

Potencialidad reactiva de agregados para hormigón en Uruguay. Correlación entre la metodología de la barra de mortero y el prisma de hormigón (acelerada y tradicional)

P. E. Vila^{1*} , H. L. Bonjour¹ , L. J. Díaz¹ , M. N. Pereyra¹ 

*Autor de Contacto: pvila@fing.edu.uy

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.608>

Recibido: 11/05/2022 | Correcciones recibidas: 21/12/2022 | Aceptado: 21/12/2022 | Publicado: 01/01/2023

RESUMEN

Se analizó la correlación entre los criterios internacionales para definir el grado de reactividad en los ensayos de expansión de la barra de mortero y del prisma de hormigón (metodología acelerada y tradicional). Experimentalmente se aplicaron las tres metodologías de ensayo a 19 muestras de agregados empleados para hormigón en Uruguay. Se tuvieron agregados de variada reactividad, pero no se encontró consenso en la interpretación por las diferentes técnicas. Los resultados son únicos para las litologías evaluadas y aportaron antecedentes de una metodología de ensayo relativamente nueva. No se observó correlación entre la expansión de la barra de mortero y en prisma de hormigón-metodología tradicional, pero si se observó una adecuada correlación entre ambas metodologías en hormigón (acelerada y tradicional).

Palabras clave: expansión; durabilidad; reacción álcali-agregado; ensayos.

Citar como: Vila, P. E., Bonjour, H. L., Díaz, L. J., Pereyra, M. N. (2023), “Potencialidad reactiva de agregados para hormigón en Uruguay. Correlación entre la metodología de la barra de mortero y el prisma de hormigón (acelerada y tradicional)”, Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 45 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.608>

¹ Departamento de Construcción, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor P. E. Vila contribuyó con la idea original (80%), el análisis de datos y la redacción del trabajo (80%), el autor H. L. Bonjour con el análisis petrográfico de todas las muestras de agregado que conformaron el estudio, L. J. Díaz contribuyó con el trabajo experimental y procesamiento de las muestras, M. N. Pereyra contribuyó con la idea original (20%), en la redacción (20%) y revisó el trabajo.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2023.

Potential alkali reactivity of aggregates for concrete in Uruguay. Correlation between mortar bar test and concrete prism (accelerated and traditional test)

ABSTRACT

The correlation between the international criteria to define the reactivity degree in the mortar bar expansion tests and the expansion in concrete prism tests (accelerated and traditional methodology) was analyzed. The three test methodologies were applied experimentally to 19 aggregates samples used for concrete in Uruguay. There were aggregates of different reactivity degree, but no consensus was found in the interpretation by the different techniques. The results are only for the lithologies evaluated and provided background for a relatively new assay methodology. No correlation was observed between the expansion of the mortar bar and in the concrete prism-traditional methodology, but an adequate correlation was observed between both concrete methodologies (accelerated and traditional).

Keywords: expansion; durability; alkali-aggregate reaction; tests.

Reatividade potencial de agregados para concreto no Uruguai. Correlação entre a metodologia da barra de argamassa e o prisma de concreto (acelerado e tradicional)

RESUMO

Foi analisada a correlação entre os critérios internacionais para definir o grau de reatividade potencial nos ensaios de expansão em barras de argamassa e no prisma de concreto (metodologia acelerada e tradicional). Experimentalmente foram aplicadas as três metodologias de ensaio a 19 amostras de agregados empregados para concreto no Uruguai. Houve agregados de reatividade variada, mas não houve consenso na interpretação pelas diferentes técnicas. Os resultados são únicos para as litologias avaliadas e forneceram base para uma metodologia de ensaio relativamente nova. Não foi observada correlação entre a expansão da barra de argamassa e no prisma de concreto metodologia-tradicional, mas uma correlação adequada foi observada entre as duas metodologias de concreto (acelerado e tradicional).

Palavras-chave: expansão; durabilidade; reação álcali-agregado; ensaios.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón de cemento Portland está constituido entre 60 y 75 % de su volumen por agregados pétreos. Los agregados que contienen sílice de baja cristalinidad o amorfa (como lo son el cuarzo con sílice reactiva, ftanita, chert, calcedonia, tridimita, cristobalita, ópalo y vidrio volcánico) junto a la presencia de álcalis (óxido de sodio y de potasio), iones hidroxilos (OH^-) y humedad, producen una reacción química deletérea en el hormigón denominada reacción álcali-sílice (RAS). Esta reacción, una vez desencadenada, puede causar serios problemas en estructuras de hormigón, principalmente en infraestructuras civiles como puentes, pavimentos, fundaciones, represas, entre otros (Faniño et al., 2021; Godart et al., 2013; Sims and Poole, 2017).

El principal efecto deletéreo en el hormigón se da por el carácter expansivo de los productos de la reacción, lo que puede generar roturas de los bordes en juntas, movimientos diferenciales en bordes de muros, mapeo de fisuración craquelado clásico de la RAS en losas de pavimentos o en macizos de fundaciones, mapeo de fisuras longitudinales en pilares, popouts, decoloración y lixiviados en las superficies (Fournier et al., 2010; Méndez, 2019).

Para el diseño de una nueva estructura es importante conocer el riesgo de estar afectada por esta patología para poder tomar las medidas preventivas necesarias y minimizar el daño. Estas medidas son de carácter prescriptivo o por desempeño, pero siempre el primer paso es conocer la potencialidad reactiva del agregado a emplearse, lo que permitirá clasificarlo por su grado o nivel de reactividad. Este grado de reactividad, junto con la vida útil de diseño, el riesgo asociado a la falla, el tipo de elemento y el ambiente que lo rodea, permite determinar el nivel de prevención requerido para el control de la RAS. Algunas de las medidas prescriptivas pueden ser limitar el contenido de álcalis en el hormigón o el empleo de adiciones minerales activas (IRAM, 2016; IRAM, 2012; ABNT, 2008; ASTM, 2020; Nixon and Sims, 2016).

El grado de reactividad se determina empleando alguna de las metodologías normalizadas existentes de ensayos de expansión de laboratorio: expansión acelerada en barra de mortero (abreviado como AMBT) (IRAM, 1997), expansión acelerada en prisma de hormigón (abreviado CPT-60) (IRAM, 2013) o metodología de expansión tradicional en prisma de hormigón (abreviado CPT-38) (IRAM, 2013).

