



---

*Este trabajo será publicado en las memorias del  
"Seminario Iberoamericano sobre Diseño Prestacional para Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado",  
organizado por LEMIT-SEDUREC-RILEM, La Plata, Buenos Aires (Argentina), 28 y 29 de Octubre de 2013.*

---

## **MEDIDAS DE PREVENCIÓN FRENTE A LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO: ENFOQUES PRESCRIPTIVO Y PRESTACIONAL**

*Darío Falcone <sup>(1)</sup>, Carlos A. Milanesi <sup>(2)</sup>*

- 1) LEMIT-CIC, Calle 52 entre 121 y 122, La Plata, Argentina, [durabilidad@lemit.gov.ar](mailto:durabilidad@lemit.gov.ar)  
2) Jefe Departamento Técnico, C. A. S. A., Defensa 113 Piso 7, C. A. de Buenos Aires, Argentina, [cam@cavellaneda.com.ar](mailto:cam@cavellaneda.com.ar)

### **RESUMEN**

Razones económicas y ligadas con la sustentabilidad imponen hoy al proyectista a emplear los agregados disponibles en las zonas próximas a la obra. Cuando estos resultan potencialmente reactivos, es necesario adoptar ciertas precauciones a fin de inhibir los efectos deletéreos de la reacción álcali-agregado (RAA). Las normas IRAM 1512 y 1531, recientemente actualizadas, establecen una serie de medidas preventivas frente a la RAA, basadas en las recomendaciones propuestas por la Asociación de Normalización Canadiense (CSA) y el grupo RILEM. En este trabajo se describe el enfoque adoptado por estas normas y se mencionan los avances registrados a nivel internacional en esta temática. Por último, se citan algunos ejemplos de aplicación y se analiza la validez del criterio normativo vigente.

### **ABSTRACT**

Economic and other reasons related to sustainability require the engineer to use aggregates in the areas close to the building site. When these aggregates are potentially reactive, it is necessary to take certain precautions in order to inhibit the deleterious effects of alkali-aggregate reaction (AAR). IRAM 1512 and IRAM 1531, recently updated, establish a series of preventive measures against AAR, based on the recommendations proposed by the Canadian Standards Association (CSA) and RILEM group. This paper describes the approach taken by these standards and also refers to the international progress in this area. Based on the analysis of case studies given in the literature, the validity of the current standard specification is discussed.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Para lograr que la industria de la construcción sea sustentable es necesario diseñar mezclas de hormigón durables (1). Sin embargo, a pesar de las importantes evoluciones experimentadas por algunos códigos y reglamentos de seguridad actuales,

el tratamiento de los conceptos de durabilidad y vida en servicio de las estructuras, en el campo específico de la reacción álcali-agregado (RAA), es aún limitado (2).

Actualmente, se acepta que la RAA se divide en dos tipos: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC) (3-5).

La RAS constituye un problema real de durabilidad en numerosos países del mundo (3), incluso en Argentina, donde esta patología se conoce desde hace más de 50 años (6-15). A nivel global, se considera que la RAS es la patología más frecuente en estructuras de hormigón, después de la corrosión del acero (16).

La RAC, en cambio, es una reacción deletérea de muy rara ocurrencia (17). Si bien, en nuestro país, no se conocen antecedentes de obras en servicio que hayan resultado afectadas por la RAC, existen experiencias de laboratorio que demuestran la existencia de rocas dolomíticas con esta patología (18).

El conocimiento adquirido sobre la RAS ha puesto a disposición del tecnólogo distintas alternativas de prevención, como reducir el contenido de álcalis del hormigón o emplear adiciones minerales activas (AMA), entre otras, posibilitando así la construcción de estructuras de hormigón con un grado razonable de seguridad (4, 19-21).

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 RAC (17-18). Por esta razón, cuando se está en presencia de agregados potencialmente reactivos debido a la RAC, los reglamentos recomiendan evitar su uso (22-24).

Si se tiene en cuenta que el volumen que ocupan los agregados en el hormigón es del orden del 75%, se comprende, claramente, la importancia que este aspecto posee, especialmente en los grandes proyectos de ingeniería civil, por cuanto la solución más conveniente, desde el punto de vista técnico-económico, consiste en emplear los agregados disponibles en la zona de la obra (21).

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 (25, 26). Entre los años 2008 y 2013, ambas normas fueron sometidas a un 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 (27) y el grupo RILEM (28).

A continuación, se describe el enfoque que adoptan las normas IRAM 1512 y 1531 para seleccionar medidas preventivas apropiadas para el control de la RAA y se mencionan los avances registrados a nivel internacional en esta temática (22-24, 28). Por último, se citan algunos ejemplos de aplicación y se analiza la validez del criterio normativo vigente.

## **2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN FRENTE A LA RAS**

La RAS es una reacción química que se produce entre los iones oxhidrilos ( $\text{OH}^-$ ), presentes en la solución de poros del hormigón, y ciertos minerales silíceos metaestables (ópalo, vidrio volcánico, tridimita, etc.) que componen los agregados. El producto de esta reacción es un gel alcalino, el cual, bajo determinadas condiciones, es capaz de absorber agua y generar expansiones dentro de la estructura del hormigón, suficientes para producir la rotura del mismo (3-5).

Cuando es necesario recurrir al empleo de agregados potencialmente reactivos, las consecuencias nocivas de la RAS pueden ser controladas mediante la implementación, individual o combinada, de las siguientes estrategias (28):

- a) Restringir la alcalinidad de la solución de poros del hormigón. La limitación del contenido de álcalis ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) 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:
  - o Utilizando cementos de bajo o moderado contenido de álcalis. Éste es el método natural más conocido para mitigar los efectos de la RAS (3-5) y es el método preferido por RILEM.
  - o Incorporando adiciones minerales activas (AMA), ya sea formando parte del cemento o como un componente más de la mezcla de hormigón.
- 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  $\text{LiNO}_3$ ), 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) Evitar que el contenido de minerales potencialmente reactivos en el agregado se ubique próximo al valor crítico. Para los agregados que no presentan efecto *pessimum*, la reducción del contenido de agregado reactivo por otro inocuo (dilución) disminuye el efecto expansivo de la combinación, con lo cual, el problema tecnológico consiste en determinar en qué proporción deben mezclarse ambos agregados (reactivo e inocuo) para acotar la expansión a un valor admisible (la mayoría de las veces, esta solución es inviable por razones económicas y sustentables). En el caso que los agregados presenten efecto *pessimum*, es posible aprovechar esta característica evaluando si la combinación grueso + fino posee un comportamiento estable y de características inocuas frente a la expansión.
- d) 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.

Las normas IRAM plantean dos procedimientos alternativos para seleccionar las medidas preventivas frente a la RAS: uno de carácter prescriptivo y otro prestacional, basado en la evaluación del desempeño de mezclas de mortero u hormigón.

En la tabla 1 se resumen las medidas preventivas establecidas por IRAM en función del enfoque adoptado. A continuación, se describen los lineamientos de cada uno de ellos.

**Tabla 1—Medidas preventivas que es posible implementar, según los lineamientos de las normas IRAM 1512 e IRAM 1531, en función del enfoque adoptado**

Estrategia preventiva	Enfoque	
	Prescriptivo	Prestacional
a) Controlar que el contenido de álcalis del hormigón no supere el valor máximo	Sí	No
b) Incorporar un % mínimo de AMA al ligante (CV, EGAH)	Sí	Sí
c) Combinar las estrategias a) y b)	Sí	No
d) Incorporar una dosis suficiente de aditivo químico a base de Li	No	Sí
e) Diluir el agregado reactivo por otro no reactivo	No	Sí
f) Utilizar un cemento RRAA (resistente a la reacción álcali-agregado) que cumpla con la IRAM 50001	Sí	No

## 2.1. ENFOQUE PRESCRIPTIVO

En el enfoque prescriptivo, 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. Un caso particular se da cuando se decide utilizar un cemento RRAA, ya que la selección de esta medida preventiva no depende de los factores citados anteriormente y sólo se requiere que aquel cumpla los requisitos establecidos por la norma IRAM 50001. De todas las medidas de prevención, esta última es la más estricta y conservadora (40).

A continuación, se describen los pasos necesarios para seleccionar las distintas estrategias que es posible adoptar (tabla 1) para reducir el riesgo de RAS.

