

Método acelerado del cilindro de hormigón. Evaluación del comportamiento de mezclas de obra frente a la reacción álcali-sílice

C. Milanesi^a, S. Orlando^a, F. Pastrengo^a, M. Rearte^a, D. Falcone^b, C. N. Bournod^c y S. A. Marfil^{*}

^aCementos Avellaneda S. A., CP C1107, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, carlos.milanesi@cemavellaneda.com.ar, sebastian.orlando@cemavellaneda.com.ar, franco.pastrengo@cemavellaneda.com.ar, maximiliano.rearte@cemavellaneda.com.ar

^bLaboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC), CP 1900, La Plata, Argentina, durabilidad@lemit.gov.ar

^cDepartamento de Geología – Universidad Nacional del Sur (UNS), CGAMA (CIC-UNS), CP 8000, Bahía Blanca, Argentina, cbournod@hotmail.com, smarfil@uns.edu.ar

Recibido: 26 de diciembre de 2024

Aceptado: 11 de junio de 2025

RESUMEN

Si bien existen métodos de ensayo normalizados para evaluar la potencial reactividad de un agregado frente a la RAS (IRAM 1674, IRAM 1700), ninguno de ellos es capaz de evaluar el comportamiento de la denominada fórmula de obra. En este trabajo se dan a conocer los primeros resultados de la implementación del nuevo método de ensayo acelerado basado en desempeño, desarrollado por la Universidad de New Brunswick (Canadá), denominado "método del cilindro de hormigón". El método consiste en poner las probetas de ensayo en contacto con una solución de NaOH, equivalente a la solución de poro del hormigón bajo estudio, de manera de acotar la lixiviación alcalina. Se presentan los valores de expansión obtenidos sobre nueve mezclas de hormigón, elaboradas con tres combinaciones de agregados de conocida reactividad frente a la RAS en servicio, y con contenidos variables de álcalis. Se analizan las ventajas y limitaciones del método.

PALABRAS CLAVE: RAS, método acelerado del cilindro de hormigón, ensayo de desempeño, mezcla de obra

ABSTRACT

Although there are standardized test methods to evaluate the potential alkali-silica reactivity (ASR) of an aggregate (IRAM 1674, IRAM 1700), none of them are capable of assessing the behavior of the so-called job mix formula. This paper presents the first results of implementing the new accelerated, performance-based test method, developed by the University of New Brunswick (Canada), known as the "concrete cylinder method". The method consists of placing the test specimens in contact with a NaOH solution, equivalent to the pore solution of the concrete under study, in order to limit alkali leaching. The expansion results obtained from nine concrete mixtures, prepared with three combinations of aggregates of known ASR in service and with variable alkali loading, are presented. The advantages and limitations of the method are then analyzed.

KEYWORDS: ASR, accelerated concrete cylinder method, performance test, job mix

**Autor de correspondencia*

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

Citar como: Milanesi, C., Orlando, S., Pastrengo, F., Rearte, M., Falcone, D., Bournod, C. N., y Marfil, S. A. (2025). Método acelerado del cilindro de hormigón. Evaluación del comportamiento de mezclas de obra frente a la reacción álcali-sílice. Revista Hormigón, 68, 46–62. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/si4d6a14e>

1. Introducción

El deterioro prematuro de estructuras de hormigón por el desarrollo de la reacción álcali-sílice (RAS) se conoce desde el año 1940 [1] y los casos se han extendido por todo el mundo [2], convirtiéndose en el principal problema de durabilidad, después de la corrosión del acero.

Si bien existen numerosos métodos de ensayo para evaluar la potencial reactividad alcalina de los agregados, algunos de ellos fueron desestimados con los años, debido a su limitado alcance [3,4]. Además, las normas se encuentran en permanente revisión y cambios [5,6]. Uno de los métodos de mayor aceptación en Argentina y a nivel mundial, es el método del prisma de hormigón, el cual, con algunas variantes, ha sido normalizado por diferentes organismos [7-9]. Sin embargo, a pesar de su reconocida confiabilidad, este método presenta dos inconvenientes que limitan su aplicación práctica: falta de celeridad y dificultad para controlar los efectos de la lixiviación alcalina (el agua necesaria para la expansión del gel de la RAS también lava los álcalis disueltos en la solución de poro del hormigón e inhibe el proceso de reacción) [10].

El fenómeno de la lixiviación de los álcalis y su efecto sobre la disminución de la expansión del mortero u hormigón se conoce desde el inicio en el conocimiento de la RAS [11,12]. La norma IRAM 1700 [9], por ejemplo, exige que el contenido de álcalis del hormigón se eleve a 5,25 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$, mediante la adición de NaOH al agua de amasado, para compensar la disminución de los álcalis que, inevitablemente, experimentan las probetas de ensayo durante el curado húmedo. Debido a que la cantidad de álcalis lixiviados es mayor cuanto mayor es el tiempo de estacionamiento de las probetas, este fenómeno es particularmente más grave cuando se requiere evaluar la eficiencia de una adición mineral activa, ya que las normas argentinas, para estos casos, exigen un período de evaluación de dos años [13-15]. Por lo tanto, la consecuencia práctica del fenómeno de

lixiviación alcalina es que el método del prisma de hormigón, en su versión actual [9], no puede ser utilizado para evaluar el efecto de la disminución del contenido de álcalis del hormigón, como recurso estratégico para el control de la RAS, ni para evaluar el desempeño de la “fórmula de obra”, es decir, el hormigón que resulta de la combinación de los materiales propuestos para la obra, en la proporción específica escogida para la mezcla.

En los últimos años, muchas investigaciones se han orientado al estudio de las variables que impactan en la lixiviación alcalina [16], en la búsqueda de un método de ensayo que permita evaluar el desempeño de la “fórmula de obra” o la determinación del “umbral alcalino” [17,18].

En este trabajo se presentan los resultados de las primeras experiencias realizadas en el país para la implementación de un método de ensayo acelerado, desarrollado, recientemente, por la Universidad de New Brunswick (Canadá), denominado “método del cilindro de hormigón” (MACH) [19]. En esta oportunidad, se dan a conocer los avances sobre resultados de expansión arrojados por el MACH, informados en el Congreso de la AATH del año 2024 [20]. Se realiza una caracterización petrográfica de los agregados utilizados y se analizan los resultados de expansión obtenidos con tres combinaciones de agregados reactivos (grueso + fino), con antecedentes de RAS en servicio, bajo diferentes contenidos de álcalis en el hormigón, a fin de evaluar el desempeño de este método.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Los agregados y los cementos utilizados en la elaboración de las mezclas de hormigón se indican en la Tabla 1. Además, para la elaboración de los prismas de hormigón [9] usados como referencia, se utilizó como

Tabla 1. Materiales utilizados.

Materiales			Procedencia	Nombre	PUV	MF
Agregados	Gruesos	Basalto toleítico	Curuzú Cuatiá (Corrientes)	B CC	1696	6,67
		Canto rodado silíceo	Río Uruguay (Entre Ríos)	CR ER	1674	6,69
		Canto rodado polimíctico	Río Vipos (Tucumán)	CR T	1710	6,89
	Finos	Arena silícea	Colonia Mabragna (Entre Ríos)	AR ER	-	2,10
		Arena polimíctica	Río Vipos (Tucumán)	AR T	-	3,30
Cemento	CPN40	Bajo álcalis		0,35 % Na ₂ O _{eq}		
		Moderado álcalis		0,79 % Na ₂ O _{eq}		
		Alto álcalis		1,04 % Na ₂ O _{eq}		

agregado grueso un basalto olivínico de la provincia de San Luis (B SL) y una arena silícea del Río Uruguay (AR UR) de conocido comportamiento inocuo.