Por otra parte, Uruguay cuenta con una gran variedad litológica, representada por rocas de diferente naturaleza, edad e historia geológica (Veroslavsky Barbe et al., 2004a; Veroslavsky Barbe et al., 2004b). Estas rocas han sido ampliamente utilizadas como agregados en la industria de la construcción. Se destacan por su utilización rocas graníticas, granodioritas, basálticas, así como arena, grava y canto rodado. Hasta la fecha no se cuenta con una normativa nacional que indique el procedimiento para realizar la evaluación de la potencialidad reactiva de una fuente de agregado. Tradicionalmente la evaluación de la potencialidad reactiva del agregado se realizaba únicamente con el método de la barra de mortero (AMBT).

Entre los años 2018 y 2021 se llevó a cabo una campaña experimental que permitió evaluar la reactividad alcalina de muestras de agregado pertenecientes a las principales fuentes de explotación de agregados para hormigón ubicadas en distintas zonas del país. El grado de reactividad fue evaluado aplicando las metodologías de ensayo de expansión mencionadas anteriormente.

El objetivo de este trabajo fue analizar la correlación entre los criterios internacionales para definir el grado de reactividad que surge de los ensayos de expansión de la barra de mortero o del prisma de hormigón (metodología acelerada o tradicional) aplicado a 19 muestras de agregados pertenecientes a diferentes fuentes de explotación de Uruguay.

2. GRADOS DE REACTIVIDAD DEL AGREGADO

La normativa internacional define el grado de reactividad del agregado aplicando alguna de las siguientes metodologías: expansión en barra de mortero (AMBT), expansión en prisma de hormigón-metodología acelerada (CPT-60) o expansión en prisma de hormigón-metodología tradicional (CPT-38). A partir del resultado, el agregado es clasificado en una escala de R0 a R3 como se muestra en la Tabla 1 (R0 corresponde al agregado no reactivo y R3 extremadamente reactivo) (ASTM, 2020; ABNT, 2008; IRAM, 2016; Giovambattista et al., 2020).

Tabla 1. Grado de reactividad del agregado según la expansión (E, en %) en las metodologías de la barra de mortero y en hormigón.

Grado	Grado de reactividad	AMBT a 14 días ¹⁾	AMBT a 28 días ²⁾	CPT-60 a 13 semanas ³⁾	CPT-38 a 52 semanas ⁴⁾
R0	No reactivo	$E < 0,10$	$E < 0,19$	$E < 0,04/0,08^5)$	$< 0,04$
R1	Moderado	$0,10 \leq E < 0,30$	$0,19 \leq E < 0,40$	$0,04/0,08^5) \leq E < 0,12$	$0,04 \leq E < 0,12$
R2	Alto	$0,30 \leq E < 0,45$	$0,40 \leq E < 0,60$	$0,12 \leq E < 0,24$	$0,12 \leq E < 0,24$
R3	Muy alto	$E \geq 0,45$	$E \geq 0,60$	$E \geq 0,24$	$\geq 0,24$

Notas ¹⁾: ASTM C1778 y Bases para un Código Modelo Argentino; ²⁾ NBR 15577; ³⁾ IRAM 1531, IRAM 1512 y Bases para un Código Modelo Argentino; ⁴⁾ ASTM C1778, NBR 15577 y Bases para un Código Modelo Argentino; ⁵⁾: para agregados cuya reactividad se deba exclusivamente a alguna variedad de cuarzo (microcristalino o tensionado) se adopta el límite de 0,08%.

El AMBT es adoptado por todas las normas para definir el grado de reactividad. En esta metodología es habitual adoptar el límite a los 14 y/o 28 días. La norma americana y argentina adoptan la expansión a los 14 días, mientras que la norma brasilera adopta la expansión a los 28 días.

El CPT-60 es el ensayo de expansión acelerada en prismas de hormigón y es adoptado por la normativa argentina. El CPT-38 es el ensayo tradicional en prismas de hormigón y es adoptado por todos los reglamentos. En caso de discrepancia entre los distintos métodos este último tienen prelación sobre el resto, puesto que al ser la menos agresiva, el comportamiento del agregado es lo más similar al de servicio (en obra).

El AMBT involucra la preparación de barras de mortero de 25 mm x 25 mm x 285 mm con el agregado en las fracciones pasante 4,75 mm y mayor de 0,150 mm, en las proporciones indicadas en la Tabla 2. Las probetas son curadas por 24 h a 20 °C y 100% HR, luego son inmersas en agua por 24 h. A las 48 h se registra la lectura inicial y son inmersas en solución de NaOH 1 N a 80 °C por el período de 14 a 28 días. Esta metodología de ensayo también es empleada para evaluar el efecto péximo y la capacidad de inhibir la reacción de una adición mineral reactiva (ASTM International, 2020).

Tabla 2. Dosificación del mortero (AMBT)

Agregado, % retenido en masa por tamiz					Total agregado (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)
4,75-2,36, mm	2,36-1,18, mm	1,18-0,60, mm	0,60-0,30, mm	0,30-0,15, mm			
10	25	25	25	15	0,99	0,44	0,207

Con las metodologías de expansión en hormigón (CPT-60 y CPT-38) son producidas probetas prismáticas de 75 mm x 75 mm x 285 mm de hormigón en las proporciones indicadas en la Tabla 3. En la metodología acelerada los prismas son sometidos a 60 °C y 100 % HR por 13 semanas y en la metodología tradicional a 38 °C y 100 % HR por 1 año.

Tabla 3. Dosificación del hormigón (CPT-60 y CPT-38) (kg/m³)

Agregado grueso, por fracción			Agregado Fino, por fracción				Cemento (Kg)	Agua (kg)	Aditivo	
19-12,5 mm	12,5-9,5 mm	9,5-4,75 mm	4,75-2,36 mm	2,36-1,18 mm	1,18-0,60 mm	0,60-0,15 mm			Sikament 290N (%)	NaOH (g)
354	354	354	71	142	142	354	420	198,4	0,20%	535,7

Previo a los ensayos de expansión se realiza la evaluación petrográfica del agregado para determinar los componentes reactivos (ASTM, 2019).

