



Análisis comparativo de resultados de diferentes métodos de ensayo para evaluar la potencial reactividad de arenas del sur de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción álcali-sílice

Comparative analysis of different test methods to evaluate the potential reactivity of sands from the south of the province of Buenos Aires against the alkali-silica reaction

Juan José Berezosky¹ Darío Daniel Falcone² Francisco Locati³ Silvana Andrea Marfil^{4*}

*Contacto

Recibido: 22 de junio de 2023 ▪ Aceptado: 22 de noviembre de 2023 ▪ Publicado: 4 de diciembre de 2023

Resumen

Se estudiaron arenas procedentes de cinco canteras ubicadas en el sur de la provincia de Buenos Aires y una del norte de la provincia de Río Negro, calificadas como potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-sílice (RAS) en trabajos previos según el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674). Se realizó un estudio petrográfico de detalle (IRAM 1649) cuantificando los componentes potencialmente reactivos, así como ensayos físicos complementarios según el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700) convencional (a 38 °C) y acelerado (a 60 °C), y se compararon los resultados con los obtenidos previamente. Se concluyó que todas las arenas analizadas contienen vidrio volcánico, como trizas de vidrio fresco y en la mesostasis de algunas rocas volcánicas como especies deletéreas frente a la RAS, a pesar de tener diferentes proveniencias. Si bien todas las canteras analizadas fueron calificadas como potencialmente reactivas según el ensayo petrográfico y el ensayo acelerado de la barra de mortero, en el prisma de hormigón (tanto acelerado como convencional), presentaron un comportamiento variable. Solo la arena de la cantera 5 (de confirmada reactividad en estructuras en servicio) arrojó resultados por encima de los límites establecidos por todos los métodos de ensayos normalizados utilizados, por lo que se califica como potencialmente reactiva.

Palabras clave: agregados, reacción álcali-sílice, ensayos normalizados

Abstract

Sands from five quarries located in the south of the Buenos Aires province and one from the north of the province of Río Negro, qualified as potentially reactive against the alkali-silica reaction (ASR) in previous studies according to the accelerated mortar bar test (IRAM 1674), were studied. A detailed petrographic study was performed (IRAM 1649), quantifying the potentially reactive components, as well as

1 Dirección Nacional de Vialidad, Distrito 19, Bahía Blanca, Argentina.

2 Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica. Comité de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional de La Plata durabilidad@lemit.gov.ar

3 Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de Córdoba. flocati@unc.edu.ar

4 Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente. Comité de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires. smarfil@uns.edu.ar

complementary physical tests according to the conventional (at 38 °C) and accelerated (at 60 °C) concrete prism test, and the results were compared with those previously obtained. It was concluded that all sands contain volcanic glass, in the form of fresh volcanic shards and in the mesostasis of some volcanic rocks, as deleterious species against the ASR, despite they have different provenances. Although all analyzed quarries were qualified as potentially reactive, in the concrete prism (both accelerated and conventional), they have presented variable behavior. Only the sand from quarry 5 (of confirmed reactivity in structures in service) shows results above the limits established by all the standardized tests used to evaluate the potential reactivity against the ASR, therefore, it is qualified as potentially reactive.

Keywords: aggregates, alkali-silica reaction, standardized tests.

INTRODUCCIÓN

El deterioro prematuro de estructuras de hormigón debido al desarrollo de la reacción álcali-sílice (RAS) es un problema que tomó relevancia a nivel internacional a principio de 1940. Esta reacción se produce entre la solución de poro presente en el hormigón y las formas de sílice metaestable de ciertos agregados. Entre los principales componentes potencialmente reactivos se pueden mencionar las variedades de sílice criptocristalina (tridimita, cristobalita) y amorfa (ópalo), calcedonia y vidrio volcánico, considerados de reacción rápida, y cuarzo microcristalino, fuertemente tensionado y microfracturado, de reacción lenta. Los álcalis provienen principalmente del cemento, aunque también pueden ser aportados por los agregados y por fuentes externas. Para que la reacción se desarrolle es necesario un elevado contenido de álcalis, agregados potencialmente reactivos y una humedad relativa elevada (superior al 80 %) en forma simultánea. Esta reacción produce un gel que se expande por la absorción de agua y provoca fisuras en el hormigón (Sims y Poole, 2017).

En el sur de la provincia de Buenos Aires existen varios yacimientos sedimentarios (de origen eólico, fluvial y marino) que se utilizan como agregados finos para hormigón, algunos de ellos de conocida reactividad frente a la RAS. Los primeros trabajos en la zona vinculados con esta temática fueron realizados por Batic et al. (1974) utilizando el método convencional de la barra de mortero (IRAM 1637, 1966) (actualmente en desuso). Posteriormente, Maiza et al. (1988) y Marfil (1989) estudiaron varias canteras próximas a la ciudad de Bahía Blanca y calificaron a los materiales como potencialmente reactivos utilizando los métodos de ensayo químico (IRAM 1650, 1968), (actualmente en desuso), petrográfico (IRAM 1649, 2008) y el método convencional de la barra de mortero. Concluyeron que la reactividad se debía a la presencia de rocas volcánicas, tobas con pastas vítreas y trizas de vidrio volcánico en algunas de ellas. Éstas y otras canteras, provenientes de la zona costera (Claromecó) y Río Colorado, fueron estudiadas por Berezosky et al. (2016) utilizando el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997). Todas las muestras mostraron expansiones entre 0,155 % y 0,751 % a los 16 días (14 días en solución 1 N de NaOH), superiores al límite máximo (0,1 %) estipulado en la norma IRAM 1512 (2013), concluyendo, al igual que en los trabajos previos, que la expansión está en directa relación con el contenido de rocas volcánicas con pastas vítreas y trizas de vidrio volcánico en las arenas.

En resumen, se puede concluir que el material utilizado como agregado fino en la zona de Bahía Blanca está constituido por más del 40 % de rocas de origen volcánico, la mayoría con pastas vítreas (frescas y parcialmente alteradas a minerales arcillosos). El contenido de trizas de vidrio volcánico fresco oscila entre 3 % y 7 %. Sin embargo, las diferentes canteras del sur de la provincia poseen mezclas de éstos y otros materiales geológicos en proporciones muy variables, por lo que una cuidadosa caracterización petrográfica y la evaluación de su reactividad alcalina potencial a través de ensayos normalizados es determinante a la hora de optar por un proveedor de agregado fino para la ejecución de estructuras de hormigón o para definir medidas de prevención frente a la reacción (Berezosky et al., 2017).

Por otra parte, en la zona existen antecedentes de estructuras de hormigón afectadas por el desarrollo de la RAS debido al uso de estas arenas (Señas et al., 2010, Berezosky et al., 2015, 2018, entre otros).