### 2.1.1. Determinación del grado de reactividad del agregado

El primer paso consiste en la evaluación del grado de reactividad del agregado (GRA). IRAM, al igual que la CSA (22) y la Administración Federal de Carreteras de los EEUU, FHWA (24), define el GRA (tabla 2) a través del valor de la expansión a un año, obtenido en el método del prisma de hormigón IRAM 1700 (29), equivalente al ASTM C 1293, CSA A23.2-14A o RILEM AAR-3 (30-32).

Para IRAM y CSA, el valor de expansión que debe utilizarse para determinar el GRA es el que corresponde a la combinación de los agregados fino y grueso propuestos para el hormigón de obra (proporción 40%/60%, respectivamente). Si el resultado de esta combinación no está disponible, se debe tomar la máxima expansión obtenida al ensayar cada uno de los agregados en forma individual. Este último, es el criterio que adoptan la FHWA y AASHTO.

Si la expansión del hormigón es inferior a 0,04 %, la combinación de los agregados bajo estudio debe considerarse no reactiva y no es necesario adoptar medidas preventivas.

**Tabla 2—Clasificación del agregado según su reactividad (IRAM 1512 e IRAM 1531)**

Grado de reactividad alcalina del agregado	Expansión del hormigón según IRAM 1700 <sup>1)</sup> (%)		Expansión a 16 días del mortero IRAM 1674 <sup>2)</sup> (%)
	A 52 semanas en el ensayo tradicional (38 °C)	A 13 semanas en el método acelerado (60 °C)	
No reactivo	< 0,04	< 0,04	< 0,10
Moderadamente reactivo	≥ 0,04; < 0,12	-	<sup>2)</sup>
Altamente reactivo	≥ 0,12	≥ 0,04	≥ 0,10

<sup>1)</sup> En caso de discrepancia entre los resultados obtenidos por los métodos de ensayo IRAM 1674 e IRAM 1700, ambos realizados sobre el mismo agregado, este último tiene prelación sobre el primero.

<sup>2)</sup> El método IRAM 1674 no es adecuado para distinguir entre agregados de moderada y elevada reactividad. Por esta razón, en ausencia de datos del ensayo IRAM 1700, los agregados que producen expansiones iguales o mayores que 0,10%, se consideran altamente reactivos.

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

Clase de reactividad del agregado	Nivel de reactividad del agregado	Expansión del hormigón a 1 año (%) <sup>1)</sup>	Expansión del mortero a 16 días (%) <sup>2)</sup>
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	Muy altamente reactivo	> 0,24	> 0,45

<sup>1)</sup> Expansión del prisma de hormigón a 1 año (CSA A23.2-14A, ASTM C 1293, RILEM AAR-3, IRAM 1700)

<sup>2)</sup> Expansión de la barra de mortero a la edad de 16 días (CSA A23.2-25A, ASTM C 1260, RILEM AAR-2, IRAM 1674)

Para distinguir si la combinación es moderada o altamente reactiva, 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.

AASHTO (23), en 2010, introduce dos modificaciones importantes (tabla 3) a la hora de valorar el GRA.

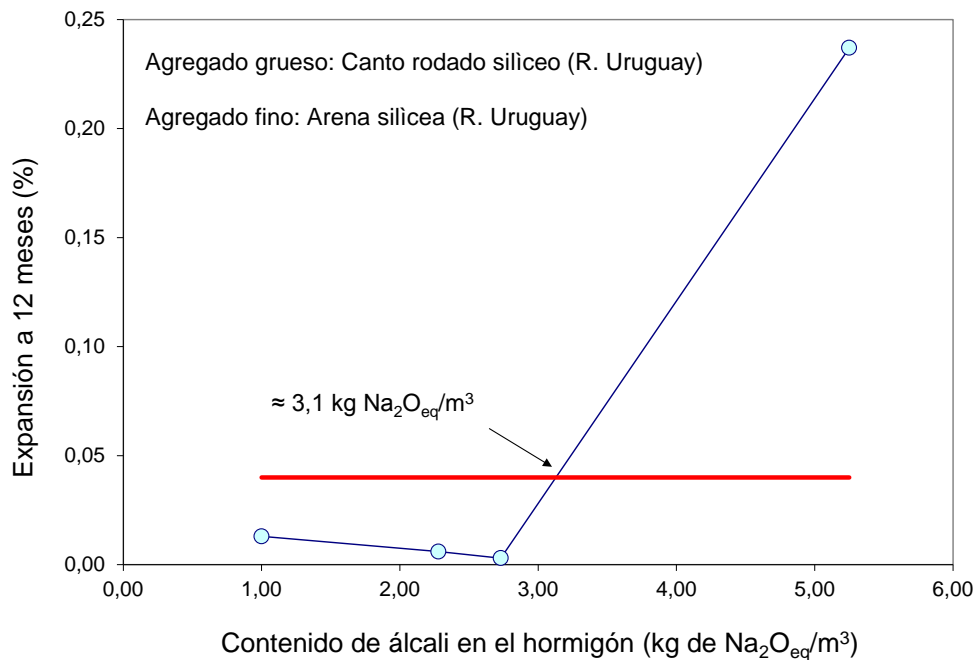
En primer lugar, AASHTO permite que el GRA pueda determinarse también aplicando el método acelerado ASTM C 1260 (33), equivalente al método IRAM 1674, CSA A23.2-25A o RILEM AAR-2 (34-36). El valor de expansión del mortero que debe tomarse en este caso es el que corresponde al del agregado que produzca la mayor expansión en este método, a la edad de 16 días. Un criterio similar es utilizado por la versión 2009 de la norma CSA (22).

Si bien los valores de expansión del mortero ASTM C 1260, propuestos para juzgar el GRA (tabla 3), surgen de estudios comparativos realizados con el método del prisma de hormigón, es bien conocida la pobre correlación que existe entre ambos métodos (38-40). A pesar de esta objeción, la posibilidad de emplear el método acelerado obedece a que, en la práctica, la mayoría de las veces no se dispone de los resultados del ensayo del prisma de hormigón (37).

La segunda modificación que introduce AASHTO es ampliar la tipificación del agregado, incorporando una cuarta categoría (“muy altamente reactivo”), a fin de contemplar la situación de algunos agregados americanos que, a diferencia de los agregados

canadienses, generan valores de expansión en el hormigón mayores a 0,24 % a un año (tabla 3). Canadá, en la versión de 2009 (22), propone un valor similar (0,23 %).

Es importante mencionar que la magnitud de la expansión no es la única forma de valorar el GRA. RILEM (28), 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 1). 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.



**Figura 1**—Determinación del umbral mínimo de álcalis según RILEM

### 2.1.2. 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 % (3-5). En elementos estructurales no masivos (mínima dimensión < 1,0 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 (tablas 4 y 5).

**Tabla 4**—Evaluación del riesgo de RAS (IRAM 1512 e IRAM 1531)

Dimensión del elemento estructural y ambiente que lo rodea	Grado de reactividad del agregado		
	No reactivo	Moderadamente reactivo	Altamente reactivo
No masivo y seco <sup>1), 2)</sup>	1	1	2
Masivo y seco <sup>1), 2)</sup>	1	2	3
Hormigón expuesto al aire húmedo, enterrado o sumergido <sup>3)</sup>	1	3	4

1) Se considera que un elemento estructural es masivo cuando su mínima dimensión lineal es mayor que 1 m.  
2) Un ambiente se considera seco cuando el valor medio anual del porcentaje de humedad relativa ambiente es menor que 60%.  
3) Un elemento de hormigón, no masivo, 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.

**Tabla 5—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 <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	1	3	4	5
Hormigón expuesto al contacto con álcalis <sup>3)</sup>	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 decongelantes (NaCl) o anticongelantes (acetato de potasio, formato de sodio, etc.)

Los elementos estructurales masivos (mínima dimensión  $\geq 1,0$  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.

El rol de los álcalis externos es complejo. 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, debido 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, en tanto que la penetración de los iones Cl<sup>-</sup> usualmente se limita a unos pocos centímetros.

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.

Por último, es interesante destacar la falta de tratamiento de la temperatura ambiente entre los factores que conforman las condiciones de exposición de la estructura. La RAS, como la mayoría de las reacciones químicas, es acelerada por un incremento de la temperatura. En otras palabras, 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 fisuración. Es posible, que en futuras revisiones de la CSA o AASHTO se incluya la temperatura como un factor más a considerar entre las condiciones de exposición de la estructura.

### **2.1.3. Clasificación de la estructura**

Como se verá en 2.1.4, el nivel de prevención requerido para controlar los efectos deletéreos de la RAS, depende del nivel de riesgo de RAS (2.1.2) y del tipo de estructura, tipificada en función de la severidad de las consecuencias que genera la reacción.