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

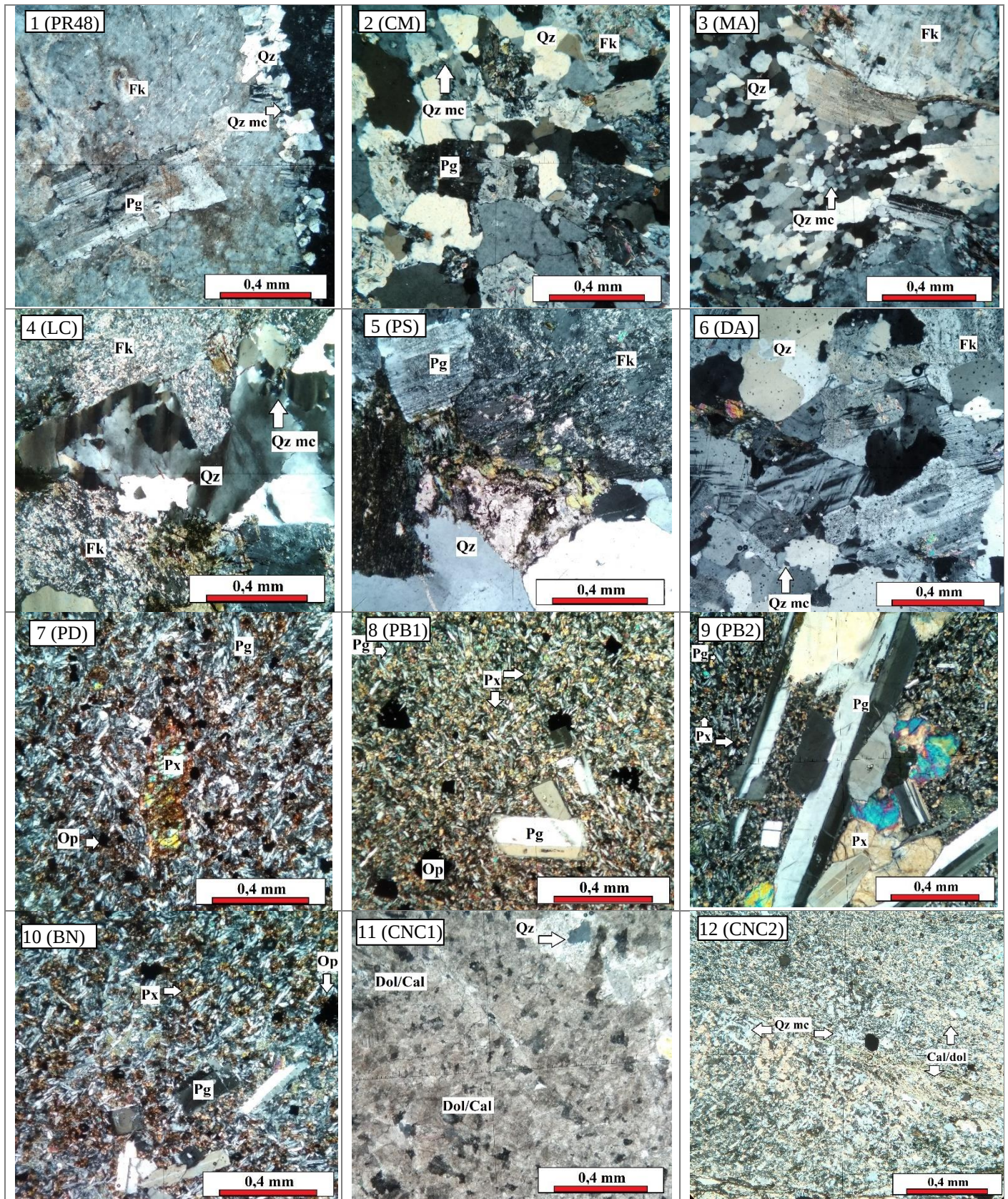
3.1 Materiales

En la evaluación fueron empleadas 19 muestras de agregado (13 de agregado grueso, 3 de arena gruesa y 3 de arena fina) todos ellos considerados aptos para hormigón (UNIT, 2005) provenientes de fuentes de explotación ubicadas en diferentes zonas del país (Tabla 4). Además, se indica la composición mineralógica y los componentes reactivos frente a los álcalis según IRAM 1531 (IRAM, 2016) e IRAM 1512 (IRAM, 2012). Las muestras del ordinal 1 al 6 fueron muestras de agregado grueso denominados “granitos”, las que presentaron cuarzo microcristalino y cuarzo tensionado (Qz/mc y Qz/t) como componentes reactivos. Del ordinal 7 al 10 fueron muestras de basalto y presentaron vidrio volcánico (Vv) alterado como componente reactivo (además la muestra 10 presentó ópalo). Las muestras 11 y 12 fueron metadolomía, la muestra 12 presentó cuarzo microcristalino (Qz/mc). La muestra 13 fue un canto rodado silíceo con presencia de cuarzo microcristalino (Qz/mc) y calcedonia como componentes reactivos (Ccd). Las muestras 14 a 19 son arenas de depósito fluvial con cuarzo microcristalino (Qz/mc) como componente reactivo. En la Figura 1 se muestran imágenes con nicoles cruzados de las muestras.

Tabla 4. Muestras de agregado empleadas en la evaluación experimental.

Ordinal	Id. de la muestra	Tipo	Ubicación	Origen geológico	Componentes reactivos
1	PR48	Grueso	Las Piedras, Canelones	Granito La Paz	Qz/mc
2	CM	Grueso	Cno. Carrasco, Montevideo	Granodiorita Cañada de las Canteras	Qz/mc
3	MA	Grueso	Mal Abrigo, San José	Granito Mal Abrigo	Qz/mc
4	LC	Grueso	San Carlos, Maldonado	Granito Aiguá	Qz/mc y Qz/t
5	PS	Grueso	Soca, Canelones	Granito Soca	Qz/mc y Qz/t
6	DA	Grueso	Durazno, Durazno	Franja Granito-Gnéisica Terreno Piedra Alta	Qz/mc y Qz/t
7	PD	Grueso	Ruta 5 Km 480, Tacuarembó	Basalto Arapey	Vv alterado
8	PB1	Grueso	Centenario, Durazno	Basalto Arapey	Vv alterado
9	PB2	Grueso	Centenario, Durazno	Basalto Arapey	Vv alterado
10	BN	Grueso	Paso de los Toros, Tacuarembó	Basalto Arapey	Vv alterado y Op
11	CNC1	Grueso	Pan de Azúcar, Maldonado	Metadolomía – Complejo Zanja del Tigre	Qz
12	CNC2	Grueso	Pan de Azúcar, Maldonado	Metadolomía – Complejo Zanja del Tigre	Qz/mc
13	CRS	Grueso	Salto, Salto	Arenas conglomeráticas – Canto Rodado Salto	Qz/mc y Ccd
14	AGP	Arena	Aguas Corrientes, Canelones.	Depósito actual – Sedimento Río Santa Lucía	Qz/mc
15	AGPP	Arena	Paso Pache, Canelones.	Depósito actual- Sedimento Río Santa Lucía	Qz/mc
16	AGRN	Arena	Centenario, Durazno	Depósito actual fluvial – Río Negro	Qz/mc y Ccd
17	AFT	Arena	Delta del Tigre, San José	Formación Chuy	Qz/mc
18	AFJ	Arena	Jaureguiberry, Canelones	Deposito actual- Dunas Costeras	Qz/mc
19	AFRN	Arena	Centenario, Durazno	Depósito actual fluvial – Río Negro	Qz/mc