Falcone (2013) realizó un exhaustivo trabajo de recopilación bibliográfica considerando la información disponible sobre los distintos métodos de ensayos para evaluar la reactividad potencial de los agregados frente a la RAS considerando las normativas, los antecedentes de estudios realizados en el laboratorio LEMIT desde 1965 y los resultados obtenidos en sus experiencias. La vinculación de los resultados de laboratorio con el comportamiento en obra comúnmente se desvirtúa en función del cambio en los mecanismos de la reacción debido al aumento del grado de agresividad comparado con la exposición de la estructura de hormigón. Las variables más usadas para acelerar los tiempos de ensayos son modificar la temperatura y/o el contenido de álcalis de las mezclas de mortero u hormigón. En este sentido se encuentran normalizados, el método acelerado de la barra de mortero y el método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013). Su empleo tampoco se puede generalizar para cualquier tipo de mineralogía. Cuando el agregado es de reacción rápida, la mayoría de los métodos de ensayo lo pondrá de manifiesto a corto plazo. El mayor inconveniente radica cuando se evalúan agregados de reacción lenta, que contienen cuarzo tensionado y/o microcristalino, para los cuales algunos métodos no permiten calificar a ciertos agregados como potencialmente reactivos debido a las condiciones del ensayo o a la edad en que se evalúa la expansión. En el ensayo del prisma de hormigón convencional el tiempo de ensayo es muy prolongado (un año), por lo tanto, es necesario prever los ensayos de agregados con anticipación a ser

usados en obra. Los resultados de este ensayo son confiables y determinantes frente a los otros métodos, además de tener buena reproducibilidad. El ensayo es muy versátil para estudiar soluciones preventivas prestacionales, como el tipo y proporción de adición mineral activa (AMA), o la incorporación de sales de litio.

Por lo expuesto y considerando que todas las arenas del sur de la provincia de Buenos Aires fueron calificadas como potencialmente reactivas según el ensayo acelerado de la barra de mortero, aunque son pocas las que han evidenciado RAS en estructuras en servicio, en el presente trabajo se analiza la reactividad de las arenas del sector a través de un estudio petrográfico de detalle cuantificando los componentes reactivos, y con el método del prisma de hormigón convencional (a 38 °C) y acelerado (a 60 °C), y se comparan los resultados con los obtenidos en trabajos previos utilizando el ensayo acelerado de la barra de mortero.

MATERIALES

Se seleccionaron cuatro canteras del sur de la provincia de Buenos Aires y una del norte de la provincia de Río Negro (Figura 1), calificadas como potencialmente reactivas en trabajos previos según el método acelerado de la barra de mortero. Para la realización del ensayo se confeccionaron barras de 25 mm x 25 mm x 300 mm, con una parte de cemento y 2,25 partes de agregado con una relación agua/cemento de 0,47. Se curaron a temperatura ambiente durante un día. Una vez que fraguaron se desmoldaron y se tomó una primera lectura de referencia. Luego, se sumergieron en agua a 80 °C ± 2 °C en un recipiente de almacenamiento durante 24 horas y se registró la lectura cero. Finalmente, se

sumergieron en una solución 1N de NaOH (Figura 2a) y se colocaron en una estufa a 80 °C ± 2 °C, tomando lecturas periódicas (Figura 2b) hasta 16 días (14 días en solución de NaOH). Según la norma IRAM 1512 (2013), el agregado se considera potencialmente reactivo si la expansión supera el límite de 0,1 % a los 16 días.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos donde se observa que todas superan el límite máximo de expansión (0,1 %) a los 16 días, aunque las muestras de las canteras 4 y 5 son las que presentan los mayores valores (Berezosky et al., 2016).

MÉTODOS

Se tomaron muestras representativas provenientes de los acopios de cada cantera y se tamizaron utilizando un juego de tamices normalizado de la serie ASTM N° 10, 18, 30, 60 y 100 de abertura cuadrada. Posteriormente se realizó el análisis petrográfico de cada muestra según lo establecido en la norma IRAM 1649 (2008), siguiendo los criterios de la norma IRAM 1512 (2013), mediante un estereomicroscopio

Tabla 1. Resultados del método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) (Berezosky et al., 2016).

CANTERA	EXPANSIÓN (%) A LA EDAD DE 16 DÍAS
1	0,271
2	0,290
3	0,168
4	0,382
5	0,677

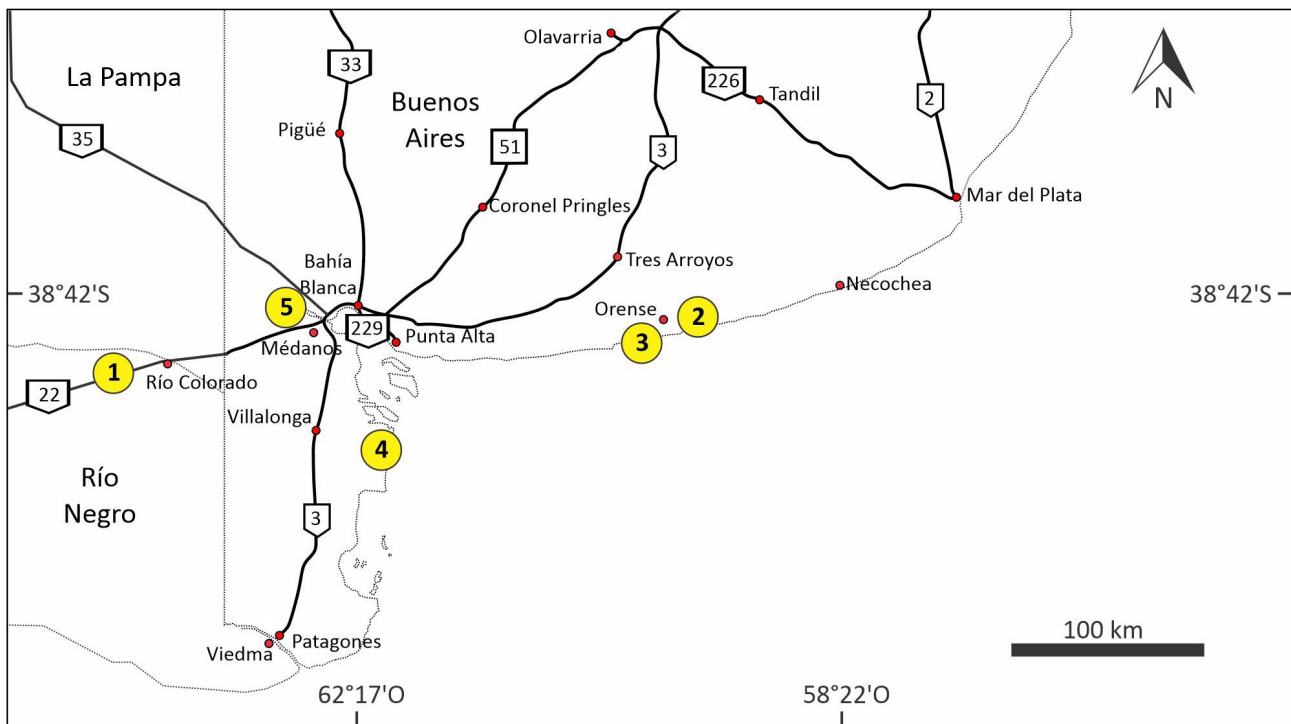


Figura 1. Ubicación de las canteras estudiadas (1 a 5). Modificado de Berezosky et al. (2016).



