

ESTUDIO DE PRISMAS DE HORMIGÓN ELABORADOS CON BASALTOS DE LA MESOPOTAMIA ARGENTINA

Rocco Claudio¹, Madsen Lenís^{2,3}, Locati Francisco⁴, Tobes Juan¹,
Fava Carlos¹, Marfil Silvina^{2,3}, Maiza Pedro²

1 UNLP. Área Departamental Construcciones. Facultad de Ingeniería. Calle 48 y 115. 1900. La Plata. cgrocco@ing.unlp.edu.ar

2 Dpto. de Geol. UNS, San Juan 670, Bahía Blanca. lenis.madsen@uns.edu.ar,
smarfil@uns.edu.ar

3 CIC de la Prov. de Bs. As

4 CICTERRA (CONICET-UNC), Av. Vélez Sarsfield 1611 X5016GCA. Córdoba.
flocati@unc.edu.ar

Palabras clave: reacción álcali-agregado (RAA), fluorescencia, ensayos físico-mecánicos.

RESUMEN

En un trabajo previo se evaluó la reactividad alcalina potencial de agregados basálticos de 4 canteras de la Mesopotamia argentina. Se realizaron estudios petrográficos que incluyeron la cuantificación del vidrio volcánico, ensayos acelerados para evaluar la reactividad alcalina potencial (IRAM 1674), químicos (IRAM 1650) y de expansión sobre prismas de hormigón hasta 1 año (IRAM 1700). Si bien los resultados del método acelerado, químico y petrográfico calificaron a las rocas de las cuatro canteras como potencialmente reactivas, solo una (Curuzú Cuatiá) presentó, en el ensayo IRAM 1700, valores de expansión que superaron los límites a un año (0,108 %). Para explicar ese comportamiento diferencial se extendió el período de ensayo de los prismas hasta 5 años. Los resultados se mantuvieron, Curuzú Cuatiá llegó a una expansión de 0,162 % mientras que el resto mostró valores por debajo de 0,04 %. Se confeccionaron secciones delgadas, convencionales e impregnadas con fluoresceína, para su estudio con microscopio petrográfico a través de luz polarizada y UV respectivamente. Se evaluó la relación entre la expansión, el contenido de vidrio volcánico y arcilla presente en la roca. Además se determinó la velocidad en ultrasonido, resistencia a tracción indirecta, densidad y absorción de agua. Se observó que la expansión se relaciona con el grado de fisuración de los prismas y principalmente con el contenido de vidrio volcánico de la roca. Tanto la velocidad en ultrasonido como la resistencia a tracción indirecta disminuyen con la expansión de los prismas.

INTRODUCCIÓN

Los basaltos de la Mesopotamia constituyen una fuente importante de agregados para la elaboración de hormigón en Argentina. Si bien se trata de un material aceptable por sus propiedades físico-mecánicas, debe considerarse que la presencia de especies deletéreas como vidrio volcánico y/o variedades de sílice microcristalina, puede calificarlas como potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-sílice (RAS). Además debe considerarse la incidencia de la presencia de arcillas del grupo de las esmectitas. El

hormigón de la ruta nacional N° 127, el aeropuerto de la ciudad de Corrientes y pavimentos urbanos de la localidad de Curuzú Cuatiá, son algunos ejemplos que presentan claras evidencias de deterioro debido al desarrollo de la RAS, con fisuración coronas de reacción relacionadas con las especies potencialmente reactivas presentes en las rocas basálticas, conformadas por pastas vítreas y/o argilizadas principalmente con montmorillonita (1,2). Los productos de neoformación identificados fueron ettringita, sílice amorfa a pobremente cristalizada y aluminosilicatos alcalinos y alcalino térreos. La reactividad potencial de estas rocas es variable aún dentro de una misma cantera y está asociada a la propia heterogeneidad de los frentes de las coladas y al grado fisuración y alteración de la roca.

Se seleccionaron canteras de rocas basálticas de las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos para evaluar su comportamiento frente a la RAS. Estas rocas forman parte de las cuencas sedimentarias de Paraná y Chacoparanense y cubren areniscas de origen eólico y fluvial con espesores entre 200 y 600 metros (3). El basalto aflora junto al río Uruguay en el este de Misiones y Corrientes y NE de Entre Ríos. Cubre aproximadamente 1.000.000 km² en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. El espesor varía entre 800 y 1000 metros alcanzando los 1930 metros en Brasil. Las coladas expuestas en la provincia de Misiones se extienden en el subsuelo hasta la localidad entrerriana de Gualeguay. Son basaltos toleíticos con textura dominante de grano fino, raras veces porfírica y tonalidades gris oscura a negras (4).