Se trabajó con tres tipos de cemento pórtland normal (CPN 40), de diferente origen y contenido de álcalis (Tabla 1), a fin de diseñar mezclas de hormigón de bajo, medio y alto contenido alcalino (entre 1,8 y 4,0 kg Na₂O_{eq}/m³), sin necesidad de adicionar NaOH al agua de mezclado. En la Tabla 1 se muestra también la densidad a granel del agregado grueso (PUV), compactado y seco, determinada según la IRAM 1548 [21] y el módulo de finura (MF) del agregado fino.

2.2 Métodos

2.2.1 Examen petrográfico

El análisis petrográfico de los agregados utilizados en la elaboración de los hormigones se realizó según lo establecido en la norma IRAM 1649 [22]. Se utilizó un estereomicroscopio Leica S9i para el análisis sobre grano suelto y un microscopio de polarización Leica DM 750 P para el estudio sobre secciones delgadas de los agregados y

de los cilindros luego de cumplido el tiempo de ensayo.

2.2.2 Evaluación de la reactividad alcalina potencial de los agregados

La determinación de la reactividad alcalina de los agregados se realizó mediante el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) [23] y el método acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700 a 60 °C) [9]. En el primer caso, se confeccionaron barras de mortero de 25 mm x 25 mm x 300 mm, con una parte de cemento, 2,25 partes de agregado y una relación agua/cemento de 0,47. Se curaron durante un día a temperatura ambiente, se desmoldaron y se tomó una primera lectura de referencia. Luego se sumergieron en agua a 80 °C (± 2 °C) durante 24 horas y se registró la lectura inicial. Por último, se sumergieron en una solución 1N de NaOH y se colocaron en estufa a 80 °C (± 2 °C), tomando lecturas periódicas hasta los 16 días (14 días en solución de NaOH). Según el criterio adoptado por la norma IRAM 1531 [13] y 1512 [14], el agregado se considera potencialmente reactivo si la expansión supera el límite de 0,10 % a los 16 días.

Para la realización del ensayo acelerado del prisma de hormigón se siguieron los lineamientos establecidos en la norma IRAM 1700 [9]. Para evaluar el agregado grueso, el agregado fino que se utiliza debe ser inocuo y viceversa, y se adicionó NaOH al agua de amasado para elevar el contenido de álcalis del hormigón a 5,25 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$. Se confeccionaron prismas de 75 mm x 75 mm x 300 mm. Se colocaron en recipientes de almacenamiento a 23 °C durante 24 horas. Luego se desmoldaron y se tomó la lectura inicial. Se envolvieron en una tela de algodón saturada en agua, cubierta con una lámina de polietileno, se colocaron en una bolsa de nylon con 5 ml de agua destilada y se cerraron herméticamente. Luego, se colocaron en un contenedor con 35 mm de agua en el fondo, en una cámara a 60 °C. Se realizaron lecturas periódicas de los cambios de longitud de los prismas a 5, 8, 10, 13 y 15 semanas. De acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 1531 [13] y 1512 [14], se considera que el agregado es inocuo si la expansión a las 13 semanas no supera el límite de 0,04 % para agregados de reacción rápida o de 0,08 % para los de reacción lenta.

2.2.2 Método acelerado del cilindro de hormigón (MACH)

El MACH, desarrollado por la Universidad de New Brunswick [19], consiste en moldear cilindros de hormigón de 145 mm de diámetro y 240 mm de altura, con pernos insertados en los extremos para evaluar el cambio de longitud. Al cabo de las primeras 24 horas, las probetas se desmoldan, se realiza la lectura inicial y se colocan dentro de un recipiente plástico, de diámetro ligeramente superior a ellas.

Dentro del espacio anular que queda entre la probeta y la pared del recipiente (≈ 3 mm), se coloca una solución alcalina de NaOH, cuya concentración es determinada en base a la composición del cemento de la fórmula de obra

(Figura 1a). La concentración de esta solución “modelo” se determina en base a la hipótesis de que la solución contenida en los poros del hormigón (en mol OH^-/L) es igual a 0,7 veces el porcentaje de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ del cemento ($0,7 \times \% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ cemento), según los trabajos de Diamond y Penko [24]. El recipiente que contiene la probeta (Figura 1b y 1c), cerrado y sellado (con cinta adhesiva), se pesa (para controlar la evaporación de la solución) y se lleva a la estufa a 60 °C (igual que la norma IRAM 1700 en la versión acelerada del ensayo), hasta la próxima lectura. Las lecturas se realizan en forma periódica, a temperatura ambiente, cada 3 semanas, hasta las 15 semanas de comenzado el ensayo (Figura 1d).

La dosificación de las mezclas se realizó ajustando el porcentaje de combinación de los cementos indicados en la Tabla 1 y el contenido unitario de cemento del hormigón, de forma de lograr tres contenidos diferentes de álcalis del hormigón, para cada combinación de agregados (Tabla 2). La cantidad de cemento del hormigón fue ajustada entre $305 \text{ kg}/\text{m}^3$ y $395 \text{ kg}/\text{m}^3$, de acuerdo con el contenido de álcalis de los cementos seleccionados para el estudio (Tabla 1). El valor de la relación agua/cemento se mantuvo constante en todas las mezclas e igual a 0,45. El contenido de agregado grueso se determinó mediante el método del ACI 211.1 [25], en función del módulo de finura del agregado fino (MF, Tabla 1), del tamaño máximo del agregado grueso (19,0 mm) y la densidad a granel del agregado grueso (PUV, Tabla 1). El asentamiento promedio de las mezclas fue igual a 7,0 cm, ajustado con la incorporación de un aditivo fluidificante de alto rango. El volumen sólido de agregado fino fue el necesario para alcanzar el m^3 de la mezcla.

Complementariamente, con las mezclas indicadas en la Tabla 2, se moldearon prismas de 75 mm x 75 mm x 300 mm, que se sometieron al mismo curado que el indicado en la norma IRAM 1700 (a 60 °C) [9].