Figura 2. Preparación y medición de barras de mortero (a, b) y prismas de hormigón (c, d). a. Barras de mortero en solución 1N de NaOH. b. Medición de la expansión. c. Almacenamiento de prismas de hormigón en cámara húmeda a 38 °C. d. Medición de la expansión.

trinocular Leica S9i. El análisis petrográfico es el primer ensayo que se aplica para estudiar la potencial reactividad de un agregado para hormigón. Se realiza sobre el retenido en cada fracción, comenzando por las divisiones mayores y analizando 500 partículas en cada retenido. Finalmente se realizaron los cálculos correspondientes teniendo en cuenta los porcentajes retenidos en cada tamiz (cálculos ponderados) y se calculó la composición final de la muestra.

En la Tabla 2 se muestran los contenidos máximos de componentes considerados potencialmente reactivos frente a la RAS según la norma IRAM 1512 (2013). Esta norma también menciona que si la muestra de agregado en estudio contiene más de uno de esos componentes debe considerarse potencialmente reactiva independientemente del porcentaje en el que se presente.

Además, se realizó el ensayo del prisma de hormigón (convencional a 38 °C y acelerado a 60 °C) según lo establecido en la norma IRAM 1700 (2013) para comparar los resultados con los obtenidos en el ensayo acelerado de la barra de mortero. Se confeccionaron prismas de 75 mm x 75 mm x 275 mm con las arenas objeto de estudio. Como agregado grueso se utilizó un basalto (tamaño 6 mm - 20 mm) proveniente de la provincia de Córdoba de conocido comportamiento inocuo (Falcone, 2013), con una relación 40/60. Se utilizaron 420 kg/m³ de cemento portland con una relación agua/cemento entre 0,42 y 0,45 según los requisitos de trabajabilidad, y la alcalinidad se ajustó hasta 5,25 kg de Na₂O/m³ en el hormigón. El conjunto de prismas se colocó en recipientes de almacenamiento a 23 °C durante 24 horas. Cumplido el tiempo se desmoldaron y se tomó la primera lectura de referencia. Luego se envolvieron en una tela de algodón

Tabla 2. Minerales y rocas potencialmente reactivas (IRAM 1512, 2013).

Reacción álcali-sílice (RAS)	MINERALES / ROCAS	CONTENIDO MÁXIMO
		Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado
	Cuarzo microcristalino (< 62 µm)	5,0
	Ftanita, chert	
	Calcedonia	3,0
	Tridimita	
	Cristobalita	1,0
	Ópalo	0,5
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3,0

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. Posteriormente, se colocaron en cámara húmeda a $38 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 1 año (Figura 2c), tomando lecturas periódicas a 1, 2, 4, 8, 13, 18, 26, 39 y 52 semanas (Figura 2d). En cada medición, los contenedores se retiraron 24 horas antes para estabilizar la temperatura de lectura a $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. De acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 1531 (2016), si la expansión no supera el límite de 0,04 % al cabo de un año, los agregados son considerados no reactivos y pueden ser usados sin ninguna restricción, a menos que estructuras existentes muestren un comportamiento reactivo de estos agregados. Si presentan expansiones mayores a 0,04 %, será necesario adoptar medidas preventivas para evitar el desarrollo de la RAS.

El procedimiento establecido por la norma IRAM 1700 a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (2013) es similar al descripto para $38 \text{ }^\circ\text{C}$. Se diferencia en que se eleva la temperatura de $38 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y se toman lecturas periódicas a 5, 8, 10, 13, 15 y 20 semanas. Las probetas se mantuvieron por 24 horas a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y una humedad relativa mayor que 90 %. Luego se sumergieron en agua 30 minutos a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y se realizó una lectura inicial, posteriormente se colocaron en un contenedor con 35 mm de agua en el fondo, en una cámara a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ y 100 % de humedad relativa. Se realizaron lecturas periódicas de las longitudes de los prismas de hormigón, previamente enfriados a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y 100 % de humedad. Se utilizaron 420 kg/m^3 de cemento con un contenido total de álcalis de $5,25 \text{ kg/m}^3$ en el hormigón.

Luego de cumplido el tiempo de ensayo se realizaron cortes delgados de los prismas para su estudio con microscopio petrográfico a fin de observar la microestructura, desarrollo de microfisuras y productos de reacción. Para ello se utilizó un microscopio Leica DM750P.

RESULTADOS

Método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a $60 \text{ }^\circ\text{C}$

En la Tabla 3 se muestra la expansión (%) obtenida a

las diferentes edades de ensayo para cada una de las muestras analizadas. Se puede observar que solo las canteras 4 y 5 presentan valores superiores al máximo establecido en la norma IRAM 1700 (2013) (0,04 % a las 13 semanas). Las muestras de las tres canteras restantes presentan valores de expansión semejantes entre sí (0,03 %). En la Figura 3 se grafican los resultados y se comparan con el límite máximo establecido en la norma.

Método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a $38 \text{ }^\circ\text{C}$

En la Tabla 4 se muestra la expansión (%) obtenida a diferentes edades de ensayo para cada una de las muestras analizadas. Se observa que solo la cantera 5 presenta valores superiores al máximo establecido en la norma IRAM 1700 (2013) (0,04 % a las 52 semanas). Las muestras de las cuatro canteras restantes presentan valores de expansión entre 0,02 % y 0,03%. En la Figura 4 se grafican los resultados y se comparan con el límite máximo establecido en la norma.

Análisis petrográfico

En las Tablas 5-9 se muestra la composición de los agregados estudiados según los lineamientos de la norma IRAM 1649 (2008). La composición petrográfico-mineralógica varía de una cantera a otra, aunque en general presentan componentes similares en proporciones variables. La principal

Tabla 3. Resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

CANTERA	EXPANSIÓN (%) A LA EDAD DE (SEMANAS)					
	5	8	10	13	15	20
Cantera 1	0,025	0,031	0,030	0,030	0,031	0,032
Cantera 2	0,019	0,026	0,025	0,034	0,033	0,034
Cantera 3	0,026	0,030	0,029	0,034	0,034	0,033
Cantera 4	0,050	0,066	0,074	0,082	0,081	0,090
Cantera 5	0,322	0,352	0,359	0,391	0,395	0,395