En un trabajo previo se evaluó la reactividad alcalina potencial de estos agregados basálticos a través de estudios petrográficos, ensayos acelerados en barras de mortero (IRAM 1674) (5), químicos de reactividad (IRAM 1650) (6) y de expansión sobre prismas de hormigón hasta 1 año de edad (IRAM 1700) (7). Los resultados del método acelerado, químico y petrográfico calificaron a las rocas basálticas estudiadas como potencialmente reactivas. La cantera Curuzú Cuatiá fue la única que presentó, en el ensayo de expansión a 1 año de edad (IRAM 1700), valores que superaron el límite especificado(8). Con el propósito de explicar ese comportamiento diferencial se extendió el período de ensayo de los prismas de hormigón hasta los 5 años.

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos de los estudios sobre los prismas de hormigón, luego de cumplido el tiempo de ensayo, utilizando microscopio petrográfico a través de luz polarizada y UV. De forma complementaria se realizaron ensayos físicos para determinar la densidad, absorción, tracción por compresión diametral y módulo de elasticidad dinámico de las diferentes muestras.

MATERIALES

Se estudiaron cuatro canteras de basalto en producción, dos ubicadas al sur de la provincia de Corrientes (una próxima a la ciudad de Curuzú Cuatiá (denominadas CC1 y CC2) y otra en cercanías a la localidad Felipe Yofre (Y1 e Y2)), una al norte de Entre Ríos (ER1 y ER2) y una en la provincia de Misiones (P1 y P2). Se trabajó con la fracción 6-19 mm del material muestreado en las pilas de acopio. Las muestras, cuyo tamaño fue del orden de 2 m³, fueron reducidas por cuarteo en laboratorio para obtener las porciones utilizadas en los estudios y ensayos. Como agregado fino se utilizó una arena natural constituida principalmente por cuarzo, con cantidades subordinadas de feldespato, cuarcita y valvas carbonáticas, estas últimas en muy escasa proporción. El cemento usado en los ensayos es un CPN40 que cumple con los requerimientos que establece la norma IRAM 1700.

MÉTODOS

Los ensayos de reactividad alcalina potencial a 5 años, se realizaron sobre prismas de hormigón según IRAM 1700. Se ensayaron 2 muestras de piedra partida (fracción 6-19 mm) de cada cantera denominadas 1 y 2. Luego de cumplido el tiempo de ensayo se confeccionaron secciones delgadas convencionales e impregnadas con resina fluorescente (utilizando fluoresceína sódica). El contenido de vidrio y arcillas se determinó al microscopio mediante análisis modal utilizando objetivo 10x. Se cuantificaron estos materiales en el campo del microscopio (10 campos por muestra) y se tomó el valor promedio. Se utilizaron microscopios Olympus, trinocular BH-2 y LeicaDM4500 P LED con luz UV incidente respectivamente. Luego se realizó un procesamiento informático de las imágenes para determinar el área fisurada. Además se determinó la velocidad en ultrasonido (IRAM 1683), resistencia a tracción indirecta (IRAM 1658), densidad y absorción de agua de las diferentes muestras.

RESULTADOS

Ensayos de prismas de hormigón, (IRAM 1700)

Los resultados que se muestran en la Tabla 1 corresponden a los valores promedio de 3 probetas por cada muestra. Las muestras de Curuzú Cuatiá son las únicas que presentan valores de expansión que superan el límite máximo de 0,04% a un año con resultados muy variables en los dos ensayos realizados (0,07 y 0,108). Se continuaron los ensayos hasta la edad de 5 años y los resultados se mantienen. En la Figura 1 se puede observar que la expansión siguió aumentando hasta los dos años y luego se estabiliza, incluso en el último año se observa una leve contracción.

Tabla 1: Resultados del ensayo IRAM 1700.

