el enfoque actual que recibe este tema a nivel internacional.

2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN FRENTE A LA RAS

Para que la RAS (deletérea) pueda tener lugar, es necesaria la concurrencia simultánea de los siguientes factores (figura 2):

- El agregado debe contener suficiente "sílice reactiva" para la formación del gel expansivo. Por ello, para que el agregado sea considerado potencialmente reactivo, desde el punto de vista petrográfico, el contenido de minerales reactivos debe superar los valores mínimos indicados en las normas y reglamentos (IRAM 1512, IRAM 1531, CIRSOC 201).
- La solución de poros del hormigón debe ser suficientemente alcalina. La sílice reactiva, presente en el agregado, sólo se disolverá para formar el gel expansivo si el pH de la solución es suficientemente elevado.
- La disponibilidad de agua debe ser adecuada (el gel expande cuando absorbe agua).

En otras palabras, si cualquiera de estos tres factores se restringe, las posibilidades de la RAS son limitadas, lo cual, señala los posibles caminos para abordar esta problemática.

El primero y el más elemental de los recursos consiste en reemplazar, en forma total, el agregado potencialmente reactivo por otro de características inocuas. No obstante, los estudios de factibilidad de los grandes proyectos de ingeniería civil demuestran que la solución más conveniente, desde el punto de vista técnico-económico, consiste en emplear los agregados disponibles en la zona de obra, aun cuando estos resulten potencialmente reactivos (28). El hecho de que los agregados ocupen entre el 70% y el 80% del volumen del hormigón, explica claramente el porqué de esta afirmación.

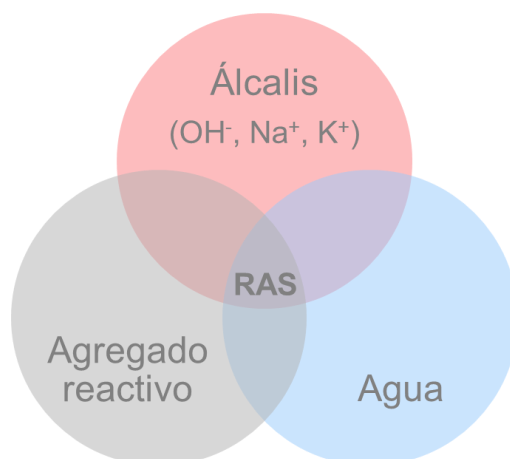


Figura 2. Factores necesarios para que ocurra la RAS

Es importante destacar en este punto que, tanto el CIRSOC 201 (29) como las normas IRAM 1512 y 1531 (27,30), permiten recurrir a la “mezcla de agregados” (reemplazo parcial del agregado reactivo por otro no reactivo), como método para controlar la RAS. Si bien el método de “dilución” (*sweetening*) es citado con frecuencia en los libros texto y guías especializadas (31-33), se trata de un recurso cuya aplicación no es aceptada aún de manera universal. Lo dicho, se debe, fundamentalmente, a la limitación de los métodos de ensayo disponibles para la evaluación de las denominadas “mezclas de obra” (34).

Cuando no existe más remedio que emplear el agregado potencialmente reactivo, las consecuencias nocivas de la RAS pueden ser controladas mediante la implementación, individual o combinada, de las siguientes estrategias (35-39) (figura 2):

- a) Restringir la alcalinidad de la solución de poros del hormigón. La limitación del contenido de álcalis (Na⁺, K⁺) del hormigón reduce el pH de la solución de poros e inhibe la disolución de la sílice reactiva, evitando así la formación del gel expansivo. Esto puede lograrse a través de dos caminos diferentes:
 - Utilizando cementos de bajo o moderado contenido de álcalis. Es el método natural más conocido para mitigar los efectos de la RAS y el preferido por RILEM (35).

Si bien los álcalis presentes en el hormigón pueden tener diversos orígenes (agua, aditivos, agregados, etc.), sin lugar a dudas, el cemento constituye la principal fuente de aporte. Por ello, durante años, las especificaciones limitaron el contenido de álcalis del cemento, buscando controlar los efectos nocivos de la RAS.

Por ejemplo, para el caso de agregados potencialmente reactivos, el CIRSOC 201-84 (40) exigía que el contenido de óxido de sodio equivalente (Na₂O_{eq}) del cemento fuera inferior a 0,60%. Si bien, esta solución fue aplicada con éxito en muchas de las grandes obras de ingeniería del país (28,41,42), el empleo de un cemento de bajo contenido de álcalis constituye, en la actualidad, un recurso cuestionado, incluso por sus precursores (43).

Entre las diversas objeciones planteadas a esta estrategia (disponibilidad de un cemento de este tipo cerca de la obra, mayores costos, mayor polución ambiental debido al venteo de los álcalis al exterior, etc.), queda claro que el uso de un cemento de bajo álcalis, como único recurso para el control de la RAS, no tiene en cuenta la reactividad del agregado ni tampoco el contenido de cemento del hormigón.

En efecto, en la tabla 1 se muestran tres ejemplos sencillos, en los que se ilustra cómo el contenido de álcalis del hormigón ($\text{kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$) no sólo depende del contenido de álcalis del cemento ($\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) sino también del contenido de cemento del hormigón (kg/m^3).

Tabla 1. Variación del contenido de álcalis del hormigón en función del contenido de álcalis del cemento y el contenido de cemento de la mezcla

Ejemplo	Contenido de:		
	Álcalis en el cemento ($\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) (1)	Cemento en el hormigón (kg/m^3) (2)	Álcalis en el hormigón ($\text{kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$) (3) = $0,01*(1)*(2)$
I	1,00	400	4,0
II	0,60	400	2,4
III	0,72	330	2,4

Sin duda, el elevado contenido de álcalis de la mezcla de hormigón del ejemplo I ($4 \text{ kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$), es el resultado de utilizar, en forma combinada, un cemento de alto álcalis ($1\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) con un elevado contenido de cemento ($400 \text{ kg}/\text{m}^3$). Si se requiriera llevar el contenido de álcalis del hormigón a un nivel más seguro (por ejemplo, $2,4 \text{ kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$), sería necesario emplear un cemento con un contenido de álcalis igual a $0,60\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (ejemplo II). Si, en cambio, la mezcla de hormigón a elaborar posee un contenido moderado de cemento ($330 \text{ kg}/\text{m}^3$), es posible alcanzar el mismo nivel alcalino en el hormigón ($2,4 \text{ kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$) usando un cemento de “moderado” contenido de álcalis ($0,72\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), con disponibilidad común en el mercado.

Por este motivo, la tendencia actual, a nivel internacional, consiste en limitar el contenido de álcalis del hormigón y no del cemento. Países como Francia, Japón o Australia, limitan el contenido de álcalis del hormigón a un valor cercano a $3 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$. Otros, en cambio, como Canadá, Nueva Zelanda y el Reino Unido, han adoptado diferentes límites, en función de la reactividad del agregado y otros factores (35-39).

- Incorporando adiciones minerales activas (AMA), ya sea formando parte del cemento o como un componente más de la mezcla de hormigón.

La incorporación de una AMA (ceniza volante, escoria de alto horno, puzolanas), siempre que ésta sea efectiva y se halle en cantidad suficiente, permite reducir el pH de la solución de poros (por dilución y reacción puzolánica) y la movilidad de los iones alcalinos (refinamiento de poros). Paralelamente, reduce la resistencia inicial del hormigón, lo cual, incrementa el riesgo de fisuración del pavimento, a edad temprana, aspecto que debe ser tenido en cuenta durante la fase constructiva.

- b) Modificar las características expansivas del gel, empleando aditivos químicos a base de litio (Li). La incorporación de sales de Li en la mezcla de hormigón (la más común, bajo la forma de una solución al 30% de LiNO_3), en cantidad suficiente, es un método efectivo para contrarrestar los efectos nocivos de la RAS. Se cree que el Li, al incorporarse a la estructura del gel, inhibe la absorción de agua de éste y, por ende, la expansión del mismo.
- c) Limitar el acceso de humedad al hormigón. Sin humedad suficiente en el hormigón, el gel no podrá absorber toda el agua que necesita para desarrollar su capacidad expansiva. Si bien, en algunos casos (estructuras delgadas, expuestas a un medio húmedo), es posible disminuir el riesgo de RAS con la adopción de medidas tendientes a mantener la estructura “seca” (aplicación de pinturas especiales, diseño adecuado de drenajes, etc.), en general, este tipo de estrategias sólo se emplean para atenuar los efectos deletéreos en las estructuras afectadas por la RAS o como elemento redundante de protección.

3. ASPECTOS REGLAMENTARIOS Y NORMATIVOS VIGENTES

En Argentina, los requisitos que deben cumplir los agregados que se emplean en la elaboración de hormigones se establecen en las normas IRAM 1512 y 1531 (27,30).

En el año 2006, ambas normas fueron modificadas, tomando como base el proyecto de Reglamento CIRSOC 201-2005. Las modificaciones implementadas eliminaron la posibilidad de usar un cemento de bajo álcalis para mitigar la RAS y no avanzaron sobre la idea de la limitación del contenido de álcalis del hormigón (téngase presente que la redacción final de este documento tiene más de 15 años).

A partir de 2008, ambas normas fueron sometidas a un nuevo y profundo proceso de revisión, en el que se introdujeron modificaciones diversas, en especial, en la temática referida a la RAA, tomando como base las recomendaciones propuestas por la Asociación de Normalización Canadiense (44) y el grupo RILEM (35).

