

ANÁLISIS CINÉTICO PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE EXPANSIÓN POR REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE EN BARRAS DE MORTERO Y DE HORMIGÓN

Patricia Vila¹, Hugo Bonjour², María Noel Pereyra³

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay, pvila@fing.edu.uy

² Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay, hbonjour@fing.edu.uy

³ Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay, mpereyra@fing.edu.uy

RESUMEN

El objetivo fue analizar los parámetros que surgen del análisis cinético propuesto por RILEM AAR-2; tanto en el ensayo de expansión acelerado de la barra de mortero AMBT (IRAM 1674) como en el ensayo de expansión acelerado en prismas de hormigón (IRAM 1700) y su correlación con el límite de 0,04 % de expansión a las 52 semanas en el ensayo de expansión tradicional en hormigón. Se analizó la expansión en 9 tipos de agregados, obteniéndose una buena correlación del modelo cinético y los datos experimentales, lo que permitió calcular los parámetros del modelo $\ln(k)$, M y el cociente $\ln(k)/M$. No se obtuvo una buena correlación entre la expansión en AMBT y la expansión a las 52 semanas en prismas de hormigón-metodología tradicional y no fue posible definir un criterio para la reactividad del agregado en el AMBT a partir de los parámetros cinéticos. Por el contrario, la expansión a las 13 semanas en el ensayo acelerado en prismas de hormigón presentó una buena correlación con la expansión a las 52 semanas en hormigón-metodología tradicional, lo que permitió determinar que $\ln(k)/M$ de -7,7 se corresponde con el límite de 0,04 % (considerando un tiempo de inducción t_0 de 1 semana). Se deberá abarcar una mayor cantidad de muestras para que la correlación sea de mayor validez y evaluar la sensibilidad de los resultados al variar el tiempo de inducción t_0 .

Palabras claves: hormigón, álcali-sílice, expansión, ensayo acelerado, análisis cinético.

INTRODUCCIÓN

La reacción álcali-sílice (RAS) es una reacción interna en el hormigón que se da entre ciertos componentes de los agregados considerados “reactivos” (diferentes formas de cuarzo con sílice reactiva, ftanita, chert, calcedonia, tridimita, cristobalita, ópalo y vidrio volcánico) y los álcalis principalmente provenientes del cemento pórtland (identificados como iones de sodio y de potasio). Para el desarrollo de la reacción es necesario de un medio alcalino, como es habitual en la solución presente en la porosidad del hormigón. Como consecuencia y en presencia de humedad, los productos de la reacción se expanden, generando agrietamiento y reduciendo significativamente la vida útil de la estructura afectada. Además, producen manchas por lixiviados en la superficie del hormigón [1].

Consecuentemente grandes esfuerzos se han realizado para desarrollar métodos de ensayo para evaluar la reactividad del agregado y el grado de letargo de la reacción [2-4]. Recientemente, el Comité Técnico 219-ACS de RILEM introdujo dentro de sus recomendaciones, un nuevo método para la interpretación del resultado de expansión, basado en el análisis cinético de evolución de la expansión con el tiempo de ensayo [1]. Johnston y Fournier [5] y Johnston y otros [6] fueron los primeros en introducir este método de interpretación que surge de aplicar el modelo matemático conocido como Kolmogorov-Avrami-Mehl-Johnson (abreviado modelo KAMJ). Tal modelo relaciona el porcentaje de expansión (E_i) de manera exponencial en potencia del tiempo t_i como se muestra en la Ec.1:

$$E(t_i) = 1 + E_{t_0} - e^{-k(t_i-t_0)^M} \quad (1)$$

Donde E_{t_0} es el grado de reacción en el tiempo t_0 cuando la nucleación y crecimiento se convierten en dominantes y k es una constante de velocidad que combina los efectos de nucleación, crecimiento multidimensional, la geometría de los productos de la reacción y de difusión. M , término exponencial relacionado con el crecimiento y la forma de la nucleación. Este modelo puede ser aplicado al desarrollo de la expansión tanto en barras de mortero como en elementos de hormigón sometidos a la reacción, siendo una importante herramienta para realizar proyecciones o estimaciones del comportamiento del material a diferentes tiempos de ensayo o edades de expansión [5-7].