Cantera / muestra	% de expansión a la edad de (años)				
	1	2	3	4	5
CC 1	0,070	0,092	0,095	0,093	0,091
CC2	0,108	0,162	0,165	0,164	0,162
ER1	0,008	0,009	0,011	0,005	0,009
ER2	0,005	0,017	0,021	0,019	0,017
Y1	0,010	0,012	0,016	0,010	0,011
Y2	0,010	0,008	0,010	0,009	0,007
P1	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007
P2	0,003	0,005	0,005	0,003	0,003

Ensayos físicos:

En la Tabla 2 se muestra los resultados de los ensayos de velocidad en ultrasonido, resistencia a tracción indirecta, densidad y absorción de agua.

Tabla 2: Resultados de los ensayos físicos. SSS: saturada a superficie seca

Cantera Muestra	Velocidad ultrasonido (m/s)	Resistencia tracción indirecta (MPa)	Densidad SSS (g/cm ³)	Absorción de agua (%)
CC 1	4541	4,55	2,53	2,83
CC 2	4572	4,07	2,52	3,04
ER2	4734	5,72	2,55	2,65
Y2	4748	5,07	2,50	3,19
P2	4816	5,60	2,53	2,83

En la Figura 2 se observa una disminución de la resistencia a la tracción indirecta y de la velocidad de pulso ultrasónico con el incremento de la expansión. En cambio la densidad y absorción no se modifican sustancialmente con la expansión.

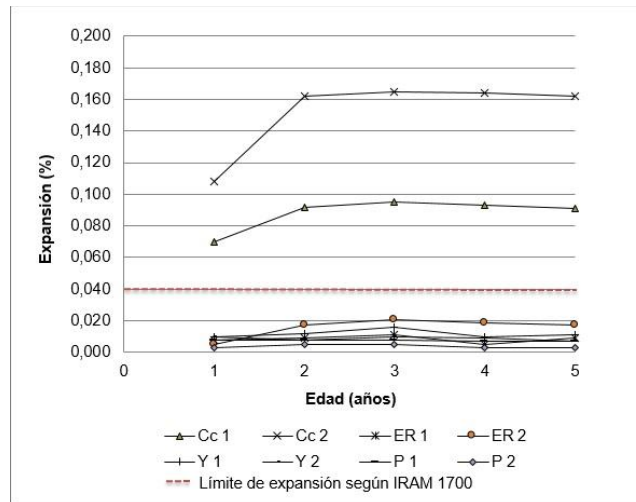


Figura 1: Expansión de prismas de hormigón (IRAM 1700) en función de la edad.