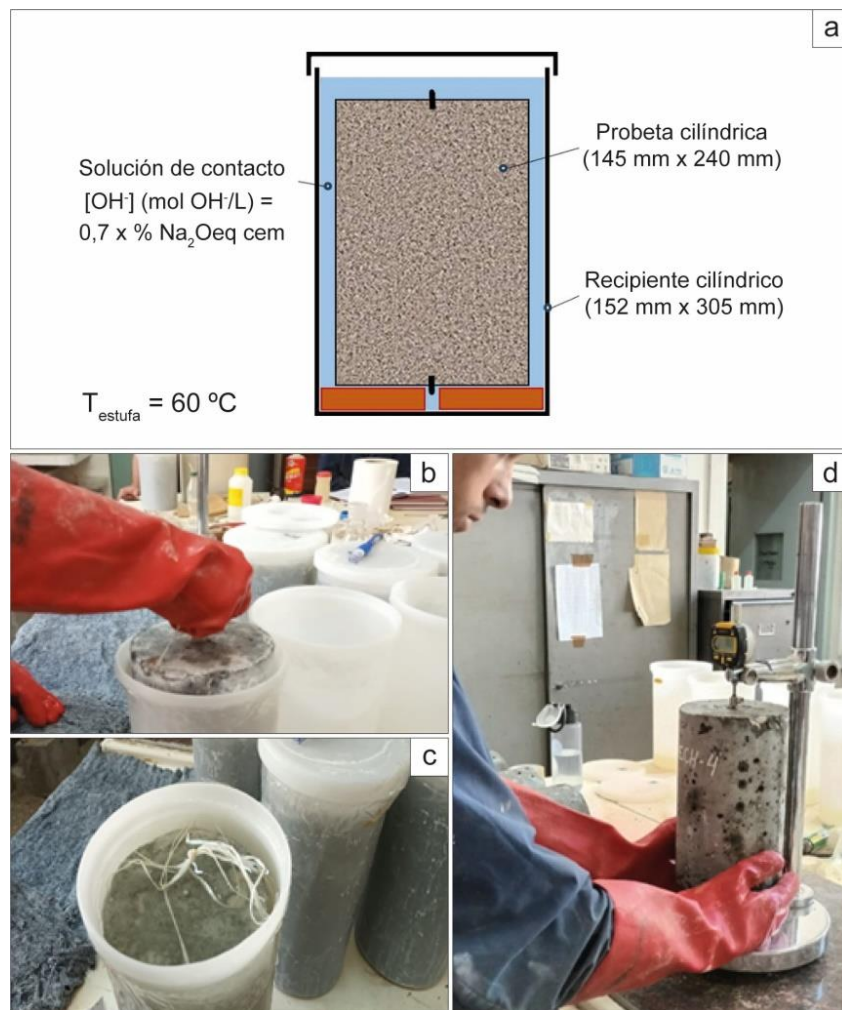


Figura 1. a) Esquema de las condiciones de almacenamiento del MACH. b) Colocación de las probetas en el recipiente. c) Llenado con la solución de contacto. d) Medición de la expansión del cilindro.

Tabla 2. Designación y composición de las mezclas bajo estudio.

Denominación de las mezclas	Agregados grueso / fino	Álcalis del hormigón (kg Na ₂ O _{eq} /m ³)
ER1	CR ER / AR ER	1,8
ER2		3,0
ER3		4,0
T4	CR T / AR T	2,4
T5		3,0
T6		4,0
B7	B CC / AR ER	2,4
B8		3,0
B9		4,0

3. Resultados

3.1 Análisis petrográfico de los agregados utilizados en el MACH

3.1.1 Basalto toleítico de Corrientes (B CC)

El basalto B CC es una roca volcánica compacta, homogénea, color gris oscuro, afanítica, con moderada cantidad de polvo adherido a la superficie de las partículas. Los fragmentos son masivos y densos. No se observaron clastos porosos ni alveolares. Algunas partículas incluyen fenocristales oscuros de minerales máficos, de tamaño milimétrico, y pequeños xenolitos dentro de una pasta muy fina. El 92 % de las partículas tienen formas irregulares equidimensionales y el 8 % son irregulares planares.

Vista al microscopio óptico sobre secciones delgadas, se destacan fenocristales de plagioclasa, parcialmente corroídos en sus zonas periféricas que llegan a dimensiones mayores a 1,5 mm. Su composición es An₄₀ y presenta muy poca alteración. Además, se encuentran relictos de olivino de 100 µm - 200 µm totalmente alterados, reconocibles por su hábito y *parting* destacado por óxidos de hierro. La pasta de la roca está constituida por tablillas de plagioclasa, de composición An₄₅₋₅₅ (andesina-labradorita), de 150 µm - 250 µm, con macla polisintética, acompañadas por pequeños granos de piroxenos (principalmente augita) de

40 µm - 60 µm, óxidos de hierro, minerales arcillosos y escaso vidrio relíctico, distribuidos de manera intersticial. Se observaron escasos xenolitos constituidos por plagioclasas de composición semejante, junto a fenocristales de augita y augita titanífera. La textura de la roca es porfírica a glomeroporfírica con pasta intersertal, con aproximadamente 15 % de vidrio (color pardo a verdoso) y, en sectores, intergranular. Se identificó escaso vidrio fresco relíctico en la mesostasis, la mayor parte se encuentra desvitrificado dando lugar a la formación de minerales arcillosos. Su participación en la muestra total se estima en ~ 2 %. La roca se califica como basalto toleítico.

3.1.2 Canto rodado silíceo de Entre Ríos (CR ER)

El canto rodado CR ER es un material polimíctico, constituido por 38 % de calcedonia, 29 % de areniscas (silíceas y ferruginosas) y 34 % de cuarzo. El detalle de la composición (en % en peso) en los diferentes tamaños y en la muestra total se indica en la Tabla 3.

La calcedonia presenta fractura concoidea y variados colores. El cuarzo es cristalino, de grano grueso y fractura irregular. Las areniscas ferruginosas contienen componentes líticos heterogéneos, con matriz silícea ferruginosa.

Tabla 3. Composición petrográfica de la muestra CR ER.

Constituyentes	Composición de las fracciones retenidas en los tamices												Composición de la muestra (% en peso)
	1"		3/4"		1/2"		3/8"		4 mm		<4mm		
	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	
Calcedonia	-	-	45	3,2	37	24,8	34	5	41	4,4	58	0,2	37,6
Areniscas silíceas	-	-	-	-	18	12,1	16	2,4	13	1,4	19	0,1	16
Areniscas ferruginosas	-	-	22	1,6	8	5,4	27	4	16	1,7	15	0,1	12,8
Cuarzo	-	-	33	2,3	37	24,8	23	3,4	30	3,2	8	<0,1	33,7
TOTAL	-	-	100	7,1	100	67	100	14,7	100	10,8	100	0,4	100

Las areniscas silíceas están constituidas por granos de cuarzo cementados por sílice. Aproximadamente el 20 % presenta oquedades superficiales.

Las partículas presentan escaso polvo adherido a la superficie, contenido en las imperfecciones de los clastos, y tinción superficial por óxidos de hierro. Presentan formas predominantemente irregulares equidimensionales (65 %) con cantidades subordinadas de redondeadas (29 %) y escasas irregulares planares (6 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó calcedonia (38 %) y cuarzo criptocristalino en el cemento de las areniscas. No se observaron sustancias nocivas.

3.1.3 Canto rodado polimíctico de Tucumán (CR T)

El material corresponde a un canto rodado triturado, constituido principalmente por rocas metamórficas (92 %), con predominio de filitas y pizarras (59 %) sobre esquistos (33 %), y cantidades subordinadas de cuarzo (14 %). En la Tabla 4 se muestra el detalle de la composición (en % en peso) en las diferentes granulometrías y en la muestra total.

Las filitas son rocas foliadas, de grano fino, constituidas por cuarzo, feldespatos muy

argilizados y micas. Como minerales de alteración se identificaron illita y cloritas. La fábrica está definida por la orientación de los minerales micáceos, generando texturas lepidoblásticas. El cuarzo es microcristalino.

Las pizarras son composicionalmente similares, pero con una foliación más fina y definida (clivaje pizarreño). Los esquistos son cuarzo-feldespáticos, están constituidos por feldespato (plagioclasa y en menor proporción ortosa), biotita, clorita y anfíboles, distribuidos en texturas granolepidoblásticas.

Algunas partículas presentan dominios cuarzo-feldespáticos por segregación. También es común observar venillas de cuarzo o calcita en estas partículas. Se observan muy escasas partículas de rocas graníticas, con argilización de los feldespatos. El cuarzo corresponde a partículas monominerales de los fragmentos de mayor desarrollo cristalino del mismo origen.