OBJETIVO

Analizar los resultados de expansión obtenidos de la metodología de ensayo de expansión acelerado de la barra de mortero AMBT y de expansión acelerado en prismas de hormigón (a 60 °C) aplicando el modelo cinético (modelo KAMJ) recomendado por RILEM AAR-2. Evaluar la correlación entre los parámetros cinéticos del modelo $\ln(k)$ y $\ln(k)/M$ y la expansión a las 52 semanas de la metodología de ensayo tradicional del prisma de hormigón (a 38 °C).

El análisis permitirá una mayor confiabilidad del criterio para determinar la reactividad del agregado que surge del análisis de expansión obtenidos por ambas metodologías de ensayo (barras de mortero AMBT y prismas de hormigón-acelerado). El presente trabajo pretende contribuir, aportando resultados de estos coeficientes ($\ln(k)$ y $\ln(k)/M$) que permitan en trabajos futuros definir criterios de reactividad aplicando el análisis cinético.

METODOLOGÍA

Materiales y ensayos

Para el estudio fueron utilizados diferentes tipos de agregados todos ellos considerados aptos para hormigón [8]. De un total de 9 muestras, 7 fueron de agregado grueso (identificadas PPD, PR48, PPCM, PPMA, PPLC, CR y CNC), 1 de arena gruesa (AGPP) y 1 de arena fina (AFT). El agregado grueso, salvo PR48 (pedregullo) y CR (canto rodado), fueron piedra partida. Las arenas fueron todas de origen natural. En la Tabla 1 se muestra la identificación de cada muestra, procedencia, origen geológico y componentes reactivos según IRAM 1531 [9] e IRAM 1512 [10].

Para la detección de los componentes reactivos las muestras de agregado fueron analizadas al microscopio mediante la confección de láminas delgadas en el agregado grueso y frotis en arenas según metodologías IRAM 1649 [11]. Como componentes reactivos las muestras presentaron vidrio volcánico, calcedonia, cuarzo tensionado y microcristalino.

Tabla 1: Agregados utilizados en el análisis.

Muestra	Procedencia	Tipo de roca/sedimento	Componente reactivo frente a la RAS
PPD	Ruta 5, al Norte de Tacuarembó	Basalto (Formación Arapey)	Vidrio volcánico y/o componentes de baja cristalinidad.
PR48	La Paz, Canelones	Granito (Granito la Paz)	Cuarzo microcristalino (menor a 0,062 mm).
PPCM	La Cruz de Carrasco, Montevideo	Granodiorita (Granodiorita Cañadas de las Canteras)	Cuarzo microcristalino (menor a 0,062 mm).
PPMA	Mal Abrigo, Colonia	Granito (Granito Mal Abrigo)	Cuarzo microcristalino (menor a 0,062 mm).
PPLC	San Carlos, Maldonado	Granito (Granito Aiguá)	Cuarzo microcristalino (menor a 0,062 mm). Cuarzo tensionado (AEO Alto)
CR	Ciudad de Salto, Salto	Conglomerado (Formación Salto)	Calcedonia y cuarzo microcristalino ⁽¹⁾
CNC	Nueva Carrara, Maldonado	Mármol dolomítico (Complejo Zanja del Tigre)	No presenta
AGPP	Paso Pache, San José	Arena gruesa, cuarzo-feldespática. Fluvial Río.	Cuarzo microcristalino (menor a 0,062 mm).
AFT	Ciudad del Plata, San José	Arena fina cuarzosa. Fluvial Río.	Cuarzo microcristalino (menor a 0,062 mm).

AEO: Ángulo de extinción ondulante. Bajo menor a 15 °, alto mayor 15 °. Nota 1: existen antecedentes reportados en la bibliografía de la presencia de ópalo [12].

El cemento utilizado para la fabricación de los morteros y el hormigón es un cemento pórtland normal identificado como CPN 40 según UNIT 20 [18] (cemento que contiene únicamente clinker como componente principal, sin adiciones y de uso general en el hormigón). Las muestras de CPN utilizadas presentaron un contenido de álcalis equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) comprendido entre 1,16 % a 1,25 %, una expansión en autoclave promedio de 0,11 % y una superficie específica (Blaine) promedio de 330 m²/kg. No fue posible usar un cemento CPN con un contenido de álcalis según lo indican las normas de los ensayos de expansión de 0,9±0,1 % ya que en Uruguay no existe un cemento CPN con esas características.