La categorización que propone IRAM para clasificar la estructura (tabla 6) es una adaptación de la propuesta efectuada por el grupo RILEM (28). Una clasificación similar, orientada al campo vial, es propuesta por AASHTO (tabla 7).

Según este enfoque, el riesgo de RAS que admite la estructura no sólo depende de la vida útil en servicio prevista para ella (22), sino también de factores económicos, ambientales o ligados con la seguridad.

El listado propuesto en estas tablas no debe considerarse taxativo y sólo busca asistir al comitente, en cooperación con el proyectista, a definir la categoría de la estructura a construir.

### **2.1.4. Determinación del nivel de prevención requerido**

En la tabla 8 se establecen los niveles de prevención requeridos por IRAM para controlar los efectos nocivos de la reacción, en función del nivel de riesgo de RAS (tablas 4 y 5) y la clasificación de la estructura (tablas 6 y 7). En la tabla 9 se consignan los niveles de prevención propuestos por AASHTO.

**Tabla 6**—*Clasificación de la estructura en función de la severidad de las consecuencias derivadas del deterioro producido por la RAS (IRAM 1512 e IRAM 1531)*



Categoría de la estructura	Riesgo asociado	Ejemplos
S1	Bajo	Elementos temporarios (vida útil en servicio requerida menor o igual a 5 años) Elementos de fácil reemplazo.
S2	Normal	La mayor parte de las construcciones y estructuras de ingeniería civil con vida útil en servicio prevista entre 5 años y 75 años.
S3	Elevado	Hormigones de alto desempeño o estructuras altamente críticas con vida útil en servicio prevista mayor que 75 años o para las cuales una reparación importante es imposible o muy costosa. Por ejemplo: a) instalaciones nucleares, b) presas, c) túneles, d) puentes o viaductos importantes, e) estructuras de contención de productos peligrosos.

**Tabla 7—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"> <li>• Elementos no estructurales de edificios</li> <li>• Elementos no expuestos a la humedad</li> <li>• Estructuras temporarias (vida útil &lt; 5 años)</li> </ul>
S2	Moderadas (si el daño es importante)	Un riesgo moderado de RAS es aceptable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veredas, cordones y cunetas</li> <li>• Estructuras con vida útil en servicio &lt; 40 años</li> </ul>
S3	Considerables (si los daños son pequeños)	Un riesgo mínimo de RAS es aceptable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pavimentos</li> <li>• Elementos de fundación, muros de contención</li> <li>• Alcantarillas, barreras de seguridad (New Jersey)</li> <li>• Caminos rurales, de bajo tránsito</li> <li>• Elementos premoldeados cuyos costos de reemplazo son excesivos</li> <li>• Estructuras con vida útil en servicio entre 40 y 75 años</li> </ul>
S4	Graves (si los daños son pequeños)	La posibilidad de RAS no es tolerada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puentes principales</li> <li>• Plantas de generación eléctrica</li> <li>• Presas</li> <li>• Instalaciones nucleares</li> <li>• Tuneles</li> <li>• Elementos críticos cuya inspección o reparación resulta muy difícil</li> <li>• Estructuras con vida útil en servicio &gt; 75 años</li> </ul>

**Tabla 8—Definición del nivel de prevención requerido (IRAM 1512 e IRAM 1531)**

Nivel de riesgo de RAS	Categoría de la estructura		
	S1	S2	S3
1	A	A	A
2	A	B	C
3	A	C	D
4	B	D	E

**Tabla 9**—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.

## 2.1.5. Medidas de prevención

### 2.1.5.1. Determinación del contenido máximo admisible de álcalis del hormigón

En las tablas 10 y 11 se indican los contenidos máximos admisibles de álcalis del hormigón que corresponde aplicar 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 (37, 44, 45).

Los álcalis a considerar en el cómputo son los que aporta el cemento pórtland. 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<sub>H</sub>: Contenido de álcalis del hormigón (kg de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>/m<sup>3</sup>)
- A<sub>C</sub>: Contenido de álcalis del cemento, según ASTM C 114 (% de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>)
- C: Contenido de cemento por m<sup>3</sup> de hormigón (kg/m<sup>3</sup>)

**Tabla 10**—Contenido máximo de álcalis en el hormigón para controlar la RAS en función del nivel de prevención requerido (IRAM 1512 e IRAM 1531)

Nivel de prevención	Contenido máximo de álcalis aportados por el cemento (kg de Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> /m <sup>3</sup> )
A	No se requiere limitar el contenido de álcalis
B	3,0
C	2,4
D	1,8
E	1,8 + AMA <sup>(1)</sup>

1) Para el nivel E se requiere limitar el contenido de álcalis del hormigón y usar una AMA en cantidad igual o superior a la que corresponde al nivel de prevención "D"

**Tabla 11**—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 <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	

1) Para los niveles Z y ZZ se requiere limitar el contenido de álcalis y usar una AMA (ver tabla 15)

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 ( $\mu_{Ac}$ ) en una desviación estándar ( $s_{Ac}$ ), o en una cantidad igual a 0,05 %, si no se dispone del valor informado por el fabricante:

$$A_C = \mu_{Ac} + s_{Ac}$$

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 (A° Ayuí Grande –A° Mandisoví Grande) de la Ruta Nacional N° 14 (19). El agregado grueso utilizado en ese tramo fue un basalto de moderada reactividad, para el cual, se especificó un cemento con un contenido de álcalis menor a 0,70 % de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>, de manera que el contenido de álcalis del hormigón, aportado por el cemento, no superara 2,4 kg de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>/m<sup>3</sup>.

Si bien las AMA también contienen álcalis, su incorporación al hormigón inmoviliza gran parte de estos, merced a la mayor cantidad de 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, los álcalis que provienen de éstas no deben ser tenidos en cuenta en el cálculo. Este razonamiento, sin embargo, es válido siempre que los contenidos de álcalis de las AMA cumplan los límites indicados en las tablas 12 y 13.

AASHTO (23) alerta que el resto de los componentes de la mezcla (agregados de origen marino, agua de reciclado, aditivos) pueden incorporar álcalis al hormigón, por lo que su contribución debería ser tenida en cuenta. Este concepto, sin embargo, no está incluido en la norma canadiense (22), por lo cual, tampoco es considerado por las normas IRAM (25, 26).

### **2.1.5.2. Determinación del contenido mínimo de AMA del ligante**

En las tablas 12 y 13 se indican los % mínimos de AMA, en masa, que corresponde incorporar al ligante, para cada nivel de prevención.

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 (22, 37, 44, 45).

Los contenidos de AMA indicados por la norma IRAM (tabla 12) son válidos para cementos con contenidos de álcalis menores que 1,00 % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . Cuando el porcentaje de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  se encuentra entre 1,00 % y 1,25%, el contenido mínimo de AMA es el que corresponde al nivel de prevención inmediato superior al requerido en función del riesgo de RAS previsto. Un concepto similar es aplicado por AASHTO (tabla 14).

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 2.2 (enfoque prestacional). Un caso similar ocurre cuando el contenido de álcalis de la escoria granulada de alto horno o de la ceniza volante sea mayor que 1,0 % o 4,5 % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ , respectivamente.

**Tabla 12—Contenido mínimo de AMA en el cemento u hormigón para controlar la RAS en función del nivel de prevención requerido (IRAM 1512 e IRAM 1531)**

AMA	Contenido de álcalis de la adición (% Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	Contenido mínimo de adiciones en el cemento (% en masa)		
		Nivel de prevención B	Nivel de prevención C	Nivel de prevención D
Escoria granulada de alto horno	< 1,0	25	35	50
Ceniza volante	< 3,0	15	20	25
	De 3,0 a 4,5	20	25	30

**Tabla 13**—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 <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	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	Ver tabla 15
	3,0 - 4,5	20	25	30	40	
Escoria granulada de alto horno	< 1,0	25	35	50	65	
Humos de sílice (Si <sub>2</sub> O ≥ 85 %) <sup>(1)</sup>	< 1,0	2,0 x AH	2,5 x AH	3,0 x AH	4,0 x AH	

1) 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 %.