Predominan las formas irregulares equidimensionales (70 %), con cantidades subordinadas de irregulares planares (29 %) y muy escasas redondeadas (1 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó cuarzo microcristalino (~ 7 %) y cuarzo con extinción ondulante (AEO promedio 19°), en las rocas metamórficas. No se observaron sustancias nocivas.

Tabla 4. Composición petrográfica de la muestra CR T.

Constituyentes	Composición de las fracciones retenidas en los tamices												Composición de la muestra (% en peso)
	1"		3/4"		1/2"		3/8"		4 mm		<4mm		
	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	
Esquistos	-	-	100	0	33	10,4	31	5,3	36	14,1	33	3,7	33,5
Filitas y pizarras	-	-	0	0,9	62	19,5	66	11,4	53	20,7	53	6	58,5
Cuarzo	-	-	0	0	5	1,6	3	0,5	11	4,3	14	1,6	8
TOTAL	-	-	100	0,9	100	31,5	100	17,2	100	39,1	100	11,3	100

3.1.4 Arena silícea de Entre Ríos (AR ER)

La muestra está constituida por 45 % de cuarzo, 37 % de areniscas (27 % silíceas y 10 % ferruginosas, respectivamente) y 17 % de calcedonia. Se identificaron además escasos minerales opacos en las fracciones más finas (en el retenido y pasante tamiz #100) (< 1 %) (Tabla 5).

El cuarzo es de grano grueso, y su color va de blanco y traslúcido a opalescente. La calcedonia tiene fractura concoidal, hábito fibroso con estructura mamelonar, arriñonada, de colores variados, con predominio del color ámbar. Los minerales opacos son principalmente hematita y magnetita.

Las partículas presentan escaso polvo superficial adherido, constituido por cuarzo fino. Se concentra en las irregularidades/imperfecciones de los clastos. Se observó tinción superficial por óxidos de hierro.

Predominan las formas irregulares equidimensionales (72 %) con cantidades subordinadas de redondeadas (28 %). Son muy escasas las irregulares planares (< 1 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó calcedonia y sílice criptocrystalina en el cemento de las areniscas. No se identificaron sustancias nocivas.

3.1.5 Arena polimíctica de Tucumán (AR T)

La arena AR T está constituida en forma predominante por rocas metamórficas (51 %), con proporciones similares de filitas y esquistos, y cuarzo (45 %). Se identificó escasa cantidad de micas (4 %) y minerales opacos en el pasante tamiz #100 aunque su participación en la muestra total es despreciable (< 0,1 %). El detalle de la composición (en % en peso) en las diferentes granulometrías y en la muestra total, se puede ver en la Tabla 6.

El cuarzo presenta leve tinción superficial por la precipitación de óxidos de hierro, corresponde principalmente al desprendimiento de los esquistos. Presenta extinción ondulante (AEO promedio 18°) y aproximadamente un 8 % es microcristalino.

Las filitas son rocas metamórficas de color gris oscuro, casi sin segregación, de brillo lustroso generado por el contenido de micas. Los esquistos tienen foliación y presentan bandeamiento, comúnmente con segregación. Tienen abundante cuarzo microcristalino (~ 15 %), óxidos de hierro y muscovita orientada, definiendo la textura. Dentro de las micas predomina la muscovita (60 %), con cantidades menores de biotita (40 %). Estos minerales presentan sericitización y cloritización/desferrización respectivamente.

Tabla 5. Composición petrográfica de la muestra AR ER.

Constituyentes	Composición de las fracciones retenidas en los tamices												Composición de la muestra (% en peso)
	10		18		30		60		100		<100		
	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	
Calcedonia	35	5	20	0,8	17	0,9	14	8,5	10	1,4	12	0,1	16,7
Areniscas silíceas	22	3,1	39	1,6	42	2,2	30	18,2	14	2	15	0,2	27,3
Areniscas ferruginosas	28	4	18	0,8	6	0,3	5	3	12	1,7	15	0,2	10
Cuarzo	15	2,1	23	1	35	1,9	51	31	60	8,6	53	0,6	45,2
Minerales opacos	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,6	5	0,1	0,7
TOTAL	100	14,2	100	4,2	100	5,3	100	60,8	100	14,3	100	1,2	100

Tabla 6. Composición petrográfica de la muestra AR T.

Constituyentes	Composición de las fracciones retenidas en los tamices												Composición de la muestra (% en peso)
	10		18		30		60		100		<100		
	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	%	% Pond	
Cuarzo	27	8,8	54	15,4	58	7,1	52	11,3	55	2,2	60	0,5	45,3
Filitas	44	14,3	22	6,3	17	2	9	2	13	0,5	9	0,1	25,2
Esquistos	29	9,5	24	6,9	19	2,3	26	5,6	25	1	22	0,2	25,5
Micas	0	0	0	0	6	0,7	13	2,8	7	0,3	8	0,1	3,9
Minerales opacos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	<0,1	<0,1
TOTAL	100	32,6	100	28,6	100	12,3	100	21,7	100	4	100	0,8	100

Los minerales opacos son principalmente óxidos de hierro.

Predominan las formas irregulares equidimensionales (88 %) con escasas irregulares planares y redondeadas, en proporciones similares (6 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó cuarzo microcristalino en las rocas metamórficas (~ 10 %). No se observaron sustancias nocivas.

3.2 Evaluación de la reactividad alcalina

En la Tabla 7 se muestran los resultados de expansión obtenidos con el método acelerado

de la barra de mortero (IRAM 1674) [23] y el ensayo acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700) [9] de los agregados utilizados en este estudio. Los agregados inocuos empleados para el ensayo IRAM 1700, el agregado grueso basáltico (B SL) y la arena silícea (AR UR), arrojaron expansiones en el método IRAM 1674 (a los 16 días) de 0,005 % y 0,070 %, respectivamente.

En la Tabla 8 se muestran los valores de expansión (%) obtenidos con el MACH, extendido hasta las 24 semanas de edad, y se comparan con la expansión a 15 semanas de prismas moldeados con las mismas fórmulas, curadas según las condiciones de la norma IRAM 1700 [9].

Tabla 7. Resultados de la expansión (%) según las normas IRAM 1674 y 1700 a 60 °C.

Agregados	Expansión (%)	
	IRAM 1674 (16 días)	IRAM 1700 a 60 °C (13 semanas)
CR ER	0,030 (R0)	0,088 (R1)
AR ER	0,123 (R1)	0,018 (R0)
CR T	0,241 (R1)	0,103 (R1)
AR T	0,220 (R1)	0,070 (R0)
B CC	0,465 (R3)	0,017 (R0)

Grado de reactividad: R0 (Inocuo), R1 (Moderadamente reactivo), R2 (Altamente reactivo) y R3 (Extremadamente reactivo), según IRAM 1531 [13] y 1512 [14].

Tabla 8. Resultados de expansión (%) obtenidos para las mezclas estudiadas.

Mezcla	Porcentaje de expansión del hormigón a 60 °C a la edad (en semanas)								
	Método Acelerado del Cilindro de Hormigón (MACH)								IRAM 1700
	3	6	9	12	15	18	21	24	15
ER1	0,008	0,000	0,006	0,005	0,004	0,012	0,011	0,014	0,005
ER2	0,008	0,012	0,013	0,015	0,015	0,020	0,019	0,020	0,013
ER3	0,010	0,012	0,015	0,028	0,027	0,042	0,037	0,033	0,004
T4	0,014	0,020	0,023	0,044	0,057	0,054	0,064	0,069	0,016
T5	0,024	0,052	0,078	0,089	0,105	0,114	0,122	0,132	0,008
T6	0,046	0,098	0,136	0,157	0,177	0,186	0,196	0,220	0,032
B7	0,011	0,014	0,017	0,017	0,019	0,017	0,020	0,020	0,010
B8	0,007	0,001	0,004	0,011	0,014	0,014	0,015	0,018	0,016
B9	0,000	0,001	0,004	0,007	0,011	0,013	0,019	0,026	0,014

3.3 Petrografía de los cilindros post-ensayo

Luego de cumplidas las 15 semanas del ensayo se observó, sobre cortes delgados, la microestructura del hormigón de los cilindros ER1, ER3, T4, T6 y B9, a fin de identificar evidencias del desarrollo de la RAS (Figura 2).

