

# H68

Revista HORMIGÓN



ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE TECNOLOGÍA DEL  
**HORMIGÓN**

## Editorial

Estimados socios de la AATH y lectores de la Revista Hormigón,

Este es el número 68 de la revista y la novena edición desde su lanzamiento en formato digital. En este número encontrarán tres artículos. El primer artículo analiza las características microtexturales y mineralógicas de rocas basálticas y riolíticas de varios afloramientos naturales y frentes de canteras de Argentina, con el objetivo de evaluar no solo su potencial reactividad frente a la reacción álcali-sílice (RAS), sino también determinar si existe una relación entre el tipo de arreglo textural y/o grado de alteración de las distintas rocas con su potencial reactivo, más allá del tipo litológico y el origen de las mismas. El segundo artículo, cuyas autoras son uruguayas, analiza las propiedades físico-mecánicas de adoquines producidos en Uruguay, con el fin de generar una base de datos que refleje la producción y contribuya a la actualización de la normativa uruguaya vigente. Finalmente, se presenta un interesante artículo que analiza las ventajas y limitaciones de un nuevo método ensayo acelerado basado en desempeño denominado “Método acelerado del cilindro de hormigón”. Los autores presentan los valores de expansión obtenidos sobre nueve mezclas de hormigón, elaboradas con tres combinaciones de agregados de conocida reactividad frente a la RAS en servicio.

Como es habitual en esta sección compartimos con ustedes algunos datos estadísticos actualizados sobre la actividad de los usuarios en la página web de la revista. Desde su primera publicación online en julio de 2021 se registran visitas desde 86 países, con 41.928 vistas de página (page\_view) y 4.787 descargas de archivos (file\_download). Argentina lidera la lista de países con más usuarios (7249), seguida por España (1639), México (1356), Perú (1173), Estados Unidos (862), Chile (846), Colombia (691), Ecuador (449), Bolivia (440) y Uruguay (328).

Aprovechamos la oportunidad para recordarles que durante todo el año se encuentra abierta la recepción de artículos. Los mismos deberán ajustarse a las normas para autores que obran en la página web de la revista y, una vez recibidos, serán sometidos a evaluación por pares.

Podrán encontrar novedades de la revista en nuestra cuenta en Instagram <https://www.instagram.com/revistahormigon/>.

Esperamos contar con sus contribuciones.

Celeste Torrijos  
Directora de la Revista Hormigón  
(CONICET-LEMIT-UNLP)

Francisco Locati  
Director asociado de la Revista Hormigón  
(CONICET-CICTERRA-UCC)



## SUMARIO

- 5 **Influencia de la textura y mineralogía de rocas volcánicas de la región mesopotámica, patagónica y sur de Mendoza en su potencial comportamiento reactivo**

P. Arias, L. Madsen y F. D. Bianchi

- 23 **Propiedades físico-mecánicas de adoquines de hormigón producidos en Uruguay**

P. Vila y M. N. Pereyra

- 46 **Método acelerado del cilindro de hormigón. Evaluación del comportamiento de mezclas de obra frente a la reacción álcali-sílice**

C. Milanesi, S. Orlando, F. Pastrengo, M. Rearte, D. Falcone, C. N. Bournod y S. A. Marfil

### Dirección de la Revista

Corrientes 2438 - 4º Piso - Oficina 4  
(C1046AAP).

Ciudad Autónoma de Buenos Aires –  
República Argentina.

[www.aath.org.ar](http://www.aath.org.ar)

Entidad con personería jurídica  
Nº 05005/81

### Contacto:

[revistahormigon@gmail.com](mailto:revistahormigon@gmail.com)

Foto de portada: Medición de la expansión de cilindro de hormigón en el “Método acelerado del cilindro de hormigón” (Gentileza Mg. Ing. Darío Falcone).

Los artículos son publicados con la sola responsabilidad de los autores. La Dirección no se solidariza con las opiniones vertidas en los mismos. Los artículos pueden reproducirse total o parcialmente citando la fuente. Registro Nacional de la Propiedad Intelectual Nº 5.344.085. Propietario: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.

La revista solicita a los autores la obligatoriedad de requerir los datos respaldatorios de las investigaciones y su depósito de acuerdo a la Ley Nº 26899, Repositorios Digitales Institucionales de Acceso Abierto.

## Equipo Editorial revista Hormigón

### **Directora**

TORRIJOS, María Celeste

### **Director Asociado**

LOCATI, Francisco

### **Secretaria General**

MARTÍNEZ, Graciela Armenia

### **Comité Editorial**

CORALLO, Patricio

CUENCA ASENSIO, Estefanía

GIACCIO, Graciela

MARFIL, Silvina

MILANESI, Carlos

RAGGIOTTI, Belén

RAHHAL, Viviana

VILLAGRÁN, Yury

## Comisión Directiva AATH

### **Presidente**

RAHHAL, Viviana (Período 2023-2025)

### **Vicepresidente**

STUMPF, Pablo (Período 2024-2026)

### **Secretario**

BÁLZAMO, Humberto (Período 2024-2026)

### **Secretario de Actas**

POSITIERI, María Josefina (Período 2023-2025)

### **Tesorero**

FORNASIER, Gastón (Período 2023-2025)

### **Protesorero**

ROSSETTI, Agustín (Período 2024-2026)

### **Vocal Titular 1°**

ZEGA, Claudio Javier (Período 2023-2025)

### **Vocal Titular 2°**

ORLANDO, Sebastián (Período 2024-2026)

### **Vocal Titular 3°**

PRIANO, Carla (Período 2023-2025)

### **Vocal Titular 4°**

RAUTENBERG, Dayana (Período 2024-2026)

### **Vocal Suplente 1°**

FERNANDEZ, Lelis René (período 2024-2026)

### **Vocal Suplente 2°**

ESPELET, Alejandra (Período 2023-2025)

### **Revisor de cuentas 1°**

BENITEZ, Graciela Alejandra (Período 2024-2025)

### **Revisor de cuentas 2°**

FESTA, Daniela (Período 2024-2025)



## COMISIONES INTERNAS AATH

### BOLETÍN DE NOVEDADES

*Director Editorial*

ZERBINO, Raúl

*Editor Ejecutivo*

BOURNOD, Constanza

### CURSOS y SEMINARIOS

*La Comisión está integrada por:*

CÓRDOBA, Gisela

ORLANDO, Sebastián

PRIANO, Carla

ROSSETTI, Agustín

### COMUNICACIÓN

*La Comisión está integrada por:*

CABRERA, Oscar

STUMPF, Pablo

ZEGA, Claudio

### LIBROS

*La Comisión está integrada por:*

ZERBINO, Raúl

CARRASCO, María Fernanda

POSITIERI, María Josefina

## Influencia de la textura y mineralogía de rocas volcánicas de la región mesopotámica, patagónica y sur de Mendoza en su potencial comportamiento reactivo