En 2010, la norma AASHTO PP 65 (38), siguiendo las recomendaciones de la Administración Federal de Carreteras de los EEUU (36), introduce cambios significativos al enfoque canadiense, los que posteriormente son adoptados por ASTM (39).

En resumen, si bien el avance logrado en los últimos años por las normas IRAM 1512 e IRAM 1531 fue sustancial, las modificaciones introducidas por AASHTO y ASTM exigen una nueva revisión de ambos documentos, a fin de acompañar las nuevas tendencias a nivel internacional.

A continuación, se describe el enfoque que adopta la norma AASHTO PP 65 (38), destacando las diferencias existentes respecto a las normas IRAM. En base a los antecedentes existentes en Argentina de pavimentos de hormigón en servicio afectados por la RAS, se analiza la validez del criterio de AASHTO para su aplicación en el campo vial. Por último, se detalla el caso de la Ruta Nacional N° 14 como el primer ejemplo de aplicación de este nuevo enfoque en nuestro país.

4. AASHTO PP 65-10: ENFOQUES PRESCRIPTIVO Y PRESTACIONAL

La norma AASHTO PP 65, al igual que las normas IRAM, plantea dos procedimientos alternativos para seleccionar las medidas preventivas frente a la RAS: uno de carácter prescriptivo (no se requieren ensayos para valorar la efectividad de la solución propuesta) y otro prestacional, basado en la evaluación del desempeño de mezclas de mortero u hormigón.

En la tabla 2 se resumen las medidas preventivas establecidas por AASHTO, en función del enfoque adoptado.

Tabla 2—Medidas preventivas que es posible implementar, según los lineamientos de AASHTO, en función del enfoque adoptado

Estrategia preventiva	Enfoque	
	Prescriptivo	Prestacional
a) Acotar el contenido de álcalis del hormigón a un valor máximo	Sí	No
b) Incorporar un % mínimo de AMA (CV, EGAH, HS) al cemento u hormigón	Sí	Sí
c) Combinar las estrategias a) y b)	Sí	No
d) Incorporar al hormigón una dosis suficiente de nitrato de litio (LiNO ₃)	No	Sí
e) Reemplazar el agregado reactivo por otro no reactivo	-	-

Tanto las normas IRAM 1512 y 1531 como el CIRSOC 201-2005, incluyen dos alternativas adicionales para prevenir la RAS, además de las indicadas en la tabla 2. La primera, de carácter prescriptivo, muy conservadora (46), consiste en utilizar un cemento resistente a la reacción álcali-agregado (RRAA), que cumpla la IRAM 50001 (45). La segunda, de tipo prestacional, radica en reemplazar parcialmente el agregado reactivo, por otro no reactivo, y evaluar la efectividad de esta solución mediante los métodos IRAM 1674 o IRAM 1700. Como se mencionó en el punto 2, la dificultad de valorar la efectividad de este recurso de manera confiable, limita su aplicación en la práctica (34).

Por lo expuesto, en lo que sigue sólo se detallarán los lineamientos de cada uno de los enfoques adoptados por AASHTO.

4.1. ENFOQUE PRESCRIPTIVO

En el enfoque prescriptivo (tabla 2), el nivel permitido de álcalis en el hormigón o el contenido requerido de AMA dependen de la reactividad del agregado, del tipo y tamaño de la estructura, de las condiciones de exposición de ésta y de la composición química del cemento y de las AMA.

A continuación, se describen los pasos necesarios para seleccionar las distintas estrategias que es posible adoptar (tabla 2) para reducir el riesgo de RAS.

4.1.1. Determinación del grado de reactividad del agregado

El primer paso consiste en la evaluación del grado de reactividad del agregado (GRA). El GRA (tabla 3) se define a través del valor de la expansión, a un año, obtenido con el método del prisma de hormigón ASTM C1293 (47), equivalente al IRAM 1700 (48).

Tabla 3—Clasificación del agregado según su reactividad (ASSHTO PP 65-10)

Clase de reactividad del agregado	Nivel de reactividad del agregado	Expansión del hormigón a 1 año (%) ¹⁾	Expansión del mortero a 16 días (%) ²⁾
R0	No reactivo	≤ 0,04	≤ 0,10
R1	Moderadamente reactivo	> 0,04; ≤ 0,12	> 0,10; ≤ 0,30
R2	Altamente reactivo	> 0,12; ≤ 0,24	> 0,30; ≤ 0,45
R3	Extremadamente reactivo	> 0,24	> 0,45

1) Expansión del prisma de hormigón a 52 semanas según ASTM C1293 (similar a IRAM 1700)
2) Expansión de la barra de mortero a la edad de 16 días según AASHTO T 303 (similar a IRAM 1674)

Cuando no se dispone del resultado del ensayo de hormigón, el GRA puede determinarse mediante el método acelerado de la barra de mortero ASTM C1260 (49), equivalente al IRAM 1674 (50). En este caso, los límites de expansión adoptados (tabla 3) surgen de estudios comparativos realizados con el método del prisma de hormigón (51), a pesar de la pobre correlación que existe entre ambos métodos (52-53). Esta objeción, sin embargo, en la práctica es desestimada ya que la mayoría de las veces no se dispone de los resultados del ensayo del prisma de hormigón. Las experiencias desarrolladas en Argentina (53), similares a las informadas por EEUU y Canadá, prueban que los resultados de este método pueden ser empleados en la determinación del GRA y se ubican del lado de la seguridad.

Cuando no se cuenta con datos del agregado, el mismo debe ser considerado de muy alta reactividad (R3).

En cualquier caso (ASTM C1260 o ASTM C1293), el valor de expansión que debe tomarse para determinar el GRA es el máximo obtenido al ensayar cada uno de los agregados en forma individual. IRAM, al igual que Canadá (37), adoptan el valor de expansión que corresponde a la combinación de los agregados fino y grueso propuestos para el hormigón de obra (40% de agregado fino + 60% de agregado grueso). Si el resultado de esta combinación no está disponible, se adopta el criterio de AASHTO.

Si la expansión del hormigón es inferior a 0,04% (o menor a 0,10% en el mortero), los agregados deben considerarse no reactivos y no es necesario adoptar medidas preventivas.

Para distinguir si el agregado es de moderada (R1) o alta reactividad (R2), se utiliza un límite de expansión igual a 0,12%. Este valor fue adoptado por la CSA para separar el comportamiento de dos agregados canadienses, ampliamente estudiados por investigadores de este país, que han servido para el desarrollo de la norma CSA A23.2-27A (51). Los agregados “extremadamente reactivos” (R3) poseen valores de expansión en el hormigón mayores a 0,24 % a un año. Canadá propone un valor igual a 0,26% (37).

Actualmente, las normas IRAM 1512 y 1531, por haber sido elaboradas en base a la versión de 2004 de la norma canadiense (44), clasifican el GRA en tres categorías, sin incluir la R3 (agregados “extremadamente reactivos”). Un aspecto a destacar de estas normas es que, merced a una reciente modificación, han introducido el denominado “método acelerado del prisma de hormigón” (48), mediante el cual, es posible valorar la reactividad alcalina potencial del agregado en tres meses, con una efectividad del orden del 90%, muy superior a la del método acelerado de la barra de mortero (6).

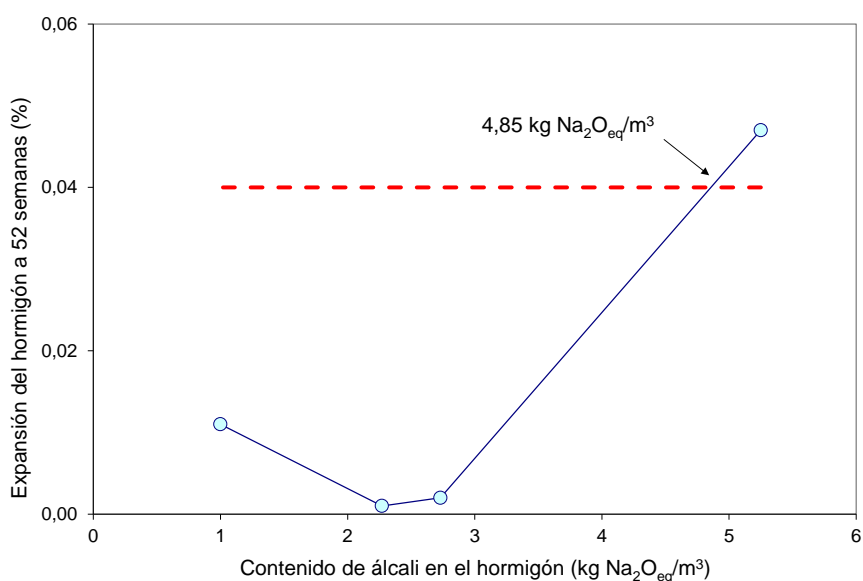


Figura 3—Determinación del umbral mínimo de álcalis según RILEM

Es importante mencionar que la magnitud de la expansión no es la única forma de valorar el GRA. RILEM (35), por ejemplo, propone determinar el GRA a través del denominado “umbral alcalino”, definido como el contenido mínimo de álcalis que es requerido en el hormigón para iniciar la expansión con ese agregado en particular (figura 3). Si bien este concepto posee mayor mérito técnico que la mera medición de la expansión, la enorme variedad de agregados en Argentina y la complejidad de esta determinación, hace impráctica la adopción de esta metodología en la actualidad (26).