Al microscopio óptico, el hormigón ER1 presenta escasas microfisuras tanto en el agregado fino (AF) como grueso (AG) y en la pasta de cemento (Figura 2a). El hormigón ER3 también presenta microfisuras en el AG, con continuidad en la pasta de cemento y bordeando las partículas del AF (Figura 2b). Se observó carbonatación asociada principalmente a microfisuras y cavidades de aire accidental, con productos de neoformación craquelados.

En el hormigón T4 se observan microfisuras en el mortero y en el AG. Algunas están parcialmente rellenas por minerales de alto color de interferencia (calcita) y también por un material isótropo (Figura 2c). En algunos sectores se observa carbonatación de la pasta y las cavidades de aire accidental están mayormente vacías. El hormigón T6 presenta mayor desarrollo de microfisuras en el AG, con continuidad en el mortero (Figura 2d). En muchos casos, las microfisuras son muy finas

y, en ocasiones, se localizan en la interfase con el agregado. Se observan algunas partículas con bordes de reacción incipientes y oquedades asociadas a las partículas del AG tapizadas por un producto isótropo y craquelado.

En el hormigón del cilindro B9 se observan escasas microfisuras atravesando al AG y en la pasta, siguiendo el contacto de los agregados. En las partículas del AG, el vidrio volcánico intersticial está desvitrificado a un agregado de minerales secundarios arcillosos.

4. Discusión

Utilizando los criterios establecidos en las normas IRAM 1531 y 1512 [13,14], para agregados gruesos y finos respectivamente, de las tres combinaciones de agregados estudiadas (ER, T y B), sólo las dos primeras podrían considerarse como moderadamente reactivas (R1), debido a la reactividad del agregado grueso.

En el caso de la serie ER, no hay duda alguna de que tanto el agregado grueso como el fino, debido a su elevado contenido de calcedonia y sílice criptocristalina, deben ser considerados potencialmente reactivos. Sin embargo, de

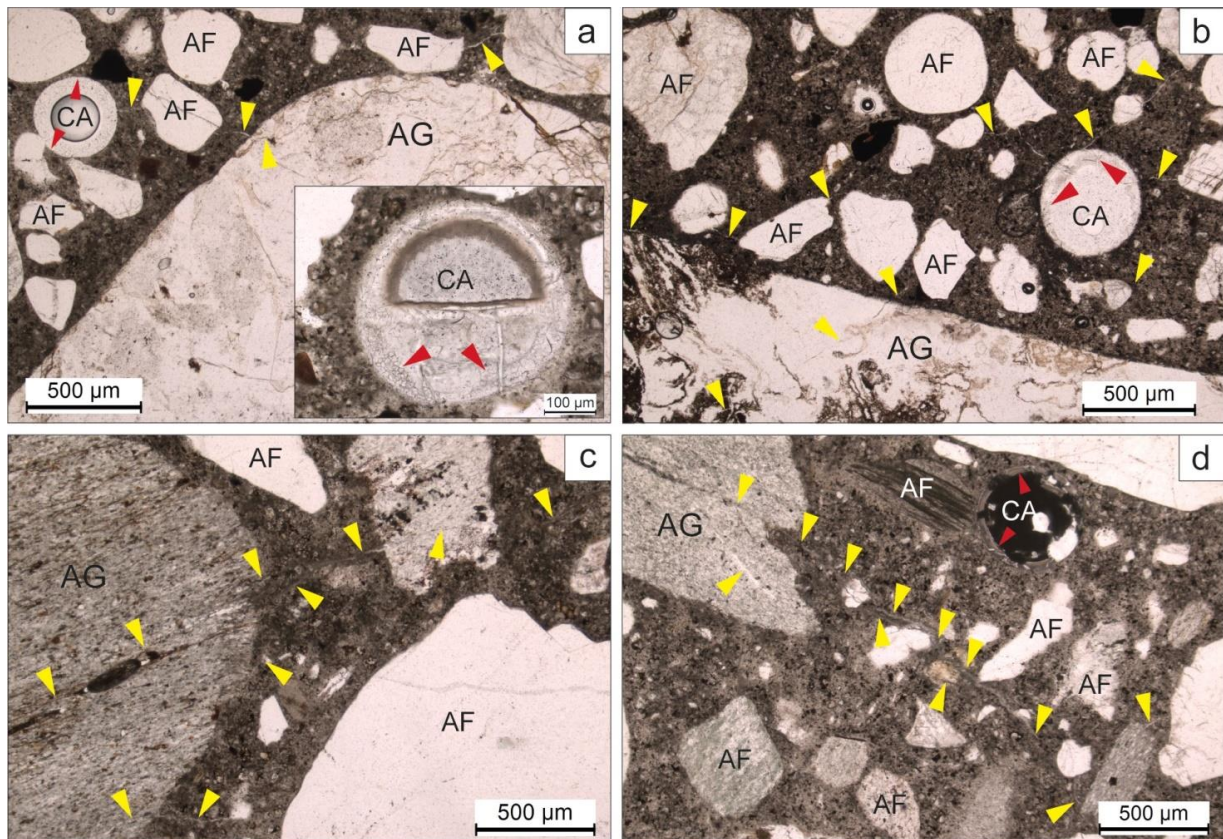


Figura 2. Fotomicrografías de los cilindros vistos al microscopio petrográfico con luz paralela. a) ER1, las microfisuras son escasas, en el contacto agregado grueso (AG)-pasta de cemento, conectando con una cavidad (CA). Detalle de otra CA situada fuera de la fotomicrografía, parcialmente rellena por dos materiales, uno pardo y otro incoloro y craquelado. b) ER3, microfisuras en el AG con continuidad en el mortero. La CA está tapizada por productos de reacción. c) T4, microfisuras en el AG, atravesando el mortero. d) T6, microfisuras en el AG continúan en el mortero, atravesando una partícula de agregado fino (AF). La CA está tapizada por productos de neoformación (color pardo). Las flechas amarillas señalan microfisuras y las rojas productos de neoformación en cavidades.

acuerdo a los resultados del prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700) [9], sólo el agregado grueso debería calificarse como potencial responsable del comportamiento inestable del hormigón frente a la RAS ($0,088 \% > 0,040 \%$, Tabla 7), ya que el desempeño de la arena en el hormigón resultó absolutamente estable ($0,018 \% < 0,040 \%$, Tabla 7).

Es importante aclarar que la muy baja expansión registrada con el canto rodado de Entre Ríos (CR ER) por el método IRAM 1674 ($0,030 \% \ll 0,10 \%$, Tabla 7) puede ser atribuida a un falso negativo, según los considerandos en la norma IRAM 1531 [13], ya que algunos agregados provenientes del Río

Uruguay sientan precedentes de este comportamiento.

