

## REACTIVIDAD POTENCIAL ÁLCALI-SÍLICE DE AGREGADOS UTILIZADOS PARA HORMIGÓN EN URUGUAY

Hugo Bonjour<sup>1</sup>, Patricia Vila<sup>2</sup>, María Noel Pereyra<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, hbonjour@fing.edu.uy

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, pvila@fing.edu.uy

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, mpereyra@fing.edu.uy

### RESUMEN

La reacción álcali - sílice se produce a partir de la reacción entre la sílice reactiva presente en algunos agregados y los álcalis en el hormigón. Diferentes niveles de daño se dan en las estructuras dependiendo de la cinética de la reacción, siendo la mineralogía del agregado uno de los principales factores. En Uruguay son utilizados agregados de distinto origen geológico y fue de interés evaluar su potencialidad reactiva. Fueron escogidas 6 canteras de explotación de agregado grueso para hormigón, a los que se les realizó la descripción petrográfica (IRAM 1649) y ensayos de expansión álcali-sílice en barra de mortero (IRAM 1674) y en hormigón (IRAM 1700). Como componentes considerados reactivos fueron detectados calcedonia, cuarzo microcristalino y tensionado, vidrio volcánico y/o componentes de baja cristalinidad. En los ensayos de expansión se obtuvieron distintos niveles de reactividad (desde no reactivos hasta altamente reactivos). En esta instancia se presentaron los resultados de muestras de agregado pertenecientes a diferentes fuentes de explotación nacional incluidas en el proyecto de investigación RAS-CSIC.

**Palabras claves:** agregados, reacción álcali-sílice, petrografía, patologías en hormigón.

### INTRODUCCIÓN

Uruguay cuenta con una gran variedad litológica, representada por rocas de diferente naturaleza, edad e historia geológica. Estas rocas han sido ampliamente utilizadas como agregados en la industria de la construcción. Se destacan por su utilización rocas graníticas, basálticas, así como arena, grava y canto rodado.

Teniendo en cuenta los agregados que se utilizan específicamente para la elaboración de hormigón, al estar sometidos a un medio de elevada alcalinidad reaccionan con los álcalis disponibles en la solución ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) para formar silicatos alcalinos hidratados. Estos últimos, al estar en contacto con agua aumentan su volumen, generando presiones internas en el hormigón que provocan su expansión y/o rotura. Este fenómeno, conocido como reacción álcali-sílice (RAS) es una de las patologías en el hormigón [1].

La RAS ocurre particularmente en los agregados que contienen constituyentes reactivos del grupo de la sílice como ópalo, calcedonia, tridimita, cristobalita o vidrio volcánico, así como en cuarzo tensionado y recristalizado y/o microfracturado. En estos últimos la reacción se da en forma lenta a diferencia de los primeros que ocurre en forma rápida [2].

La norma IRAM 1531 [3] establece un límite máximo de 0,5 % para contenidos de ópalo, 3 % calcedonia, 1 % tridimita, 1 % cristobalita o 3 % vidrio volcánico y un 5 % para cuarzo tensionado y microcristalino (tamaño de cristal menor a 0,062 mm) y/o microfracturados. La norma brasilera ABNT NBR15577-3 [4] establece condiciones similares a excepción del cuarzo microcristalino que toma como límite para el tamaño de cristal menor a 0,15 mm.

Con el fin de evaluar la reactividad potencial frente a la RAS de diferentes agregados se trabajó en una primera etapa realizando sus respectivos análisis petrográficos de acuerdo con la norma IRAM 1649 [5]. En una segunda etapa se evaluó la potencialidad reactiva de los agregados mediante el ensayo de expansión acelerado de la barra de mortero según IRAM 1674 [6] y los ensayos de expansión en prisma de hormigón acelerado y tradicional según IRAM 1700 [7].

## **OBJETIVO**

Evaluar el comportamiento reactivo frente a la reacción álcali-sílice (RAS) de muestras de agregado grueso provenientes de diferentes fuentes de explotación utilizados en la industria de la construcción en Uruguay para la producción de hormigón.