4.1.2. Evaluación del riesgo de RAS

Estudios de laboratorio han demostrado que la expansión de la RAS cesa cuando la humedad interna del hormigón se ubica por debajo del 80% (1-3). En elementos estructurales no masivos (mínima dimensión < 0,9 m), expuestos a ambiente seco, es de esperar que la humedad relativa interna del hormigón disminuya con el tiempo, hasta ubicarse eventualmente por debajo del nivel requerido para sustentar la RAS, antes de que la expansión alcance una magnitud significativa, a menos que se utilice un agregado extremadamente reactivo. Por ello, en este caso, se considera que el nivel de riesgo de RAS es bajo (nivel 1) cuando se utiliza un agregado inocuo o moderadamente reactivo y aumenta con la reactividad de éste (tabla 4).

Los elementos estructurales masivos (mínima dimensión $\geq 0,9$ m), en cambio, aún expuestos a ambiente seco, poseen un mayor riesgo de RAS debido a su capacidad para mantener, por largo tiempo, la humedad interna del hormigón.

Si bien la velocidad de avance de la RAS depende del grado de exposición del hormigón a la humedad (los elementos expuestos al contacto directo con el agua se deterioran más rápidamente que los elementos expuestos al aire húmedo), este aspecto no es tenido en cuenta en el enfoque prescriptivo.

Tabla 4—Evaluación del riesgo de RAS (ASSHTO PP 65-10)

Tamaño y condiciones de exposición del elemento estructural	Reactividad del agregado			
	R0	R1	R2	R3
No masivo y seco ^{1), 2)}	1	1	2	3
Masivo y seco ^{1), 2)}	1	2	3	4
Hormigón expuesto al aire húmedo, enterrado o sumergido	1	3	4	5
Hormigón expuesto al contacto con álcalis ³⁾	1	4	5	6

1) Se considera elemento masivo cuando posee una dimensión mínima superior a 0,9 m
2) Se considera ambiente seco cuando la humedad relativa ambiente promedio es menor a 60%
3) Ejemplos de estructuras expuestas al contacto de álcalis: estructuras marinas expuestas al contacto con el agua de mar y estructuras viales expuestas a la acción de las sales descongelantes (NaCl) o anticongelantes (acetato de potasio, formato de sodio, etc.)

El rol de los álcalis externos es ambiguo. Para la CSA, un elemento de hormigón, no masivo, inmerso continuamente en agua de mar, no presenta un riesgo de RAS mayor que un elemento similar expuesto a un medio húmedo. Lo dicho, se debe a que la concentración alcalina del agua de mar (30 g/L NaCl \approx 0,51 N NaCl o Na⁺) es menor que la de la solución de poros del hormigón.

Por otro lado, experiencias de laboratorio han demostrado que las sales alcalinas de los ácidos acético o fórmico, habitualmente empleadas como agentes descongelantes o anticongelantes en pavimentos, agravan la RAS. Si bien, no se conoce la implicancia de este fenómeno a escala real, donde la profundidad de penetración de este tipo de sustancias es limitada, AASHTO considera prudente, en estos casos, incrementar el riesgo de RAS “un nivel”, en comparación a aquellos elementos de hormigón expuestos a un medio húmedo solamente.

La RAS, como la mayoría de las reacciones químicas, es acelerada por un incremento de la temperatura. Para hormigones de la misma composición, cuanto más cálido es el ambiente (climas templados o tropicales), mayor es la velocidad de expansión y menor el tiempo de aparición de fisuras. A pesar de lo expuesto, hasta el momento, ninguna guía ha sido capaz de incluir este factor entre las condiciones de exposición de la estructura. Es posible, que en futuras revisiones de la AASHTO se tenga en cuenta este aspecto.

4.1.3. Clasificación de la estructura

Como se verá en 4.1.4, el nivel de prevención requerido para controlar los efectos deletéreos de la RAS, depende del nivel de riesgo de RAS (4.1.2) y del tipo de estructura, tipificada en función de la severidad de las consecuencias que genera la reacción (tabla 5).

La categorización que propone AASHTO para clasificar la estructura es una adaptación de la propuesta efectuada por el grupo RILEM (35), orientada al campo vial.

Según este enfoque, el riesgo de RAS que admite la estructura no sólo depende de la vida útil en servicio prevista para ella, sino también de factores económicos, ambientales o ligados con la seguridad. El listado propuesto en esta tabla no debe considerarse taxativo y sólo busca asistir al comitente, en cooperación con el proyectista, a definir la categoría de la estructura a construir.

Tabla 5—Clasificación de la estructura en función de la severidad de las consecuencias derivadas del deterioro producido por la RAS (ASSHTO PP 65-10)

Clase de estructura	Consecuencias de la RAS sobre la seguridad, economía o el ambiente	Grado de aceptación del deterioro provocado por la RAS	Ejemplos
S1	Despreciables	Algún deterioro puede ser tolerado	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos no estructurales de edificios • Elementos no expuestos a la humedad • Estructuras temporarias (vida útil < 5 años)
S2	Moderadas (si el daño es importante)	Un riesgo moderado de RAS es aceptable	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Pavimentos • Alcantarillas, barreras de seguridad (New Jersey) • Puentes rurales, de bajo tránsito • Elementos premoldeados cuyos costos de reemplazo son excesivos • Estructuras con vida útil en servicio entre 40 y 75 años
S4	Graves	La posibilidad de RAS no es tolerada	<ul style="list-style-type: none"> • Puentes principales • Tuneles • Elementos críticos cuya inspección o reparación resulta muy difícil • Estructuras con vida útil en servicio > 75 años

4.1.4. Determinación del nivel de prevención requerido

En la tabla 6 se establecen los niveles de prevención requeridos por AASHTO en función del nivel de riesgo de RAS (tabla 4) y la clasificación de la estructura (tabla 5).

Tabla 6—Definición del nivel de prevención requerido (ASSHTO PP 65-10)

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

(#) No se permite la construcción de una estructura clase S4 cuando el riesgo de RAS es de nivel "6". En estos casos, se deben tomar medidas complementarias a fin de reducir el nivel de riesgo de RAS.

4.1.5. Medidas de prevención

4.1.5.1. Determinación del contenido máximo de álcalis del hormigón

En la tabla 7 se indican los contenidos máximos admisibles de álcalis del hormigón para cada nivel de prevención. Estos límites se basan en datos publicados que surgen del estudio del comportamiento de estructuras de hormigón en servicio y de experiencias de campo realizadas con prototipos de hormigón (51,54,55).

Tabla 7—Contenido máximo de álcalis en el hormigón para controlar la RAS en función del nivel de prevención requerido (ASSHTO PP 65-10)

Nivel de prevención	Contenido máximo de álcalis en el hormigón (kg de Na ₂ O _{eq} /m ³)
V	No se requiere ningún límite
W	3,0
X	2,4
Y	1,8
Z	Tabla 9
ZZ	

Para AASHTO, los álcalis a considerar en el cómputo son sólo aquellos que aporta el cemento pórtland. Sin embargo, advierte que el resto de los componentes de la mezcla (agregados de origen marino, agua de reciclado, aditivos) también pueden incorporar álcalis al hormigón, por lo que su contribución debería ser tenida en cuenta. Este último concepto, sin embargo, no está incluido en las normas americanas más recientes (37,39) y tampoco es considerado por las normas IRAM (27,30).

Si bien las AMA también contienen álcalis, su incorporación al hormigón inmoviliza gran parte de estos, merced a la mayor cantidad productos de hidratación generados por aquellas, lo cual, reduce el pH del hormigón. En otras palabras, cuando se utilizan AMA, ya sea como un componente más de la mezcla o formando parte del cemento (CPC, CPE, CPP, CAH), los álcalis que provienen de éstas no deben ser tenidos en cuenta en el cálculo. Este último es válido, no obstante, siempre que los contenidos de álcalis de las AMA cumplan los límites indicados en la tabla 8.

Para verificar si el contenido total de álcalis del hormigón resulta inferior al valor límite requerido por la norma, se utiliza la siguiente expresión:

$$A_H = 0,01 \times A_C \times C$$

Donde:

- A_H: Contenido de álcalis del hormigón (kg de Na₂O_{eq}/m³)
- A_C: Contenido de álcalis del cemento, según ASTM C114 (% de Na₂O_{eq})
- C: Contenido de cemento por m³ de hormigón (kg/m³)

Para tener en cuenta las variaciones propias del proceso de fabricación del cemento, IRAM, tomando el criterio canadiense, recomienda incrementar el valor promedio del contenido de álcalis (μ_{Ac}) en una desviación estándar (s_{Ac}) o en una cantidad igual a 0,05%, si no se dispone del valor informado por el fabricante. Esta previsión, sin embargo, no es tenida en cuenta en el procedimiento de AASHTO.

El criterio propuesto por IRAM fue empleado en el país, por primera vez, para el diseño de la mezcla empleada en la construcción del tramo V, Sección I (A° Ayuí Grande – A° Mandisoví Grande) de la Ruta Nacional N° 14 (24). El agregado grueso utilizado en ese tramo fue un basalto de moderada reactividad (56), para el cual, se especificó un cemento con un contenido de álcalis menor a 0,70% de Na₂O_{eq}, de manera que el contenido de álcalis del hormigón, aportado por el cemento, no superara 2,4 kg de Na₂O_{eq}/m³.

4.1.5.2. Determinación del contenido mínimo de AMA del ligante

En las tablas 8 y 9 se indican los % mínimos de AMA, en masa, que corresponde incorporar al hormigón (sea como un componente de la mezcla o como parte integrante del cemento), para cada nivel de prevención.