**Tabla 14**—Ajuste del contenido mínimo de AMA en función del contenido de álcalis del cemento (ASSHTO PP 65-10)

Contenido de álcalis del cemento (% de Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	El contenido mínimo de AMA:
< 0,70	Podrá corresponder al nivel de prevención inmediato inferior al recomendado en la tabla 9
0,70 a 1,00	Corresponde al nivel de prevención recomendado en la tabla 9
1,00 a 1,25	Corresponde al nivel de prevención inmediato superior al recomendado en la tabla 9
> 1,25	No se dan recomendaciones

**Tabla 15**—Empleo combinado de AMA con bajo contenido de álcalis en el hormigón 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		
	Uso de 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 <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> /m <sup>3</sup> )	Nivel mínimo de reemplazo de la AMA
Z	Corresponde al nivel Z (tabla 13)	1,8	Corresponde al nivel Y (tabla 13)
ZZ	No está permitido	1,8	Corresponde al nivel Z (tabla 13)

### 2.1.6. Comprobación de la validez 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 (3). Por ejemplo, si 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 obras con antecedentes de reacción en servicio.

#### 2.1.6.1. 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 (41).

El pavimento se construyó entre los años 1996 y 1997, en cuatro tramos, utilizando un hormigón elaborado con 390 kg de cemento pórtland normal por m<sup>3</sup>, agregado grueso basáltico y arena silíceo natural.

La obra se inició en el tramo I (Federal), con cemento de bajo álcalis (< 0,6 % Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>), 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 (15), permitieron detectar que sólo un sector del tramo IV presentaba signos claros de RAS (fisuras, geles, reducción del 35 % en el valor promedio de la resistencia a compresión del hormigón en testigos, etc.). Estos estudios demostraron que los fenómenos de RAS eran debidos al basalto y que, en los sectores afectados por la reacción (tramo IV), el contenido de álcalis solubles del

hormigón era mayor a  $3,0 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ . En el resto de los tramos (más de 100 km de ruta), el valor promedio resultó del orden de  $2,5 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ .

La reactividad de los basaltos de la Mesopotamia (42, 43) puede ser considerada moderada (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 una vida útil de 25 años, es necesario adoptar un nivel de prevención “moderado” para inhibir la RAS (tabla 8), lo cual, implica limitar el contenido de álcalis del hormigón a  $2,4 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$  (tabla 10).

En resumen:

- En los sectores donde el contenido de álcalis del hormigón es menor al valor exigido por IRAM ( $0,6\% \times 390 = 2,34 < 2,4 \text{ kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ), no se observaron signos de RAS.
- El hecho de que existan en el pavimento zonas sin problemas de RAS, con contenidos de álcalis en el hormigón del orden de  $3,0 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ , puede ser atribuido al empleo de variedades de basalto de menor reactividad.

### **2.1.6.2. Edificio Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP)**

Algunas columnas del hall central del edificio de oficinas de la AFIP comenzaron a mostrar signos de RAS luego de 70 años de vida en servicio (14). Estas columnas, de sección masiva (sección  $> 1 \text{ m}^2$ ), mostraron un daño severo de RAS (fisuración y pérdida de capacidad portante). El resto de las columnas del edificio presentó un daño considerado moderado a incipiente (la capacidad portante no se vio comprometida).

Del examen petrográfico de los testigos de hormigón extraídos de las columnas se infiere que los fenómenos de RAS en esta obra se originan a causa del agregado grueso (canto rodado silíceo del Río Uruguay). Este agregado, que debe su reactividad a la presencia de ópalo (como parte constituyente del cemento de las areniscas que lo componen), posee antecedentes documentados de reacción en servicio (10).

Estudios no publicados, realizados por los autores en el LEMIT, demuestran que la reactividad alcalina del canto rodado silíceo del Río Uruguay (CRS) es muy variable, siendo posible obtener en el ensayo IRAM 1700 valores de expansión a un año comprendidos entre  $0,07 \%$  y  $0,24 \%$ .

Por lo expuesto, siguiendo el criterio de IRAM, el CRS debe ser considerado altamente reactivo (expansión del hormigón  $> 0,12 \%$ ). Dado que los elementos estructurales son de carácter masivo y se hallan expuestos a un ambiente seco (columnas interiores), corresponde considerar un riesgo de RAS igual a 3. Si se admite que la categoría de la estructura es S2 (vida útil  $< 75$  años), el nivel de prevención requerido es moderado (contenido máximo de álcalis en el hormigón:  $2,4 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ).

Por el contrario, según el criterio propuesto por AASHTO, el CRS podría ser tipificado como R3, ya que la expansión del hormigón puede alcanzar valores próximos a  $0,24 \%$ ,

superando incluso el valor límite propuesto por Canadá (0,23 %). En base a esto y considerando que la categoría de la estructura es S3 (tabla 7), el contenido de álcalis en el hormigón debería limitarse a un valor máximo igual a 1,8 kg de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ .

La determinación del contenido de cemento en los testigos arrojó valores comprendidos entre 255 y 306  $\text{kg}/\text{m}^3$  (14), en tanto que los contenidos de álcalis del hormigón, expresados en % del peso de cemento, variaron entre 0,42 % y 1,42 % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  (14, 46). Es interesante destacar que los mayores contenidos de álcali (> 0,75 % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) fueron hallados en los testigos extraídos de las columnas del hall central que resultaron seriamente afectadas por la RAS.

En base a estos datos, asumiendo que valor promedio del contenido de cemento es igual a 277  $\text{kg}/\text{m}^3$ , resulta que el contenido de álcalis del hormigón fue altamente variable (1,2 a 3,9  $\text{kg}$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ). En particular, en el sector donde la magnitud de la RAS fue significativa (al comprometer la seguridad de la estructura), el contenido de álcalis se ubicó por encima de 2,1  $\text{kg}$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ , resultando, por consiguiente, muy superior al umbral máximo requerido por AASHTO (1,8  $\text{kg}$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ). En el resto de las columnas del edificio, donde el daño de RAS fue considerado moderado a incipiente, los contenidos de álcalis fueron inferiores.

### **2.1.6.3. Pavimento del aeropuerto Teniente Benjamín Matienzo (Tucumán)**

En el año 1989, Klaric y Fava (47) 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. Se estimó que la cantidad de losas afectadas por la RAS era del orden del 30 %, en las que se verificó una caída en la resistencia a compresión del hormigón del orden del 75 %, en promedio (11).

El agregado grueso empleado en la elaboración del hormigón es una grava lítica (Río Salí), petrográficamente muy heterogénea, compuesta por una alta proporción de rocas esquistas (> 70 %), con abundantes secciones de cuarzo tensionado (ángulo de extinción ondulante > 27°). El agregado fino es una arena sílico-feldespática, muy heterogénea, constituida por cuarzo tensionado (50 %), pequeñas proporciones 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 (esquistos). La existencia de fisuras microscópicas ( $\approx$  10  $\mu\text{m}$ ) en las zonas de interface y matriz, cercanas a los clastos de cuarzo y esquistos 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 NBRI (48), que otorgan un grado de reactividad mucho mayor al agregado grueso ( $\text{Exp}_{14\text{d}} \approx 0,33$  %), en comparación al fino ( $\text{Exp}_{14\text{d}} \approx 0,17$  %).

Ensayos realizados por los autores en el LEMIT, indican que la reactividad alcalina potencial del canto rodado del Río Salí podría calificarse como moderada (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 S2 (tabla 6), 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 8).

En base al análisis de los resultados de los ensayos químicos realizados sobre los testigos de hormigón, extraídos de distintas zonas del pavimento (11, 48), 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  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ .

## 2.2. ENFOQUE PRESTACIONAL

Si bien el empleo de modelos prestacionales para el diseño por durabilidad de las estructuras de hormigón ha mostrado un importante avance en el campo de la corrosión de las armaduras, el desarrollo de estas herramientas es aún incipiente en el caso de la RAS (2).

En el enfoque prestacional, la efectividad de la estrategia preventiva seleccionada para inhibir la RAS es evaluada a través de dos métodos de ensayo: uno, basado en el método acelerado de la barra de mortero (50) y, otro, basado en el método del prisma de hormigón (51).

Las normas IRAM 1512 e IRAM 1531 permiten abordar mediante este enfoque el estudio de las siguientes estrategias:

- a) Utilizar un cemento para uso general (que cumpla con la IRAM 50000 o IRAM 50002), que incorpore una AMA (ceniza volante, escoria granulada de alto horno, puzolana natural, etc.).
- b) 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.
- c) Emplear un inhibidor químico a base de litio.
- d) Cambiar parcialmente el agregado reactivo por otro no reactivo (dilución).

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.

### 2.2.1 Método del prisma de hormigón

El método consiste en registrar la expansión de prismas de hormigón, almacenados bajo condiciones de alta humedad y temperatura (38 °C), a fin de evaluar la capacidad inhibidora de la medida preventiva escogida (AMA, aditivo a base de Li o dilución del agregado reactivo).