Qz/mc: cuarzo microcristalino. Qz/t: cuarzo tensionado. Vv: vidrio volcánico. Ccd: calcedonia.
Op: ópalo



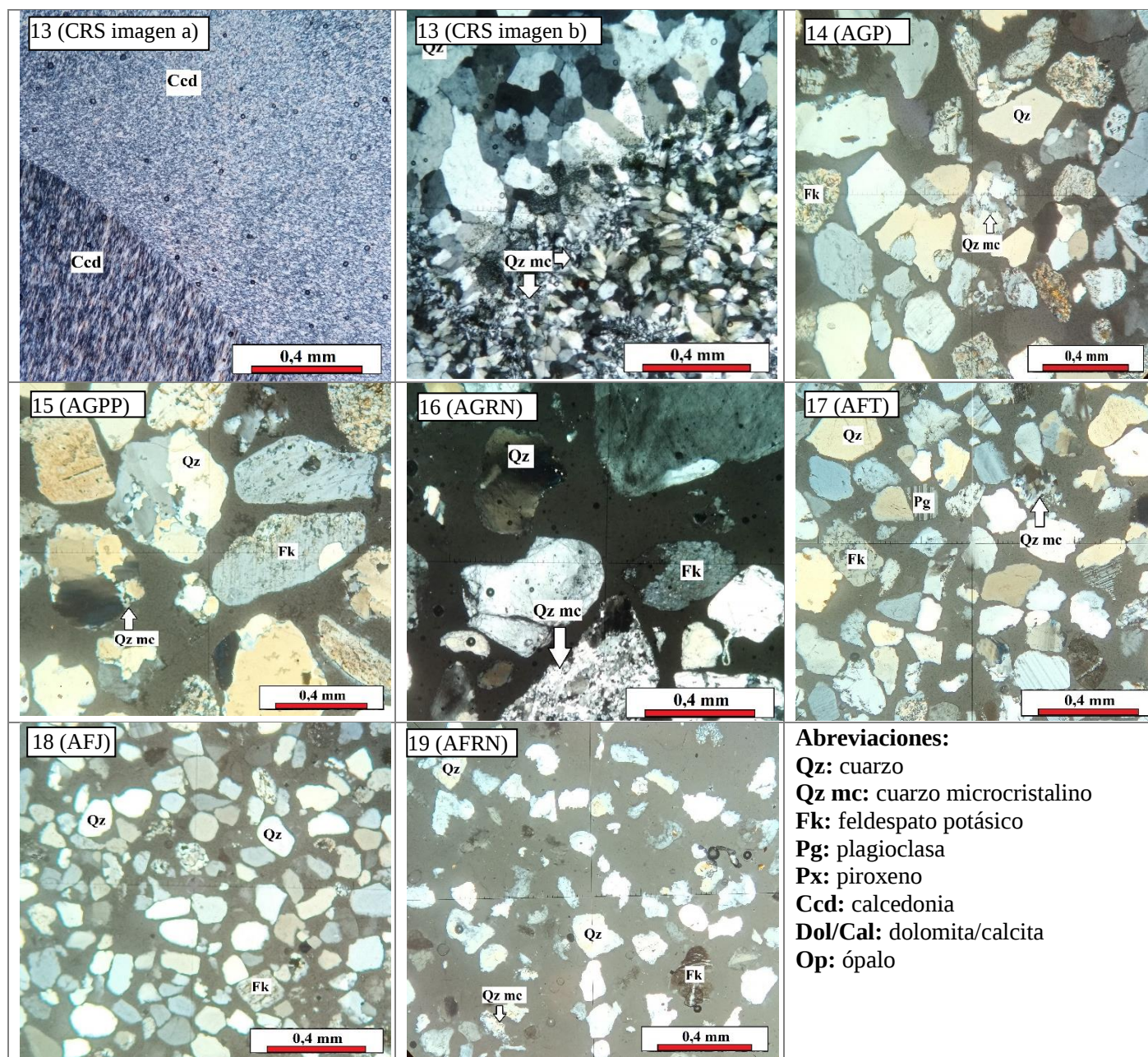


Figura 1. Fotomicrografía con nicoles cruzados de las muestras.

El cemento utilizado para la fabricación de los morteros y el hormigón es un cemento Portland que contiene únicamente clinker como componente principal, sin adiciones y de uso general en el hormigón (Tabla 5), identificado como CPN 40 según UNIT 20 (UNIT, 2017).

Tabla 5. Caracterización del cemento Portland CPN 40

CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Sodio Equivalente Na ₂ O+0,658K ₂ O (%)	C ₃ A (%)
62,99	19,93	4,42	2,76	3,06	0,34	1,23	1,15	6,5
Residuo insoluble (%)	Pérdida por calcinación (%)	Retenido tamiz 75 µm (%)	Blaine (m ² /kg)	Expansión en autoclave (%)	Densidad (kg/dm ³)	Tiempo de fraguado inicial (h:min)	Tiempo de fraguado final (h:min)	Resistencia 28 días (MPa)
0,11	2,46	3,1	356	Sin registro	3,15	1:56	2:56	46,6

Los morteros y los hormigones se fabricaron adoptando los procedimientos normalizados IRAM 1674 (IRAM, 1997) e IRAM 1700 (IRAM, 2013), respectivamente. Las proporciones se indican en las Tablas 2 y 3.

3.2 Metodología

Fueron aplicadas tres metodologías de ensayo de expansión (AMBT, CPT-60 y CPT-38). En el ensayo de AMBT se obtuvo el registro de longitud de las barras de mortero a los 0 días (longitud inicial, previo a la inmersión en la solución de 1N NaOH), 14, y 28 días de sumergidas. En el ensayo del prisma de hormigón, metodología acelerada (CPT-60), se realizó el registro de la longitud inicial a 0 días (previo al acondicionamiento en la cámara de 60 °C y 100 % HR) y a 13 semanas. Por último, en el ensayo del prisma de hormigón, metodología tradicional (CPT-38) se realizó el registro de la longitud inicial a 0 días (previo al acondicionamiento en la cámara de 38 °C y 100 % de HR) y a las 52 semanas. Para cada metodología de ensayo se determinó la expansión $E(t_i)$ de cada una de las barras según (1):

$$E(t_i) = 100 * (L_{ti} - L_{t0}) / L_n \quad (1)$$

Donde:

$E(t_i)$: expansión a la edad de ensayo t_i

t_i : edad de ensayo, expresado en días para el AMBT y en semanas en las metodologías CPT-60 y CPT-38.