Tabla 8—Contenido mínimo de AMA en el cemento u hormigón para controlar la RAS en función del nivel de prevención requerido (ASSHTO PP 65-10)

Tipo de AMA	Contenido de álcalis de la AMA (% Na ₂ O _{eq})	Contenido mínimo de AMA en el ligante (% en masa)				
		Nivel de prevención W	Nivel de prevención X	Nivel de prevención Y	Nivel de prevención Z	Nivel de prevención ZZ
Ceniza volante (CaO ≤ 18%)	≤ 3,0	15	20	25	35	Tabla 9
	> 3,0; ≤ 4,5	20	25	30	40	
Escoria granulada de alto horno	≤ 1,0	25	35	50	65	
Humos de sílice (Si ₂ O ≥ 85%) ⁽²⁾	≤ 1,0	2,0 x AH	2,5 x AH	3,0 x AH	4,0 x AH	

1) La AMA puede ser incorporada directamente al hormigón, como un componente más de la mezcla, o formar parte del cemento.
2) AH: Contenido de álcalis del hormigón (kg de Na₂O_{eq}/m³). El contenido mínimo de humos de sílice debe ser ≥ 7 %.

Tabla 9—Empleo combinado de un bajo contenido de álcalis en el hormigón con AMA para proveer un nivel excepcional de prevención frente a la RAS (ASSHTO PP 65-10)

Nivel de prevención	Acción preventiva requerida frente a la RAS		
	Usar AMA como único método preventivo	Limitar el contenido de álcalis en el hormigón e incorporar una AMA en cantidad suficiente	
	Nivel mínimo de reemplazo	Contenido máximo de álcalis en el hormigón (kg de Na ₂ O _{eq} /m ³)	Nivel mínimo de reemplazo de la AMA
Z	Corresponde al nivel Z (tabla 8)	1,8	Corresponde al nivel Y (tabla 8)
ZZ	No está permitido	1,8	Corresponde al nivel Z (tabla 8)

Los contenidos mínimos indicados en estas tablas se apoyan en datos (publicados y no publicados) que surgen de investigaciones realizadas en laboratorio, del estudio del comportamiento de estructuras de hormigón en servicio y de experiencias de campo llevadas a cabo con prototipos de hormigón (51,54,55).

Los contenidos de AMA indicados en la tabla 8 son válidos para cementos con contenidos de álcalis comprendidos entre 0,70% y 1,00 % de Na₂O_{eq}. Cuando el porcentaje de Na₂O_{eq} es inferior a este rango, es posible reducir el contenido mínimo de AMA, según lo indicado en la tabla 10. Cuando el porcentaje de Na₂O_{eq} es superior, el ajuste es necesario y debe realizarse empleando la misma tabla.

El uso de puzolanas naturales o metacaolines no se halla cubierto por el criterio prescriptivo. En estos casos, la efectividad inhibidora debe demostrarse mediante ensayos de laboratorio, que se discuten en el punto 4.2 (enfoque prestacional). Un caso similar ocurre cuando las características de las AMA (contenidos de álcalis, CaO o Si₂O) caen fuera de los rangos de validez de la tabla 8.

Tabla 10—Ajuste del contenido mínimo de AMA en función del contenido de álcalis del cemento (ASSHTO PP 65-10)

Contenido de álcalis del cemento (% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)	El contenido mínimo de AMA:
$\leq 0,70$	Corresponde al nivel de prevención inmediato inferior al indicado en la tabla 8
$> 0,70$ a $\leq 1,00$	Corresponde al nivel de prevención indicado en la tabla 8
$> 1,00$ a $\leq 1,25$	Corresponde al nivel de prevención inmediato superior al indicado en la tabla 8
$> 1,25$	No se dan recomendaciones

4.2. ENFOQUE PRESTACIONAL

En el enfoque prestacional, la efectividad de la estrategia preventiva es evaluada a través de dos métodos de ensayo: uno, basado en el método acelerado de la barra de mortero (49,50) y, otro, basado en el método del prisma de hormigón (47,48).

Mediante este enfoque es posible abordar el estudio de las siguientes estrategias:

- Utilizar un cemento de uso general (IRAM 50000 o IRAM 50002), que incorpore una o más AMA (ceniza volante, escoria granulada de alto horno, puzolana natural, etc.).
- Utilizar un ligante obtenido por mezcla, en planta de hormigón, de un cemento de uso general (IRAM 50000), más una AMA que cumpla con la norma IRAM respectiva, según la adición que se trate.
- Emplear un inhibidor químico a base de nitrato de litio (LiNO_3).

En lo que sigue se describen las posibilidades y limitaciones de cada uno de estos métodos y se presentan resultados de su aplicación en casos concretos.

4.2.1 Método del prisma de hormigón

Este método (47) consiste en registrar la expansión de prismas de hormigón, almacenados bajo condiciones de alta humedad y a $38\text{ }^\circ\text{C}$, a fin de evaluar la capacidad inhibidora de la medida preventiva escogida (uso de AMA o LiNO_3).

La mezcla se realiza con el agregado reactivo bajo estudio (agua/ligante: 0,42 a 0,45) y un contenido de ligante (cemento + AMA) igual a 420 kg/m^3 .

Si el estudio se lleva a cabo para comprobar la capacidad inhibidora de un cemento que contenga AMA (opción "a"), la mezcla se dosifica con este cemento, debiéndose incrementar el contenido total de álcalis del mismo a 1,25% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (el ajuste sólo debe alcanzar a la fracción "clinker + yeso").

Si el estudio se lleva a cabo para evaluar la estrategia indicada en b), la mezcla de hormigón se realiza con el cemento propuesto para la obra y la AMA, en la proporción que corresponda. Es conveniente realizar varias mezclas, con distintos % de reemplazo, a fin de optimizar el % de adición requerido.

Cuando se emplee un aditivo químico a base de LiNO_3 (opción "c"), el contenido de agua del aditivo debe ser tenido en cuenta para la determinación de la razón agua/ligante.

Se considera que las medidas de prevención a), b) o c) son efectivas para inhibir los efectos deletéreos de la RAS cuando la expansión del hormigón, a la edad de 104 semanas, es igual o menor que 0,040%. Si bien el método del prisma de hormigón es altamente confiable, el tiempo que demanda (2 años) es incompatible con los plazos de la mayoría de los proyectos de obra.

La influencia que posee la lixiviación de los álcalis sobre la expansión del hormigón, debido a la reducida sección transversal de la probeta de ensayo, es citada como una desventaja adicional de los métodos ASTM C1293 y CSA A23.2-14A (46). Esta es la razón por la que no existe aún un método reconocido a nivel internacional para evaluar el desempeño de las “mezclas de obra”. En este sentido, los métodos propuestos por RILEM (35) o IRAM (48), al adoptar un procedimiento de curado diferente (prismas envueltos en tela, dentro de bolsas plásticas cerradas), ofrecen un mejor desempeño. El CIRSOC 201 (29) establece una metodología para evaluar la combinación de los materiales propuestos para la obra, basada en el método IRAM 1700, aunque sin mayor sustento científico.

Los resultados de expansión obtenidos con el método del prisma de hormigón proveen un pronóstico confiable acerca del comportamiento “en servicio” de hormigones elaborados con cementos con contenidos de álcalis de hasta 1,0% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Si el contenido de álcalis del cemento propuesto para la obra fuese mayor, el ensayo debería hacerse con este cemento, incrementando su contenido de álcalis en 0,25%.

4.2.2 Método acelerado de la barra de mortero

Como alternativa a lo dispuesto en 4.2.1, la efectividad de las soluciones indicadas en 4.2 puede evaluarse mediante el método ASTM C1567 (58), similar al ASTM C1260.

La mezcla de mortero se realiza con el agregado reactivo bajo estudio y el ligante propuesto para la obra (cemento + AMA). Este método puede emplearse también para evaluar la respuesta del agregado a la acción inhibidora del nitrato de litio, con algunas modificaciones en la metodología (38).

Las medidas de prevención basadas en el uso de AMA (estrategias “a” y “b”) son efectivas cuando la expansión del mortero, a los 16 días de edad, es $\leq 0,10$ %.

El método ASTM C1260 (similar al IRAM 1674) resulta muy atractivo por su celeridad, aunque adolece de algunas limitaciones, en especial, al evaluar ciertos agregados gruesos. En primer lugar, no es aplicable al estudio de la RAC y su confiabilidad es limitada para la detección de ciertos agregados que deben su reactividad al cuarzo tensionado (8,53).

Por ello, antes de aplicar el ASTM C1567, es necesario verificar que el agregado bajo estudio responde de manera adecuada a este ensayo. Para ello, la representación gráfica de los resultados de expansión del agregado reactivo, obtenidos por los métodos ASTM C1260 y ASTM C1293, debe ubicarse en la zona 2 (figura 4). En caso contrario, es más conveniente llevar a cabo la evaluación mediante la aplicación del método de hormigón.

El método ASTM C1567 no es aplicable para estudiar AMA de alto contenido de álcalis (tabla 8) ni el comportamiento de mezclas de agregados. En estos casos, la evaluación de la estrategia debería llevarse a cabo mediante el método del prisma de hormigón, cuyos resultados siempre prevalecen sobre los del método acelerado de la barra de mortero.