Metodología del análisis

Del ensayo AMBT se obtuvo el registro de longitud de las barras de mortero a los 0 días (longitud inicial), 3, 7, 10, 14, 21 y 28 días de sumergidas en NaOH. Del ensayo de expansión acelerado en prisma de hormigón (a 60 °C) se tuvo el registro de longitud a los 0 días (longitud inicial), 1, 5, 8, 10, 13, 15 y 20 semanas. Se determinó la expansión E_{ti} a la edad de ensayo t_i para cada una de las metodologías de ensayo como la diferencia entre la lectura a edad t_i y la lectura inicial t_0 , expresado como un porcentaje del largo nominal de la barra L_n (250 mm en mortero y 255 mm en hormigón) según Ec. 2:

$$E_{ti} (\%) = 100 \cdot (L_{ti} - L_0) / L_n \quad (2)$$

El resultado de expansión por muestra de agregado surge como el promedio de expansión de todas las barras ensayadas. Se calculó el coeficiente de variación por muestra para verificar la precisión entre las medidas de las diferentes barras según ASTM C1260 para el AMBT y según IRAM 1700 para los prismas de hormigón.

Se realizó el análisis cinético recomendado por RILEM AAR-2 [1] aplicando el modelo matemático de KAMJ (Ec. 1). Realizando el doble logaritmo natural a ambos lados de la Ec. 1 y haciendo un cambio de variable se obtuvo el modelo de comportamiento lineal (Ec. 3) en las variables “y” y “x”, según Ec. 4 y Ec. 5.

$$y = M * x + \ln(k) \tag{3}$$

Donde:

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1+E_{t_0}-E_t}\right)\right) \tag{4}$$

$$x = \ln(t - t_0) \tag{5}$$

Mediante el ajuste lineal por mínimos cuadrados a los datos experimentales se obtuvieron los parámetros cinéticos $\ln(k)$ y M para las dos metodologías de ensayo (AMBT y hormigón-acelerado a 60 °C). En tiempo de inducción t_0 adoptado fue en AMBT de 3 días y en hormigón 1 semana.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Expansión en AMBT, en hormigón-acelerado (60 °C) y hormigón-tradicional (38 °C)

Como primer parte del análisis se observó la correlación entre los resultados de expansión en barras de mortero AMBT y la expansión a las 52 semanas en prismas de hormigón-tradicional (Figura 1) y la correlación entre la expansión a las 13 semanas en prismas de hormigón-acelerado y la expansión a las 52 semanas en prismas de hormigón-tradicional (Figura 2).

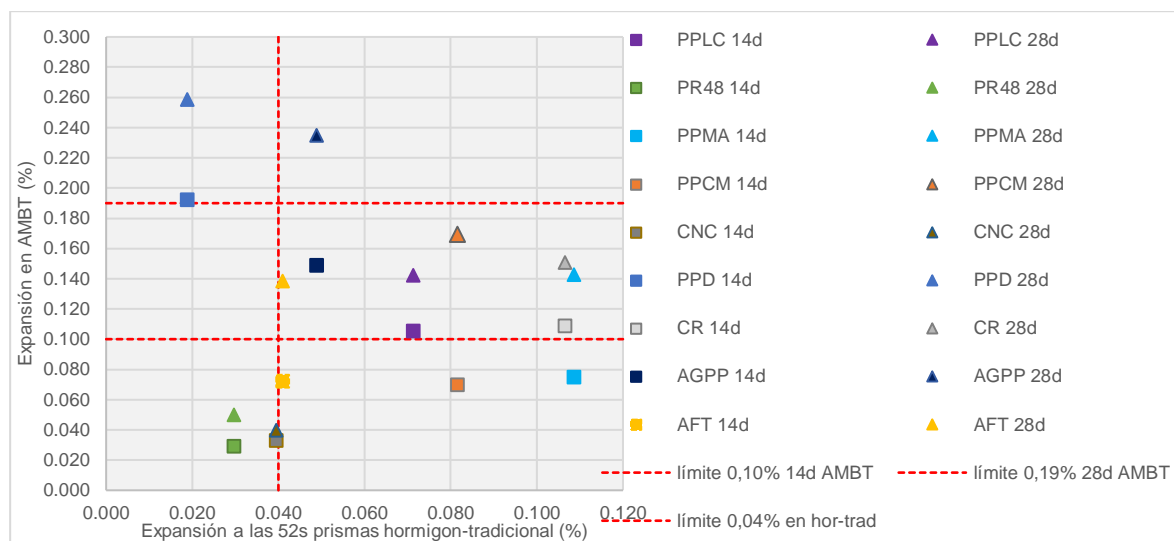


Figura 1: Expansión en AMBT vs expansión en prismas de hormigón-tradicional a 52 semanas.