## **METODOLOGÍA**

Se recolectaron muestras representativas de 6 canteras de explotación de agregado grueso para hormigón y fueron confeccionadas secciones delgadas de 30  $\mu\text{m}$  de espesor para el análisis petrográfico y detección de materiales reactivos según la Norma IRAM 1531 [3] e IRAM 1649 [5], empleando un microscopio petrográfico. De muestras de aproximadamente 300 kg de agregados de acopios comerciales de tamaño 5-20 mm, se realizó una caracterización básica del material (según lo indica UNIT 1050 [8]), el ensayo de expansión acelerado de la barra de mortero según IRAM 1674 [6] y los ensayos de expansión por álcali-sílice en hormigón, acelerado a 60 °C y tradicional a 38 °C, ambos según IRAM 1700 [7].

El cemento utilizado para la fabricación de los morteros y el hormigón es un cemento pórtland normal identificado como CPN 40 por la Norma UNIT 20 [9] (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  $\text{m}^2/\text{kg}$ . No fue posible usar un cemento CPN con un contenido de álcalis según lo indican las normas del ensayo de 0,9 $\pm$ 0,1 % ya que en Uruguay no existe un CPN con esas características.

Para las lecturas de expansión se utilizó un comparador vertical de recorrido máximo 15 $\pm$ 0,001 mm y una barra de referencia de 300 mm. Las barras de mortero fueron fabricadas de 25x25x285 mm, con una longitud nominal libre entre pernos de medición de 250 $\pm$ 2 mm y los prismas de hormigón fueron fabricados de 75x75x285 mm (con una longitud libre entre pernos de 255 $\pm$ 2 mm. Ambos tipos de barras fueron preparadas y mantenidas durante el transcurso del ensayo según lo indican las respectivas normas (IRAM 1674 [6] e IRAM 1700 [7]).

El agregado fino para producir hormigón fue una mezcla de un agregado grueso triturado y una arena fina. Esta mezcla se armó en tales proporciones que permitió obtener un Módulo de Finura de 2,7 $\pm$ 0,2 según lo indica la norma del ensayo (IRAM 1700 [7]). Ambos materiales presentaron una expansión en barra de mortero (IRAM 1674 [6]) menor a 0,08 % a los 14 días de inmersión en NaOH, y en hormigón tradicional a las 52 semanas presentaron una expansión de 0,04 % (el agregado grueso empleado para esta determinación fue del mismo origen que la arena triturada).

## RESULTADOS

### Descripción petrográfica y presencia de minerales reactivos

A continuación, se indica la descripción petrográfica y determinación de componentes reactivos de acuerdo con la norma IRAM 1531 [3] y fotomicrografías de los diferentes agregados (Figura 1). En la Tabla 1 se presenta el resumen para las diferentes muestras.

**1. Granito de Aiguá (San Carlos):** Granito equigranular de grano grueso conformado por 40 % de cuarzo, con tamaños de cristales que van desde los 0,04 a 5 mm. En estos cristales se observa extinción ondulante, bordes corroídos, recristalización y en algunos cristales microfrazas. Los cristales de cuarzo microcristalino (menores a 0,062 mm) superan el 5 % determinado por la norma, además los ángulos de extinción ondulante (AEO) en este mineral son de 21° en promedio. Además, presenta un 30 % de feldespatos alcalinos representados por microclina y ortosa, con importantes alteraciones a sericita. Las plagioclasas conforman un 25 % de la roca y se encuentran alteradas a sericita. El restante 5 % lo conforman biotitas. Como mineral accesorio se identificó esfeno (Figura 1A).