L_{ti} : largo de la barra entre pernos de lectura a la edad t_i , en mm

L_{t0} : largo de la barra entre pernos de lectura a tiempo 0, en mm

L_n : largo efectivo de expansión de la barra, en mm

La expansión a la edad t_i por muestra de agregado se obtuvo como el promedio de expansión de tres barras de un mismo mortero ensayadas en simultáneo, calculándose previamente el coeficiente de variación por muestra para verificar la precisión entre barras según ASTM C1260 (ASTM, 2014) para el AMBT y según IRAM 1700 (IRAM, 2013) para los prismas de hormigón.

Calculada la expansión y adoptando los límites de la Tabla 1 se determinó el grado de reactividad de cada muestra y se analizó la correlación entre los resultados aplicando las tres metodologías de ensayo. Para la evaluación de la expansión por las diferentes metodologías, el agregado fue extraído de la misma muestra, mediante cuarteo y fraccionamiento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Grado de reactividad según la metodología aplicada

En la Tabla 6 se presenta el grado de reactividad de los agregados que surge de la expansión en las barras de mortero (AMBT) a los 14 y 28 días, de la expansión en prismas de hormigón, metodología acelerada (CPT-60) a 13 semanas de ensayo y de la expansión en prismas de hormigón, metodología tradicional (CPT-38) a 52 semanas de ensayo (1 año).

En las muestras de agregado grueso “granítico” (ordinal de muestra de 1 a 6) en el AMBT, los morteros 1, 2, 3 y 6 presentaron una expansión a 14 días menor del 0,10 % y a los 28 días menor del 0,19 %. Por lo tanto, bajo esta metodología de ensayo, estas muestras son clasificadas con grado de reactividad R0 (no reactivas). Los granitos 4 y 5 superaron el límite de 0,10 % a los 14 días, siendo ambas clasificadas con grado de reactividad R1 para esta edad. Sin embargo, adoptando la expansión a los 28 días, la muestra 4 sería catalogada como R0 (no reactiva) y la 5 como R1. En las metodologías de hormigón CPT-60 y CPT-38, la muestra 1 presentó una expansión menor a 0,08 % y 0,04 % (límites de ambas metodologías, respectivamente) y fue clasificado como R0 (no reactivo) aplicando estas metodologías. El hormigón fabricado con la muestra 2 y el fabricado con la muestra 6 presentaron la expansión superior al límite en ambas, siendo clasificado como R1. El hormigón con la muestra 3 presentó la mayor expansión de todas y fue clasificado con grado de reactividad R2 en CPT-60 y con grado R1 en CPT-38.

En las muestras de basaltos (ordinal de muestra de 7 a 10), según la metodología AMBT, la expansión a los 14 y 28 días clasificó a la muestra 7 como R1, a la muestra 8 como R3 y R2 (14 y 28 respectivamente) y a las muestras 9 y 10 como R3. En estas dos últimas se obtuvieron expansiones que superaron el 1 % a los 14 días. Sin embargo, en la evaluación en hormigón, las muestras de basalto 7, 8 y 9 fueron catalogadas como no reactivas (R0) y la muestra 10 como R1. En las muestras de metadolomía (11 y 12), todos los métodos de evaluación clasifican a la muestra 11 como no reactiva (R0) y a la muestra 12 con grado de reactividad R1. El canto rodado (muestra 13) fue clasificado con grado de reactividad R1 por todos los métodos.

En las arenas, las muestras 14 y 15 presentaron el mismo comportamiento, en el AMBT y en CPT-38, ambas fueron clasificadas con grado de reactividad R1 y por el CPT-60 como no reactivas (R0). Ambas muestras procedieron de sedimentos del Río Santa Lucía, aunque fueron extraídas de zonas diferentes.

Las muestras de arenas 16 y 19 presentaron un comportamiento muy similar en la expansión, siendo clasificadas con grado de reactividad R1, salvo en la expansión a 28 días en AMBT de la muestra 16, que fue algo menor a 0,19 % lo que la clasifica como no reactiva. Ambas muestras fueron del mismo origen (sedimentos del Río Negro).

Las muestras 17 y 18 fueron clasificadas como no reactivas (R0) salvo en el CPT-38 en la muestra 17 que superó la expansión de 0,04 % al año y fue clasificada como R1.

Adoptando la metodología CPT-38 como la de mayor confiabilidad y considerando los resultados no coincidentes obtenidos según las otras metodologías (celdas “no” de la Tabla 5), se observa que se llega a interpretaciones erróneas conocidas como falsos positivos y falsos negativos. Falsos positivos son agregados identificados como reactivos por la metodología empleada, mientras que la expansión en CPT-38 es menor a 0,04% (lo que se asocia a un comportamiento en servicio no deletéreo). Falsos negativos, por el contrario, son agregados de despreciable expansión por la metodología empleada, pero que presentan una expansión mayor de 0,04 % en el CPT-38 (asociado a un comportamiento en servicio deletéreo).

Tabla 6. Expansión y grado de reactividad según las metodologías de ensayo.

Muestra		Grado de reactividad según la metodología:				¿Coincide con CPT-38?		
Ordinal	Id.	AMBT -14d	AMBT -28d	CPT-60	CPT-38	AMBT -14d	AMBT -28d	CPT-60
1	PR48	R0	R0	R0	R0	si	si	si
2	CM	R0	R0	R1	R1	no	no	si
3	MA	R0	R0	R2	R1	no	no	no
4	LC	R1	R0	R0	R1	si	no	no
5	PS	R1	R1	R0	R1	si	si	no
6	DA	R0	R0	R1	R1	no	no	si
7	PD	R1	R1	R0	R0	no	no	si
8	PB1	R3	R2	R0	R0	no	no	si
9	PB2	R3	R3	R0	R0	no	no	si
10	BN	R3	R3	R1	R1	no	no	si
11	CNC1	R0	R0	R0	R0	si	si	si
12	CNC2	R1	R1	R1	R1	si	si	si
13	CRS	R1	R1	R1	R1	si	si	si
14	AGP	R1	R1	R0	R1	si	si	no
15	AGPP	R1	R1	R0	R1	si	si	no
16	AGRN	R1	R0	R1	R1	si	no	si
17	AFT	R0	R0	R0	R1	no	no	no
18	AFJ	R0	R0	R0	R0	si	si	si
19	AFRN	R1	R1	R1	R1	si	si	si
R0: color verde. R1: color anaranjado.					contar "si":	11	9	13
R2 y R3: color rosa. "si": color verde. "no": color rosa.					contar "no":	8	10	6

Analizando los resultados no coincidentes con los obtenidos en el CPT-38, en la metodología AMBT a 14 días, ocho muestras arrojaron resultados erróneos (42% de las muestras) y considerando la expansión a los 28 días, diez resultados fueron erróneos (53 %). En los agregados gruesos, los falsos negativos de esta metodología pertenecieron a las muestras de granito (CM, MA, LC, DA) que presentaron como componente reactivo cuarzo microcristalino (Qz/mc). En las muestras de arena fue en AGRN donde se observó un falso negativo (con Qz/m como componente reactivo). Respecto a los falsos positivos de la metodología AMBT, fueron en cuatro muestras de basalto de las cinco muestras ensayadas. Tanto los falsos positivos como los falsos negativos de esta metodología han sido reportados en la bibliografía (Madsen et al., 2018; Torres, 2014; Garber et al., 2005).