Para los hormigones de la serie T, la calificación de la reactividad del agregado grueso, a partir de los resultados obtenidos por los ensayos físicos normalizados (IRAM 1674 e IRAM 1700 a 60°C , Tabla 7), es coherente con los resultados del examen petrográfico. Por su parte, si bien la arena (AR T), desde el punto de vista petrográfico, posee minerales potencialmente reactivos, debe considerarse inocua (R0) por el nivel de expansión registrado en el ensayo del prisma de hormigón (expansión inferior al límite propuesto por la norma).

En cuanto a los hormigones de la serie B, si bien el agregado basáltico fue escogido por sus antecedentes de RAS en servicio [27], la muestra seleccionada para estos estudios resultó inocua en el ensayo del prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700) ($0,017 \% < 0,040 \%$, Tabla 7), lo que guarda relación con el bajo porcentaje de vidrio volcánico fresco detectado en el estudio con microscopio óptico ($< 3 \%$).

Con respecto a lo expresado en los párrafos anteriores, los resultados del MACH son coherentes. Si bien se trata de un método para el cual no se han definido aún límites de expansión para calificar el desempeño de la mezcla evaluada, los hormigones de las series ER y T muestran un comportamiento inestable frente a la RAS, especialmente para contenidos de álcalis por encima de los niveles considerados críticos ($\geq 3 \text{ kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$). En efecto, el MACH resulta sensible al incremento en el contenido de álcalis del hormigón (Tabla 8, Figura 3). Nótese que las mismas mezclas, bajo las condiciones de estacionamiento del método IRAM 1700 (60°C), muestran un comportamiento poco variable, totalmente estable frente a la RAS, y que no guarda relación con el contenido de álcalis en el hormigón. En la Figura 3, la línea punteada de color rojo marca, sólo a modo de referencia, un posible límite de expansión ($0,050 \%$). Este límite, de carácter tentativo, se ha escogido por tratarse de un nivel de expansión típico para el desarrollo de las primeras fisuras en el hormigón.

El término “lixiviación” refiere a la disolución de una sustancia soluble contenida en un sólido (en este caso, el hormigón) hacia la solución que se halla en contacto con éste. En el caso del MACH, dado que la solución de contacto sólo contiene iones Na^+ y OH^- , los cationes K^+ y Ca^{2+} presentes en los poros del hormigón se desplazan por difusión hacia la solución de contacto, aumentando la concentración de estos cationes en la misma, sin mayores cambios en la concentración del OH^- (nótese que el OH^- se encuentra presente en ambas fases, tanto en el hormigón como en la

solución de contacto). Al mismo tiempo, el catión Na^+ se desplaza en sentido inverso, desde la solución de contacto hacia el interior del hormigón, debido a la baja concentración de Na^+ presente en los poros de éste (los cementos pòrtland utilizados en este estudio poseen alta concentración de K^+ y baja de Na^+). El diseño del MACH, al menos desde el punto de vista conceptual, si bien no evita el desplazamiento de los cationes Na^+ , K^+ y Ca^{2+} , resultaría efectivo para mantener la $[\text{OH}^-]$, evitando así que la expansión de las probetas se detenga por consumo de uno de sus principales reactivos (OH^-).

En el caso de que los agregados sean inocuos frente a la RAS, es de esperar que la $[\text{OH}^-]$ se mantenga razonablemente constante dentro de la solución de poros del hormigón, ante la presencia de este mismo ion en la solución de contacto (el gradiente de concentración estaría acotado y esto limitaría el movimiento del ion OH^- hacia el exterior por difusión). Por el contrario, si los agregados fueran reactivos, la RAS consumiría parte de los iones OH^- durante la disolución de la sílice reactiva (disminuyendo su concentración en el interior del hormigón), lo cual provocaría el ingreso de éstos desde la solución de contacto externa. Este proceso pone en ventaja al MACH, frente a otros métodos de ensayo como, por ejemplo, el IRAM 1700.

Paralelamente, la sílice reactiva del agregado en contacto con el ion OH^- se disuelve y toma el Ca^{2+} para formar el gel de la RAS. Cuando la cantidad de sílice disuelta es elevada (porque el agregado es altamente reactivo) y/o la concentración del Ca^{2+} es baja (ocasionada por el fenómeno de lixiviación mencionado precedentemente), es decir la relación Ca/Si es baja, la viscosidad del gel disminuye considerablemente, provocando su desplazamiento hacia la solución de contacto, sin generar demasiada expansión en el hormigón. Este fenómeno ha sido observado en agregados del Río Uruguay en ensayos como el IRAM 1674 [23, 26], donde arrojan falsos negativos.

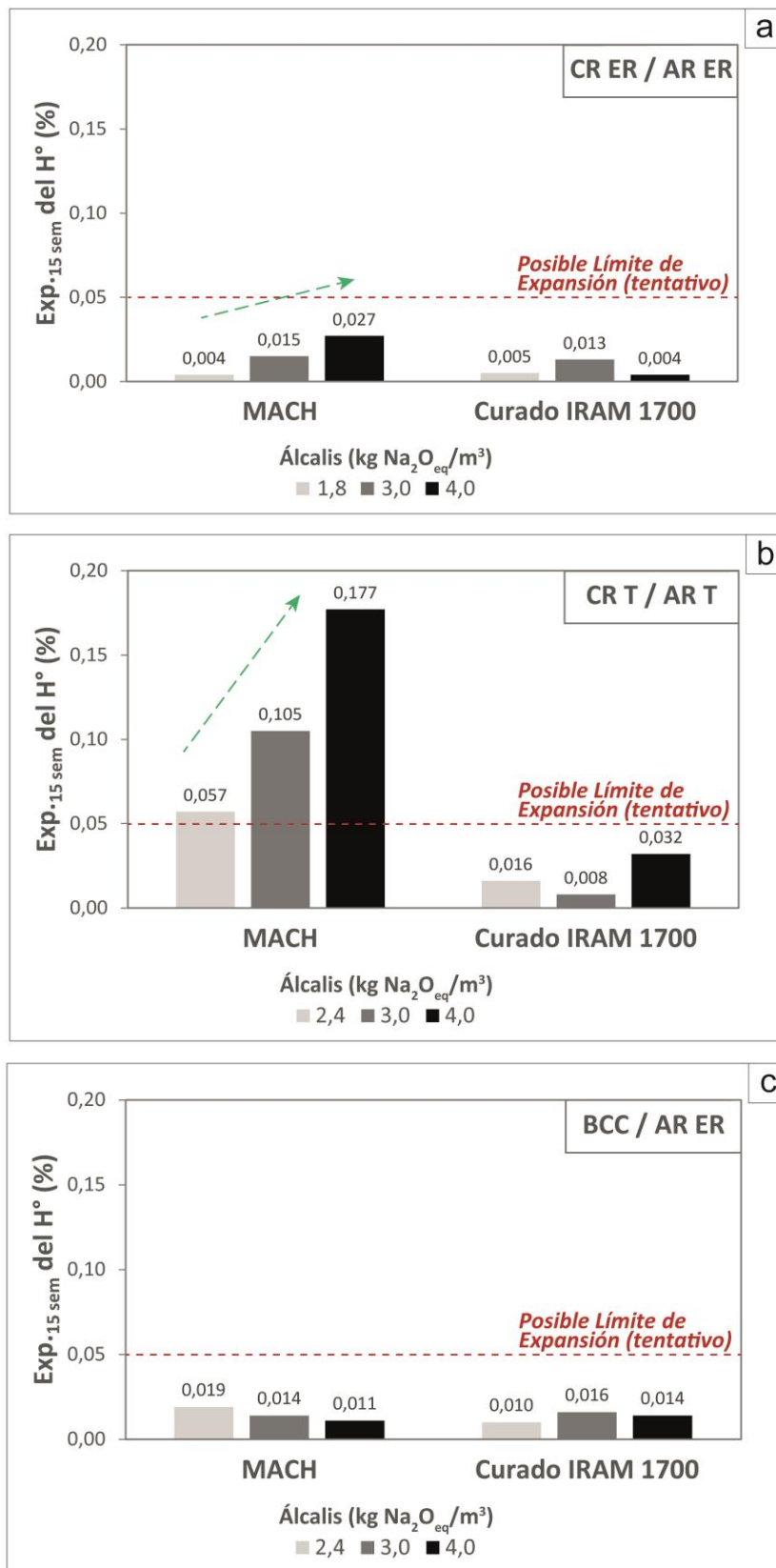


Figura 3. Impacto del contenido de álcalis del hormigón en los valores de expansión obtenidos para las mezclas ensayadas con el MACH vs. curado según la IRAM 1700 a 60 °C. a) Serie ER. b) Serie T. c) Serie B.