El hormigón se realiza con el agregado reactivo bajo estudio ( $0,42 < \text{agua/ligante} < 0,45$ ) y un contenido de ligante (cemento + AMA) igual a  $420 \text{ kg/m}^3$ . De ser necesario adecuar la trabajabilidad de la mezcla, es posible incorporar un reductor de agua de alto rango.

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  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ , de modo de llevar el contenido total de álcalis del hormigón a  $5,25 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ . AASHTO, en cambio, considera que este 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 líquido a base de litio (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 dos años (104 semanas), es igual o menor que 0,040 %.

Cuando la estrategia consiste en cambiar parcialmente el agregado reactivo por otro no reactivo (opción "d"), se deben ensayar distintas combinaciones de agregados hasta encontrar aquella cuya expansión en el hormigón, a la edad de un año, sea igual o menor que 0,040 %. Esta estrategia no constituye una opción válida para la CSA o AASHTO.

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 C 1293 y CSA A23.2-14A (40). 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 (32) o IRAM (29), al adoptar un procedimiento de curado diferente (prismas envueltos en tela, dentro de bolsas plásticas cerradas), ofrecen un mejor desempeño. El CIRSOC 201 (52) establece una metodología para evaluar la combinación de los materiales propuestos para la obra frente a la RAS, basada en el método IRAM 1700.

En resumen, en Argentina, se acepta que el método del prisma de hormigón pueda ser empleado para evaluar mezclas de hormigón de bajo contenido de álcalis (CIRSOC 201), que incorporen AMA de alto contenido de álcalis (tablas 12 y 13), aditivos a base de litio o mezclas de agregados.

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 %  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  (23, 40). 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 %.

### **2.2.2 Método acelerado de la barra de mortero (NBRI)**

Como alternativa a lo dispuesto en 2.2.1, tanto IRAM (25, 26) como la CSA (51), permiten que la efectividad inhibidora de las soluciones indicadas en 2.2 pueda evaluarse mediante el conocido método NBRI (34-36), con ligeras modificaciones. ASTM, en cambio, ha normalizado un método de ensayo específico para este fin (50).

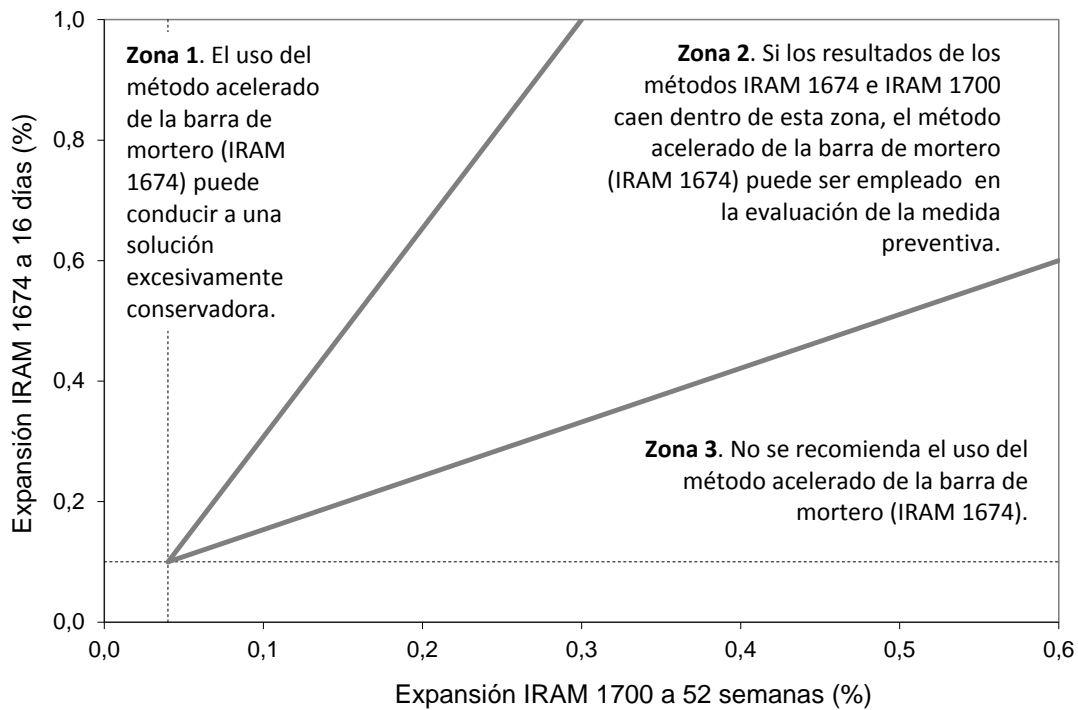
La mezcla de mortero se realiza con el agregado reactivo bajo estudio y el ligante propuesto para la obra (cemento + AMA). Este método puede emplearse también para evaluar la respuesta del agregado a la acción inhibidora del nitrato de litio (23). Cuando es necesario adecuar la trabajabilidad del mortero, es posible incorporar un aditivo reductor de agua de alto rango a fin de permitir una apropiada compactación.

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 NBRI 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 reacción álcali-carbonato y su confiabilidad es limitada para la detección de ciertos agregados que deben su reactividad al cuarzo tensionado (18, 53-55).

Por ello, antes de aplicar el NBRI, es necesario verificar que el agregado bajo estudio responde de manera adecuada a este ensayo (23, 24). En otras palabras, la aplicación del NBRI sólo es enteramente adecuada cuando la representación gráfica de los resultados de expansión del agregado reactivo, obtenidos por los métodos NBRI e IRAM 1700, se ubican en la zona 2 (figura 2). En caso contrario, es más conveniente llevar a cabo la evaluación mediante la aplicación del método del prisma de hormigón.

El método NBRI no es aplicable para estudiar AMA de alto contenido de álcalis (tablas 12 y 13) ni el comportamiento de mezclas de agregados (22-24, 34, 49), a pesar de que esta última aplicación es permitida por IRAM y el CIRSCOC 201 (25, 26, 52). En estos casos, la evaluación de la estrategia debería llevarse a cabo con el método del prisma de hormigón, cuyos resultados siempre prevalecen sobre los del método acelerado.

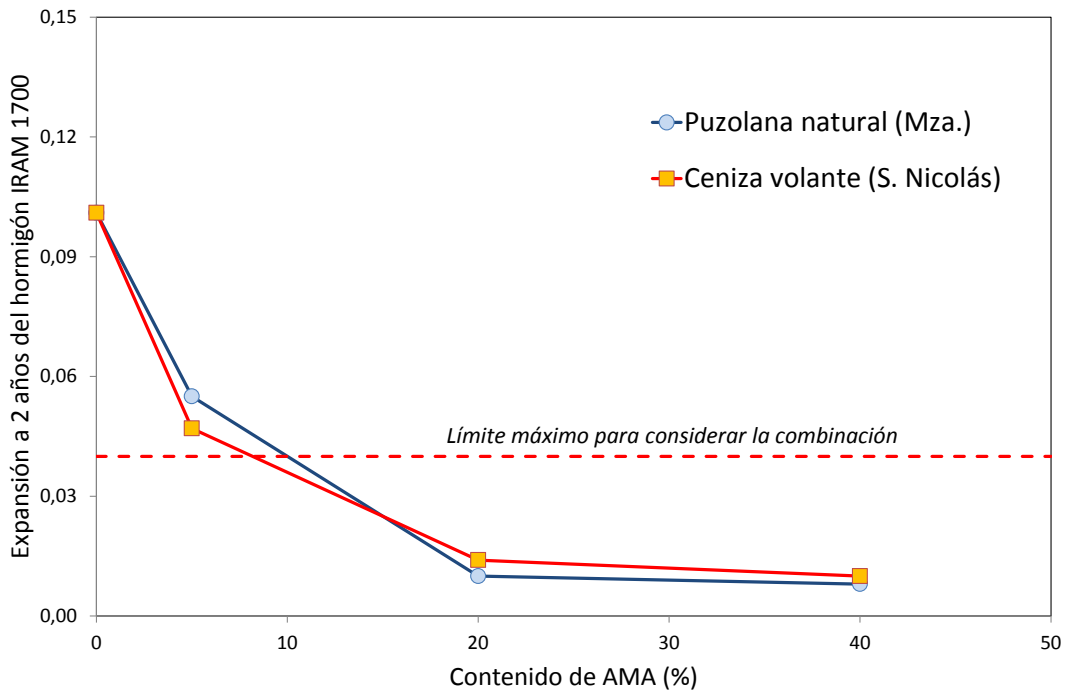


**Figura 2**—Comparación entre los resultados de los métodos IRAM 1674 e IRAM 1700 para valorar la aplicabilidad del primero en la evaluación de la estrategia inhibidora