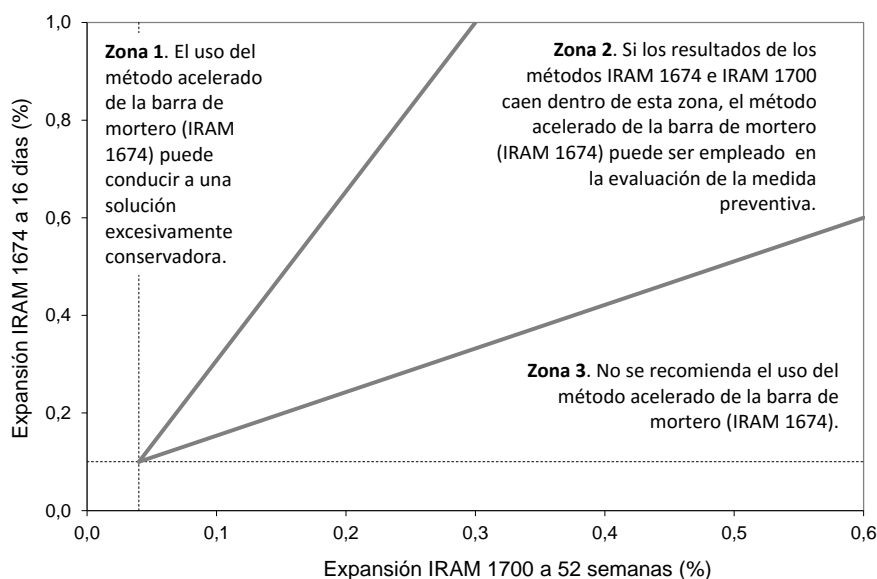


Figura 4—Comparación entre los resultados de los métodos IRAM 1674 e IRAM 1700 para valorar la aplicabilidad del primero en la evaluación de la estrategia inhibidora

5. VALIDACIÓN DEL MÉTODO AASHTO

5.1 Validación del criterio prescriptivo

La información proveniente del desempeño real de un agregado potencialmente reactivo en una estructura de hormigón es un recurso válido para valorar la efectividad de una medida preventiva (1). Si, además, dentro de la estructura existiesen elementos estructurales construidos con diferentes contenidos de álcalis, podría evaluarse la relación “contenido de álcalis vs. grado de reacción” para determinar el umbral alcalino por debajo del cual es posible inhibir la RAS.

A continuación se hará uso de este enfoque para analizar la aplicabilidad del criterio prescriptivo en nuestro país, utilizando datos extraídos de la bibliografía de pavimentos con antecedentes de reacción en servicio.

5.1.1. Pavimento de hormigón Ruta Nacional N° 127

El pavimento de hormigón de la Ruta Nacional N° 127 (120 km), que une la localidad de Federal (Entre Ríos) con el paraje Cuatro Bocas (Corrientes), es el primer pavimento ejecutado en el país con tecnología de alto rendimiento (57).

El pavimento se construyó en cuatro tramos, utilizando un hormigón de 390 kg de cemento p \acute{o} rtland normal por m³, con agregado grueso basáltico y arena silíceo natural.

La obra se inició en el tramo I (Federal), con cemento de bajo álcalis (< 0,6% Na₂O_{eq}), debido a que el basalto fue calificado como potencialmente reactivo. Luego de ejecutados pocos km, en base a resultados de ensayos de laboratorio, se decidió eliminar las restricciones referidas al contenido de álcalis del cemento. A partir de entonces, se completó el tramo I, ejecutándose el resto de los tramos con cementos de moderado contenido de álcalis (≈ 0,75%). Se sabe, además, que un sector del tramo IV se construyó con un cemento de alto contenido de álcalis (> 1,0%).

Estudios realizados luego de 10 años en servicio (22), permitieron detectar que sólo un sector del tramo IV presentaba signos claros de RAS (fisuras, geles, reducción de la resistencia a compresión en un 35%, etc.). Estos estudios demostraron que la RAS era debida al basalto y que, en los sectores afectados por la reacción (tramo IV), el contenido de álcalis solubles del hormigón era mayor a 3,0 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$. En el resto de los tramos (más de 100 km de ruta), el valor promedio resultó del orden de 2,5 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$.

La reactividad de los basaltos de la Mesopotamia (56,59) puede ser considerada moderada, R1 (expansión del hormigón a un año < 0,12%). Sabiendo que el pavimento está en contacto permanente con un medio de alta humedad, su riesgo de RAS es igual a 3 (tabla 4). Para este nivel de riesgo y tratándose de una estructura tipo S3 (tabla 5), es necesario adoptar un nivel de prevención "X" (tabla 6), lo cual, implica limitar el contenido de álcalis del hormigón a 2,4 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ (tabla 7).

En resumen:

- En los sectores donde se verificaron manifestaciones de RAS, el contenido de álcalis del hormigón resultó superior a 3,0 kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ (> 2,4 kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$).
- En los sectores donde el contenido de álcalis del hormigón era menor al valor exigido por AASHTO (2,4 kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$) no se observaron signos de RAS.

5.1.2. Pavimento del aeropuerto Teniente Benjamín Matienzo (Tucumán)

En 1989, Klaric y Fava (17,18) realizaron estudios para investigar las posibles causas del deterioro observado en algunas losas del pavimento de hormigón del aeropuerto de la ciudad de Tucumán, luego de 10 años en servicio. Estos estudios pusieron de manifiesto que la causa principal de la expansión y fisuración del hormigón era la RAS. En las losas afectadas ($\approx 30\%$) la reducción de la resistencia a compresión fue del orden del 75 % (60).

El agregado grueso es una grava lítica del Río Salí, compuesta por una elevada proporción (> 70%) de rocas esquistas, con abundantes secciones de cuarzo tensionado (ángulo de extinción ondulante > 27°). El agregado fino es una arena sílico-feldespática, constituida por cuarzo tensionado (50%), pequeñas cantidades de calcedonia ($\approx 2\%$), vidrio volcánico (< 3%) y rocas esquistas ($\approx 10\%$), además de otros minerales en cantidades menores al 1%.

El examen petrográfico del hormigón demostró que la RAS era originada, principalmente, por el agregado grueso (esquistas). La existencia de fisuras microscópicas ($\approx 10 \mu\text{m}$) en las zonas de interface y matriz, cercanas a los clastos de cuarzo y esquistas del agregado fino, permitió inferir que éste también tuvo algún grado de participación en la RAS, aunque de manera mucho más acotada. Esto es coherente con los resultados de expansión obtenidos con el método acelerado de la barra de mortero (18), que otorgan un grado de reactividad mucho mayor al agregado grueso ($\text{Exp}_{14 \text{ d}} \approx 0,33\%$), en comparación al fino ($\text{Exp}_{14 \text{ d}} \approx 0,17\%$).

Estudios realizados por Milanese (61) indican que la reactividad alcalina potencial del canto rodado del Río Salí podría considerarse moderada, R1 (expansión del hormigón a un año $\approx 0,090\%$). Si se acepta que es posible asignar a este pavimento un riesgo de RAS igual a 3 (tabla 4) y una categoría S3 (tabla 5), para inhibir la RAS se requeriría limitar el contenido de álcalis del hormigón por debajo de 2,4 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ (tabla 7).

En base al análisis de los resultados de los ensayos químicos realizados sobre los testigos de hormigón, extraídos de distintas zonas del pavimento (18,60), es posible resumir las siguientes consideraciones:

- En aquellos sectores donde se verificaron claramente manifestaciones de deterioro atribuidas a la RAS (fisuras, geles, reducción de la capacidad portante), el contenido de álcalis del hormigón se ubicó por encima de 3,0 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$.
- En las zonas donde el hormigón no presentó signos de reacción ($f'_c \approx 60$ MPa), el contenido de álcalis del hormigón resultó menor a 2,5 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$.

5.2. Validación del criterio prestacional

En las figuras 5 y 6 se muestran resultados de estudios (26,62) realizados con el propósito de evaluar la capacidad inhibidora de dos AMA (puzolana natural y ceniza volante), empleando el enfoque prestacional.

El agregado grueso reactivo es una migmatita granítica milonitizada (Azul, Buenos Aires), constituida por un 60% de cristales de cuarzo (tamaño promedio $\approx 50 \mu\text{m}$), altamente deformados ($\text{AEO} = 18^\circ$). Se empleó una arena silícea natural, de características inocuas.

Se diseñaron diversas mezclas de mortero y hormigón, utilizando un cemento de alto contenido de álcalis y diferentes % de reemplazo de puzolana natural (San Rafael, Mendoza) o ceniza volante de bajo contenido de calcio (San Nicolás, Buenos Aires). Además, se elaboraron prototipos de hormigón simple ($30 \times 30 \times 60 \text{ cm}^3$) a fin de verificar la capacidad inhibidora de las AMA a largo plazo, bajo condiciones ambientales severas (suelo salino): la mitad de los prototipos fue estacionada en cámara húmeda (23°C), la mitad restante fue enterrada en suelo salino (10000 ppm de ion SO_4^{2-}).

En la figura 5 se muestran los resultados de expansión obtenidos al aplicar el método IRAM 1700, variando el % de AMA desde 0 % a 40 %. En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos con el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674).

Como es posible observar, mientras el porcentaje mínimo de adición que inhibe la expansión del hormigón (IRAM 1700) es del orden del 10%, en el mortero (IRAM 1674) ese % es ligeramente inferior. Si bien los resultados obtenidos por ambos métodos no difieren significativamente entre sí, la diferencia puede deberse, al menos en parte, al hecho de que este agregado no cumple la condición de la figura 4: cuando los puntos se ubican en la zona 3, el método acelerado puede sobrevalorar la eficiencia de la AMA (figura 7).