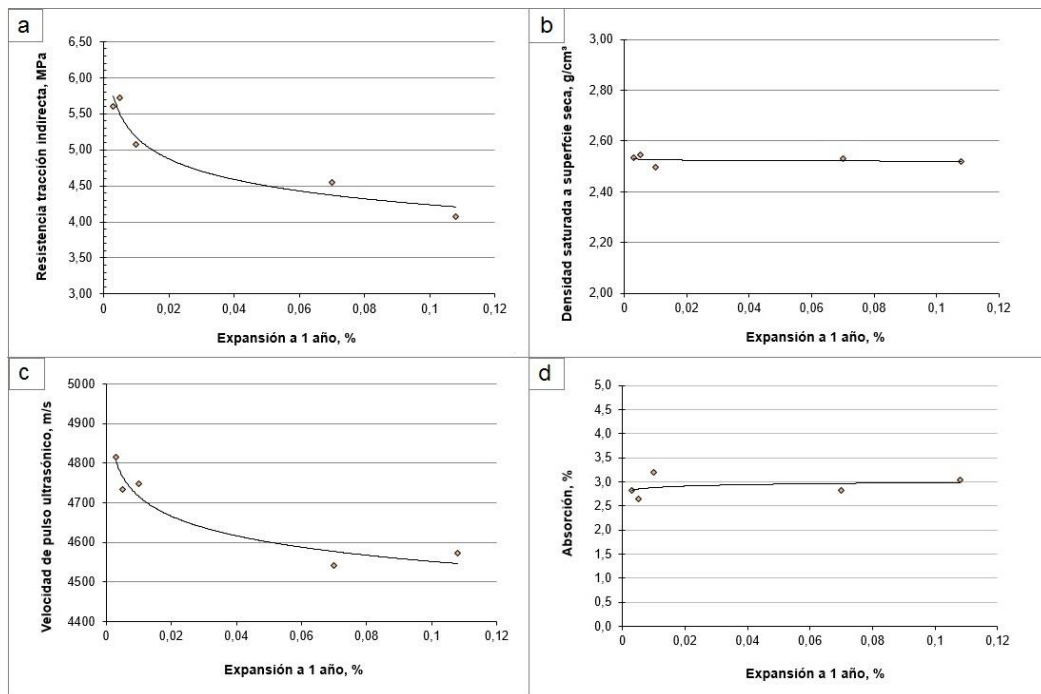


Figura 2: Relación entre la expansión de prismas de hormigón ensayados según norma IRAM 1700 a un año y: a. Resistencia a tracción indirecta, b. Densidad sss, c. Velocidad de pulso ultrasónico, d. Absorción de agua.

Petrografía

Si bien en general las características petrográficas de las rocas de las cuatro canteras estudiadas son similares, se observaron variaciones texturales, en el tamaño de los componentes cristalinos, en el contenido de vidrio volcánico y minerales arcillosos. A continuación se describen las características petrográficas (sobre secciones delgadas) de los prismas de hormigón luego de cumplidos los 5 años de ensayo.

Curuzú Cuatiá: La roca está constituida por tablillas de plagioclasa cuyo tamaño oscila entre 0,2 y 0,4 mm, subhedrales y fracturadas con bordes corroídos irregulares y levemente alteradas. Se reconocen xenolitos de textura granular constituidos por oligoclasa–andesina que alcanzan el milímetro, con grandes cristales de piroxenos, y evidencias de asimilación periférica. El mafito se encuentra frecuentemente desferrizado, dando lugar a la formación de óxidos e hidróxidos de hierro localizado. Los interespacios que dejan las tablillas del feldespatos están ocupados por vidrio volcánico desvitrificado, aunque se reconocen sectores aún isótropos de colores pardos considerados relictos de la palagonita original (CC1: 9% - CC2: 12%). La mineralogía de estos sectores es: arcilla esmectítica (CC1: 14% - CC2: 10%) con cantidades subordinadas de clorita, apatito y óxidos de hierro. Las pastas de ambos prismas se encuentran fisuradas y con procesos de carbonatación. La muestra CC1 presenta microfisuras finas vacías, que atraviesan el mortero. Éste se encuentra levemente carbonatado en sectores localizados donde el contacto con el agregado no es neto. En la muestra CC2 (Figura 3a) el grado de microfisuración es elevado, afectando tanto al agregado grueso como al mortero. La carbonatación, se concentra principalmente en la zona de fisuras del mortero, rellenando parcialmente las mismas.

Yofre: El agregado grueso basáltico está compuesto por tablillas de plagioclasa fuertemente corroídas y fracturadas, homogéneas de aproximadamente 0,2 mm, siendo el menor tamaño dentro de los agregados estudiados. El mafito (de dimensiones similares al feldespatos) es augita al que se asocia augita titanífera alterada diferencialmente, comúnmente desferrizada y cloritizada. Estos procesos generan abundantes minerales opacos. La desferrización no es homogénea, se intensifica en sectores de fracturas y de mayor porosidad desarrollada a expensas de la argilización de los sectores vítreos, produciendo la decoloración del basalto. El porcentaje de vidrio es menor que en las muestras anteriores (4%) mientras que el contenido de arcilla se mantiene en 6%. El agregado de la muestra Y2 se encuentra sano, sin fisuración. Se observó carbonatación dispersa relacionada a la interface entre el agregado grueso y el mortero.

Yeruá: El tamaño de las tablillas de plagioclasas varía entre 0,6 y 1,2 mm (Figura 3b). Se presentan corroídas aunque menos fracturadas que las descritas con anterioridad. El mafito acompaña a la granulometría, con bajo grado de desferrización. Los interespacios que dejan las tablillas del feldespatos están ocupados en parte por vidrio volcánico desvitrificado, aunque se reconocen sectores aún isótropos de colores pardos considerados relictos de la palagonita original (2%). La mineralogía de estos sectores es: principalmente arcilla esmectítica (9%) con cantidades subordinadas de clorita, apatito y óxidos de hierro. No se reconocen fisuras, ni procesos de reacción que afecten al prisma.