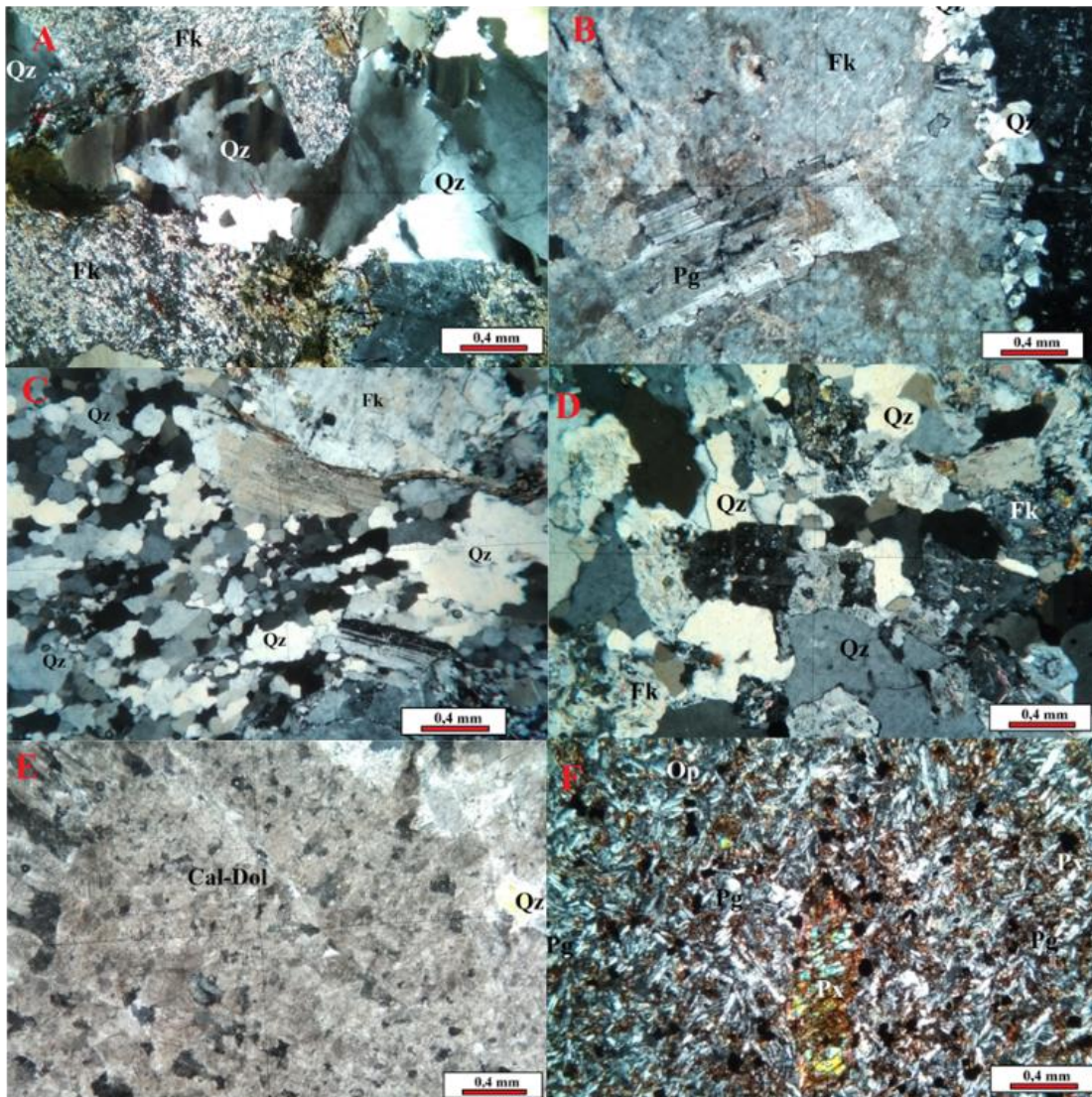
**2. Granito La Paz (La Paz):** Granito de textura porfírica, conformado por 65 % de fenocristales de feldespato potásico representados por ortosa y en menor medida microclina. Los cristales son automórficos a subautomórficos con perfitas y alteraciones a sericita. Sus tamaños van desde 1 a 7 cm. Presenta un 25 % de cuarzo xenomórfico con AEO bajo (9° en promedio) y los tamaños de cristales van desde los 0,05 mm a 1 cm. Los cristales de cuarzo microcristalino no superan el 5 % determinado por la norma para considerar a la muestra potencialmente reactiva. Además, presenta un 5 % de plagioclasas subautomórficas y un 5 % de biotita y muscovita subhedral a anhedral, no hay orientación preferencial de filosilicatos. Los minerales accesorios presentes en las muestras son anfíbol, circón, apatito y minerales opacos (Figura 1B).