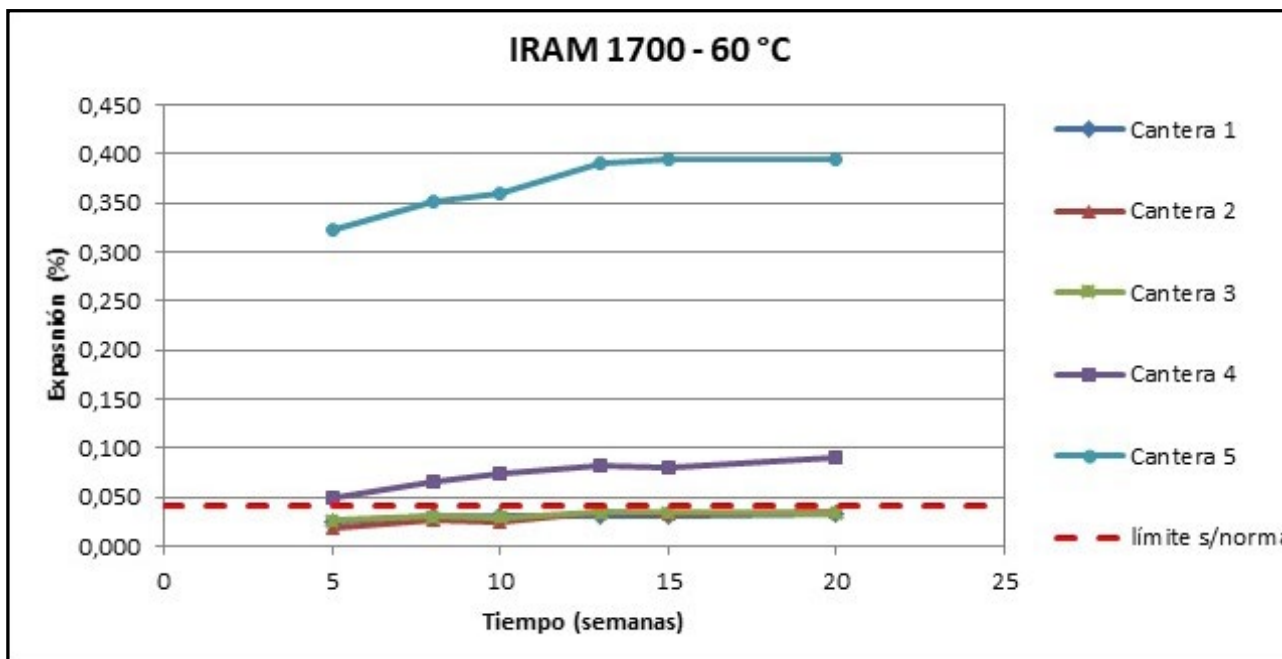


Figura 3. Curvas de expansión según los resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 60 °C.

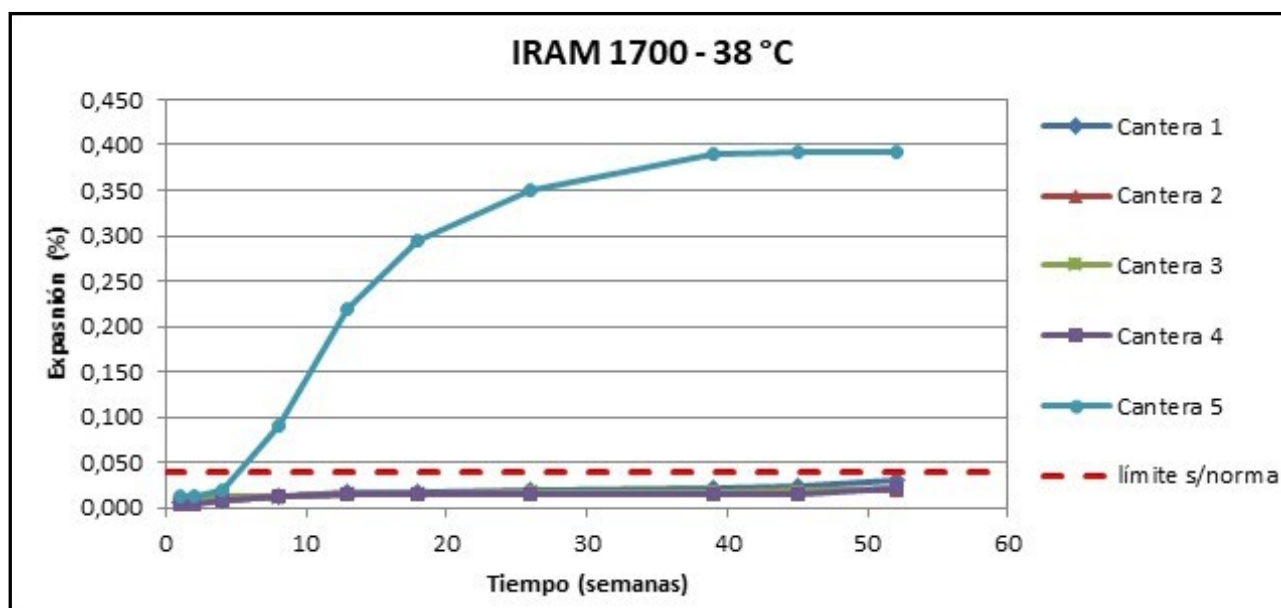


Figura 4. Curvas de expansión según los resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 38 °C.

Tabla 4. Resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 38 °C.

CANTERA	EXPANSIÓN (%) A LA EDAD DE (SEMANAS)									
	1	2	4	8	13	18	26	39	45	52
Cantera 1	0,005	0,011	0,008	0,012	0,017	0,017	0,020	0,022	0,024	0,030
Cantera 2	0,005	0,007	0,009	0,013	0,016	0,016	0,018	0,018	0,019	0,020
Cantera 3	0,006	0,009	0,013	0,012	0,015	0,016	0,018	0,018	0,019	0,022
Cantera 4	0,004	0,004	0,009	0,013	0,016	0,014	0,014	0,015	0,016	0,021
Cantera 5	0,012	0,012	0,020	0,091	0,220	0,295	0,351	0,389	0,392	0,392

diferencia es que las arenas de origen marino tienen valvas carbonáticas y mayor contenido de cuarzo, mientras que las restantes contienen mayor cantidad de rocas volcánicas (andesitas, riolitas y tobas). Subordinadamente se identificaron cuarcitas, areniscas y partículas monominerales de feldespatos, anfíboles y piroxenos.

Como componentes potencialmente reactivos se identificó vidrio volcánico fresco como partículas individuales (trizas), y parcialmente alterado en la mesostasis de algunas vulcanitas ácidas y tobas. Además, se identificó calcedonia en una de las canteras y ocasionalmente cuarzo microcristalino en fragmentos de cuarcitas.

PETROGRAFÍA DE LOS PRISMAS DE HORMIGÓN

Prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700, 2013) a 60 °C

Los prismas realizados con la arena de la cantera 1 muestran escasas evidencias de reacción. Se observaron muy pocas microfisuras en la pasta (de poca apertura y vacías), que en general no afectan los componentes de los agregados. Solo se observó una microfisura que afecta partículas de vulcanitas (Figura 5a). En la composición de la arena predomina cuarzo, areniscas, plagioclasas y piroxenos en forma subordinada. Son escasas las vulcanitas (en especial

Tabla 5. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 1 (IRAM 1649, 2008).