Posadas: El tamaño de las tablillas de plagioclasa varía entre 0,6 y 1,0 mm. En los interespacios se disponen granos de piroxenos (augita y augita titanífera) de menor tamaño los que conservan sus propiedades ópticas. Los de mayor desarrollo cristalino se encuentran desferrizados y cloritizados, dando lugar a la generación de abundantes minerales opacos. La desferrización no es homogénea, se intensifica en sectores de fracturas y de mayor porosidad desarrollada a expensas de la argilización de los sectores vítreos, produciendo la decoloración del basalto. El contenido de vidrio es de 5% y el de esmectitas 7%. El prisma no presenta fisuras relacionadas con la expansión. La pasta se encuentra carbonatada de manera diferencial en el contacto entre el agregado grueso y el mortero.

En la Tabla 3 se indica el contenido de vidrio y arcillas de las muestras estudiadas. Los porcentajes de vidrio varían entre el 2 y el 12% y de arcilla entre 6 y 14%. Los prismas que presentan la mayor expansión coinciden con los basaltos que tienen textura más fina. Esto se debe a que los interespacios que se forman entre las tablillas de

plagioclasa son muy pequeños, en los cuales se aloja el vidrio relíctico original de la roca. Los agregados que presentan tamaño de grano mayor, generan espacios intercrystalinos donde se alojan microcristales de composición semejante a su entorno.

Tabla 3: Porcentaje de vidrio y arcilla (esmectita) determinada para cada cantera.

	CuruzúCuatía (CC1)	Curuzú Cuatía (CC2)	Yerúa (ER2)	Yofre (Y2)	Posadas (P2)
% de vidrio	9	12	2	4	5
% de arcilla	14	10	9	6	7

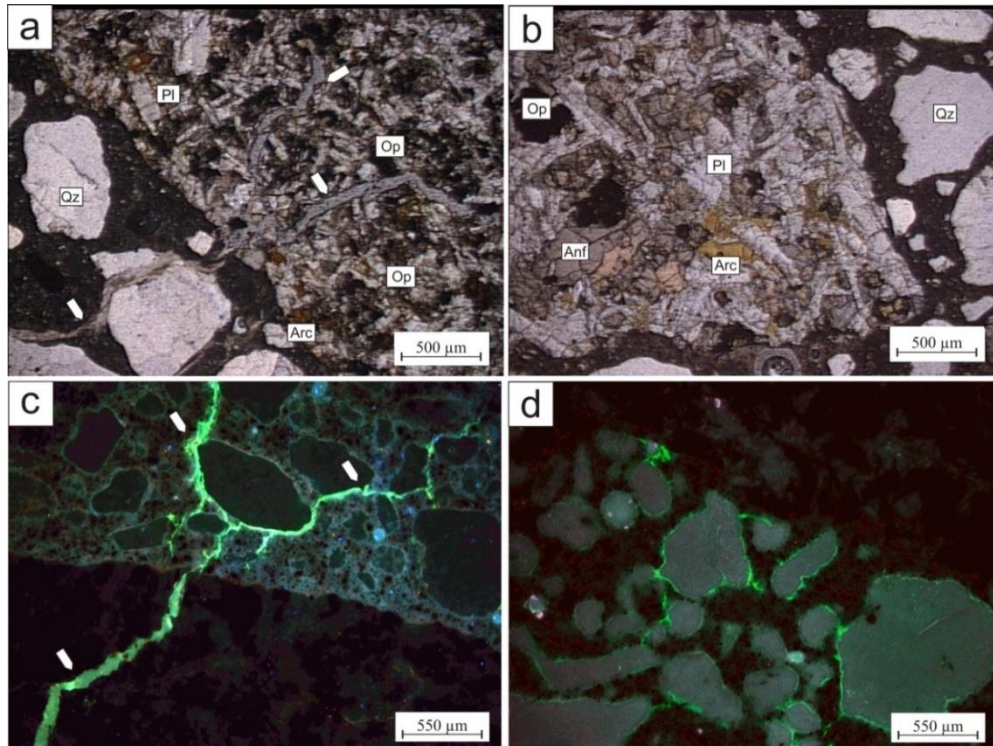


Figura 3: Fotomicrografías (nicoles paralelos). a. Prisma CC2 (Curuzú Cuatía). Microfisuras (vacías) que afectan al agregado grueso (grano fino) y al mortero. b. Prisma Y2 (Yofre). Se observa en la parte inferior de la imagen carbonatación relacionada al contacto entre el mortero y el agregado grueso (grano grueso). c y d. Fisuras en los prismas de hormigón vistas con luz UV. c. Prisma CC2. d. Prisma Y2. Qz: cuarzo; Pl: plagioclasa; Op: minerales opacos; Arc: arcillas; Anf: anfíboles.