Es interesante destacar que las expansiones obtenidas por el MACH, correspondientes a los hormigones T6 (4 kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$), resultaron significativamente mayores que las obtenidas en el ensayo IRAM 1700 (5,25 kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$), contrariamente a lo que sucedió en los hormigones ER3 (4 kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$). Se cree que el comportamiento de la serie ER está asociado a la elevada solubilidad y cantidad de sílice reactiva que compone el agregado grueso (del orden del 40 % de calcedonia), que pasa a la solución de contacto limitando la expansión del hormigón, según lo explicado en el párrafo anterior, de forma similar a lo que sucede en otros ensayos [23]. En cambio, en los agregados de Tucumán, la cantidad y reactividad de la sílice son mucho menores (del orden del 10 % de cuarzo microcristalino), lo cual permitiría a la sílice disuelta captar el Ca^{2+} necesario para formar un gel de mayor viscosidad y generar expansión en el hormigón. Los valores de expansión de la serie T en el MACH resultan, *a priori*, alentadores para la aplicación de este método en la

evaluación de mezclas con componentes de reacción lenta, usualmente de difícil detección en algunos ensayos acelerados.

En la Figura 4 se muestra el efecto de la lixiviación alcalina, evidenciado en la pendiente (α) de las curvas de expansión luego de las 15 semanas de ensayo, obtenidas con el MACH y el método IRAM 1700 a 60 °C, en los hormigones con los agregados de Tucumán. Del análisis comparativo de los valores de expansión vs. tiempo entre ambos métodos, surge que, aun cuando el fenómeno de lixiviación alcalina es “controlado” parcialmente (ya que existe lixiviación de K^+ y Ca^{2+}), las tasas de expansión de los cilindros (MACH) luego de las 15 semanas se mantienen de manera sostenida, mientras que la de los prismas de hormigón (IRAM 1700) ingresan a la fase de agotamiento (Figura 4). Lo expuesto indica que la solución de contacto resulta efectiva para mantener la $[\text{OH}^-]$ evitando que la expansión del hormigón se detenga.

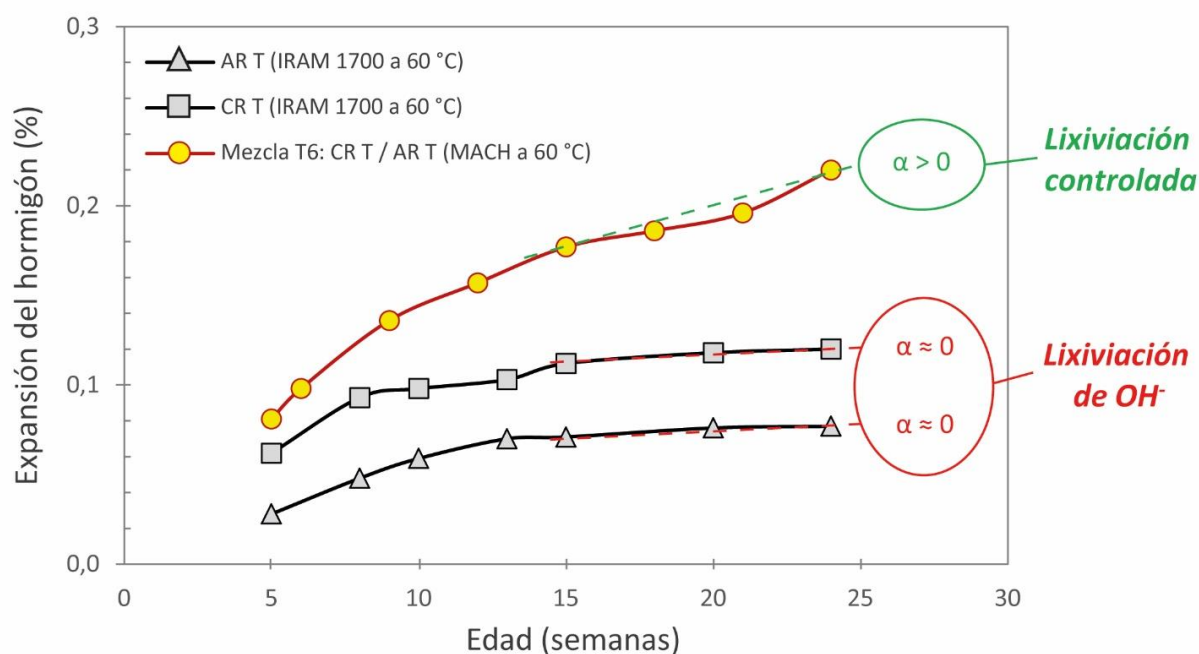


Figura 4. Efecto de la lixiviación alcalina en los hormigones con agregados de Tucumán, con ambos métodos (MACH vs. IRAM 1700 a 60 °C).

5. Consideraciones finales

A partir de los resultados obtenidos en esta experiencia, es posible realizar las siguientes consideraciones respecto del MACH:

- El método es sencillo y no requiere de equipamiento especial, fuera del utilizado en los estudios de rutina de la RAS.
- Tratándose de un método nuevo, no normalizado, del cual se desconocen sus límites de aplicación (edades a las que deben evaluarse sus resultados y los niveles de expansión que deben considerarse nocivos, entre otros), sus resultados deben analizarse en forma global (no para cada tipología de agregado) considerando especialmente las tendencias.
- El uso de una solución con un pH similar a la del hormigón en estudio (fórmula de obra), permite captar el efecto que posee el cambio en el contenido de los álcalis de la mezcla sobre la expansión del hormigón, contrariamente a lo que sucede al utilizar el procedimiento de curado del método IRAM 1700.
- Las expansiones registradas por el MACH, a una edad comprendida entre 3 y 4 meses, resultan del mismo orden que aquellas obtenidas por el método IRAM 1700 a 60 °C, lo que alienta su aplicación en el campo práctico.
- Si bien la cantera del basalto toleítico fue seleccionada por sus antecedentes de RAS en servicio, la muestra extraída para el estudio presentó un comportamiento inocuo frente a la RAS, contrariamente a lo esperado. A posteriori, a medida que se fueron disponiendo los resultados de los ensayos en marcha, quedó en evidencia que dicho comportamiento debía ser atribuido a su bajo contenido de vidrio volcánico. Con todo, la respuesta del MACH fue estable y coherente con el desempeño de un agregado inocuo.
- Los niveles de expansión obtenidos para la combinación de agregados de Entre Ríos (ER)

mediante el MACH, a pesar de que reflejan el incremento del contenido de álcalis del hormigón, son inferiores a los valores esperados, sobre todo teniendo en cuenta los antecedentes en servicio y el grado de reactividad del agregado grueso (R1 con IRAM 1700 a 60 °C). Este comportamiento, atribuido a la rápida lixiviación de la sílice “reactiva” del agregado, al igual que sucede con el ensayo de la barra de mortero (IRAM 1674), podría imponer alguna limitación a la aplicabilidad de este método.