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Rocas volcánicas ácidas	0,07	0,26	1,79	3,67	2,87	1,20	9,86
Rocas volcánicas básicas	0,12	0,24	1,79	9,90	6,38	2,63	21,07
Rocas graníticas	0,19	0,21	0,49	6,05	3,59	1,40	11,93
Cuarzo	0,00	0,16	3,09	29,35	8,38	4,34	45,31
Feldespatos	0,02	0,01	0,12	0,00	0,00	0,00	0,15
Cuarcitas	0,05	0,10	0,87	2,20	1,76	0,27	5,24
Areniscas	0,02	0,06	0,29	2,93	0,64	0,10	4,05
Tosca	0,05	0,04	0,17	0,00	0,00	0,00	0,26
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,01	0,14	1,10	0,72	0,17	2,14
TOTAL	0,52	1,09	8,75	55,20	24,34	10,11	100,00

Tabla 6. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 2 (IRAM 1649, 2008).

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	0,02	1,90	4,88	3,19	0,09	0,06	10,14
Cuarzo	0,00	0,25	3,31	34,03	27,04	3,70	68,33
Rocas volcánicas básicas	0,00	0,30	0,59	2,90	1,94	0,41	6,13
Rocas volcánicas ácidas	0,00	0,19	0,25	0,43	0,00	0,00	0,87
Areniscas	0,00	0,04	0,08	1,45	3,23	0,26	5,06
Cuarcitas	0,00	0,00	0,45	2,90	2,12	0,00	5,47
Piroxenos y anfíboles	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	1,25	2,18
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,04	0,00	0,43	0,92	0,06	1,45
Rocas graníticas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,37
TOTAL	0,02	2,71	9,56	45,32	36,64	5,74	100,00

Tabla 7. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 3 (IRAM 1649, 2008).

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	0,05	1,64	3,59	2,12	0,59	0,00	7,99
Cuarzo	0,00	0,31	2,13	39,55	20,79	2,46	65,24
Rocas volcánicas básicas	0,00	0,22	0,66	6,21	4,28	0,59	11,96
Rocas volcánicas ácidas	0,00	0,13	0,35	2,12	1,07	0,08	3,76
Areniscas	0,00	0,02	0,08	1,80	2,14	0,00	4,04
Cuarcitas	0,00	0,02	0,12	0,98	0,24	0,00	1,36
Piroxenos y anfíboles	0,00	0,00	0,00	0,49	1,43	1,37	3,29
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,01	0,06	0,65	0,83	0,06	1,61
Feldespatos	0,00	0,04	0,02	0,33	0,36	0,00	0,75
TOTAL	0,05	2,39	7,01	54,26	31,72	4,57	100,00

Tabla 8. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 4 (IRAM 1649, 2008).

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	1,06	0,83	0,83	0,00	0,00	0,00	2,71
Cuarzo	0,00	0,10	0,58	18,27	6,75	9,89	35,58
Rocas volcánicas básicas	2,67	0,47	0,19	4,26	1,53	0,44	9,55
Rocas volcánicas ácidas	4,83	0,36	0,17	1,37	0,51	0,11	7,34
Areniscas	3,22	1,24	0,99	7,46	5,09	0,00	18,00
Cuarcitas	1,06	0,20	0,15	2,74	0,76	0,00	4,91
Feldespatos	0,10	0,01	0,00	3,04	1,27	0,11	4,54
Rocas graníticas	2,67	0,17	0,34	4,11	2,16	0,22	9,67
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,01	0,07	1,52	1,02	0,11	2,73
Minerales opacos	0,00	0,00	0,00	0,91	0,38	0,66	1,95
Tosca	0,15	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28
Piroxenos y anfíboles	0,00	0,00	0,00	1,37	1,15	0,22	2,74
TOTAL	15,74	3,51	3,32	45,05	20,62	11,75	100,00

Tabla 9. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 5 (IRAM 1649, 2008).

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Rocas volcánicas ácidas	2,90	3,59	3,68	12,83	4,19	1,32	28,50
Rocas volcánicas básicas	0,49	1,21	0,84	4,02	1,12	0,64	8,32
Rocas graníticas	1,80	1,36	0,93	1,78	0,48	0,07	6,43
Cuarzo	0,86	3,18	3,61	12,07	7,05	3,64	30,40
Feldespatos	0,28	0,17	0,33	2,58	0,36	0,42	4,13
Areniscas	2,57	1,53	0,64	1,10	0,45	0,37	6,66
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,20	0,44	3,05	1,15	0,34	5,19
Tosca	0,36	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44
Terrones blandos	0,32	0,13	0,03	0,00	0,00	0,00	0,48
Anfíboles y piroxenos	0,00	0,50	0,47	3,73	1,21	0,61	6,52
Minerales opacos	0,45	0,38	0,30	0,30	0,00	0,00	1,43
Areniscas calcáreas	0,48	0,24	0,14	0,00	0,00	0,00	0,86
Calcedonia	0,19	0,18	0,23	0,04	0,00	0,00	0,65
TOTAL	10,70	12,75	11,64	41,51	16,00	7,42	100,00

andesitas y basaltos), y en general presentan pastas vítreas. Además, se observaron escasas trizas de vidrio volcánico y una partícula de calcedonia. Algunas areniscas tienen cuarzo microcristalino.

En el prisma confeccionado con la arena de la cantera 2 se observó abundante cantidad de valvas carbonáticas (Figura 5b), cuarzo, feldespatos, escasos minerales opacos, areniscas (la mayoría con cuarzo microcristalino) y vulcanitas (algunas con vidrio volcánico). No hay evidencias del desarrollo de la RAS. Se observan escasas microfisuras de poca apertura en la pasta que no afectan las partículas del agregado.

En el prisma confeccionado con la arena de la cantera 3, se observó abundante cantidad de cuarzo y feldespatos. Además, se identificaron valvas carbonáticas (algunas de gran tamaño), escasos minerales opacos, areniscas y vulcanitas (algunas con vidrio volcánico). No hay evidencias de desarrollo de la RAS. Se observan escasas microfisuras de poca apertura localizadas en la pasta, aunque no afectan las partículas del agregado fino.

La Figura 5c corresponde al prisma realizado con la arena de la cantera 4. Se observaron varias microfisuras en la pasta que ocasionalmente se continúan en las partículas del agregado. En algunos sectores se bifurcan logrando una configuración que se puede asemejar al desarrollo tipo “mapa” (característico de la RAS). La arena tiene mayor contenido de vulcanitas vítreas que las descritas anteriormente, areniscas (algunas con cuarzo microcristalino), calcedonia, y trizas de vidrio fresco y parcialmente alterado. Además, posee cuarzo, feldespatos, rocas graníticas y escasas valvas carbonáticas.