P. Arias<sup>a\*</sup>, L. Madsen<sup>a,b</sup>, F. D. Bianchi<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional del Sur (UNS), Departamento de Geología, CP 8000, Bahía Blanca, Argentina, [ariaspatricia124@gmail.com](mailto:ariaspatricia124@gmail.com)

<sup>b</sup>Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA, CIC-UNS), CP 8000, Bahía Blanca, Argentina. [lenis.madsen@uns.edu.ar](mailto:lenis.madsen@uns.edu.ar)

<sup>c</sup>Instituto Geológico del Sur (INGEOSUR, CONICET-UNS). [fdbianchi@ingeosur-conicet.gob.ar](mailto:fdbianchi@ingeosur-conicet.gob.ar)

Recibido: 18 de diciembre de 2024

Aceptado: 15 de abril de 2025

### RESUMEN

En Argentina numerosos afloramientos de rocas volcánicas ácidas y básicas son utilizados como fuente de agregados pétreos para hormigón. Si bien sus características físico-mecánicas permiten su uso como agregado, al ser rocas de origen volcánico pueden contener materiales potencialmente reactivos susceptibles a la reacción álcali-sílice. La variación textural y mineralógica, la composición y paragénesis mineral, así como los minerales secundarios presentes, son factores indispensables a ser evaluados para predecir el comportamiento en obra de estos agregados. La mayoría de las rocas estudiadas resultan ser potencialmente reactivas desde el punto de vista petrográfico, debido a la presencia de vidrio fresco o parcialmente desvitrificado, arcillas y sílice amorfa. Los basaltos mostraron reactividad variable, desde nula a extrema, mientras que las riolitas presentan reactividad moderada. Complementariamente, para las mismas muestras se recopilieron datos bibliográficos y de ensayos físicos normalizados, para evaluar el comportamiento en el mortero y/o en el hormigón en obra.

**PALABRAS CLAVE:** Vulcanitas, reacción álcali-sílice, análisis petrográfico

### ABSTRACT

Numerous outcrops of basic and acidic volcanic rocks from Argentina are used as a source of concrete aggregates. Although their physical-mechanical properties make them suitable for use as aggregates, they may contain potentially reactive materials sensitive to the alkali-silica reaction due to their volcanic nature. The textural or mineralogical variation, mineral composition and paragenesis, as well as the secondary minerals, are essential factors to be evaluated in order to predict the aggregate behaviour in construction. Most of the rocks studied are potentially reactive from a petrographic point of view, due to the presence in the groundmass of fresh or partially devitrified glass, clays and amorphous silica. The basalts show variable reactivity, ranging from zero to extremely reactive, while the rhyolites show moderate reactivity. In addition, in order to evaluate their behaviour in mortar and/or concrete, data were collected from standardized physical tests and bibliographies belonging to the same samples studied.

**KEYWORDS:** Vulcanites, alkali-silica reaction, petrographic analysis

\*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Arias, P., Madsen, L., y Bianchi, F. D. (2025). Influencia de la textura y mineralogía de rocas volcánicas de la región mesopotámica, patagónica y sur de Mendoza en su potencial comportamiento reactivo. *Revista Hormigón*, 68, 5–22. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/f7wcfaaal>

## 1. Introducción

Las rocas volcánicas basálticas y riolíticas cubren grandes extensiones en diferentes regiones de Argentina, dentro de las cuales se destacan los basaltos de la meseta de Somuncurá en la Patagonia, los basaltos toleíticos de la Mesopotamia y las riolitas de las provincias de Río Negro y Chubut. Si bien por sus características físico-mecánicas son rocas aptas para ser usadas como agregados para hormigón, pueden contener especies mineralógicas que las tornen potencialmente reactivas frente a los álcalis [1], tales como vidrio volcánico (fresco o alterado, principalmente a minerales arcillosos) y sílice micro y/o criptocristalina (ópalo, tridimita, cristobalita y cuarzo secundario) [2]. Estos componentes pueden combinarse bajo ciertas condiciones de humedad (y temperatura) con los hidróxidos alcalinos ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) presentes en la solución de poro de morteros y hormigones, dando lugar a la formación de un gel de características expansivas, el cual genera efectos nocivos en las estructuras dando lugar al proceso denominado reacción álcali-sílice (RAS) [3-4].

A su vez, tanto la información geológica como el origen del agregado deben ser contemplados ya que existen rocas que, aunque comparten una misma génesis y ubicación geográfica, difieren en su comportamiento cuando son utilizadas como agregado para hormigón. Por tal motivo también debe evaluarse, por ejemplo, la incidencia de los minerales secundarios producto de la alteración de la paragénesis inicial [5].

Según la norma IRAM 1531 [6], rocas como riolitas y basaltos pueden presentar constituyentes potencialmente reactivos frente a los álcalis, tales como: vidrio intersticial en la pasta de la roca (fresco o desvitrificado), cristobalita/tridimita, venillas o vesículas rellenas de ópalo o calcedonia (sílice microcristalina/criptocristalina) y, en el caso de las riolitas, además puede identificarse cuarzo micro o criptocristalino. A su vez, en rocas

basálticas, es común la presencia de arcillas del grupo de las esmectitas, considerada como una sustancia perjudicial, capaz de afectar la vida útil de las estructuras, por lo cual su identificación y cuantificación es relevante. Por ello, el examen petrográfico es el primer método a aplicar en la caracterización de un agregado para definir su potencial reactividad ante la RAS.

Por otra parte, la identificación y cuantificación de sustancias reactivas y perjudiciales mediante la norma IRAM 1649 [7], permite determinar los métodos de ensayos más convenientes para evaluar el comportamiento del agregado, como así también interpretar los resultados obtenidos mediante los ensayos físicos establecidos en las normas IRAM 1674 e IRAM 1700 [8-9], dependiendo si los componentes reactivos identificados mediante la petrografía son considerados de reacción rápida (sílice pobremente cristalizada como ópalo, tridimita, cristobalita o el vidrio volcánico) o lenta (cuarzo microcristalino, fuertemente tensionado o deformado). En caso de discrepancia entre los resultados obtenidos por la petrografía y por los ensayos físicos, se deben optar como válidos los resultados obtenidos con el método convencional del prisma de hormigón [6]. Finalmente, si el agregado resulta potencialmente reactivo, sólo puede utilizarse si se toman medidas preventivas (prestacionales o prescriptivas) indicadas en la norma IRAM 1531 [6].