Determinación del área fisurada en los prismas de hormigón

Para el análisis se seleccionaron las dos muestras de la cantera Curuzú Cuatía (CC1 y CC2) debido a la diferencia en el % de expansión medido y una del resto de las canteras (Y2, ER2, P2). Se realizaron cortes delgados impregnados con resina fluorescente (utilizando fluoresceína sódica) y se observó al microscopio óptico con luz UV incidente. Se tomaron 10 imágenes por cada muestra. En la Figura 3 (c y d) se muestran dos imágenes de los prismas que evidenciaron mayor y menor expansión, correspondientes a las canteras Curuzú Cuatía y Yofre respectivamente. Se procesó cada una de las fotomicrografías con el programa ImajeJ (9) para obtener una imagen binaria (blanco y negro) de los sectores teñidos. Debido a que la fluoresceína no solo tiñe las fisuras sino también cavidades o poros de la pasta y de los agregados, para discriminar las fisuras en cada imagen, se realizó un mapeo en forma manual, asistido por el pulgínNeuronJ (10) que se instala en el mismo software. Posteriormente se

pasaron las imágenes de las fisuras al programa Corel Draw X6 y se adaptó el grosor de cada línea al real de cada fisura en todas las imágenes y en el caso de las irregulares, se mapearon con su forma construyendo superficies rellenas de la forma de la fisura (para esto se trabajó con el mapa de fisuras obtenido luego del procesamiento con el NeuronJ y de fondo la imagen original para ir "calcando" cada grosor o forma). Luego se exportaron los nuevos mapas de fisuras a imágenes binarias y se calculó el área fisurada de cada mapa en el ImageJ. En Figura 4 se muestran los resultados promedio de las 10 imágenes procesadas por cada muestra y el desvío estándar. Se puede observar que si bien la muestra que dio mayor expansión se corresponde con el mayor porcentaje de área fisurada, Y2 da valores más elevados que CC1 debido al mayor tamaño de los componentes cristalinos del agregado basáltico. Los campos se tomaron al azar y se observó mucha variación entre sectores con alto porcentaje de agregado grueso respecto a otros con alto porcentaje de pasta. Se considera que si se eleva el número de mediciones se podría disminuir el desvío y tener valores que se ajusten mejor con la expansión.