En la Figura 5d se muestra un sector del prisma confeccionado con la arena de la cantera 5. Tiene abundante microfisuramiento que afecta tanto a la pasta como a las partículas del agregado. Puede observarse, que las microfisuras parten de los agregados y se propagan hacia la pasta y en muchos sectores, puede observarse un material birrefringente relleno dichas microfisuras. En su composición predominan las vulcanitas con pastas vítreas, aunque también se identificó vidrio volcánico fresco como partículas individuales (trizas).

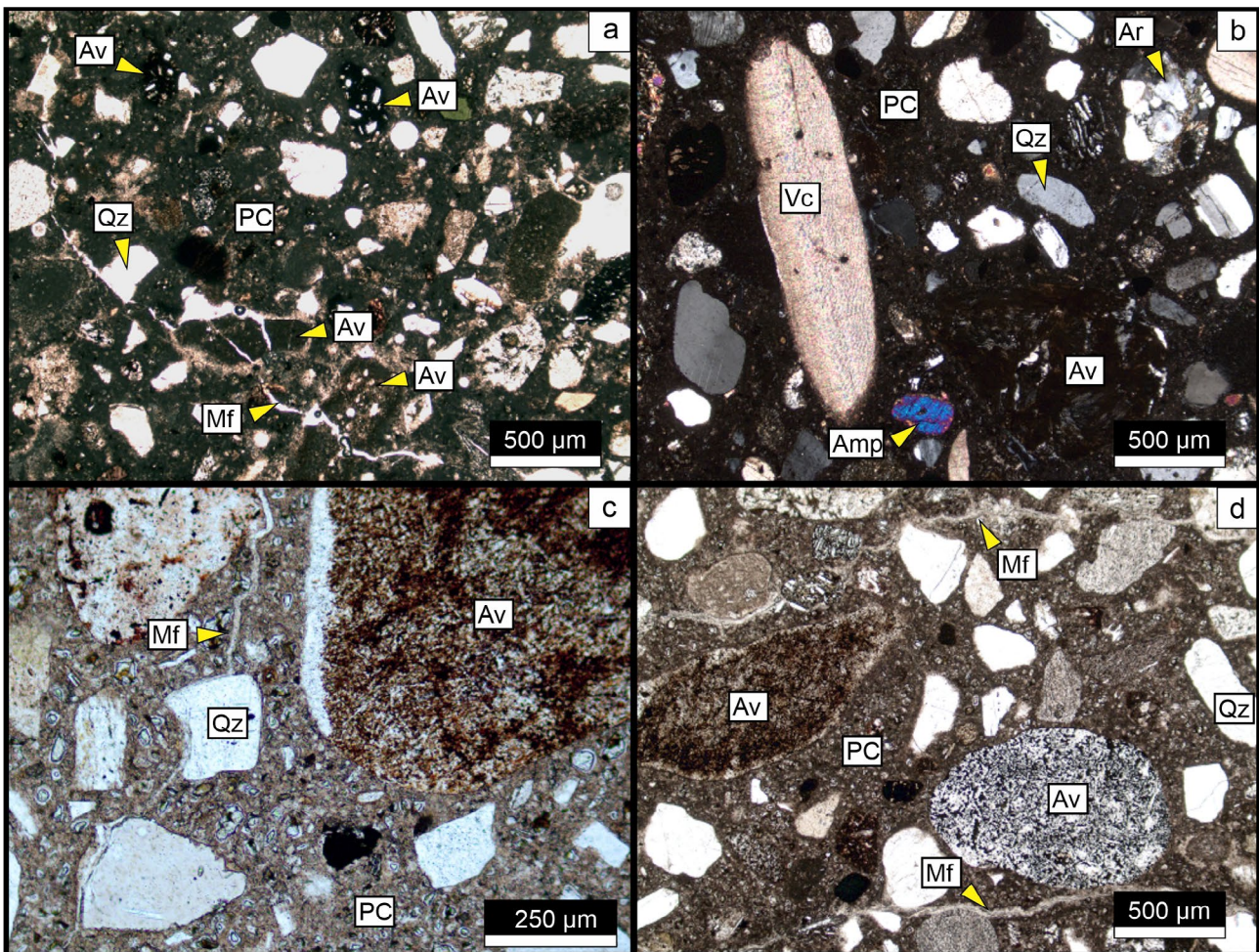


Figura 5. Fotomicrografías obtenidas durante el estudio petrográfico del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 60 °C. a. Cantera 1. b. Cantera 2. c. Cantera 4. d. Cantera 5. Av: agregado volcánico, Mf: microfisura, Qz: cuarzo, PC: pasta de cemento, Vc: valva carbonática, Amp: anfíbol, Ar: arenisca.

Prisma de hormigón convencional (IRAM 1700, 2013) a 38 °C.

Los resultados obtenidos en los prismas de hormigón (método convencional) para las muestras de las canteras 1, 2 y 3 son similares a los observados en el ensayo acelerado. No hay evidencias de reacción. En la Figura 6a, se observa el hormigón de la cantera 1. Son abundantes las trizas de vidrio y vulcanitas vítreas como componentes potencialmente reactivos, aunque no hay microfisuramiento ni evidencias de reacción. El mortero está sano. En la Figura 6b se muestra las características del prisma realizado con la arena de la cantera 2. Se observan microfisuras de poco espesor en la pasta asociadas en general a las vulcanitas sin continuidad en los agregados. La Figura 6c corresponde al prisma confeccionado con el agregado de la cantera 4. Es abundante el contenido de vulcanitas y de vidrio volcánico fresco, aunque no hay evidencias de reacción. En la Figura 6d se muestra las características del prisma realizado con la arena de la cantera 5. El microfisuramiento es muy marcado, afecta a la pasta y a las partículas del agregado fino, en especial a las vulcanitas.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los agregados finos de las canteras estudiadas fueron calificados en estudios previos (Berezosky et al., 2016) como potencialmente reactivos según el método acelerado de la barra de mortero. Además, al identificarse más de un componente potencialmente reactivo en todas las muestras mediante el examen petrográfico, corresponde calificarlas como potencialmente reactivas en función de los criterios de la norma (IRAM 1700, 2013). Sin embargo, el método del prisma de hormigón es el ensayo más confiable para determinar la potencial reactividad de un agregado frente a la RAS, por lo tanto, tiene prelación sobre el resto de los ensayos. De los estudios realizados, se puede concluir que solo las arenas de la cantera 5 superaron ampliamente (0,392 %) el límite máximo de expansión al año en el prisma convencional, mientras que en el prisma acelerado lo hicieron los agregados de la cantera 4 y cantera 5 (0,082 % y 0,391 % respectivamente a las 13 semanas).