**3. Granito de Mal Abrigo (Mal Abrigo):** Granito equigranular conformado por 50 % de cuarzo xenomórfico, de tamaño de cristales que van desde los 0,5 a los 5 mm. En sectores se observa recristalización y textura poligonal, así como un 20 % de cuarzo microcristalino superando el 5 % determinado por la norma. Presenta un 20 % de feldespatos alcalinos subautomórficos representados por microclina y ortosa con alteraciones a sericita, además se observan perfitas. Además, un 20 % de plagioclasas subautomórficas con alteraciones a sericita. El restante 5 % lo conforman biotitas y muscovitas, que ocasionalmente se observa en racimos y se localizan dispersos en la roca en algunos casos con orientación preferencial. Como minerales accesorios se reconocieron epidoto y apatito (Figura 1C).

**4. Granodiorita Cañada de las Canteras (La Cruz de Carrasco, Montevideo):** Granodiorita de grano medio, equigranular, conformada por un 55 % de cuarzo xenomórfico con leve extinción ondulante, de tamaño de cristales entre 0,05 a 2 mm. En algunos sectores se observa recristalización en los cristales de cuarzo, no superando el 5 %. Además, presenta un 40 % de plagioclasas y feldespatos alcalinos representados por microclina y algo de ortosa en bajo porcentaje en relación con las plagioclasas. Estos cristales son sub-automórficos a automórficos con alteraciones a sericita, además se observan inclusiones de cuarzo y perfitas. El restante 5 % lo conforman biotitas subhedral y se localizan dispersas en la roca sin orientación preferencial. Como minerales accesorios presenta: epidoto (principalmente producto de alteración de plagioclasas), esfeno, circón y apatito (Figura 1D).

**5. Complejo Zanja del Tigre (Nueva Carrara):** Mármol dolomítico de textura granoblástica conformado por 96 % de dolomita-calcita con tamaños de cristales que van desde los 0,1 mm a los 0,5 mm. El restante 4 % está conformado por cuarzo que presenta tamaños que van desde los 0,1 a 0,8 mm (Figura 1E).

**6. Formación Arapey (Tacuarembó):** Basalto de textura porfírica conformada por un 50 % de plagioclasas, 30 % de piroxenos, 11 % de minerales opacos, 5 % de olivino y un 4 % de minerales arcillosos o material de baja cristalinidad. Los fenocristales están conformados por plagioclasas automórficas de hasta 0,8 mm, y piroxenos de hasta 12 mm aproximadamente. La matriz es de grano fino, con textura intersertal, compuesta por plagioclasas automórficas de 0,2 a 0,5 mm, piroxenos xenomórficos con tamaños de cristales de 0,2 mm presentando alteraciones a óxidos-hidróxidos de hierro, opacos euhedrales (posiblemente magnetita) asociados a los piroxenos y material de baja cristalinidad y/o minerales arcillosos de color pardo localizados en los intersticios (Figura 1F).



**Referencias:** Fk: feldespato potásico, Dol: dolomita, Bt: biotita, Qz: cuarzo, Cal: calcita, Pg: plagioclasa, Op: ópalo.

- A. (1) PLLC: Fotomicrografía de granito en nicules cruzados, se observa recrystalización y extinción ondulante en cristales de cuarzo.
- B. (2) PR48: Fotomicrografía de granito en nicules cruzados.
- C. (3) PPMA: Fotomicrografía de granito en nicules cruzados, se observa recrystalización y textura poligonal en cristales de cuarzo.
- D. (4) PPCM: Fotomicrografía de granodiorita en nicules cruzados.
- E. (5) CNC: Fotomicrografía de mármol dolomítico en nicules cruzados.
- F. (6) PPD: Fotomicrografía de basalto en nicules cruzados, se observa textura intersertal.

**Figura 1:** Fotomicrografías de los agregados descritos.

**Tabla 1:** Se muestra el detalle de la ubicación, el tipo de roca y la presencia de componentes reactivos frente a las RAS según norma IRAM 1531 [3].