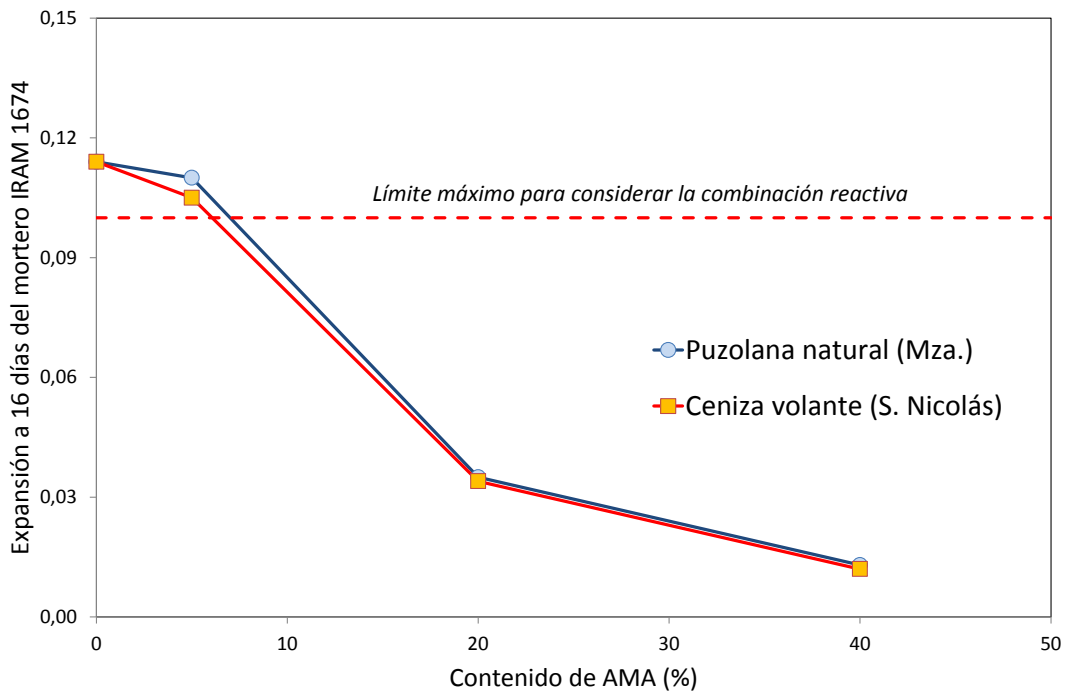
### 2.2.3 Comprobación de la validez del criterio prestacional

En las figuras 3 y 4 se muestran resultados de estudios realizados con el propósito de evaluar la capacidad inhibidora de dos AMA (puzolana natural y ceniza volante), empleando el enfoque prestacional (56).

El agregado grueso reactivo, procedente de la zona de Azul, Buenos Aires (Argentina), es una migmatita granítica milonitizada (MGM), constituida por un 60 % de cristales de cuarzo (tamaño promedio del orden de 50  $\mu\text{m}$ ), altamente deformados (ángulo de extinción ondulante = 18°). El agregado fino es una arena silíceo natural, de características inocuas.



**Figura 3—**Determinación del contenido de AMA en hormigón (IRAM 1700)



**Figura 4—** Determinación del contenido de AMA en mortero (IRAM 1674)

Se diseñaron diversas mezclas de mortero y hormigón, utilizando un cemento de alto contenido de álcalis y diferentes % de reemplazo de puzolana natural o ceniza volante. La puzolana natural es una ceniza volcánica ácida, procedente de la zona de San

Rafael, Mendoza (Argentina). La ceniza volante es de bajo contenido de calcio (clase F), procedente de la central termoeléctrica de San Nicolás, Buenos Aires (Argentina).

Además, se elaboraron prototipos de hormigón simple, de 30 x 30 x 60 cm<sup>3</sup> (dos por cada tipo de hormigón), con el propósito de verificar la capacidad inhibidora de las AMA a largo plazo, bajo condiciones ambientales severas (suelo salino). Los prototipos fueron curados en cámara húmeda durante 7 días. A los 28 días de edad, la mitad de los prototipos fue estacionada en cámara húmeda (23°C), mientras que la otra mitad fue enterrada en suelo salino (10000 ppm de ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

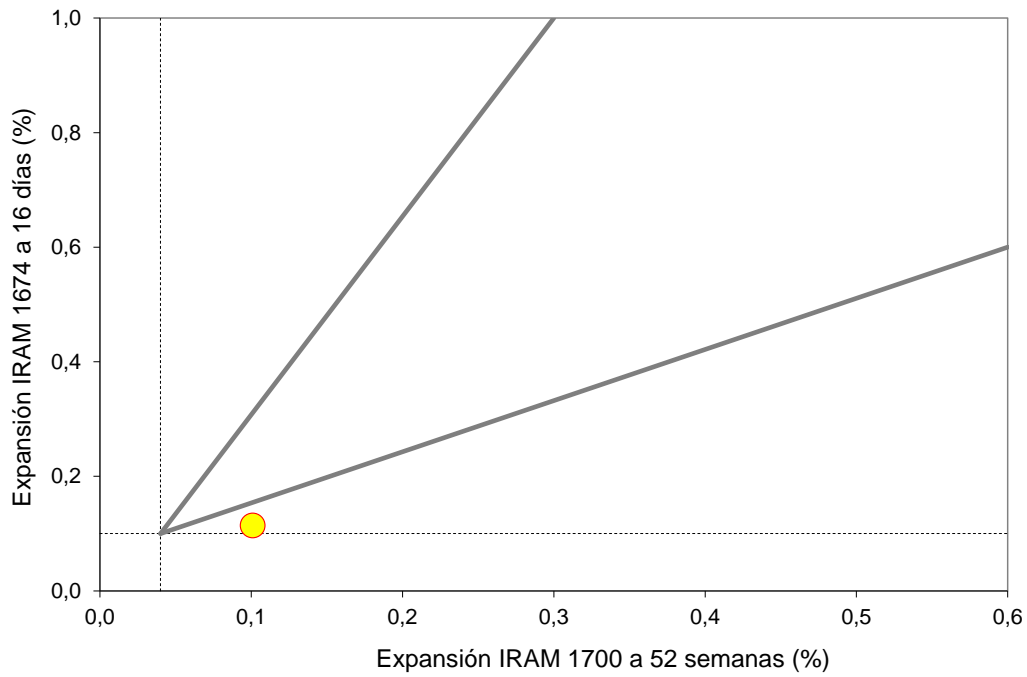
En la figura 3 se muestran los resultados de expansión obtenidos al aplicar el método IRAM 1700, variando el % de AMA desde 0 % a 40 %. En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos con el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674).

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, es claro que esta contradicción se debe al hecho de que este agregado no cumple la condición de la figura 2: cuando los puntos se ubican en la zona 3 (figura 5), el método acelerado puede sobrevalorar la eficiencia de la AMA.

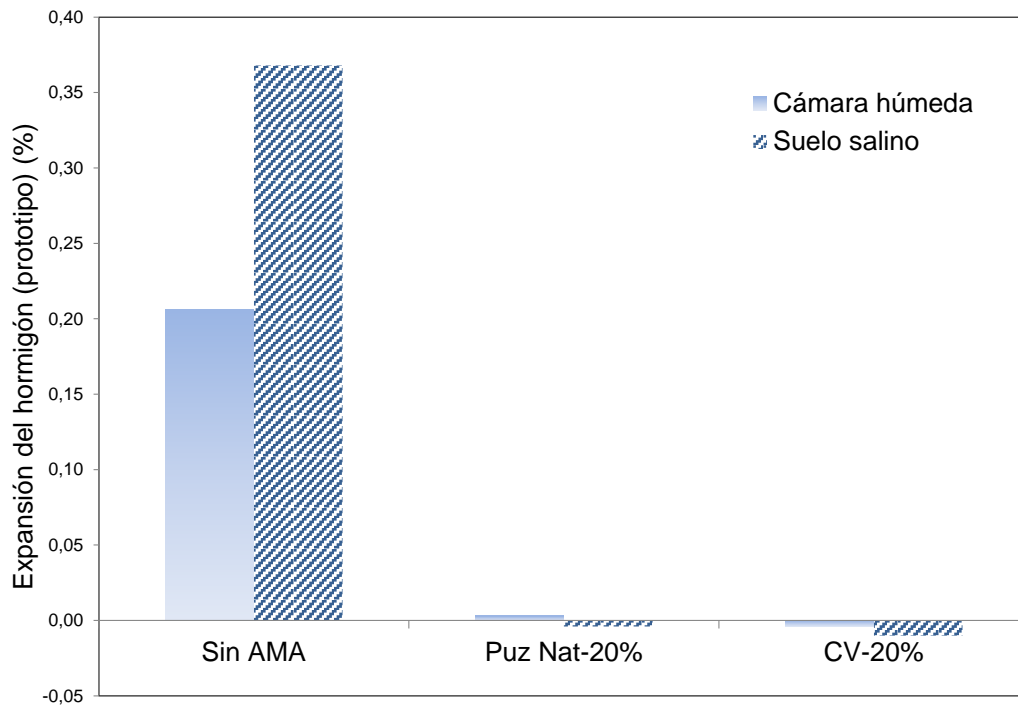
Si quisiera aplicarse a este caso el criterio prescriptivo de IRAM, el agregado grueso (MGM) debería ser considerado moderadamente reactivo (expansión del hormigón < 0,12 %). Dado que los prototipos se hallan expuestos al exterior (ambiente húmedo), corresponde considerar un riesgo de RAS igual a 3. Si se admite que la categoría de la estructura es S2 (vida útil < 75 años), el % de ceniza volante requerido para inhibir la RAS es igual al 20 % (tabla 12).