No se obtuvo una correlación entre la expansión en el AMBT y la expansión en prismas de hormigón-tradicional a las 52 semanas (ni a los 14, ni 28 días). Los agregados PPMA, PPCM y CR superaron ampliamente el límite de expansión en hormigón-tradicional mientras que en AMBT la expansión fue baja (cerca de 0,10 % a los 14 días). Por el contrario, la muestra PPD presentó una expansión en el AMBT de 0,19 % a los 14 días (superando el límite de expansión para esta metodología de ensayo) pero en los prismas de hormigón-tradicional fue 0,012 %, menor al límite de 0,04 %. PPMA es un granito con cuarzo microcristalino, PPCM es una granodiorita con cuarzo microcristalino, CR es un canto rodado con calcedonia y cuarzo microcristalino (y eventualmente ópalo) y PPD es un basalto con vidrio volcánico. Esta baja correlación entre los resultados obtenidos en ambas metodologías de ensayo se refuerza con los datos reportados en la bibliografía de los “falsos negativos” y los “falsos positivos” en el AMBT [4,14-16].

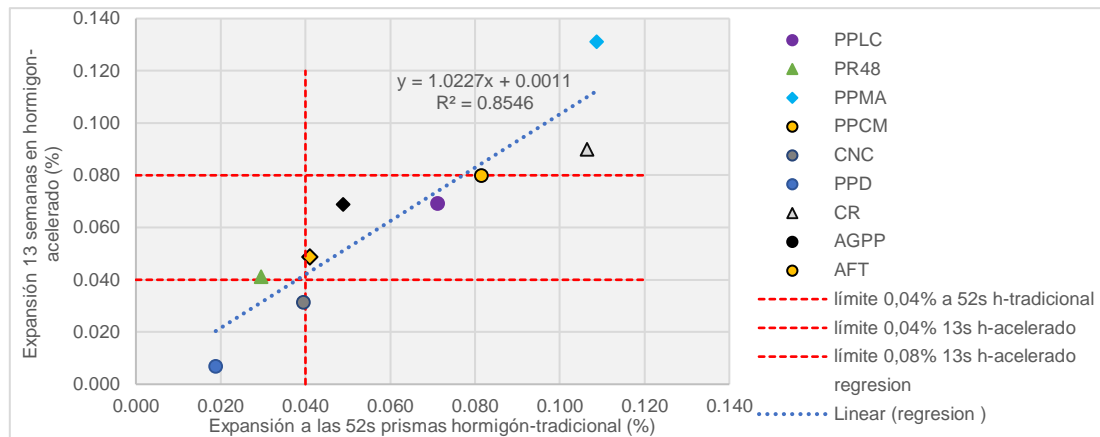


Figura 2: Expansión en primas de hormigón-acelerado vs expansión en primas de hormigón-tradicional a 52 semanas.

La expansión a las 13 semanas en primas de hormigón-acelerado presentó una buena correlación con la expansión a las 52 semanas en prisma de hormigón-tradicional. Las muestras que tuvieron la máxima expansión en ambos ensayos (PPMA y CR) fueron los que presentaron mayor apartamiento de esta correlación.

Aplicación del modelo cinético

A los datos de expansión en AMBT hasta los 28 días de inmersión y a los datos de expansión hasta las 20 semanas en primas de hormigón-acelerado se les aplicó el cambio de variables del modelo cinético (Ec. 1) según Ec. 4 y Ec. 5 y se realizó el ajuste lineal a los datos experimentales (Ec. 3) aplicando la técnica de mínimos cuadrados. Para cada una de las muestras se obtuvo R^2 de ajuste del modelo, los parámetros $\ln(k)$ y M y se calculó el cociente $\ln(k)/M$ (Tabla 2).

Tabla 2: Cálculo de los parámetros cinéticos.