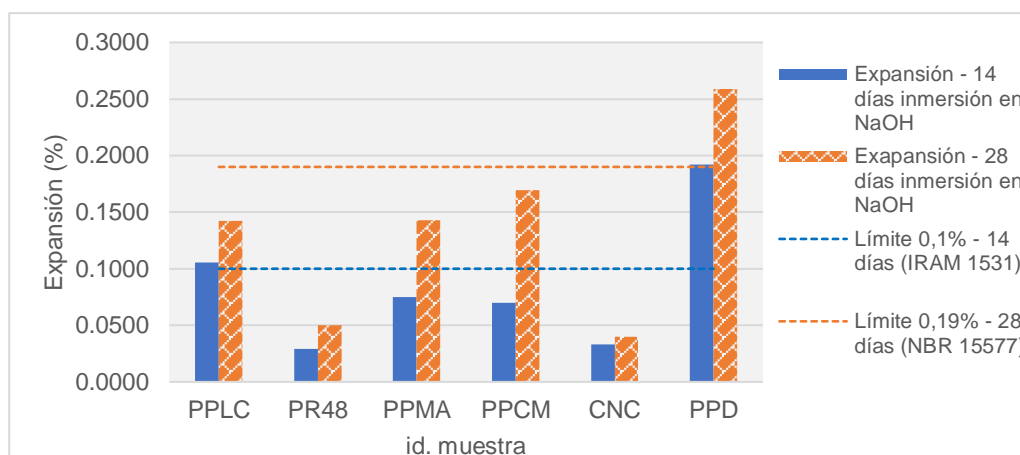
Id Muestra	Ubicación	Tipo de roca/sedimento	Componentes reactivos frente a las RAS (según IRAM 1531)	Límite normativo (IRAM 1531)
(1) PPLC	San Carlos, Maldonado	Granito (Granito Aiguá)	Cuarzo microcristalino: 10 % Cuarzo tensionado (AEO Alto): 21°	5 %
(2) PR48	La Paz, Canelones	Granito (Granito la Paz)	Cuarzo microcristalino: 3 %	5 %
(3) PPMA	Mal Abrigo, Colonia	Granito (Granito Mal Abrigo)	Cuarzo microcristalino: 20 %	5 %
(4) PPCM	La Cruz de Carrasco, Montevideo	Granodiorita (Granodiorita Cañadas de las Canteras)	Cuarzo microcristalino: 4 %	5 %
(5) CNC	Nueva Carrara, Maldonado	Mármol dolomítico (Complejo Zanja del Tigre)	No presenta	5 %
(6) PPD	Ruta 5, al Norte de Tacuarembó	Basalto (Formación Arapey)	Vidrio volcánico y/o componentes de baja cristalinidad: 4%	3 %

Nota: AEO: Ángulo de extinción ondulante.

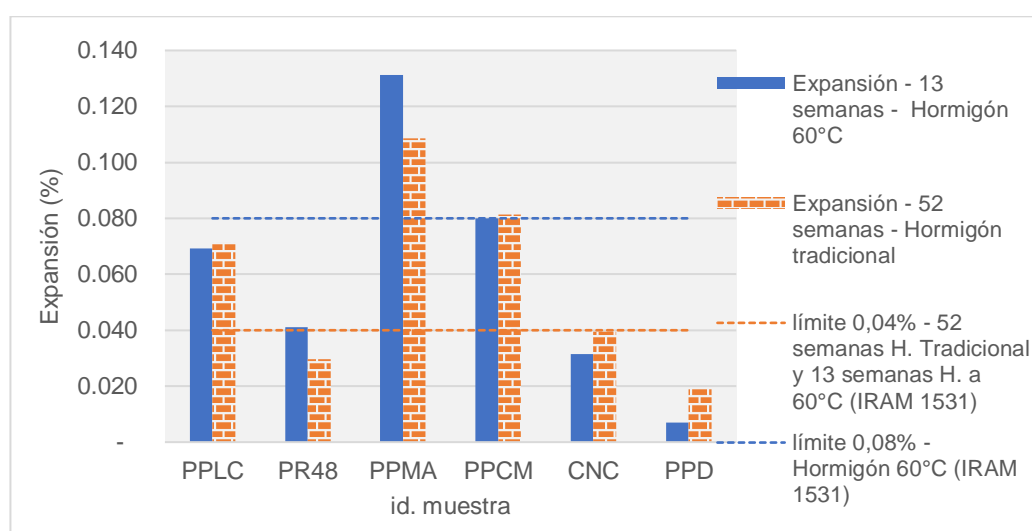
En resumen, la muestra estudiada de PPLC presentó un 10 % de cuarzo microcristalino superando el límite de la norma, además el AEO fue de 21°. La muestra de PR48 presentó 3 % de cuarzo microcristalino, encontrándose por debajo del límite normativo. PPMA presentó 20 % de cuarzo microcristalino superando ampliamente el límite normativo. CNC no presentó indicios de minerales potencialmente reactivos en cantidad significativa. PPD presentó 4 % de vidrio volcánico y/o componentes de baja cristalinidad, levemente por encima del límite.