En la figura 6 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.

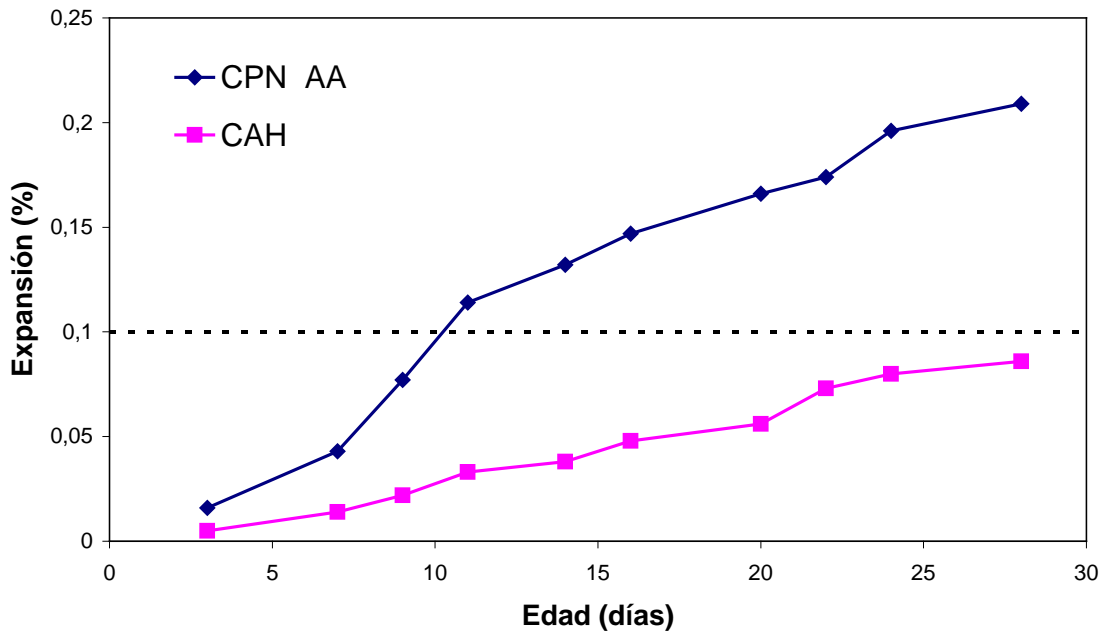
Otra experiencia más reciente es la evaluación de las mezclas de obra que se utilizaron en la construcción de la Ruta Nacional N° 6, provincia de Buenos Aires. Uno de los agregados gruesos seleccionado para uno de los tramos de esta obra resultó ser potencialmente reactivo desde el punto de vista petrográfico. Dado que no existía tiempo suficiente para estudiar los agregados en mezclas de hormigón, se decidió emplear un cemento con alto contenido de escoria de alto horno (CAH) que fuera capaz de inhibir la RAS en el método acelerado de la barra de mortero. En la figura 7 se muestra la expansión de este agregado con un cemento pórtland normal (sin adición) y la respuesta alcanzada con el CAH, que inhibió la RAS al reducir la expansión del mortero por debajo de 0,10 %.



**Figura 5**—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 6**—Eficiencia de las AMA en el control de la RAS, en distintos ambientes (ambiente húmedo y suelo salino) y para distintos porcentajes de reemplazo



**Figura 7—** Comportamiento de morteros con distinto material cementiceo (CPN AA: Cemento pórtland de alto álcali, CAH: Cemento de alto horno)

### 3. CONCLUSIONES

En base a lo expuesto y teniendo en cuenta las metodologías de ensayos disponibles en nuestro país, es posible realizar las siguientes consideraciones:

- ✓ El criterio prescriptivo establecido por IRAM (similar a la versión 2004 de la norma canadiense) funciona de manera adecuada para agregados de moderada o elevada reactividad. Cuando se trata de agregados de extrema reactividad, especialmente aquellos constituidos por ópalo, la solución que ofrece IRAM es incierta. En estos casos, la introducción de una cuarta categoría de reactividad, como la “R3” propuesta por la CSA (expansión del hormigón > 0,23 %), parece muy conveniente.
- ✓ Si bien la correlación que existe entre los resultados de los métodos IRAM 1674 e IRAM 1700 es muy pobre, el empleo de este último, en la práctica, se impone por su adecuada celeridad. De este modo, el enfoque propuesto por AASHTO aparece como una alternativa viable para resolver el nudo de esta cuestión. Los valores de expansión propuestos por esta organización para calificar el grado de reactividad del agregado a través del método NBRI, en base a la experiencia Argentina, parecen razonablemente conservadores.
- ✓ A pesar de las conocidas limitaciones del método acelerado de la barra de mortero (inaptitud para evaluar el umbral de álcalis, el conjunto de agregados propuestos para la obra, el desempeño de cementos de bajo contenido de álcalis o AMA con alto contenido de álcalis), los % de AMA estimados resultan similares a los obtenidos con el método del prisma de hormigón a dos años.



- ✓ El método del prisma de hormigón curado a 38 °C (IRAM 1700) resulta altamente confiable, sin embargo, su tiempo de ensayo (dos años) hace que, en la práctica, sólo sea aplicado como método de “*benchmarking*”.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Los autores desean agradecer al Ing. Milan E. Klaric, del Instituto Tecnológico del Hormigón (ITH), por la información brindada acerca de la condición del hormigón del Aeropuerto Internacional Teniente Benjamín Matienzo (Tucumán).

#### 5. REFERENCIAS

- (1) Aitcin, P.C., Mindess, S. (2011), *Sustainability of concrete*, Spon Press (1<sup>st</sup> edition), Milton Park, Abingdon, Oxon (UK), p. 328
- (2) Giovambattista, A. (2001), “El diseño por durabilidad de las estructuras de hormigón y los reglamentos de seguridad: Soluciones actuales y en desarrollo”, en: *Durabilidad del Hormigón Estructural*, ed. E.F. Irassar, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, [S. l.], pp. 259-306
- (3) ACI Committee 221 (1998), “ACI 221.1R-98 (Reapproved 2008) – State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity”, ACI’s 2011 *Manual of Concrete Practice*, ACI, Farmington Hills, MI (USA), p. 30 (en CD-ROM)
- (4) Batic, O.R., Sota, J.D. (2001), “Reacciones deletéreas internas”, en: *Durabilidad del hormigón estructural*, ed. E.F. Irassar, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires (Argentina), pp. 157-216
- (5) 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
- (6) 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, p. 43
- (7) Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1981), “Durabilidad de hormigones de cemento pórtland”, *Revista Hormigón*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, N° 5, pp. 5-20
- (8) 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”, en: *Memorias, VI Reunión Técnica*, eds. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Bahía Blanca (Argentina), Vol. 2, pp. 249-270
- (9) Batic, O.R., Sota, J.D., Cortelezzi, C., Maiza, P.J. (1985), “Observaciones realizadas en los productos de alteración obtenidos en hormigones afectados por la reacción álcali-agregado”, en: *Memorias, Colloquia 85*, eds. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires (Argentina), Vol. 1, pp. 275-289
- (10) Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1986), “Reactivity of alkalis and sandstone cemented with opal and chalcedony”, en: *Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, ed. Grattan-Bellew, Noyes Publications, Ottawa (Canada), pp. 408-412
- (11) 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
- (12) Maiza, P.J., Marfil, S.A., Milanese, C.A. (1999), “Minerales desarrollados en hormigones deteriorados por la reacción álcali-sílice (Provincia de Córdoba)”, en: *Memorias, VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales. COPROCNA*, eds. Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa, La Pampa (Argentina), pp. 193-199
- (13) Maiza, P.J., Marfil, S.A. (2000), “Petrografía del hormigón endurecido – Estudio de un pavimento con patologías”, *Revista Hormigón*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, N° 35, pp. 11-21