Muestra	Barras de mortero-AMBT (IRAM 1674)				Prismas de hormigón-acelerado (IRAM 1700)			
	R^2	$\ln(k)$	M	$\ln(k)/M$	R^2	$\ln(k)$	M	$\ln(k)/M$
PPDD	0,960	-3,455	0,657	-5,2589	0,870	-7,664	0,900	-8,5153
PR48	0,937	-5,750	0,820	-7,0144	0,955	-4,885	0,518	-9,0000
PPCM	0,950	-4,428	0,841	-5,2652	0,966	-4,449	0,688	-6,4667
PPMA	0,961	-5,403	1,084	-4,9853	0,925	-4,341	0,925	-4,6938
PPLC	0,977	-4,374	0,722	-6,0587	0,999	-4,291	0,623	-6,8846
CR	0,969	-5,217	0,954	-5,4665	0,987	-4,519	0,759	-5,9539
CNC	0,928	-5,838	0,755	-7,7283	0,878	-5,556	0,655	-8,4771
AGPP	0,996	-3,818	0,745	-5,1263	0,969	-4,863	0,764	-6,3636
AFT	0,964	-4,777	0,822	-5,8144	0,963	-5,407	0,778	-6,9491

El ajuste del modelo a los datos experimentales en todos los casos fue bueno (el más bajo fue 0,87). Para los datos de AMBT, $\ln(k)$ estuvo comprendido entre -5,8 y -3,5 y M estuvo comprendido entre 0,66 y 1,08. En prismas de hormigón-acelerado, $\ln(k)$ estuvo comprendido entre -7,7 y -4,3 y M entre 0,52 y 0,93. Valores reportados en la bibliografía para la metodología AMBT estuvieron en el entorno de los obtenidos en el presente trabajo [17]. Para la metodología de ensayo en prismas de hormigón-acelerado (a 60 °C) no se encontraron valores reportados en la bibliografía.

Análisis de los parámetros cinéticos

Se analizó la correlación entre el coeficiente $\ln(k)$ y la expansión a las 52 semanas en prismas de hormigón-metodología tradicional (a 38 °C) y la correlación entre $\ln(k)/M$ y la expansión 52 semanas en prismas de hormigón- tradicional (Figura 3 y Figura 4).

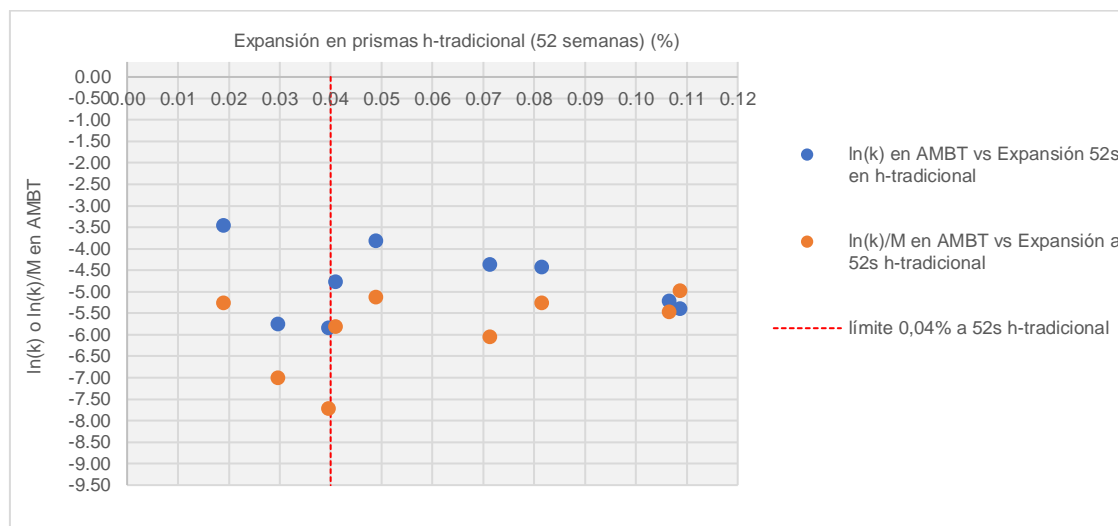


Figura 3: Correlación de $\ln(k)$ y $\ln(k)/M$ en AMBT con la expansión a 52 semanas en prismas de hormigón- metodología tradicional (a 38 °C).