En el presente trabajo se realizó un análisis de las características microtexturales y mineralógicas de rocas basálticas y riolíticas de varios afloramientos naturales y frentes de canteras de Argentina, con el objetivo de evaluar no solo su potencial reactividad frente a la RAS, sino también determinar si existe una relación entre el tipo de arreglo textural y/o grado de alteración de las distintas rocas con su potencial reactivo, más allá del tipo litológico (basalto/riolita) y el origen de las mismas.

Los estudios petrográfico-mineralógicos se llevaron a cabo en función de las normativas

vigentes (IRAM 1531 [6], IRAM 1649 [7]). Complementariamente, se recopilaron datos de ensayos físicos normalizados (método acelerado de barra de mortero según IRAM 1674 [8] y método del prisma de hormigón según IRAM 1700 [9]) y registros bibliográficos de comportamiento de agregados en obras, para evaluar la incidencia del uso de dichos agregados, y poder así estudiar a las rocas de forma integral.

### *1.1. Antecedentes de rocas basálticas y riolíticas como agregados en hormigón*

Cuando se utilizan agregados basálticos en el hormigón hay que tener en cuenta dos factores asociados a la RAS: en primer lugar, la variación textural y mineralógica en conjunto con la composición y paragénesis mineral; y, en segundo lugar, la naturaleza de los minerales secundarios que derivan de la alteración de la paragénesis inicial [10].

Diversos autores [1,5,11-13] evaluaron el comportamiento frente a la RAS de rocas basálticas provenientes de diferentes canteras en la Mesopotamia (Argentina), a quienes el estudio petrográfico les permitió concluir que la principal causa del comportamiento deletéreo correspondía a la presencia de vidrio volcánico (fresco o alterado a minerales arcillosos) y sílice micro y/o criptocristalina (ópalo, tridimita, cristobalita, cuarzo secundario). Sobre el mismo tipo de rocas, los autores evaluaron su potencial reactividad mediante el ensayo del prisma de hormigón (norma IRAM 1700 [9]), concluyendo que los que presentaron mayor expansión fueron los hormigones realizados con los agregados basálticos de textura más fina. Esto se debe a que los espacios intersticiales en rocas con textura fina están ocupados por vidrio relíctico original, mientras que las texturas más gruesas generan espacios intercristalinos de mayor tamaño donde se alojan microcristales de composición semejante a su entorno. Por otro lado, en estudios previos [11,14-15], se analizó el impacto de los minerales arcillosos en estas

rocas mediante ensayos acelerados de barra de mortero. Se encontró que la esmectita, distribuida de manera intersticial en la masa del basalto, al degradarse por el ataque alcalino, libera sílice y álcalis solubles en la solución de poro, favoreciendo el desarrollo de la RAS.

Agregados provenientes de Río Negro, Chubut, Neuquén y Mendoza, fueron objeto de numerosos estudios [11,16-21] demostrando que la mayoría de las rocas, tanto de composición basáltica como riolítica, son potencialmente reactivas frente a los álcalis. Los métodos petrográficos y físicos, más específicamente el método acelerado de la barra de mortero según la norma IRAM 1674 [8] para evaluar la potencial reactividad, permitieron concluir que las principales causas del comportamiento deletéreo son la presencia de vidrio volcánico (tanto fresco como alterado a minerales arcillosos del grupo de la montmorillonita), la argilización de la roca y la presencia de sílice micro y/o criptocristalina (ópalo, tridimita, cristobalita y cuarzo secundario de grano fino). En trabajos previos, Tiecher et al. [22], al estudiar diferentes tipos de mesostasis presentes en basaltos y riolitas, concluyeron que la composición y distribución de la pasta en la roca son los principales factores que potencian la reactividad en una roca volcánica, no así la proporción de pasta frente a la de fenocristales.

Por otra parte, en otros estudios [23-24] fue evaluada la potencial reactividad de riolitas y tobas provenientes de Río Negro y Chubut. De estas investigaciones se concluyó que aquellas rocas cristalinas con pastas de grano grueso resultaron ser inocuas, mientras que aquellas que presentan pastas vítreas, sílice microcristalina y minerales arcillosos, evidenciaron efectos deletéreos frente a la RAS. Estos autores además concluyeron que este comportamiento es atribuible a la variación en el contenido de vidrio volcánico, la textura, el tamaño de grano y el grado de alteración de cada roca. También mencionan que si bien se detectan procesos de alteración



a minerales arcillosos es importante identificarlos, ya que la presencia de montmorillonita puede ser muy perjudicial desde el punto de vista expansivo.

## 2. Materiales

Los ejemplares estudiados provienen de muestras de agregados de distintos frentes de canteras o afloramientos y representan el volcanismo básico y ácido del Mesozoico y Cenozoico ocurrido en la Mesopotamia, sur de Mendoza y Patagonia Argentina. Estas muestras se asociaron en 21 grupos (15 de basaltos y 6 de riolitas) según el tipo de roca y su procedencia. Del total de las secciones analizadas, 18 corresponden a la Formación Serra Geral (Mesopotamia), provenientes de 5 canteras; 2 pertenecen a los afloramientos de la Formación El Puente (Mendoza), 2 al Basalto Zapala (Neuquén), 11 a la Formación Somuncurá y Basalto Coli Toro en Río Negro; y 7 asignados a la Formación Marifil (Río Negro y Chubut) (Figura 1).

### 2.1 Descripción geológica de las muestras analizadas

Considerando el total de muestras analizadas en orden cronológico, en aquellas provenientes de las provincias de Río Negro y Chubut se encuentra representado ampliamente el volcanismo Mesozoico. Gran parte de estas efusiones de carácter riolítico se originaron a inicios del Triásico superior – Jurásico medio. Estos afloramientos se agrupan bajo la denominación de Complejo Volcánico Marifil o Formación Marifil [25-27], y están conformados por facies piroclásticas, lavas y rocas hipabisales.