### Expansión en barras de mortero y en hormigón por reacción álcali-sílice

Se evaluó la expansión por reacción álcali-sílice mediante el ensayo de expansión acelerado de la barra de mortero según IRAM 1674 [6] (Figura 2) y en hormigón mediante la metodología de expansión acelerada (a 60 °C) y tradicional (a 38 °C) según IRAM 1700 [7] (Figura 3). Los límites de expansión para considerar al agregado potencialmente reactivos fueron los indicados en IRAM 1531 [3] (en barra de mortero fue la expansión a los 14 días, en hormigón- 60 °C fue la expansión a las 13 semanas y en hormigón-tradicional fue la expansión a las 52 semanas) y en ABNT NBR 15571-1 [10] (fue la expansión a los 28 días en barra de mortero). Respecto al límite de expansión en hormigón-60 °C a las 13 semanas IRAM 1531 [3] indica dos límites; uno de 0,04 % para agregados en presencia de ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita y dolomita, y otro de 0,08 % para agregados con cuarzo tensionado y/o microcristalino.



**Figura 2:** Expansión álcali-sílice en barra de mortero según IRAM 1674.



**Figura 3:** Expansión álcali-sílice en hormigón (acelerado a 60 °C y tradicional a 38 °C según IRAM 1700).

Se obtuvieron diferentes niveles de expansión. CNC (mármol dolomítico) presentó una baja expansión tanto en la barra de mortero como en hormigón (a su vez no se detectó la presencia de minerales reactivos). PR48 (granito La Paz, presencia de cuarzo microcristalino) también presentó una baja expansión en mortero y en hormigón-tradicional a las 52 semanas dio 0,04 % de expansión. PPLC (Granito Aiguá, presencia de cuarzo microcristalino y tensionado) en mortero presentó una expansión cercana al límite de 0,1 %, en hormigón-60 °C estuvo por debajo del límite de 0,08 %; sin embargo, en el hormigón-tradicional superó ampliamente el límite de expansión a las 52 semanas de 0,04 %. PPCM (Granodiorita Cañada de las Canteras, presencia de cuarzo microcristalino) en mortero presentó una expansión por debajo de los límites tanto a los 14 como a los 28 días, en hormigón-60 °C estuvo cercano al límite de 0,08 % y en hormigón-tradicional superó ampliamente el límite 0,04 % a las 52 semanas. PPMA (Granito Mal Abrigo, cuarzo tensionado y microcristalino) no superó los límites en mortero; sin embargo, en hormigón fue la muestra que presentó la mayor expansión (0,11 % en hormigón-tradicional a las 52 semanas y 0,13 % en hormigón-60 °C a 13 semanas). PPD (Basalto Arapey, con vidrio volcánico y componentes de baja cristalinidad) en mortero superó ampliamente los límites; sin embargo, en hormigón fue la muestra que dio menor expansión (0,007 % en hormigón-60 °C y 0,019 % en hormigón-tradicional).