Si quisiera aplicarse a este caso el criterio prescriptivo, el agregado grueso debería ser considerado moderadamente reactivo, R1 (expansión del hormigón $< 0,12$ %). Dado que los prototipos se hallan expuestos al exterior (ambiente húmedo), corresponde considerar un riesgo de RAS igual a 3. Si se admite que la categoría de la estructura es S3 (pavimentos), el % de ceniza volante requerido para inhibir la RAS es igual al 20% (tabla 8).

En la figura 8 se muestra el % de expansión alcanzado por los prototipos de hormigón a la edad de 8 años, en función del ligante empleado en la elaboración de la mezcla (con y sin AMA), para cada tipo de ambiente (cámara húmeda y suelo salino). Estos resultados muestran, para el caso de la ceniza volante de bajo calcio, que la solución propuesta por el criterio prescriptivo sigue siendo adecuada.

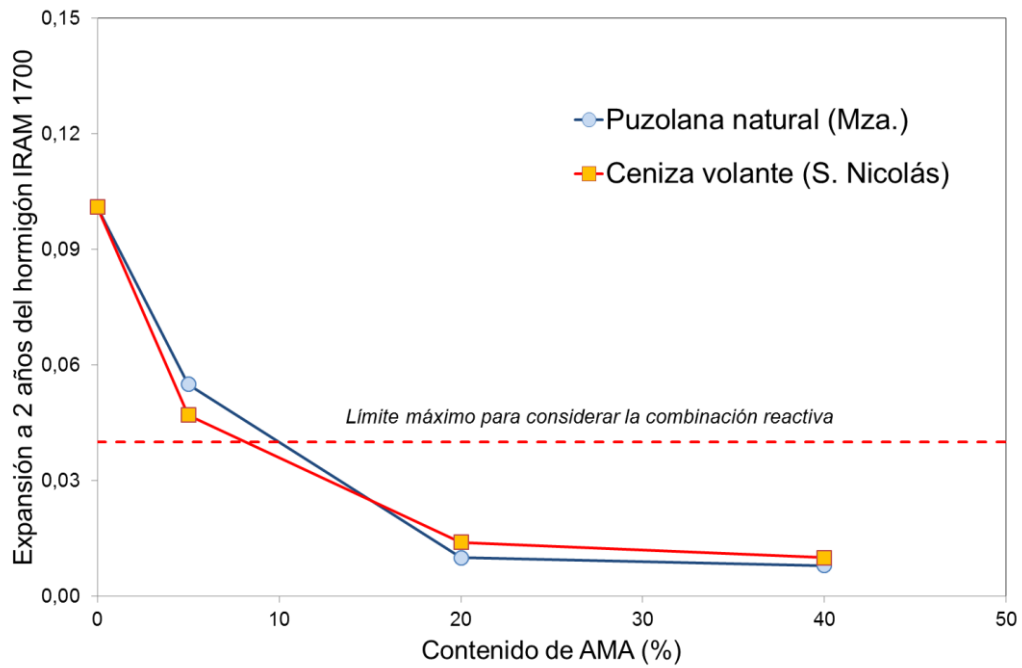


Figura 5—Determinación del contenido de AMA para inhibir a RAS (IRAM 1700)

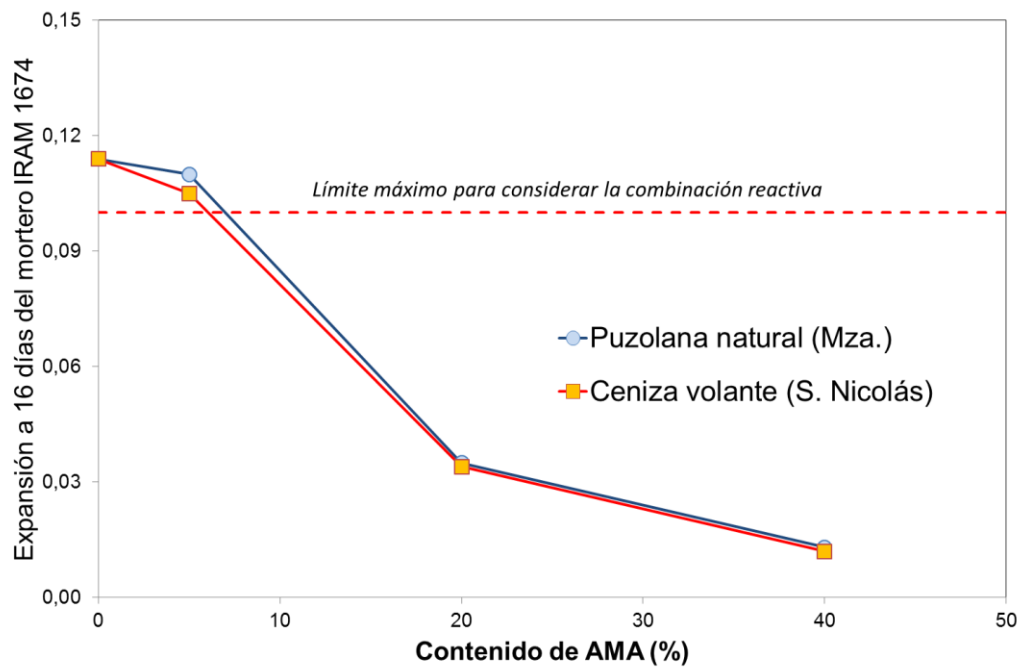


Figura 6— Determinación del contenido de AMA para inhibir la RAS (IRAM 1674)

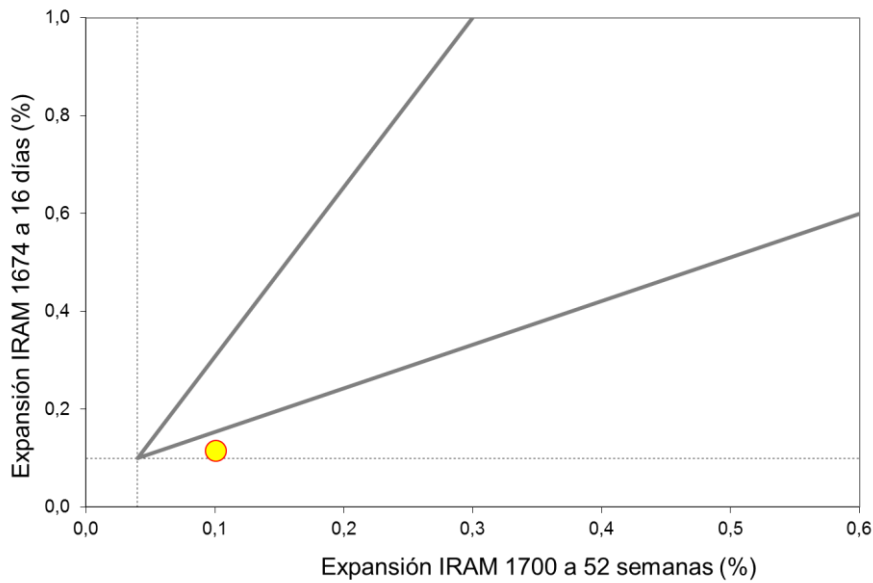


Figura 7—Comparación entre los resultados de los métodos IRAM 1674 e IRAM 1700 obtenidos con el agregado grueso reactivo de la zona de Azul, Bs. As. (Argentina)

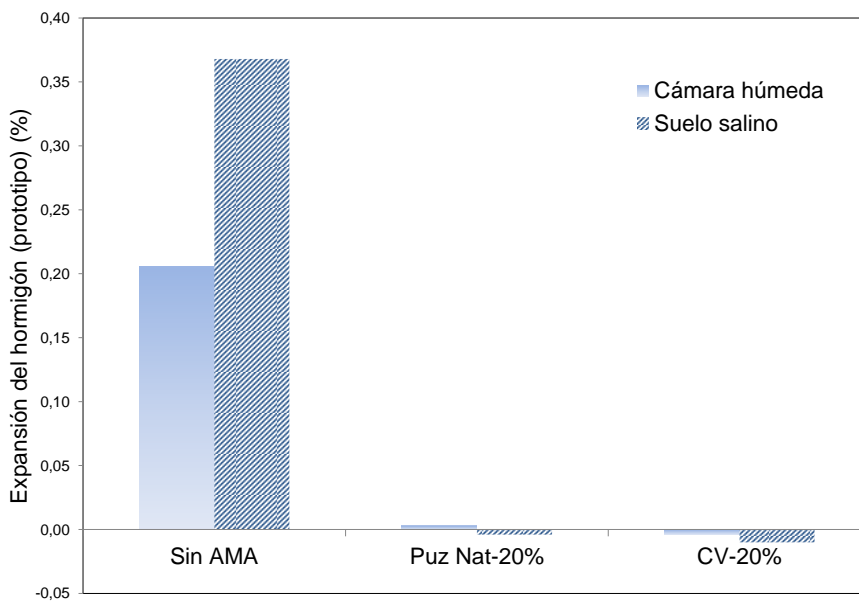


Figura 8—Eficiencia de las AMA en el control de la RAS, en distintos ambientes (ambiente húmedo y suelo salino) y para distintos porcentajes de reemplazo

6. APLICACIÓN DEL CRITERIO AASHTO AL CASO DE LA RUTA NACIONAL N° 14

En la zona de influencia de la Ruta Nacional N° 14, existen dos agregados gruesos de posible utilización para la elaboración de las mezclas de hormigón: un canto rodado silíceo y una piedra partida basáltica. Si bien, ambos, por su composición mineralógica, se consideran potencialmente reactivos, el uso del basalto constituye la alternativa más

conveniente (menor coeficiente de dilatación térmica, menor rigidez, menor dureza y mayor adherencia) (63).