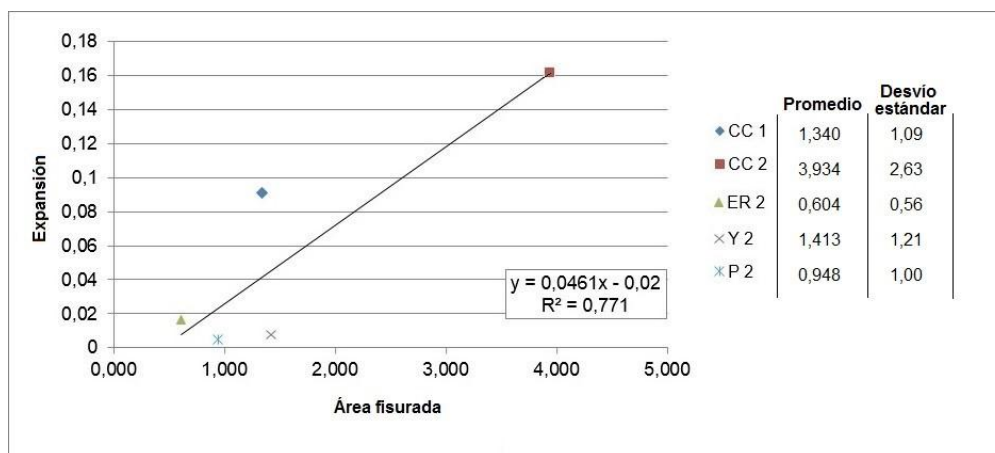


Figura 4: Relación entre la expansión de los prismas a la edad de 5 años y el área fisurada. Valores promedio y desvío estándar.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- En un trabajo previo (8) se calificaron a las rocas basálticas de las canteras CC, Y, ER y P como potencialmente reactivas frente a la RAS a partir de los resultados obtenidos utilizando métodos petrográficos, químicos y acelerado de la barra de mortero. Sin embargo la cantera CuruzúCuatiá fue la única que presentó, en el ensayo IRAM 1700 valores de expansión a 1 año de edad que superaron los límites máximos permitidos. Por ello se extendió el período de ensayo hasta los 5 años. De los resultados obtenidos (Figura 1) se puede observar que la expansión en CC continuó hasta los dos años y a partir de ahí los valores permanecen constantes. En el resto de las canteras no hubo variaciones en el cambio de longitud de los prismas con el tiempo.
- A fin de explicar las causas de este comportamiento diferencial en un mismo tipo de roca, se realizó un estudio petrográfico evaluando el contenido modal de vidrio y minerales arcillosos (esmectitas) sobre cortes delgados de los prismas de hormigón. Las muestras de CC son las que presentan mayor contenido en ambos materiales. Considerando que el límite máximo de vidrio contenido en rocas volcánicas, establecido en la norma IRAM 1531 es de 3 % (9), solo Yerúa (ER) se calificaría como no reactiva, aunque los valores determinados en Yofré (Y) y Posadas (P) están muy cerca del límite (4 % y 5 % respectivamente), mientras que Curuzú Cuatiá (CC) tiene en promedio 10,5 %.

- Con microscopía UV se observó marcadas diferencias en el grado de microfisuramiento que presenta tanto el mortero como las partículas del basalto. El porcentaje de área fisurada se correlaciona con el grado de expansión medido en los prismas de hormigón. Se considera que el desvío estándar es alto porque el área del campo del microscopio es pequeña en relación al tamaño de partícula del agregado grueso, y el microfisuramiento no es igual en el mortero que en el agregado, por lo que los valores dependen también del porcentaje que representa el área que ocupa el agregado basáltico en la imagen.
- La resistencia a la tracción indirecta y la velocidad de pulso ultrasónico disminuyen con el incremento de expansión medida en los prismas a la edad de un año. Sin embargo, los valores de densidad y absorción no varían sustancialmente a medida que progresa la expansión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UNS, al CICTERRA-CONICET, a la CIC de la Provincia de Bs. As. Este trabajo fue en parte financiado por el PICT-2014 N° 2483.

REFERENCIAS

1. Milanesi C., Souza E., Marfil S., Maiza P. "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". III Congreso Internacional. 17ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Memorias. Córdoba, (2008), 273-280.
2. Maiza P., Marfil S., Rocco C., Fava C., Tobes J. "Pavimentos de hormigón elaborados con agregados basálticos y afectados por la reacción álcali sílice (RAS). Casos de estudio". I Congreso Hormigón Premezclado de las Américas 2010, XII Congreso Iberoamericano del Hormigón Premezclado, IV Cong. Internacional de Tecnología del Hormigón y 18 Reunión Técnica de la AATH. Mar del Plata, (2010), 12 pp.
3. Herbst R. "Esquema estratigráfico de la provincia de Corrientes, República Argentina". Revista de la Asociación Geológica Argentina 24:2, (1971), 221-243.
4. Aceñolaza F. "Geología y recursos Geológicos de la Mesopotamia Argentina". Serie Correlación Geológica 22, Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), (2007).
5. IRAM 1674. "Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra del mortero", (1997), 15 pp.
6. IRAM 1650. "Reactividad alcalina potencial en agregados. Método de ensayo químico", (1968), 15pp.
7. IRAM 1700. "Agregados. Determinación del cambio de longitud debido a la reacción álcali-agregado, en prismas de hormigón", (1997), 17 pp.
8. Rocco C., Maiza P., Fava C., Marfil S., Tobes J. "Estudio de reactividad alcalina potencial de basaltos procedentes de yacimientos ubicados en la Mesopotamia Argentina". V Congreso Internacional de la AATH y 19º Reunión Técnica. Actas. Bahía Blanca, (2012), 159-166.
9. Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, (1997-2016).
10. Meijering, E., Jacob, M., Sarría, J.-C. F., Steiner, P., Hirling, H., Unser, M. "Design and Validation of a Tool for Neurite Tracing and Analysis in Fluorescence Microscopy Images". Cytometry Part A, Vol. 58, N° 2, (2004), 167-176.
11. IRAM 1531. "Agregado grueso para hormigón de cemento", 2012, 28 pp.