Grandes depósitos de rocas ígneas básicas asignadas a la Formación Serra Geral [28] (Cretácico), se hallan ubicadas en la Mesopotamia Argentina. Esta región

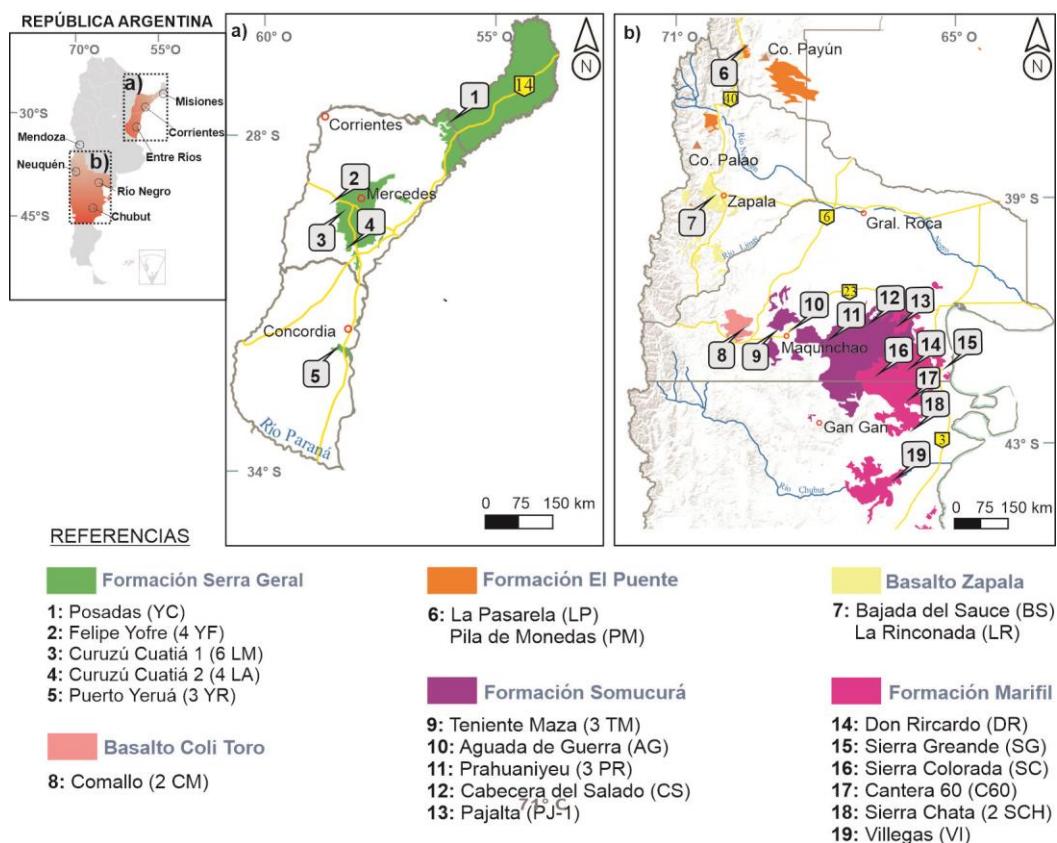
geográfica a su vez forma parte de la cuenca volcano-sedimentaria de Paraná, expuesta en Brasil, Paraguay y Uruguay, ocupando una superficie mayor a 1.400.000 km<sup>2</sup> con una columna estratigráfica que puede superar los 7000 m de espesor [29]. Estas rocas son basaltos toleíticos de intraplaca con textura dominante de grano fino, mayormente compactos y con tonalidades gris oscura a negra [30].

Por otra parte, grandes eventos máficos volcánicos se han desarrollado desde el Paleoceno caracterizando a la Patagonia Argentina como una de las más grandes regiones magmáticas continentales. En el Oligoceno superior – Pleistoceno, se originaron los derrames basálticos que conforman la meseta de Coli Toro en Río Negro. El basalto homónimo se extiende al oeste de la meseta de Somuncurá en las proximidades de la localidad de Maquinchao. Son coladas delgadas, de aspecto masivo, con textura intergranular a pilotáctica, y fenocristales de labradorita (plagioclasa) y olivino [31,32].

La meseta basáltica de Somuncurá aflora en el sur de Río Negro y norte de Chubut, y es la expresión volcánica cenozoica más extensa de la región, abarcando más de 30.000 km<sup>2</sup>. Se origina con una primera fase en el Oligoceno [33] con efusión de basaltos olivínicos alcalinos [34] adjudicados a la Formación Somuncurá [35]. Se caracterizan por su homogeneidad composicional, tienen color gris, son porfíricos o afíricos y presentan estructura vesicular y amigdaloides [36].

El volcanismo Plioceno de la región patagónica se encuentra representado por el campo lávico de Zapala, ubicado al oeste de la localidad homónima en la provincia de Neuquén. Se dispone como mantos de basaltos olivínicos subhorizontales de tonalidades grises con textura de grano fino [37].

Durante el Cuaternario se desarrolló un intenso volcanismo de basaltos alcalinos agrupados en



**Figura 1.** Mapa regional de ubicación de los afloramientos de rocas básicas y ácidas estudiadas. Se incluye la nomenclatura de cada muestra y sitio de muestreo. a) Región Mesopotámica, b) Región Patagónica y Sur de Mendoza.

el Campo Volcánico Payún Matrú [38-39]. La Formación El Puente [40] representa las primeras coladas basálticas emitidas posteriormente al colapso de la caldera Payún Matrú. Aflora al norte de Neuquén cerca del Cerro Palao y al sur de Mendoza, en las inmediaciones del Cerro Payún [41]. Se trata de basaltos piroxénico - olivínicos, con pasta intergranular, vesiculares y de color gris oscuro. Se le atribuye una edad desde el Pleistoceno medio a superior [42].

### 3. Métodos

Se analizó la composición mineralógica, texturas, moda mineral y grado de alteración de 40 secciones delgadas mediante un microscopio de polarización Leica DM 750P, equipado con cámara y sistema de captura de

imágenes para la toma de fotomicrografías. Las clasificaciones modales se establecieron mediante el diagrama para rocas volcánicas de Streckeisen [43] y LeMaitre [44], propuestos por la International Union of Geological Sciences (IUGS). El método clasificatorio se basa en el porcentaje en volumen de cada mineral (moda) estimado a partir del área observada microscópicamente en cada sección delgada, principalmente de cuarzo (Q), plagioclasa (P) y feldespatos alcalinos (F) en aquellas muestras que presentan un grado de alteración nulo a leve. En las descripciones y comentarios se utilizaron las abreviaturas minerales propuestas por Siivola y Schmid [45].