Si bien este aspecto fue contemplado en el pliego de la obra, a través de la exigencia del uso de un cemento RRAA, las dudas planteadas con relación al desempeño de este tipo de cementos a edad temprana (riesgo de fisuración), motivaron la búsqueda de otras alternativas tecnológicas para inhibir los efectos deletéreos de la RAS.

A raíz de lo expuesto, se planteó, para el tramo V sección I, aplicar la metodología propuesta por la Asociación de Normalización Canadiense (44), similar a la de AASHTO, basada en el control de los álcalis aportados por el cemento al hormigón. En la tabla 11 se resumen los datos disponibles al inicio de la construcción del tramo II.

Tabla 11. Datos disponibles al inicio de la construcción del tramo II de la RN N° 14

Obra:	Ruta Nacional N° 14	
Estructura:	Pavimento de hormigón	
Contenido de cemento:	330 kg/m ³	
Contenido de álcalis del cemento:	Valor medio (μ_{Ac})	0,67 % Na ₂ O _{eq.} (informado por el fabricante)
	Desv. Estándar (s_{Ac})	0,04 % Na ₂ O _{eq.} (informado por el fabricante)
Agregado:	Grueso	Basalto (Corrientes)
	Fino	Silíceo (Entre Ríos)
Vida útil:	25 años	
Expansión a 52 semanas (IRAM 1700):	0,047 % (corresponde a la combinación de agregados grueso y fino)	

Dado que la combinación de agregados es moderadamente reactiva (R1) y sabiendo que el pavimento estará en contacto permanente con un medio de alta humedad, corresponde asumir un riesgo de RAS igual a "3" (tabla 4). Para este nivel de riesgo y tratándose de una estructura de clase S3 (tabla 5), es necesario adoptar un nivel de prevención "X" (tabla 6), lo cual, implica limitar el contenido de álcalis del hormigón a 2,4 kg de Na₂O_{eq}/m³ (tabla 7).

Como se indicó en 4.1.5.1, para verificar si el contenido total de álcalis del hormigón resulta inferior al valor límite requerido por la norma, se utiliza la siguiente expresión:

$$A_H = 0,01 \times A_C \times C$$

Para tener en cuenta las variaciones que pudieran existir en el contenido de álcalis del cemento, entre los distintos despachos, la norma canadiense recomendaba incrementar el valor promedio del contenido de álcalis (μ_{Ac}) en 1 (una) desviación estándar (s_{Ac}):

$$A_C = \mu_{Ac} + s_{Ac} = 0,67\% + 0,04\% = 0,71\%$$

Por último, el contenido total de álcalis del hormigón, aportados por el cemento, se calcula de la siguiente manera:

$$A_H = 0,01 \times 0,71\% \text{ Na}_2\text{O}_{eq} \times 330 \text{ kg/m}^3 = 2,34 < 2,4 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{eq}/\text{m}^3$$

De este modo, se verifica que el contenido total de álcalis, aportados por el cemento al hormigón, resulta inferior al valor límite requerido por la norma, con lo cual, se lograría controlar los efectos nocivos de la RAS.

7. CONCLUSIONES

En base a lo expuesto, es posible realizar las siguientes consideraciones:

- ✓ El criterio propuesto por AASHTO pone en manos del tecnólogo una herramienta útil y efectiva para seleccionar las estrategias más adecuadas para la obra a construir, orientadas a controlar los efectos derivados de la RAS.
- ✓ Los antecedentes existentes en Argentina, de pavimentos de hormigón afectados por la RAS, permiten concluir que la aplicación de este criterio es válida, particularmente en el campo vial.
- ✓ Se trata de un criterio confiable que permite optimizar los recursos disponibles en las proximidades de la obra. Su aplicación, en el caso de la Ruta Nacional N° 14, es un claro ejemplo en este sentido.
- ✓ La metodología formulada por AASHTO debe tomarse como base para actualizar las normas IRAM vigentes, de manera de potenciar los avances logrados a nivel internacional con la experiencia ganada en nuestro país. Un ejemplo en este sentido lo constituye el empleo del método acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700 a 60 °C), con el cual, es posible calificar la reactividad alcalina potencial de un agregado en tres meses, con una confiabilidad notablemente superior a la del método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674).
- ✓ Por todo lo expuesto, la inclusión en los pliegos de especificación del método AASHTO, enriquecida con la experiencia argentina, es altamente recomendable.

8. REFERENCIAS

- (1) ACI Committee 221 (2011), "State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity", ACI 221.1R-98 (Reapproved 2008), *ACI Manual of Concrete Practice*, Farmington Hills, MI (USA), 30 pp.
- (2) Fournier, B., Bérubé, M.A. (2000), "Alkali-aggregate reaction in concrete – A review of basic concepts and engineering implications", *Canadian Journal of Civil Engineering* (Special Issue on Alkali-Aggregate Reactivity in Canada), Vol. 27, N° 2, pp. 167-191
- (3) Batic, O.R., Sota, J.D. (2001), "Reacciones deletéreas internas", *Durabilidad del hormigón estructural*, E.F. Irassar (ed.), Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), Buenos Aires (Argentina), pp. 157-216
- (4) Katayama, T., Jensen, V., Rogers, C.A. (2016), "The enigma of the 'so-called' alkali-carbonate reaction", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Construction Materials*, Vol. 169, Issue CM4, pp. 223-232
- (5) Ozol, M.A. (2006), "Alkali-carbonate rock reaction", *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM STP 169D, J.F. Lamond y J.H. Pielert (ed.), American Society for Testing Materials, Philadelphia (USA), pp. 410-424
- (6) Falcone, D., Milanesi, C.A. (2012), "Método acelerado del prisma de hormigón – Evaluación de la RAS con agregados de diversas regiones de la Argentina", *Memorias, XIX Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic"*, Sota, J.D., Ortega, N.F. y Moro, J.M. (editores), AATH, Bahía Blanca, Buenos Aires (Argentina), pp. 215-222

- (7) Fava, A.S.C., Manuele, R.J., Colina, J.F., 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 portland", *Revista LEMIT*, La Plata, Buenos Aires (Argentina), Serie II, N° 85, 43 pp.
- (8) Milanesi, C.A. (2013), "Estudio de la reactividad alcalina potencial de algunas rocas dolomíticas de la Argentina frente a la reacción álcali-carbonato", *Tesis de Maestría*, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Olavarría, Buenos Aires (Argentina), 225 pp.
- (9) Milanesi, C.A., Marfil, S., Maiza, P.J., Batic, O.R. (2012), "An expansive dolostone from Argentina – The common dilemma: ACR or another variant of ASR?", *Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Drimalas, T., Ideker, J. H., & Fournier B. (editors), Texas (USA), 10 pp.
- (10) Milanesi, C.A., Locati, F., Marfil, S. (2016), "Microstructural and chemical study on an expansive dolostone from Argentina", *Proceedings, 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, San Pablo (Brasil), 10 pp.
- (11) Milanesi, C.A., Pappalardi, M., Perrone, F.H., Violini, D. (2010), "Evaluación de la aptitud de una roca dolomítica para uso en hormigones frente a la reacción álcali-agregado", *Memorias, 18^a Reunión Técnica "Ing. Cleto Agosti"*, AATH, Mar del Plata, pp. 315-322
- (12) Neville, A. (1999), "What everyone who is 'in' concrete should know about concrete", *Concrete International*, Vol. 21, Issue 4, pp. 57-61
- (13) Mehta, P.K. (1997), "Durability – Critical Issues for the future", *Concrete International*, Vol. 19, Issue 7, pp. 27-33
- (14) Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1981), "Durabilidad de hormigones de cemento pórtland", *Revista Hormigón*, AATH, N° 5, pp. 5-20
- (15) Batic, O.R., Sota, J.D., 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", *Memorias, VI Reunión Técnica*, AATH (ed.), Bahía Blanca (Argentina), Vol. 2, pp. 249-270
- (16) Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1986), "Reactivity of alkalis and sandstone cemented with opal and chalcedony", *Proceedings, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Grattan-Bellew (ed.), Noyes Publications, Ottawa (Canada), pp. 408-412
- (17) Klaric, M.E., Fava, C. (1989), "Aeropuerto Internacional Teniente Benjamín Matienzo (Tucumán) — Estudio de la condición del hormigón de la pista 01-19, plataforma y accesos", *1^{er} Informe Técnico Parcial*, Instituto Tecnológico del Hormigón (ITH), Setiembre de 1989, Informe N° 15435, 75 pp.
- (18) Klaric, M.E., Fava, C. (1989), "Aeropuerto Internacional Teniente Benjamín Matienzo (Tucumán) — Estudio de la condición del hormigón de la pista 01-19, plataforma y accesos", *1^{er} Informe Técnico Complementario*, Instituto Tecnológico del Hormigón (ITH), Noviembre de 1989, Informe N° 15512, 25 pp.
- (19) Maiza, P.J., Marfil, S.A., Milanesi, C.A. (1999), "Minerales desarrollados en hormigones deteriorados por la reacción álcali-sílice (Provincia de Córdoba)", *Memorias, VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*, COPROCA (eds.), Facultad de Ciencias Naturales de la UN de La Pampa, Santa Rosa, La Pampa (Argentina), pp. 193-199