Es reconocida la baja confiabilidad del ensayo de expansión de la barra de mortero [2, 12-14]. Agregados considerados de reacción lenta (en presencia de cuarzo microcristalino y/o tensionado) han sido reportados de baja expansión en este ensayo (cerca de 0,1 % a los 14 días de inmersión en NaOH) pero luego en servicio han presentado un comportamiento deletéreo (denominados “falsos negativos”). Por el contrario, en algunos tipos de basalto con presencia de vidrio volcánico, da expansiones que superan ampliamente el límite, pero luego en servicio no presentan un comportamiento deletéreo (denominados “falsos positivos”).

En Uruguay no se produce un cemento CPN con el contenido de álcalis de  $0,9 \pm 0,1$  % indicado por la norma IRAM 1674 [6] e IRAM 1700 [7]. El CPN empleado presentó un contenido de álcalis entre 1,16 % a 1,25 %, por lo que, en todos los hormigones fabricados el contenido de álcalis agregado en el agua de mezclado para llegar al contenido normalizado de  $5,25 \text{ kgNa}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$  de hormigón fue menor al indicado normativamente (siendo nulo en algunos casos). A su vez, el agregado fino no reactivo necesario para producir hormigón con el agregado grueso de interés a evaluar, cumplió con el límite en expansión de la barra de mortero menor a 0,08 % a los 14 días, pero no cumplió con el límite de expansión de 0,015 % en hormigón-tradicional a las 52 semanas (fue 0,04 %). Se aclara que la norma del ensayo IRAM 1700 [7] en ítem 5.2.1 indica que debe cumplir uno de los dos requisitos y no ambos.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con las características petrográficas de las muestras analizadas, se puede establecer que existen unidades geológicas con componentes que presentan riesgos de reacción álcali-sílice. Esto se observó principalmente en las muestras de las unidades Granito Aiguá (granito), Granito Mal Abrigo (granito) y Formación Arapey (basalto). Por otro lado, las muestras de las unidades Complejo Zanja del Tigre (mármol dolomítico), Granito La Paz (granito) y Granodiorita Cañada de las Canteras no presentan riesgo de reacción álcali-sílice.

Respecto a las tres metodologías de ensayo para evaluar la expansión por reacción álcali-sílice en muestras de agregado (en barra de mortero, hormigón-acelerado y hormigón-tradicional) los resultados en hormigón prevalecen sobre el mortero, a su vez la metodología en hormigón-tradicional (a 38 °C) prevalece sobre la metodología acelerada (a 60 °C). Por lo tanto, las muestras estudiadas de Granito Aiguá, Granito Mal Abrigo y Granodiorita Cañada de las Canteras serían considerados potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-sílice. Granito La Paz y Mármol Dolomítico están cercanos al límite en expansión en hormigón (a su vez en la muestra de Mármol Dolomítico no se detectaron minerales reactivos frente a los álcalis) por lo que no se puede concluir sobre su potencialidad reactiva frente a los álcalis. La muestra de Basalto Arapey no sería potencialmente reactiva.

Si bien la muestra de Mármol Dolomítico fue evaluada por las metodologías de ensayo IRAM 1674 [6] e IRAM 1700 [7] (debido a la presencia de cuarzo), por estar conformada principalmente por dolomita-calcita su reactividad debe ser evaluada frente a la reacción álcali-carbonato, siendo otros los métodos de ensayos [1].

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Estructuras y Transporte (IET) de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República) por el equipamiento y espacio necesario de laboratorio para realizar los ensayos, así como 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] 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.
- [3] IRAM 1531, "Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, (2016), 36p.
- [4] ABNT NBR 15577-3 Agregados - "Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto", Associação Brasileira de Normas Técnicas, (2008).
- [5] IRAM 1649, "Examen petrográfico de agregados para hormigón", Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Argentina, (2008), 13p.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] UNIT 1050, "Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado. Instituto Uruguayo De Normas Técnicas, (Montevideo, Uruguay, (2005), 288p.
- [9] UNIT 20, "Cemento pórtland para uso general. Definiciones y requisitos. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Montevideo, Uruguay, (2017), 13p.
- [10] ABNT NBR 15577-1 Agregados – "Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto", Associação Brasileira de Normas Técnicas, (2008).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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.
- [14] 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.