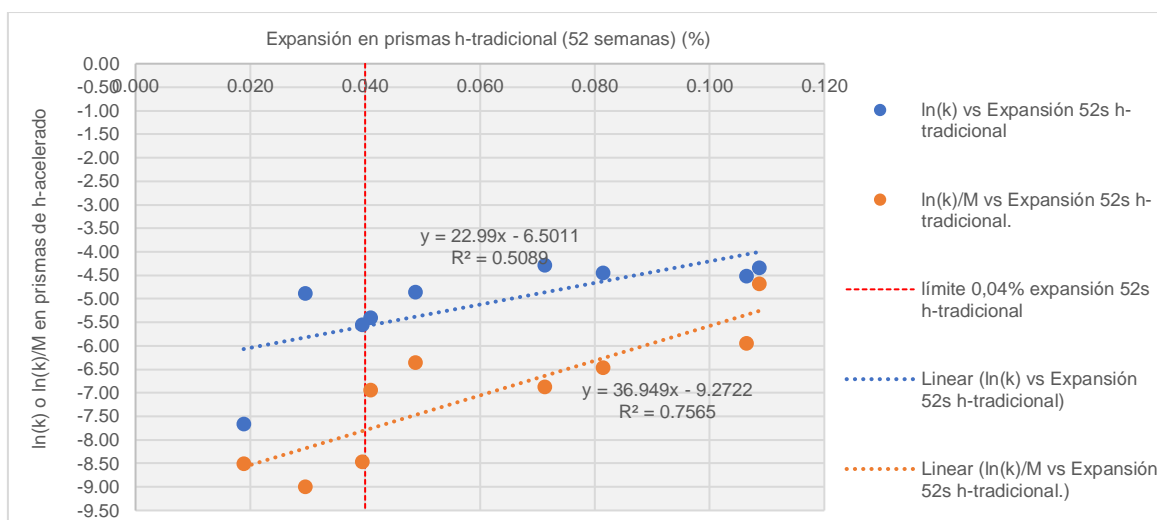


Figura 4: Correlación de $\ln(k)$ y $\ln(k)/M$ en prismas de hormigón-acelerado (a 60 °C) con la expansión a 52 semanas en prismas de hormigón- metodología tradicional (a 38 °C).

En el AMBT no se obtuvo correlación de los parámetros cinéticos y la expansión a 52 semanas en prismas de hormigón-tradicional. Sin embargo, para los coeficientes calculados de la expansión en prismas de hormigón-acelerado y la expansión a las 52 semanas se observó correlación. El mejor ajuste se obtuvo en el coeficiente $\ln(k)/M$ (R^2 de 0,76).

Teniendo en cuenta que el cemento utilizado no presentó el contenido de álcalis normalizado de $0,9 \pm 0,1$ % en sodio equivalente, que la cantidad de muestras sometidas a la correlación por mínimos cuadrados fue pequeña (gráfico Figura 4) y que el tiempo de inducción t_0 en cada uno de los modelos fue fijo, se considera que la correlación obtenida

entre el coeficiente $\ln(k)/M$ (obtenido de la metodología de ensayo en prismas de hormigón-acelerado) y la expansión a las 52 semanas en prismas de hormigón-tradicional fue buena.

Para el límite de expansión a 52 semanas de 0,04 % (según IRAM 1531 e IRAM 1512) surge a partir del análisis cinético en la metodología de expansión en prismas de hormigón-acelerado un límite para el coeficiente $\ln(k)/M$ próximo a -7,7. A diferencia de lo indicado en la IRAM 1531 [9] donde para agregado grueso y la metodología de expansión en prismas de hormigón-acelerado existen dos límites para considerar el agregado reactivo dependiendo de su mineralogía (0,04 % y 0,08 %) y para agregado fino (IRAM 1512) un único límite (0,04 %), el análisis aquí presentado permitirá definir un único límite para ambos tipos de agregado. Cabe destacar además que para el ensayo de expansión en prismas de hormigón-tradicional ambas normas marcan el mismo límite, tanto para agregado fino como para agregado grueso, de 0,04 % a las 52 semanas.

CONCLUSIONES

Aplicando el análisis cinético en cada una de las metodologías de ensayo de expansión de la barra de mortero (AMBT) y del prisma de hormigón-acelerado (a 60 °C) se obtuvo muy buena correlación entre el modelo KAMJ y los datos experimentales de expansión.

No se obtuvo correlación entre la expansión obtenida en mortero (AMBT) y en prismas de hormigón-tradicional (a 38 °C), ni tampoco entre los parámetros cinéticos $\ln(k)$ ni $\ln(k)/M$ en AMBT y la expansión a 52 semanas en prismas de hormigón-tradicional. Esta baja correlación entre los resultados obtenidos por ambas metodologías de ensayo se refuerza con los datos reportados en la bibliografía de los “falsos negativos” y los “falsos positivos” en el AMBT.