- (20) Maiza, P.J., Marfil, S.A. (2000), "Petrografía del hormigón endurecido – Estudio de un pavimento con patologías", *Revista Hormigón*, AATH, N° 35, pp. 11-21
- (21) Giovambattista, A. (2004), "Research and repair of a concrete building affected by alkali-silica reaction", *Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, M. Tang y M. Deng (eds.), International Academic Publishers – World Publishing Corporation, Beijing (China), Vol. 2, pp. 1229-1234
- (22) Milanesi, C.A., Souza, E., Marfil, S., 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", *Memorias, XVII Reunión Técnica "Ing. José Fermín Colina"*, V. Rahhal y J.D. Sota (eds.), AATH, Córdoba (Argentina), pp. 273-280
- (23) Giovambattista, A. (2011), *Hormigón — Materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el Reglamento CIRSOC 201-2005*, INTI, INTI-CIRSOC, Buenos Aires (Argentina), 2011, 386 pp.
- (24) Milanesi, C.A., 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", *Memorias, XVII Reunión Técnica "Ing. José Fermín Colina"*, V. Rahhal y J.D. Sota (eds.), AATH, Córdoba (Argentina), pp. 265-272
- (25) Milanesi, C.A., Pappalardi, M., Violini, D. (2008), "Consideraciones sobre la aplicación del criterio canadiense para inhibir la reacción álcali-sílice", *Memorias, 1^{er} Congreso Argentino de Áridos*, Cámara de la Piedra de la Provincia de Buenos Aires (eds.), Mar del Plata (Argentina), Vol. 1, pp. 475-481
- (26) Falcone, D., Milanesi, C.A. (2013), "Medidas de prevención frente a la reacción álcali-agregado: enfoques prescriptivo y prestacional", *Memorias, Seminario Iberoamericano sobre Diseño Prestacional para Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado*, Villagran Y. (ed.), LEMIT–Consolider SEDUREC–RILEM, La Plata, Buenos Aires (Argentina), 28 pp.
- (27) Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2016), "Agregado grueso para hormigón de cemento – Requisitos y métodos de ensayo", *Norma Argentina IRAM 1531*, 5ª edición, 36 pp.
- (28) Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1985), "Reacción álcali-sílice – Implicancias tecnológicas, ecológicas y económicas en la optimización de las soluciones ingenieriles", *Memorias, Colloquia 85*, AATH (eds.), Buenos Aires (Argentina), Vol. 2, pp. 453-462
- (29) INTI-CIRSOC (2005), "Especificaciones por resistencia y durabilidad", Capítulo 2, *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón – CIRSOC 201*, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación, pp. 26-30
- (30) Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013), "Agregado fino para hormigón de cemento – Requisitos", *Norma Argentina IRAM 1512*, 4ª edición, 25 pp.
- (31) Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1986), *Concrete: Microstructure, properties, and materials*, 3rd edition, The McGraw-Hill Companies, New York, 659 pp.
- (32) Mindess, S., Young J.F. (1981), *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. Jersey, 671 pp.

- (33) Alexander, M., Mindess, S. (2005), *Aggregates in concrete*, Modern Concrete Technology Series, Taylor & Francis Group, Vol. 13 (e-Library edition, 2010), 435 pp.
- (34) Falcone, D., Milanese, C.A. (2016), "Aplicación del método acelerado de la barra de mortero en el estudio de combinación de agregados", *Memorias, 7º Congreso Internacional y 21ª Reunión Técnica "Ing. del Valle Castría"*, AATH, Salta, 8 pp. (en prensa)
- (35) Sims, I., Hawthorn, F., Nixon, P. (2004), "Developing an international specification to combat AAR – Proposals of RILEM TC 191-ARP", *Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, M. Tang y M. Deng (eds.), Beijing (China), Vol. 2, pp. 8-16
- (36) Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K. (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*, Office of Pavement Technology, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington (USA), 21 pp.
- (37) CSA (2014), "A23.2-27A – Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete", *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23.2-14)*, CSA, Mississauga, Ontario (Canada), August 2014, pp. 439-449
- (38) AASHTO (2010), "AASHTO PP 65-10 – Standard practice for determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction", *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing - Provisional Standards*, AASHTO, 2010 (30th edition), Washington, D.C. 20001 (USA), 20 pp.
- (39) ASTM (2014), "Standard guide for reducing of deleterious alkali-aggregate reaction in concrete", ASTM C1778-14, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, USA, 04.02 (Concrete and Aggregates), 11 pp.
- (40) INTI-CIRSOC (1984), *Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*, Reglamento CIRSOC 201 y Anexos, Tomo I, INTI (ed.), 172 pp.
- (41) Giovambattista, A. (1977), "El Proyecto de Salto Grande - Estudios tecnológicos y criterios de diseño de sus hormigones", *Memorias, 3ª Reunión Técnica*, AATH, Entre Ríos, Tomo I, 1-1-A, 43 pp.
- (42) Wainsztein, M., Barranquero, H., Muñoz, L. (1989), "Investigación y caracterización de los áridos empleados en las estructuras de hormigón de Yacyretá", *Memorias, 9ª Reunión Técnica*, AATH, Buenos Aires, Tomo I, pp. 287-300
- (43) Ahlstrom, G., Mullarky, J., Faridazar, F. (2008), "The United States Federal Highway Administration's efforts to eliminate alkali-silica reaction in concrete transportation structures", *Proceedings, 13th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim (Norway), 10 pp.
- (44) CSA (2004), "A23.2-27A – Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete", *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23.2-09)*, CSA, Mississauga, Ontario (Canada), pp. 317-326
- (45) IRAM (2010), "Cemento – Cemento con propiedades especiales", *Norma Argentina IRAM 50001*, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Diciembre de 2010, 16 pp.

- (46) Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M. (2006), "Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1842-1856
- (47) ASTM (2010), "ASTM C 1293-08b – Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction", *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia (USA), October 2012, 04.02 (Concrete and Aggregates), 7 pp.
- (48) IRAM (1997), "Agregados – Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado", *Norma IRAM 1700*, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, octubre 1997, 16 pp.
- (49) ASTM (2010), "ASTM C 1260-07 – Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)", *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia (USA), October 2012, 04.02 (Concrete and Aggregates), 5 pp.
- (50) IRAM (1997), "Agregados – Determinación de la reactividad alcalina potencial – Método acelerado de la barra de mortero", *Norma Argentina IRAM 1674*, junio 1997, 14 pp.
- (51) Thomas, M., Folliard, K., Fournier, B., Ahlstrom, G. (2012), "A prescriptive specification for the selection of measures for preventing alkali-aggregate reaction", *Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, T. Drimalas, J.H. Ideker y B. Fournier (ed.), Austin, Texas (USA), 10 pp.
- (52) Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M. (2006), "Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1842-1856
- (53) Falcone, D., Milanesi C.A. (2014), "Evaluación de la reacción álcali-agregado: Posibilidades y limitaciones de los métodos de ensayos disponibles", *Memorias, VI Congreso Internacional, 20^a Reunión Técnica "Ing. Alberto S.C. Fava"*, AATH, Concordia (Entre Ríos), Sota J. (editor), pp. 319-326
- (54) Fournier, B., Nkinamubanzi, P.C., Chevrier, R. (2004), "Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali-silica reaction in concrete", *Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, eds. M. Tang y M. Deng, Beijing (China), Vol. 2, pp. 528-537
- (55) Hooton, R.D., Rogers, C., MacDonald, C.A., Ramlochan, T. (2013), "Twenty-year field evaluation of alkali-silica reaction mitigation", *ACI Materials Journal*, Vol. 110, N° 5, pp. 539-548
- (56) Milanesi, C.A. (2008), "Experiencias sobre la caracterización de algunos basaltos de la provincia de Corrientes (Argentina) frente a la reacción álcali-sílice", *Memorias, XVII Reunión Técnica "Ing. José Fermín Colina"*, V. Rahhal y J.D. Sota (eds.), Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina), pp. 345-352
- (57) Dalimier, M., Fernández Luco, L. (1997), "Equipos de alta performance para la pavimentación de hormigón — Antecedentes de uso en la Ruta 127", *Memorias, XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, Buenos Aires, Vol. 2, pp. 785-836
- (58) ASTM (2010), "ASTM C 1567-07 – Standard test method for determining the potential alkali reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (mortar-bar method)", *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia (USA), October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 6 pp.

- (59) Rocco, C., Maiza, P., Fava, C., Marfil, S., Tobes, J. (2012), "Estudio de reactividad alcalina potencial de basaltos procedentes de yacimientos ubicados en la mesopotamia Argentina", *Memorias, XIX Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic"*, J.D. Sota, N.F. Ortega y J.M. Moro (eds.), AATH, Bahía Blanca, Buenos Aires (Argentina), pp. 159-166
- (60) Klaric, M.E. (1992), "Estudio de la reacción álcali-sílice en estructuras existentes", *Revista Hormigón*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, N° 22, pp. 19-31
- (61) Milanesi, C.A. (1995), *Informe Científico de Beca de Perfeccionamiento*, CIC-LEMIT, Marzo 1994–Abril 1995, 73 pp.
- (62) Batic, O.R., Milanesi, C.A., 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*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, N° 40, pp. 19-29
- (63) Violini, D., Pappalardi, M., Milanesi, C.A. (2015), "La importancia en la elección de los agregados para los pavimentos de hormigón – Primera Parte: Desempeño a edad temprana de los hormigones elaborados con cada uno de los áridos", *Revista Vial*, N° 103, pp. 64-71
- (64) Violini, D., Pappalardi, M., Milanesi, C.A. (2015), "La importancia en la elección de los agregados para los pavimentos de hormigón – Segunda Parte: Problemática de la reacción álcali-sílice en la toma de decisiones, desde métodos tradicionales, hasta los nuevos criterios normativos", *Revista Vial*, N° 104, pp. 30-35