En la expansión en prisma de hormigón, metodología acelerada CPT-60, seis muestras arrojaron resultados no coincidentes con la metodología tradicional (32 % de las muestras). Cinco se corresponden a falsos negativos, dos en agregado grueso granítico (LC y LS) y dos en arenas (AGP, AGPP y AFT). Todas estas muestras presentaron cuarzo microcristalino (Qz/mc) y cuarzo tensionado (Qz/t) como constituyentes reactivos, para estos se debe adoptar el límite de 0,08 % en vez de 0,04 % (Tabla 1). Si se considerase el límite de 0,04 % en lugar de 0,08 % habría tres resultados no coincidentes, muestras PR48, MA y AFJ (PR48 y AFJ, ambos superaron el límite de 0,04 % en CPT-60 pero no en CPT-38).

4.2 Correlación entre los resultados de expansión

En la Figura 2 se graficó la expansión en la metodología AMBT a los 14 y 28 días de ensayo vs la expansión en CPT-38 lo que permitió observar la escasa correlación entre ambas metodologías. Tanto los puntos cercanos al eje de la abscisa como los puntos cercanos al eje de la ordenada muestran resultados que se apartan de la correlación. Los primeros se deben a muestras de granito (con Qz/mc y Qz/t como componente reactivo) y los segundos a muestras de basalto (con presencia de Vv). Fueron incluidos los resultados en basaltos reportados por Madsen y colaboradores (Madsen et al. 2018), observándose que dos de las tres muestras presentaron baja correlación (puntos cercanos al eje de la ordenada).

La norma ASTM C 1778 (ASTM, 2020) define una zona en el grafico para agregados reactivos donde hay buena correlación entre ambas metodologías de ensayo. Entre los agregados reactivos únicamente tres quedaron en la zona de buena correlación (AGRN, AFRN, CNC) y solo tres agregados fueron catalogados como no reactivos por ambas metodologías (AFJ, PR48 y CNC1). Por lo tanto, la metodología de la barra de mortero (AMBT) resultó de baja confiabilidad para evaluar la potencialidad reactiva del agregado, si bien se considera adecuado para evaluar la uniformidad de una fuente de agregado o para evaluar la capacidad de inhibir la reacción de una medida preventiva adoptada (ASTM, 2020).

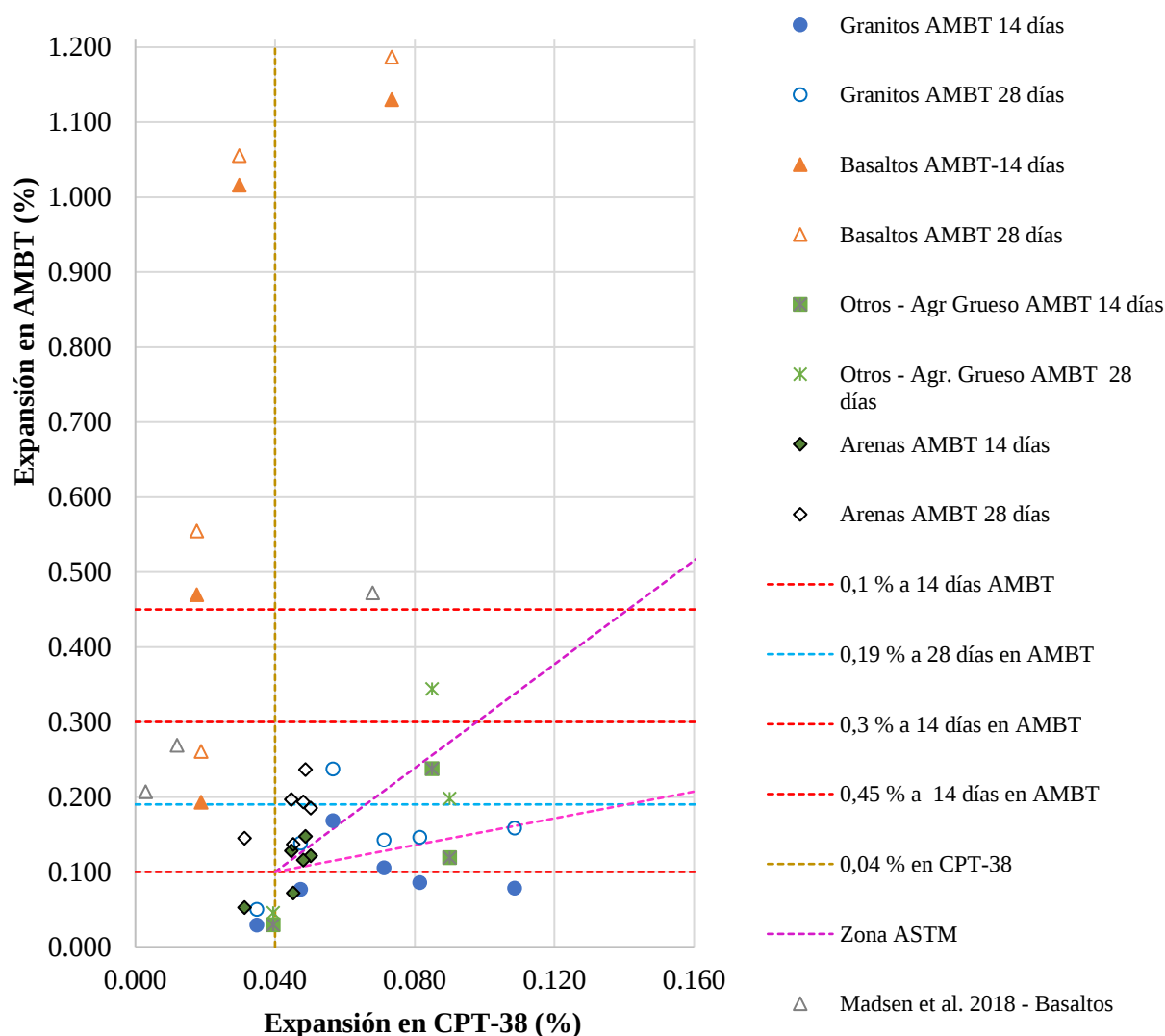


Figura 2. Expansión en AMBT a 14 y 28 días vs la expansión en CPT-38 a 52 semanas.