Sin embargo, se obtuvo una buena correlación entre la expansión a las 13 semanas en prismas de hormigón-acelerado (a 60 °C) y la expansión a 52 semanas en prismas de hormigón-tradicional (a 38 °C). En los parámetros cinéticos $\ln(k)$ y $\ln(k)/M$, calculados de la expansión en prismas de hormigón-acelerado, se observó correlación con la expansión a las 52 semanas en hormigón-tradicional. Si bien la bibliografía recomienda adoptar el parámetro $\ln(k)$ para definir un criterio de reactividad, del presente análisis se observó un mejor ajuste del parámetro $\ln(k)/M$. El límite para este parámetro sería próximo a -7,7 (valores menores serían considerados agregados no reactivos y valores mayor agregados reactivos).

En trabajos futuros se deberá ampliar la cantidad de muestras para el análisis de expansión y se deberá analizar la sensibilidad del coeficiente $\ln(k)/M$ al variar el tiempo de inducción t_0 .

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Estructuras y Transporte (IET) de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la Republica) por el equipamiento y espacio necesario de laboratorio para realizar los ensayos, así también a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) y a la empresa privada Concrexur S.A. por el apoyo financiero en el marco del proyecto CSIC: “Estudio de la reacción álcali-sílice en agregado para hormigón en Uruguay”.

REFERENCIAS

- [1] Nixon P, Sims I, “RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures, state-of-the-art”. Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, (2016), 168p.
- [2] IRAM 1674, “Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial método acelerado de la barra de mortero”, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, (1997), 14p.

- [3] IRAM 1700, "Agregados. Método para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, (2013), 16p.
- [4] Falcone D, Milanesi C, "Método acelerado del prisma de hormigón. Evaluación de la RAS con agregados de diversas regiones de la Argentina", V Congreso Internacional y 19º Reunión Técnica de la AATH, Bahía Blanca, Argentina, (2012), 8p.
- [5] Johnston D, Fournier B, "A kinetic-based method for interpreting accelerated mortar bar test (ASTM C1260) data", en Alkali-Aggregate Reaction, Proceedings of the 11th International Conference, Québec, Canada, (2000), 355-364.
- [6] Johnston D, Stokes D, Fournier B, Surfahl R, "Kinetic characteristics of ASTM C1260 testing and ASR-induced concrete damage, en 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, (2000).
- [7] Stokes D, "Concerning the use of expansion data from AST testing, en Marc-Andre Berube Symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete, ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Québec, Canada, (2006).
- [8] UNIT 1050, "Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado", Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay, (2005), 288p.
- [9] IRAM 1531, "Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, (2016), 36p.
- [10] IRAM 1512, "Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, (2013), 28p.
- [11] IRAM 1649, "Examen petrográfico de agregados para hormigón", Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Argentina, (2008), 13p.
- [12] Falcone D, Milanesi C, "Aplicación del método acelerado de la barra de mortero en el estudio de combinación de agregados", VII Congreso Internacional - 21ª Reunión Técnica de la AATH, Salta, Argentina (2016), 398-404.
- [13] UNIT 20, "Cemento pórtland para uso general. Definiciones y requisitos", Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay, (2017), 13p.
- [14] Velasco A, "Estudio experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta", tesis doctoral, Universidad Politécnica de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España, (2014), 440p.
- [15] Pérez Marfil S, Falcone D, Locati F, Marfil S, Madsen L, Maiza P, "Evaluación de la potencial reactividad de agregados pétreos de las sierras septentrionales de la provincia de Buenos Aires", VIII Congreso Internacional y 22ª Reunión Técnica de la AATH, Olavarría, Argentina, (2018), 211-218.
- [16] Madsen L, Falcone D, Locati F, Marfil S, Rocco C, "Estudio de barras de mortero y prismas de hormigón elaborados con basaltos de la provincia de Corrientes", VIII Congreso Internacional y 22ª Reunión Técnica de la AATH, Olavarría, Argentina, (2018), 353-360.
- [17] Gowripalan N, Sirivivatnanon V, "Kinetic based approach for alkali silica reaction-comparison of laboratory and field tests", 28th Biennial Conference, Adelaide, Australia, (2017), 15p.