Si se analizan los componentes potencialmente reactivos de las arenas estudiadas (Figura 7), se puede observar que el contenido de rocas volcánicas ácidas es mucho más

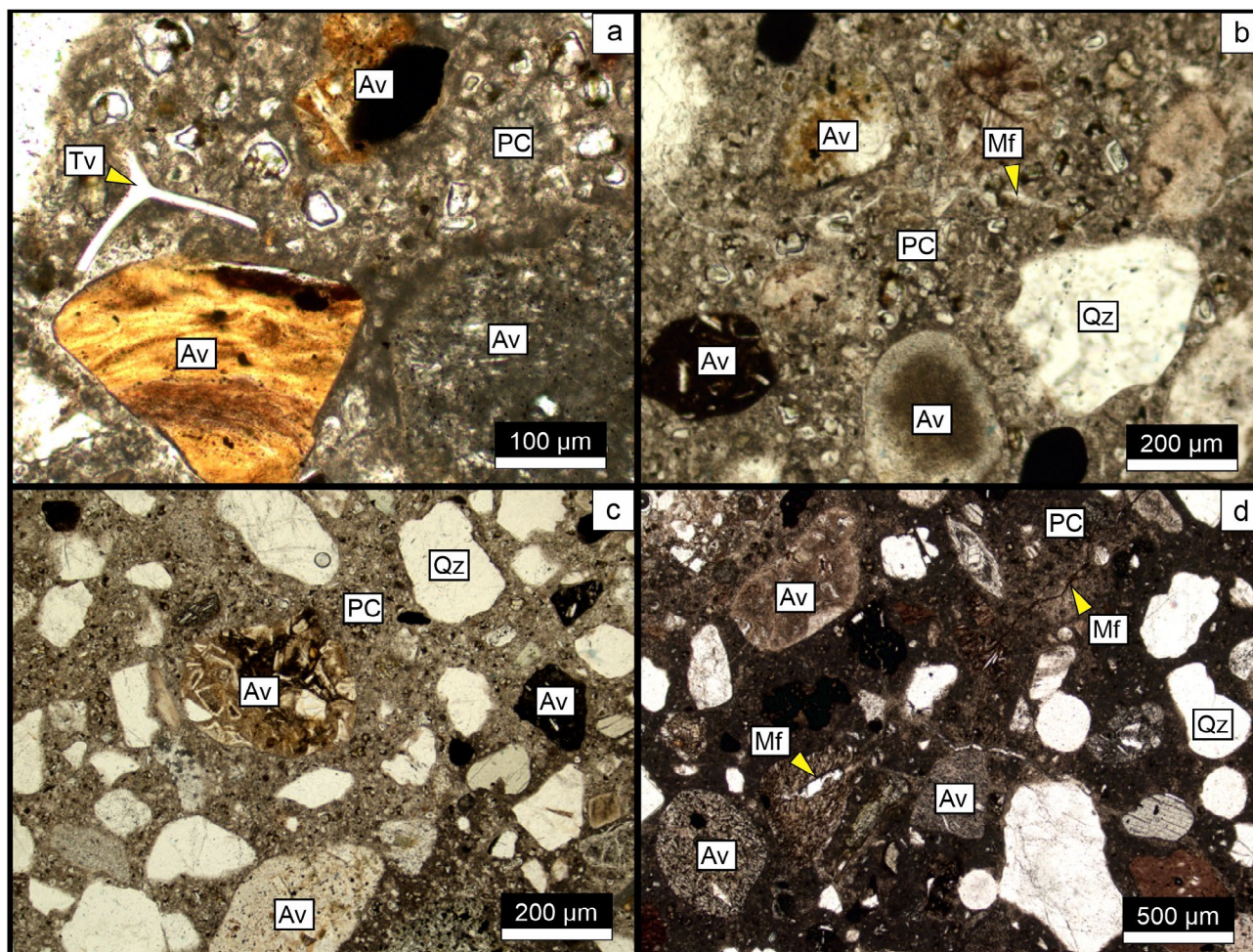


Figura 6. Fotomicrografías obtenidas durante el estudio petrográfico del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 38 °C. a. Cantera 1. b. Cantera 2. c. Cantera 4. d. Cantera 5. Tv: triza de vidrio volcánico, Av: agregado volcánico, Mf: microfisura, Qz: cuarzo, PC: pasta de cemento.

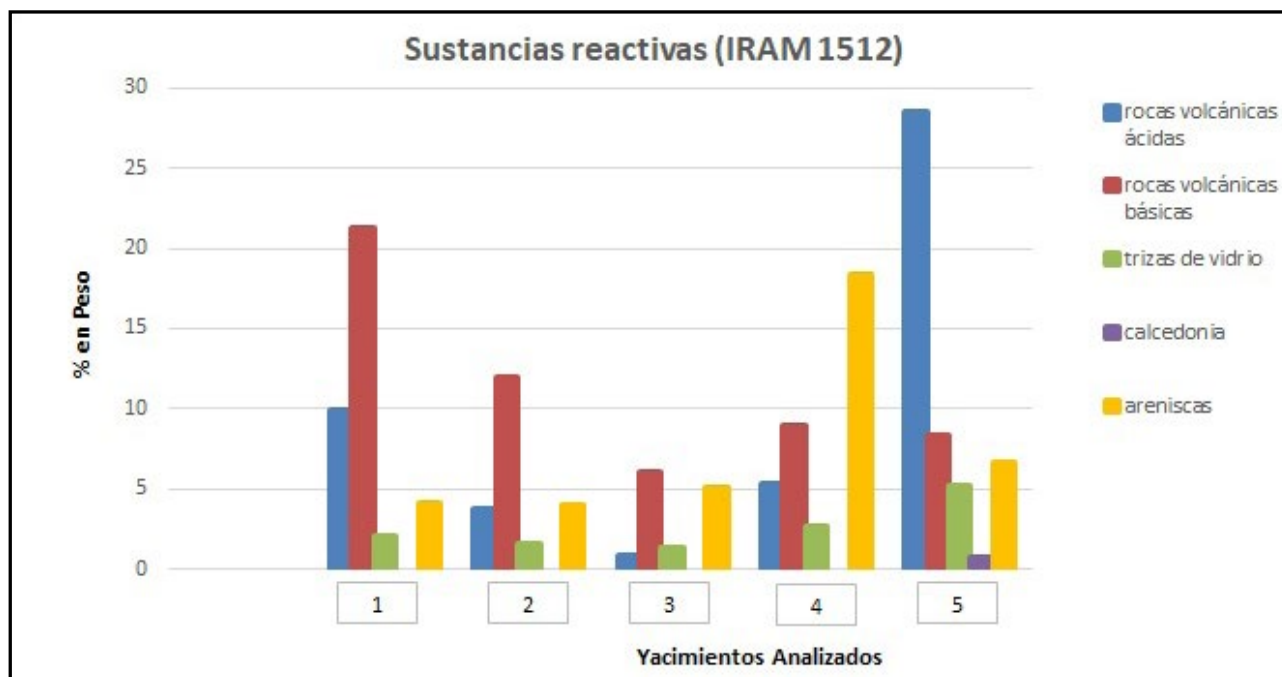


Figura 7. Porcentaje en peso de los componentes potencialmente reactivos determinados en las canteras estudiadas.

elevado en la cantera 5, con respecto al resto. Si además se considera el porcentaje de trizas de vidrio (mayor al 5 %) y calcedonia, se puede concluir que 1/3 de los componentes de esta arena son calificados como potencialmente reactivos. Esto se vio reflejado en la expansión registrada en los ensayos físicos antes descriptos. Si bien la expansión medida con el método acelerado de la barra de mortero (Berezosky et al., 2016) superó el límite máximo establecido en la norma IRAM 1674 (1997), en todas las canteras, los agregados de la cantera 5 evidenciaron el valor más elevado (0,677 %).