Para evaluar la reactividad se tuvieron en cuenta las consideraciones de la norma IRAM 1531 [6] vigente desde 2022, así como también los límites establecidos en la versión

del año 2012. Si bien la norma actual ya no cuantifica los componentes o sustancias deletéreas, en este trabajo se hizo la cuantificación modal y la estimación de los minerales/materiales potencialmente reactivos mediante el método Gazzi-Dickinson [46] basado en el conteo de puntos en intervalos de 1 mm sobre toda el área de la sección delgada para determinar la incidencia de los materiales deletéreos en el comportamiento de la roca. A su vez, se hizo hincapié en las texturas y grado de alteración de cada una a fin de establecer si existe correlación con el grado de reactividad.

## 4. Resultados

### 4.1 Estudios petrográficos

En la Tabla 1, se resumen las características de las rocas basálticas estudiadas, detallando la asociación mineral y los componentes reactivos identificados. Se incluye el tamaño promedio de los minerales que conforman la roca y la presencia de estructuras vesiculares. Según la clasificación de Streckeisen (1978) [43], las muestras analizadas en este apartado corresponden a basaltos (P = 100 %) ya que carecen de cuarzo (Q), feldespatos alcalinos (A) y feldespatoideos (F), y los minerales máficos son predominantemente piroxeno y olivino.

En general, en los 15 grupos de basaltos analizados se reconoce bajo microscopio una asociación mineral de plagioclasa cálcica (84 % - 48 %), clinopiroxeno (5 % - 39 %), olivino (10 % - 27 %), minerales opacos (4 % - 15 %) y otros minerales accesorios, principalmente apatito en escasa proporción (<1 % - 2 %).

Los basaltos mesopotámicos presentan moderada a fuerte alteración, y se caracterizan por texturas intersetales (Figura 2A) a intergranulares, ocasionalmente porfírica (Figura 2B). Se destacan por la presencia de estructuras vesiculares y fisuras rellenas con arcillas (Figura 2C), material clástico silíceo (Figura 2D), sílice criptocristalina y calcedonia.

Eventualmente, en las muestras de la cantera Felipe Yofre (YF) se identificó intercrecimiento de cuarzo y feldespato alcalino (Qtz+Kfs) (Figura 2E). Petrográficamente, todas las muestras presentan componentes potencialmente reactivos.

En los basaltos patagónicos y los del sur de Mendoza, el grado de alteración es menor, incluso se identificaron ejemplares frescos, que corresponden a los basaltos Zapala y Coli Toro. Las texturas predominantes son del tipo porfíricas, con pastas intergranulares (Figura 2F), microlíticas, pilotáxicas (Figura 2G) y criptocristalinas. En general, el vidrio volcánico se reconoce parcialmente desvitrificado en los intersticios entre los silicatos y en ocasiones fresco. Como producto de la alteración del vidrio suelen reconocerse en estos mismos sectores agregados criptocristalinos de baja birrefringencia y/o arcillas del tipo montmorillonita. A excepción de las muestras del Basalto Zapala y Coli Toro, y PM de la Formación El Puente, todos los basaltos presentan componentes potencialmente reactivos.

En el caso de las rocas ácidas, según el diagrama QAP de Streckeisen (1978) [43], la totalidad de las muestras analizadas corresponden a fenoriotitas y fenoriotitas alcalifeldespáticas al clasificarlas en función a su moda mineral. En la Tabla 2 se resumen las asociaciones minerales y características petrográficas desde el punto de vista de su reactividad alcalina potencial.

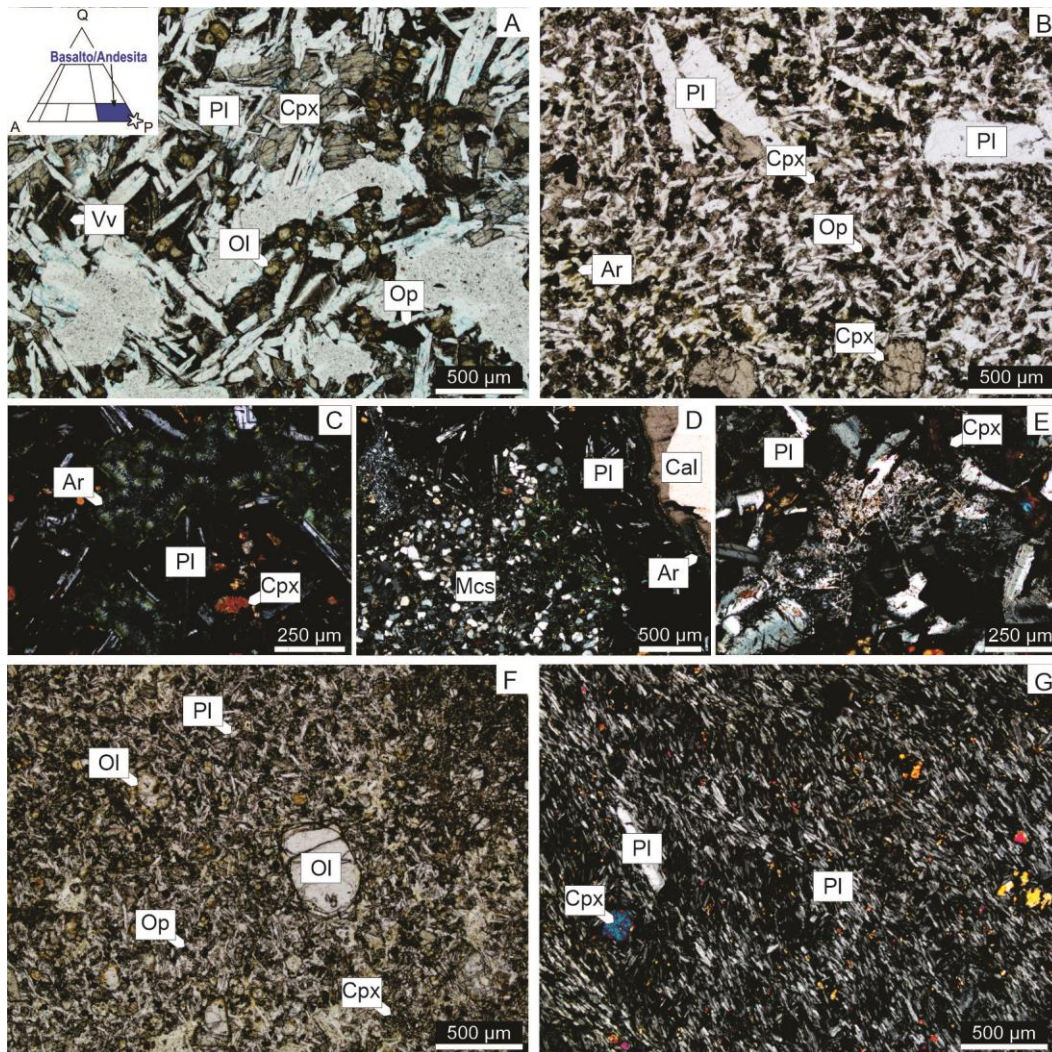
Microscópicamente, se reconoció una asociación mineral compuesta por cristales de feldespato potásico (37 % - 73 %), cuarzo (20 % - 39 %), plagioclasa (4 % - 19 %), biotita (3 % - 7 %), minerales opacos (1 % - 3 %), otros accesorios en proporciones menores al 1 % (circón) y ocasionalmente cristales de hornblenda. Las rocas riolíticas analizadas presentan textura porfírica con pasta microfelsítica, y en raras ocasiones felsítica (Figura 3A y 3B, respectivamente). Es habitual la presencia de cuarzo microcristalino con tamaño promedio ~60 µm (Figura 3C).