- (14) Giovambattista, A. (2004), "Research and repair of a concrete building affected by alkali-silica reaction", en: *Proceedings, 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, eds. M. Tang y M. Deng, International Academic Publishers – World Publishing Corporation, Beijing (China), Vol. 2, pp. 1229-1234
- (15) Milanese, 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", en: *Memorias, XVII Reunión Técnica "Ing. José Fermín Colina"*, eds. V. Rahhal y J.D. Sota, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina), pp. 273-280
- (16) Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1986), *Concrete: Microstructure, properties, and materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (USA) (3<sup>rd</sup> edition, The McGraw-Hill Companies, New York, 2006), p. 659
- (17) Ozol, M.A. (2006), "Alkali-carbonate rock reaction", en: *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM STP 169D, eds. J.F. Lamond y J.H. Pielert, American Society for Testing Materials, Philadelphia (USA), pp. 410-424
- (18) Milanese, 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 p.
- (19) Milanese, 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", en: *Memorias, XVII Reunión Técnica "Ing. José Fermín Colina"*, eds. V. Rahhal y J.D. Sota, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina), pp. 265-272
- (20) Milanese, C.A., Pappalardi, M., Violini, D. (2008), "Consideraciones sobre la aplicación del criterio canadiense para inhibir la reacción álcali-sílice", en: *Memorias, 1<sup>er</sup> Congreso Argentino de Áridos*, eds. Cámara de la Piedra de la Provincia de Buenos Aires, Mar del Plata (Argentina), Vol. 1, pp. 475-481
- (21) Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1985), "Reacción álcali-sílice – Implicancias tecnológicas, ecológicas y económicas en la optimización de las soluciones ingenieriles", en *Memorias, Colloquia 85*, eds. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires (Argentina), Vol. 2, pp. 453-462
- (22) CSA (2009), "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), July 2009, pp. 317-384
- (23) 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 (30<sup>th</sup> edition), 444 North Capitol Street, N.W., Suite 249, Washington, D.C. 20001 (USA), p. 20
- (24) 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), April 2008, p. 21
- (25) IRAM (2013), "Agregado fino para hormigón de cemento – Requisitos", *Norma IRAM 1512*, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, [S. I.], 02-07-2013, 25 pp.
- (26) IRAM (2012), "Agregado grueso para hormigón de cemento – Requisitos", *Norma IRAM 1531*, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, [S. I.], Cuarta edición, 25-09-2012, 27 pp.
- (27) 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), 2004, pp. 317-326
- (28) Sims, I., Hawthorn, F., Nixon, P. (2004), "Developing an international specification to combat AAR – Proposals of RILEM TC 191-ARP", en: *Proceedings, 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, eds. M. Tang y M. Deng, Beijing (China), Vol. 2, pp. 8-16
- (29) 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, [S. I.], octubre 1997, p. 16
- (30) 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 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), p. 5

- (31) CSA (2009), "A23.2-14A – Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C)", *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*, CSA, Mississauga, Ontario (Canada), July 2009, pp. 285-296
- (32) RILEM TC 106-AAR (2000), "Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Method for aggregate combinations using concrete prisms", *Materials and Structures*, Vol. 33, pp.290-293
- (33) 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 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), p. 5
- (34) IRAM (1997), "Agregados – Determinación de la reactividad alcalina potencial – Método acelerado de la barra de mortero", *Norma IRAM 1674*, [S. l.]: IRAM, junio 1997, p. 14
- (35) CSA (2009), "A23.2-25A – Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars", *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*, CSA, Mississauga, Ontario (Canada), July 2009, pp. 358-365
- (36) RILEM TC 106-AAR (2000), "Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – The ultra-accelerated mortar-bar test", *Materials and Structures*, Vol. 33, pp. 283-289
- (37) Thomas, M., Folliard, K., Fournier, B., Ahlstrom, G. (2012), "A prescriptive specification for the selection of measures for preventing alkali-aggregate reaction", en: *Proceedings, 14<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, eds. T. Drimalas, J.H. Ideker y B. Fournier, Austin, Texas (USA), p. 10 (en CD-ROM)
- (38) Lu, D., Fournier, B., Grattan-Bellew, P.E., Xu, Z., Tang, M. (2008), "Development of a universal accelerated test for alkali-silica and alkali-carbonate reactivity of concrete aggregates", *Materials and Structures*, Vol. 41, pp. 235-246
- (39) Falcone, D., Milanese, C.A. (2012), "Método acelerado del prisma de hormigón – Evaluación de la RAS con agregados de diversas regiones de la Argentina", en: *Memorias, XIX Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic"*, eds. J.D. Sota, N.F. Ortega y J.M. Moro, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Bahía Blanca, Buenos Aires (Argentina), pp. 215-222
- (40) 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
- (41) Dalimier, M., Fernández Luco, L. (1997), "Equipos de alta performance para la pavimentación de hormigón – Antecedentes de uso en la Ruta 127", en: *Memorias, XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, Buenos Aires, Vol. 2, pp. 785-836
- (42) Milanese, C.A. (2008), "Experiencias sobre la caracterización de algunos basaltos de la provincia de Corrientes (Argentina) frente a la reacción álcali-sílice", en: *Memorias, XVII Reunión Técnica "Ing. José Fermín Colina"*, eds. V. Rahhal y J.D. Sota, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina), pp. 345-352
- (43) 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", en: *Memorias, XIX Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic"*, eds. J.D. Sota, N.F. Ortega y J.M. Moro, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Bahía Blanca, Buenos Aires (Argentina), pp. 159-166
- (44) 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", en: *Proceedings, 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, eds. M. Tang y M. Deng, Beijing (China), Vol. 2, pp. 528-537
- (45) 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
- (46) 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, p. 386
- (47) 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<sup>er</sup> Informe Técnico Parcial*, Instituto Tecnológico del Hormigón (ITH), Setiembre de 1989, Informe N° 15435, p. 75
- (48) 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<sup>er</sup> Informe Técnico Complementario*, Instituto Tecnológico del Hormigón (ITH), Noviembre de 1989, Informe N° 15512, p. 25

- (49) Drimalas, T., Ideker, J.H., Arrieta, G., Folliard, K.J., Fournier, B.F., Thomas M.D.A. (2012), "Evaluating combination of aggregates in the accelerated mortar bar test," en: *Proceedings, 14<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*, eds. T. Drimalas, J.H. Ideker J.H. y B. Fournier, Austin, Texas (USA), 10 pp.
- (50) 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), p. 6
- (51) CSA (2009), "A23.2-28A – Standard practice for laboratory testing to demonstrate the effectiveness of supplementary cementing materials and lithium-based admixtures to prevent alkali-silica reaction in concrete", *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*, CSA, Mississauga, Ontario (Canada), July 2009, pp. 385-390
- (52) INTI-CIRSOC (2005), *Reglamento argentino de estructuras de hormigón—CIRSOC 201*, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación, Edición julio 2005 (<http://www.inti.gov.ar/cirsoc/201.htm>)
- (53) Grattan-Bellew, P. E. (1989), "Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregate", en: *Proceedings, 8<sup>th</sup> International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, ed. K. Okada, S. Nishibayashi and M. Kawamura, Kyoto (Japan), p. 279-288.
- (54) Batic, O.R., Sota, J. D., Falcone, D. D. (2005), "RAS: Contribución para identificar agregados reactivos, en particular los de reacción lenta", *Revista Ciencia y Tecnología*, N° 12, pp. 13-21
- (55) Batic, O.R., Sota, J.D., Falcone, D.D. (2003), "Reacción álcali-sílice. Comparación de resultados en métodos acelerados para detectar agregados reactivos", en: *Memorias, 15<sup>ta</sup> Reunión Técnica*, AATH, Santa Fe, p. 8 (en CD ROM)
- (56) Batic, O.R., Milanese, 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