En la Figura 3 se graficó la expansión del prisma de hormigón metodología acelerada CPT-60 vs la expansión empleando la metodología tradicional CPT-38 incluyendo todas las muestras evaluadas. Se obtuvo adecuada correlación entre ambas ($R^2 = 0,78$). La cantidad de muestras por tipo de agregado fue limitada, por lo que no se pudo realizar una recta de correlación para cada tipo.

En el mismo gráfico se agregaron los datos reportados en la bibliografía (Madsen et al. 2018 y Falcone et al. 2012) agrupados por constituyentes reactivos (Qz/mc, Qz/t, Vv y otros).

Los agregados con presencia de vidrio volcánico (Vv) (identificados como basaltos) presentaron una adecuada correlación tanto en los datos propios como en los datos de la bibliografía (Madsen et al. 2018 y Falcone et al. 2012).

Falcone y colaboradores (Falcone et al. 2012) mostraron que los agregados con presencia de Qz/mc y Qz/t se agruparon más cerca del eje de ordenada (puntos en línea negra, sin relleno) y de aquí recomendaron el límite de 0,08 % para agregados con estos constituyentes reactivos en la metodología CPT-60 (Tabla 1). Sin embargo, los resultados propios no mostraron una tendencia similar para este tipo de agregado.

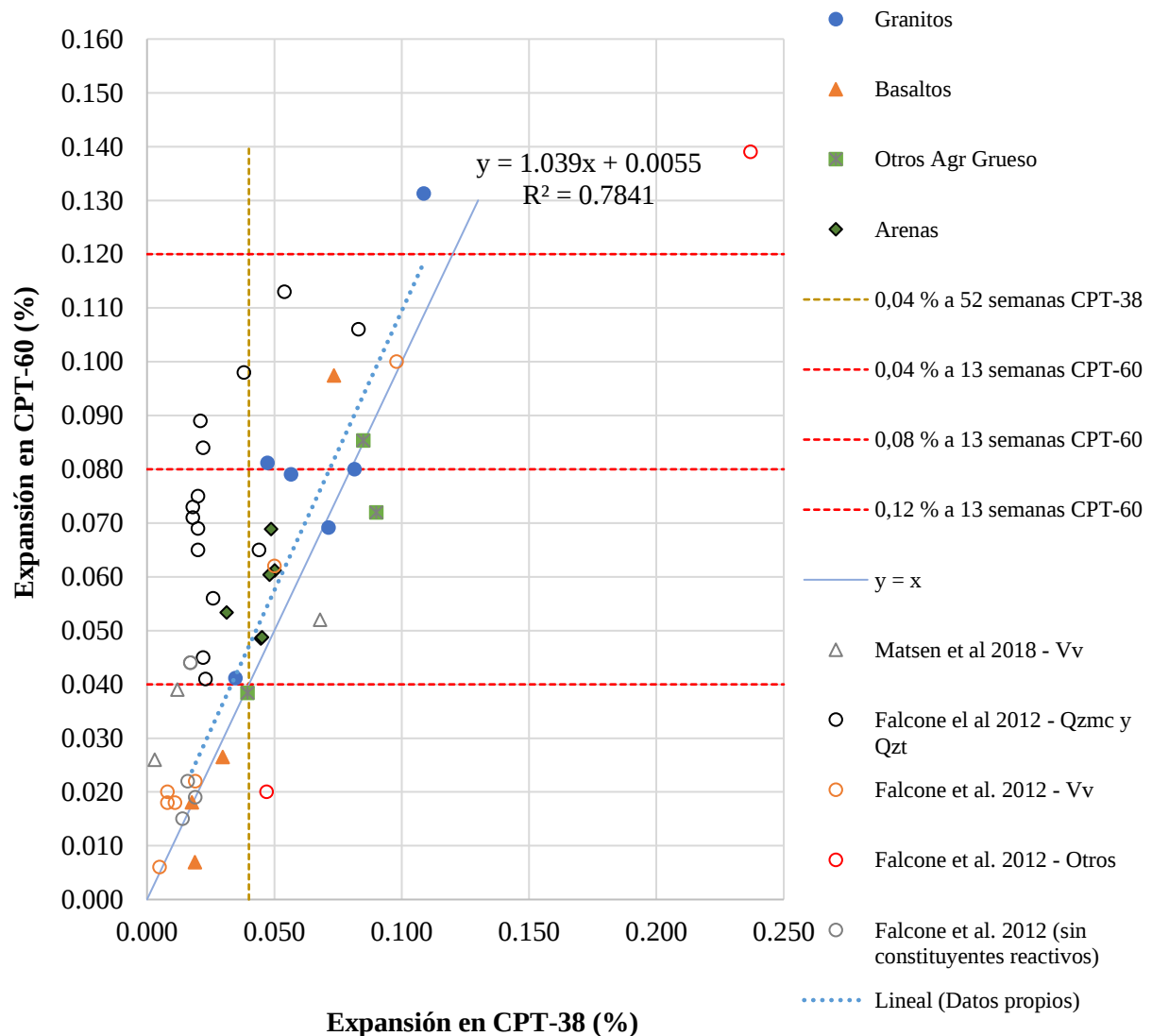


Figura 3. Expansión en CPT-60 a 13 semanas vs la expansión en CPT-38 a 52 semanas.

La metodología de ensayo CPT-60 es relativamente nueva, siendo escasos los antecedentes de correlación con el resto de las metodologías y de correlación con el comportamiento del agregado en servicio. Se deberá contar con mayor número de antecedentes para analizar si el límite de 0,08 % en el CPT-60 a 13 semanas para los agregados con presencia de cuarzo microcristalino o tensionado se correlaciona con el límite de 0,04 % en el CPT-38 a 52 semanas. En tal sentido, existe otro método de análisis propuesto por el RILEM (Nixon and Sims, 2016). En este análisis al aplicar el modelo matemático conocido como modelo de Kolmogorov-Avrami-Mehl-Johnson (abreviado modelo KAMJ) se obtienen los parámetros cinéticos de la reacción ($\ln(k)$ y M) específicos para el material en estudio y para la metodología de expansión empleada. Estos parámetros son vinculados con los límites de expansión de la Tabla 1 y se obtiene la reactividad de la muestra (Gowripalan and Sirivivatnanon, 2017; Mangialardi, 2002; Vila et al., 2020; Johnston and Fournier, 2000).