**Tabla 1.** Características de las rocas basálticas en función a la reactividad alcalina potencial.  
 Pl: plagioclasa, Cpx: clinopiroxeno, Ol: olivino, Op: minerales opacos, Acc: minerales accesorios,  
 Vv: vidrio volcánico, Ar: arcillas, Qtz: cuarzo, Qtzm: cuarzo microcristalino, Kfs: feldespato alcalino,  
 Mcs: material clástico silíceo, Ccd: calcedonia, Sc: sílice criptocristalina. n.v.: no observado. PR:  
 Potencialmente Reactivo, NR: No Reactivo.

| Ubicación                        | Muestra              | Textura predominante                             | Grado de alteración | Asociación mineral | MPR <sup>1</sup> (%) |              | SN <sup>2</sup> (%) | V <sup>3</sup> | Tamaño promedio (μm) | Clas. <sup>4</sup> |
|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------|--------------------|
|                                  |                      |                                                  |                     |                    | Vv                   | Otros        | Ar                  |                |                      |                    |
| Mesopotamia<br>(Fm. Serra Geral) | Posadas (YC)         | Intersertal                                      | Moderado            |                    | ~4                   | n.v.         | ~5                  | No             | 508                  | PR                 |
|                                  | Felipe Yofre (YF)    | Intersertal                                      | Moderado a fuerte   |                    | ~2                   | Qtz+Kfs      | ~5                  | Si             | 300                  | PR                 |
|                                  | Curuzú Cuatiá 1 (LM) | Intergranular a intersertal                      | Moderado a fuerte   | Pl+Cpx+Op+Acc      | ~2                   | Qtzm         | ~3                  | Si             | 270                  | PR                 |
|                                  | Curuzú Cuatiá 2 (LA) | Intergranular a intersertal                      | Moderado            |                    | ~2                   | Mcs          | ~3                  | Si             | 512                  | PR                 |
|                                  | Puerto Yerúa (YR)    | Intergranular a intersertal                      | Moderado            |                    | ~2                   | Mcs, Ccd, Sc | ~3                  | Si             | 633                  | PR                 |
| Mendoza<br>(Fm. El Puente)       | PM                   | Porfírica con pasta pilotáxica                   | Moderado            | Pl+Op+Cpx+Acc      | n.v.                 | n.v.         | ~4                  | No             | 229                  | NR                 |
|                                  | LP                   | Porfírica con pasta microlítica                  | Moderado            | Pl+Ol+Op+Acc       | ~1                   | n.v.         | n.v.                | No             | 243                  | PR                 |
| Neuquén<br>(Basalto Zapala)      | LR                   | Porfírica con pasta intergranular                | Nulo                | Pl+Cpx+Ol+Op+Acc   | n.v.                 | n.v.         | n.v.                | No             | 135                  | NR                 |
|                                  | BS                   | Intergranular                                    | Nulo                |                    | n.v.                 | n.v.         | n.v.                | No             | 439                  | NR                 |
| Río Negro<br>(Basalto Cólí Toro) | CM                   | Porfírica con pasta intergranular                | Nulo                | Pl+Cpx+Ol+Op+Acc   | n.v.                 | n.v.         | n.v.                | No             | 295                  | NR                 |
| Río Negro<br>(Fm. Somuncurá)     | CS                   | Porfírica con pasta criptocristalina             | Leve a moderado     | Pl+Ol+Cpx+Op+Acc   | ~4                   | n.v.         | n.v.                | No             | 494                  | PR                 |
|                                  | AG                   | Intersertal                                      | Leve a moderado     | Pl+Cpx+Ol+Op+Acc   | ~3                   | n.v.         | ~4                  | No             | 509                  | PR                 |
|                                  | TM                   | Intersertal                                      | Leve a moderado     | Pl+Ol+Cpx+Op+Acc   | ~5                   | n.v.         | n.v.                | Si             | 383                  | PR                 |
|                                  | PR                   | Porfírica con pasta microlítica/criptocristalina | Leve a moderado     | Pl+Ol+Cpx+Op+Acc   | ~1                   | n.v.         | ~1                  | No             | 390                  | PR                 |
|                                  | PJ-1                 | Intersertal                                      | Leve a moderado     | Pl+Ol+Cpx+Op+Acc   | ~5                   | n.v.         | n.v.                | No             | 363                  | PR                 |

<sup>1</sup>MPR: materiales potencialmente reactivos. <sup>2</sup>Sustancias nocivas. <sup>3</sup>Vesículas. <sup>4</sup>Clasificación según petrografía.





**Figura 2.** Fotomicrografías de las principales texturas identificadas y componentes potencialmente reactivos. A) Aspecto general de la textura intersertal conformada por plagioclasa (Pl), olivino (Ol), clinopiroxeno (Cpx), minerales opacos (Op) y vidrio volcánico (Vv). B) Textura porfírica. Fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno rodeados por una pasta intergranular con arcillas (Ar) en los espacios intersticiales. C-D) Estructuras vesiculares rellenas por arcillas esmectíticas, material clástico síliceo (Mcs) y calcita (Cal). E) Intercrecimiento de cuarzo y feldespato alcalino. F) Textura porfírica. Fenocristales de plagioclasa, olivino y clinopiroxeno rodeados por una pasta intergranular conformada por tablillas de plagioclasa, olivino iddingsitizado, clinopiroxeno y minerales opacos. G) Fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno rodeados por una pasta pilotáxica fluidal. En el esquema inserto en A) se muestra la clasificación de todas las muestras en el diagrama QAP.

A, B, F: Luz paralela. C, D, E, G: Analizador intercalado.