- La respuesta de la combinación de los agregados del Río Vapos (Tucumán) en el MACH fue coherente con el resto de los métodos aplicados y con el nivel de álcalis del hormigón. La lixiviación alcalina manifiesta en los prismas de hormigón (IRAM 1700) es “controlada” por la solución de contacto en el MACH. En este sentido, se vislumbra favorable para la evaluación de mezclas con agregados de reacción lenta.
- Como corolario, a fin de acotar la lixiviación en el hormigón, la solución de contacto podría modificarse ajustando $[\text{OH}^-]$ no sólo en base al contenido de álcalis del cemento sino también a la relación agua/cemento de la mezcla, considerar la composición química del cemento ($[\text{K}^+]$, $[\text{Na}^+]$) y saturar la solución en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Lautaro Iloro y Maximiliano Rodríguez del área Durabilidad y Ligantes del LEMIT, al Dpto. de Geología de la Universidad Nacional del Sur y al CGAMA (CIC-UNS), por el apoyo brindado.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue financiado por Cementos Avellaneda y el LEMIT a través de un convenio de cooperación, la Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As. y la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur.

Contribución de autoría

C. Milanesi: conceptualización, investigación, visualización, recursos, supervisión, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición. D. Falcone: metodología, validación, investigación, análisis formal, visualización. S. Orlando; F. Pastrengo y M. Rearte: investigación, recursos, conceptualización. C. Bournod; S. Marfil: investigación, visualización, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] Stanton, T. E. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66(10), 1781–1811.
- [2] Sims, I., y Poole, A. (Eds.). (2017). *Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [3] American Concrete Institute (1998). *Report on alkali-aggregate reactivity*. (ACI 221.1R-98, Reapproved 2008).
- [4] Bérubé, M. A., y Fournier, B. (1992). Accelerated test method for alkali-aggregate reactivity. En V. M. Malhotra (Ed.), *International Symposium on Advances in Concrete Technology* (pp. 583–627). CANMET/ACI.
- [5] Grattan-Bellew, P. E. (1996). A critical review of accelerated ASR tests. En A. Shayan (Ed.), *10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 27-38). CSIRO Division of Building Construction and Engineering Melbourne (Australia).
- [6] Fournier, B., Nkinamubanzi, P. C., Lu, D., Thomas, M. D. A., Folliard, K. J., y Ideker, J. H. (2006). Evaluating potential alkali-reactivity of concrete aggregates - How reliable are the current and new test methods?. En B. Fournier (Ed.), *Marc-André Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete* (pp. 21–43). RILEM.
- [7] American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C1293-17 Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction*.
- [8] Canadian Standard Association (2019). *CSA A23.2-14A Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C)*.
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *IRAM 1700 Agregados Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*.
- [10] Falcone, D., y Milanesi, C.A. (2014). Evaluación de la reacción álcali-agregado: Posibilidades y limitaciones de los métodos de ensayos disponibles. En J. D. Sota (Ed.), *XX Reunión Técnica de la AATH Ing. Alberto S.C. Fava* (pp. 319–326). AATH.
- [11] Blanks, R. F., y Meissner, H. S. (1946). The expansion test as a measure of alkali-aggregate reaction. *Journal of the American Concrete Institute*, 17(5), 517–539.
- [12] Batic, O. R., y Milanesi C. A. (1995). Consideraciones sobre el método de expansión de prismas de hormigón al estudio de la reactividad alcalina. En AATH (Ed.), *XII Reunión Técnica de la AATH Dra. Haydée V. Armándola* (pp. 149–162). AATH.
- [13] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2022). *IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo. Sexta edición*.
- [14] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2024). *IRAM 1512 Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos. Quinta edición*.
- [15] Ideker, J. H., Drimalas, T., Bentivegna, A. F., Folliard, K. J., Fournier, B., Thomas M. D. A., Hooton, D. R., y Rogers, C. A. (2012). The importance of outdoor exposure site testing.

- En T. Drimalas, J. H. Ideker, y B. Fournier (Eds.), *14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, (pp. 1–10). University of Texas at Austin.
- [16] Lindgård, J., Thomas, M. D. A., Sellevold, E. J., Pedersen, B., Andiç-Çakır, Ö., Justnes, H., y Rønning T. F. (2013). Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali-leaching and prism expansion. *Cement and Concrete Research*, 53, 68–90. <https://doi.org/ps4t>
- [17] Ghanizadeh, A., Parashar, A., Ideker, J. H., Drimalas, T., Folliard, K., Hossack, A., y Thomas, M. (2024). Using miniature concrete prism test (MCPT) and accelerated mortar bar test (AMBT) to determine alkali threshold of aggregates. En L. F. Sanchez, y C. Trottier (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. RILEM Bookseries, 49 (pp. 249–256). Springer. <https://doi.org/ps4v>
- [18] Stacey, S., Folliard, K., Drimalas, T., y Thomas, M. D. A. (2016). An accelerated and more accurate test method to ASTM C1293: The concrete cylinder test. En H. de M. Bernardes, y N. P. Hasparyk (Eds.), *Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 1–11). IBRACON.
- [19] Moffatt, E. G., Thomas, M. D. A., Kasaniya, M., y Laskey, M. (2022). A new performance test method for alkali-silica reaction. En A. Batista, A. Santos Silva, I. Fernandes, L. Oliveira Santos, J. Custódio, y C. Serra (Eds.), *16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – Volume 2* (pp. 653–661). LNEC.
- [20] Milanesi, C., Orlando, S., Pastrengo, F., Rearte, M., Falcone, D., Bournod, C. N., y Marfil S. A. (2024). Implementación del método acelerado del cilindro de hormigón para evaluar el desempeño de mezclas de obra frente a la reacción álcali-sílice. En R. Zerbino, M. E. Sosa, y F. Locati (Eds.), *Memorias del XI Congreso Internacional - XXV Reunión Técnica de la AATH* (pp. 146–153). AATH.
- [21] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2003). *IRAM 1548 Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos. Tercera edición.*
- [22] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2008). *IRAM 1649 Agregados para hormigones. Examen petrográfico. Segunda edición.*
- [23] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1674. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.*
- [24] Diamond, S., y Penko, M. (1992). Alkali silica reaction processes: The conversion of cement alkalis to alkali hydroxide. En J. Holm (Ed.), *Durability of Concrete – G.M. Idorn International Symposium*, ACI Special Publication, 131, (pp. 153–168). ACI.
- [25] American Concrete Institute (1991) *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete* (ACI-211.1-91, Reapproved 2009).
- [26] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2012). Avances en la aplicación de un nuevo método acelerado para la evaluación de la reacción álcali-agregado. En J. D. Sota, N. F. Ortega, y J. M. Moro (Eds.), *XIX Reunión Técnica de la AATH Ing. Oscar R. Batic* (pp. 207–214). AATH.
- [27] Milanesi, C. A., Souza, E., Marfil, S., y Maiza, P. J. (2008). Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra. En V. Rahhal, y J. Sota (Eds.), *XVII Reunión Técnica de la AATH Ing. José Fermín Colina* (pp. 273–280). AATH.