De las canteras restantes, la 4 es la que presenta mayor contenido de vidrio, y mostró una expansión superior al límite máximo en el ensayo del prisma acelerado. El contenido de componentes reactivos en el resto de las rocas es variable ya que depende del porcentaje de vidrio en las vulcanitas y del cemento con sílice criptocristalina en las areniscas.

Los resultados de los ensayos ponen en relevancia la importancia de realizar estudios complementarios e interdisciplinarios a la hora de calificar la reactividad de los agregados pétreos, a la vez de identificar las causas de los comportamientos observados. Esto resulta fundamental para definir medidas que permitan la utilización de este tipo de materiales. Como ejemplo, se puede mencionar la utilización de puzolanas naturales procedentes de la provincia de Mendoza en reemplazo parcial del cemento (30 %), mostrando ser efectiva para inhibir la reacción de los agregados de la cantera 5 (Berezosky et al., 2022). Sin embargo, es importante continuar los estudios en búsqueda de nuevas estrategias de mitigación que posibiliten la utilización de las arenas del sector, a la vez de ser estrategias económicamente viables.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista petrográfico las arenas de las cinco canteras analizadas, a pesar de tener diferentes orígenes, tienen en común las mismas especies deletéreas frente a la RAS: vidrio volcánico, como trizas de vidrio fresco y en la mesostasis de algunas rocas volcánicas. A partir de ello, se puede concluir:

- Si bien las arenas de todas las canteras analizadas se califican como potencialmente reactivas según el ensayo petrográfico y en el método acelerado de la barra de mortero, en el prisma de hormigón (convencional), las arenas de las canteras 1, 2, 3 y 4 presentaron expansiones inferiores a los límites establecidos en la norma IRAM 1512 (2013), por lo que se califican como no reactivas.
- La arena de la cantera 5 arrojó resultados por encima de los límites establecidos por todos los métodos de ensayos normalizados para evaluar la potencial reactividad frente a la RAS por lo que se califica como potencialmente reactiva.
- Las arenas de la cantera 4 se calificaron como potencialmente reactivas según el ensayo del prisma de hormigón acelerado, aunque en el prisma convencional la expansión al año no superó el límite máximo. Esta diferencia en la calificación de la arena con el método del prisma de hormigón, curado acelerado o convencional, puede estar atribuida al porcentaje de no coincidencia entre ambos curados. En estas situaciones, tiene prelación el curado tradicional, por lo tanto se considera a este agregado como no reactivo.
- Es importante remarcar que para el caso de agregados finos de reacción rápida como los estudiados en este trabajo (arenas con elevado contenido de vidrio volcánico), el método acelerado de la barra de mortero puede arrojar

resultados falsos positivos, por lo que es importante realizar ensayos complementarios que permitan verificar este comportamiento. En este sentido, el método del prisma de hormigón convencional tiene mejor desempeño por las condiciones de curado utilizadas, aunque los resultados se obtienen a un año de ensayo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Vialidad, Distrito 19, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, al Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas-Universidad Nacional de Córdoba), a la Universidad Nacional del Sur, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires y al LEMIT por el apoyo

brindado. Además, los autores agradecen a los revisores del trabajo por sus comentarios, los cuales mejoraron el manuscrito.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización - Análisis de datos: Berezosky, Marfil, Locati y Falcone; Metodología: Berezosky y Falcone; Redacción - preparación del borrador original: Berezosky y Marfil; Redacción - revisión y edición: Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Batic, O.R., Wainsztein, M. y Iñiguez, A. (1974). Estudios y experiencias sobre agregados para hormigones empleados en la zona de Bahía Blanca en relación a la reactividad alcalina potencial. *Anales LEMIT, Vol. 1, 1-10*.
- Berezosky, J., Falcone, D., Locati, F., Madsen, L. y Marfil, S. (2016). Evaluación de la potencial reactividad de arenas utilizadas como agregado fino en la zona de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. *21° Reunión Técnica y VII Congreso Internacional de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*, (pp. 357-364).
- Berezosky, J., Lescano, L., Locati, F., Maiza, P. y Marfil, S. (2015). Behaviour of reactive sands in concrete. A case study. *International Conference on Sustainable Structural Concrete*, (pp. 349-358).
- Berezosky, J., Locati, F., Falcone, D., Marfil, S. y Coelho dos Santos, G. (2022). Use of zeolite-bearing pozzolan to inhibit the reactivity of a sand from Argentina. *16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 2nd Ed.*, (pp. 227-234).
- Berezosky, J., Marfil, S. y Lescano, L. (2017). Análisis petrográfico de las arenas del sur de la provincia de Buenos Aires. Factibilidad de uso como agregado en hormigón. *3er Congreso Argentino de Áridos*, (pp. 75-79).
- Berezosky, J., Marfil, S. y Di Sciuillo, N. (2018). Evaluación del deterioro de pavimentos de hormigón de rutas interurbanas de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires). *VIII Congreso Internacional, 22ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*, (pp. 449-456).
- Falcone, D. (2013). *Antecedentes y metodología de ensayo para evaluar la reacción álcali-sílice*. Tesis de Magister inédita. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- IRAM, 1512 (2013) *Agregado fino para hormigón de cemento*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1637 (1966). *Reacción álcali-agregado. Método de la barra de mortero para la determinación de la reactividad alcalina potencial*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1649 (2008). *Examen petrográfico de agregados para hormigón*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1650 (1968). *Agregados. Reactividad alcalina en áridos. Método de ensayo químico*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1674 (1997) *Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).

- IRAM, 1700 (2013) *Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- Maiza, P., Marfil, S., Sota, J. y Batic, O. (1988). Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de reactividad potencial alcalina en áridos finos utilizados en Bahía Blanca y Punta Alta, Prov. de Buenos Aires. *II Jornadas Geológicas Bonaerenses*, (pp. 697-709).
- Marfil, S. 1989. *La reacción álcali agregado. Investigación de la reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento, utilizados en Bahía Blanca y su zona de influencia*. Tesis Doctoral inédita. Universidad Nacional del Sur.
- Señas, L., Maiza, P., Priano, C. y Marfil, S. (2010). Patologías desarrolladas en una estructura de hormigón en zona marítima. *VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras (CINPAR)*, (pp. 1-14).
- Sims, I. y Poole, A.B. (2017). *Alkali-aggregate reaction in concrete: A World Review*. CRC Press. Taylor & Francis Group.