El tipo de pasta microfelsítica se interpreta como producto del proceso de desvitrificación parcial del vidrio volcánico presente en la mesostasis de la roca y que no ha llegado a formar una textura felsítica como tal. Por tal motivo, se cuantificó el porcentaje de

mesostasis, para estimar el contenido de vidrio fresco y parcialmente desvitrificado, y de cuarzo microcristalino que conforman la pasta. Eventualmente se observó vidrio volcánico fresco en sectores de la pasta con evidencias de fluidez (Figura 3D).



**Tabla 2.** Características de las rocas riolíticas en función de la reactividad alcalina potencial. Ar: arcillas, Qtzm: cuarzo microcristalino, Vpa: vidrio parcialmente alterado, Vf: vidrio fresco, (\*): límite establecido para el Vv según norma IRAM 1531, del año 2012.

| Ubicación              | Muestra | Textura predominante               | Mesostasis (%) | Grado de alteración | Asociación mineral       | MPR <sup>1</sup> (%) |           | SN <sup>2</sup> (%) | V <sup>3</sup> | Clas. <sup>4</sup> |
|------------------------|---------|------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------------|----------------------|-----------|---------------------|----------------|--------------------|
|                        |         |                                    |                |                     |                          | Vv                   | Otros     |                     |                |                    |
| Río Negro (Fm. Marfil) | SC      | Porfírica con pasta microfelsítica | 85             | Moderado            | Kfs+Qtz+Pl+Bt+Op+Acc     | Vpa                  | Qtzm (~4) | n.v.                | No             | PR                 |
|                        | SG      |                                    | 90             |                     | Kfs+Qtz+Pl+Op+Acc        | Vpa                  | Qtzm (~4) | n.v.                | No             | PR                 |
|                        | DR      |                                    | 90             |                     | Kfs+Qtz+Pl+Hbl+Bt+Op+Acc | Vf (<3)*             | n.v.      | n.v.                | No             | PR                 |
| Chubut (Fm. Marfil)    | C60     | Porfírica con pasta felsítica      | 60             | Moderado            | Kfs+Qtz+Pl+Bt+Op+Acc     | Vf (<3)*             | Qtzm (~4) | n.v.                | No             | PR                 |
|                        | SCH     |                                    | 78             |                     | Kfs+Qtz+Pl+Bt+Op+Acc     | Vpa.                 | Qtzm (~5) | n.v.                | No             | PR                 |
|                        | VI      |                                    | 85             |                     | Kfs+Qtz+Pl+Bt+Op+Acc     | n.v.                 | n.v.      | n.v.                | No             | NR                 |

<sup>1</sup>Materiales potencialmente reactivos. <sup>2</sup>Sustancias nocivas. <sup>3</sup>Vesículas. <sup>4</sup>Clasificación según petrografía.

## 4.2 Ensayos físicos

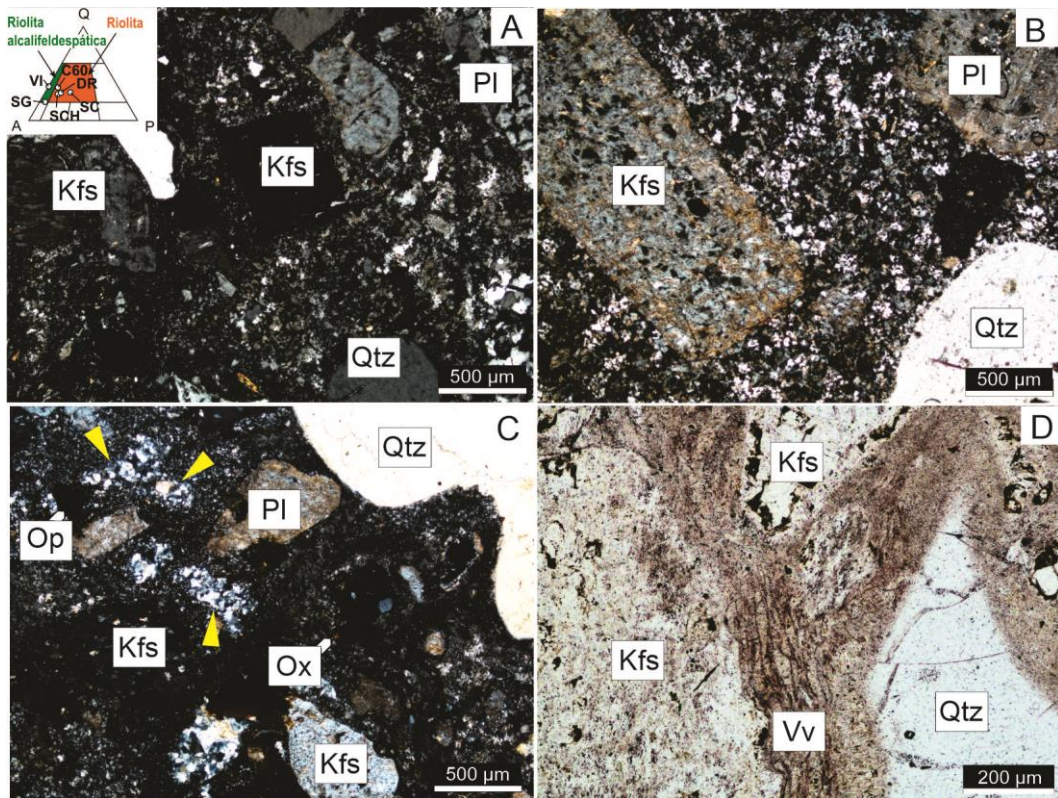
En las Tablas 3 y 4 se observan los valores de expansión registrados para cada cantera / unidad de los basaltos y riolitas, respectivamente, obtenidos mediante recopilación de resultados arrojados en ensayos de barra de mortero según norma IRAM 1674 [8] y ensayos de prisma de hormigón según IRAM 1700 [9], realizados por diversos autores [11,13-15, 19-21, 23-24, 47-48]. A su vez, se determinó el grado de reactividad alcalina del agregado según lo establecido en el Anexo B-Tabla B.1 de la norma IRAM 1531 (2022) [6].

Complementariamente se adjudicó un grado de reactividad alcalina del agregado en función del análisis petrográfico realizado para determinar si existe relación directa con el grado de alteración, textura e identificación y cuantificación de sustancias nocivas y otras sustancias perjudiciales en el agregado. Los agregados sin presencia de materiales potencialmente reactivos se indican en color

verde; en amarillo, los agregados que presentan materiales reactivos en cantidades inferiores a las especificadas por la norma IRAM 1531 (2012); en naranja, aquellos que contienen más de una sustancia reactiva; y en rojo, los que presentan más de dos sustancias reactivas, en cantidades que exceden los límites establecidos por la norma.