5. CONCLUSIONES

Aplicando las metodologías de ensayo de expansión en barras de mortero (AMBT) y en prisma de hormigón (CPT-60 y CPT-38) en 19 muestras de agregado de diferentes rocas empleadas para producir hormigón en Uruguay y adoptando los límites para definir el grado de reactividad existentes en la normativa internacional, se puede concluir:

- considerando la expansión a 14 días en el AMBT, ocho muestras (42%) no resultaron con el mismo grado de reactividad que en la metodología tradicional del prisma de hormigón CPT-38 (52 semanas de ensayo). Adoptando la expansión a 28 días, diez resultados no coincidieron (53 % de las muestras). Entre estos se encontraron muestras de granito (con presencia de Qz/mc y Qz/t) y muestras de basalto (con presencia de Vv). Por lo tanto, aunque la metodología de la barra de mortero es la más reconocida para evaluar la potencialidad reactiva del agregado, se observaron importantes limitaciones de su uso con esta finalidad.
- Considerando la expansión en CPT-60, seis muestras arrojaron resultados no coincidentes con la metodología tradicional (32 % de las muestras). Todas estas muestras presentaron cuarzo microcristalino (Qz/m) y cuarzo tensionado (Qz/t). Se observó buena correlación entre la expansión obtenida por ambas metodologías en hormigón. Sin embargo, se deberá contar con mayor número de datos para analizar si el límite de 0,08 % en CPT-60 a 13 semanas para los agregados con presencia de cuarzo microcristalino o tensionado se correlaciona con el límite de 0,04 % en CPT-38 a 52 semanas.
- Dada la correlación entre la expansión de ambas metodologías del prisma de hormigón y el tiempo necesario de evaluación de cada una (13 semanas vs 52 semanas) se sugiere el empleo de la metodología acelerada en hormigón para definir el grado de reactividad del agregado. Sin embargo, por lo anteriormente expuesto, se deberá profundizar en el límite de expansión en los agregados con presencia de cuarzo reactivo para disminuir los resultados erróneos de esta metodología.

Las conclusiones aplican a los materiales uruguayos utilizados en este trabajo. Por lo tanto, su extrapolación a otras condiciones debe ser analizada cuidadosamente.

6. 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 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”.

7. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). *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*.
- ASTM International. (2014). *ASTM C 1260: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*. <http://doi.org/10.1520/C1260-07>
- ASTM International. (2019). *ASTM C 295: Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*. <http://doi.org/10.1520/C0295-08>
- ASTM International. (2020). *ASTM C 1778: Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction*. <http://doi.org/10.1520/C1778-22>
- Falcone, D y Milanesi, C. (2012). *Método acelerado del prisma de hormigón. evaluación de la ras con agregados de diversas regiones de la Argentina*. V Congreso Internacional - 19º Reunión técnica de la AATH.
- Fanijo, E., Kolawole, J., y Almakrab, A. (2021). *Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States*. Case Studies in Construction Materials. n° 15. <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00563>
- Fournier, B., Bérubé, M.-A., Folliard, K., y Thomas, M. (2010). *Report on the diagnosis, prognosis and mitigation of ASR in transportation structures*. Federal Highway Administration.
- Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Fournier, B., and Thomas, M. (2005). *Preventing ASR/DEF in New Concrete: Final Report*.
- Giovambattista, A., Zerbino, R., Giaccio, G., Fava, C., Milanesi, C., Traversa, L., Iloro, F. (2020). *Bases de un código modelo para la tecnología de las obras de hormigón: Anales LEMIT, Serie IV, año 6, n° 13*. (L. Tecnológica, Ed.) La Plata, Argentina. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/11068>
- Godart, B., De Rooij, M., y Wood, J. (2013). *RILEM State-of-the-Art Reports Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures*. <http://www.springer.com/series/8780>
- Gowripalan, N., y Sirivivatnanon, V. (2017). *Kinetic based approach for Alkali Silica Reaction- Comparison of laboratory and field tests Fibre Optic sensors for bridge monitoring View project Applications of FRP mesh as reinforcement View project*. <https://www.researchgate.net/publication/320620011>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1674: Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero*. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). *IRAM 1512. Agregado fino para hormigón de cemento*. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). *IRAM 1700: Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2016). *IRAM 1531: Agregado grueso para hormigón de cemento Pórtland*. Buenos Aires.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2005). *UNIT 1050:2005. Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado*. Montevideo, Uruguay.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2017). *UNIT 20: Cementos pórtland para uso general - Definiciones y requisitos*. Montevideo, Uruguay.
- Johnston, D., y Fournier, B. (2000). *A kinetic-based method for interpreting accelerated mortar bar test (ASTM C1260) data*. 11th ICAAR:355-364.
- Madsen, L., Falcone, D., Locati, F., Marfil, S., y Rocco, C. (2018). *Estudio de barras de mortero y prismas de hormigón elaborados con basaltos de la provincia de corrientes*. VIII Congreso Internacional - 22a Reunión técnica de la AATH, págs. 211-218.

- Mangialardi, T. (2002). *Reconsideration of ASTM C1260 test results in the light of a recent kinetic model*. Advances in Cement Research. 14(2):51-60.
- Marfil, P., Falcone, D., Locati, F., y Marfil, S. (2018). *Evaluación de la potencialidad reactiva de agregados pétreos de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires*. VIII Congreso Internacional - 22a Reunión técnica de la AATH:211-218.
- Méndez, E. (2019). *Estrategia integral de prevención de la reacción árido-álcali*. (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ed.) Gobierno de España. <https://editorial.csic.es/publicaciones/libros/13219/978-84-00-10516-7/estrategia-integral-de-prevencion-de-la-reaccion-a.html>
- Nixon, P., y Sims, I. (2016). *RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures* (Vol. 17). <http://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5>
- Sims, I., y Poole, A. (2017). *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World review*.
- Torres, A. (2014). *Estudio Experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Veroslavsky Barbe, G., Ubilla Gutierrez, M., y Martinez Chiappara, S. (2004a). *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales: Mesozoico*. Montevideo, Uruguay.
- Veroslavsky Barbe, G., Ubilla Gutierrez, M., y Martinez Chiappara, S. (2004b). *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales: Cenozoico*. Montevideo, Uruguay.
- Vila, P., Bonjour, H., y Pereyra, M. (2020). *Análisis cinético para la interpretación de los resultados de expansión por reacción álcali-sílice en barras de mortero y de hormigón*. IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica, págs. 221-228.