## 5. Discusión

Del análisis comparativo entre los ensayos físicos normalizados y el análisis petrográfico, de la Tabla 3 se desprende que los agregados más reactivos se condicen con las texturas de tipo intersertal/intergranular de grano más grueso, como es el caso de las muestras de la región mesopotámica: YC, LA e YR. Estos ejemplares, a su vez presentan los valores más elevados de materiales potencialmente reactivos. Si bien la cantidad de vidrio volcánico relíctico es escasa, la alteración del mismo dio lugar a la formación de agregados



**Figura 3.** A) Aspecto general de la textura porfírica con pasta microfelsítica conformada por feldespato potásico (Kfs), plagioclasa (PI) y cuarzo (Qtz). B) Pasta felsítica compuesta de un agregado equigranular de cuarzo y feldspatos rodeando fenocristales de feldespato potásico (Kfs), plagioclasa (PI) y cuarzo (Qtz). C) Pasta microfelsítica, por sectores afectada por oxidación (Ox) asociada a minerales opacos (Op) y desarrollo de cuarzo microcristalino (flecha amarilla). Fenocristales de plagioclasa (PI) y feldespato potásico (Kfs) pervasivamente alterados. D) Vidrio volcánico fresco (Vv) en un sector de la pasta con evidencia de fluidez rodeando a fenocristales de cuarzo (Qtz) y feldespato potásico (Kfs). En el esquema inserto en A) se muestra la clasificación de todas las muestras en el diagrama QAP. A, B, C: Analizador intercalado. D: Luz paralela.

criptocristalinos y arcillas esmectíticas, contribuyendo al comportamiento deletéreo.

El tamaño promedio medido permite presuponer que el aumento en el tamaño de grano implicaría un mayor espacio intercrystalino donde se alojarían los materiales que promueven la RAS. Sin embargo, Rocco et al. [13] afirman que las texturas más gruesas generan espacios intercrystalinos donde se alojan microcristales de composición semejante a su entorno, registrando expansiones menores en prismas de hormigón convencional. Por lo dicho anteriormente, sin lugar a dudas la presencia de vesículas y fisuras rellenas con sílice criptocristalina, calcedonia y/o material clástico silíceo

registrada en estos agregados es responsable del incremento en el grado de reactividad de estas rocas. Este comportamiento también se evidencia en una muestra vesicular de la Formación Somuncurá (TM) reactiva, clase R2 según la norma IRAM 1674 [8].

Los basaltos que registran moderada reactividad, clase R1 (YF y LM), presentan arreglos texturales similares, pero de grano más fino respecto a los descritos anteriormente, por lo cual los espacios intercrystalinos donde se aloja el vidrio volcánico fresco y alterado a arcillas esmectíticas tendrían menor desarrollo espacial y por lo tanto sería menor la relación entre los cristales y la mesostasis.

**Tabla 3.** Valores de expansión en barras de mortero y prisma de hormigón para cada cantera / unidad.

En rojo (R3): extremadamente reactivo, en naranja (R2): altamente reactivo, en amarillo (R1): moderadamente reactivo y en verde (R0) se presentan los valores que califican al agregado como inocuo. Se incluyen texturas principales, porcentajes relativos de los materiales potencialmente reactivos y/o sustancias perjudiciales, y tamaño promedio de los minerales que conforman la roca. Qtz: cuarzo, Qtzm: cuarzo microcristalino, Kfs: feldespato alcalino, Mcs: material clástico silíceo, Ccd: calcedonia, Sc: sílice criptocristalina. PR: potencialmente reactivo, NR: no reactivo. \*Ensayo convencional de prisma de hormigón (38°C).

| Ubicación                     | Muestra | IRAM 1674 (1997) | Grado de reactividad IRAM 1531 (2022) | IRAM 1700 (2012) * | Grado de reactividad IRAM 1531 (2022) | Clas. <sup>1</sup> | Textura predominante                               | Reactividad debida a la presencia de:                                                                   |
|-------------------------------|---------|------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mesopotamia (Fm. Serra Geral) | YC      | 0,36             | R2                                    | -                  | -                                     | PR                 | Intersertal                                        | Vidrio volcánico (~4) + arcillas (~5)                                                                   |
|                               | YF      | 0,29             | R1                                    | 0,01               | R0                                    | PR                 | Intersertal                                        | Vidrio volcánico (~2) + intercrecimiento de Qtz/Kfs + arcillas (~5)                                     |
|                               | LM      | 0,27             | R1                                    | 0,01               | R0                                    | PR                 | Intergranular a intersertal                        | Vidrio volcánico (~2) + cuarzo microcristalino en vesículas + arcillas (~3)                             |
|                               | LA      | 0,47             | R3                                    | 0,07               | R1                                    | PR                 | Intergranular a intersertal                        | Vidrio volcánico (~2), + material clástico silíceo en vesículas + arcillas (~3)                         |
|                               | YR      | 0,50             | R3                                    | 0,22               | R2                                    | PR                 | Intergranular a intersertal                        | Vidrio volcánico (~2) + material clástico silíceo, calcedonia y sílice criptocristalina + arcillas (~3) |
| Mendoza (Fm. El Puente)       | PM      | 0,01             | R0                                    | -                  | -                                     | NR                 | Porfírica con pasta pilotáxica                     | Arcillas (~4)                                                                                           |
|                               | LP      | 0,11             | R1                                    | -                  | -                                     | PR                 | Porfírica con pasta microlítica                    | Vidrio volcánico (~1)                                                                                   |
| Neuquén (Basalto Zapala)      | LR      | 0,04             | R0                                    | -                  | -                                     | NR                 | Porfírica con pasta intergranular                  | -                                                                                                       |
|                               | BS      | 0,05             | R0                                    | -                  | -                                     | NR                 | Intergranular                                      | -                                                                                                       |
| Río Negro (Basalto Coli Toro) | CM      | 0,05             | R0                                    | -                  | -                                     | NR                 | Porfírica con pasta intergranular                  | -                                                                                                       |
| Río Negro (Fm. Somuncurá)     | CS      | 0,30             | R1                                    | -                  | -                                     | PR                 | Porfírica con pasta criptocristalina               | Vidrio volcánico (~4)                                                                                   |
|                               | AG      | 0,04             | R0                                    | -                  | -                                     | PR                 | Intersertal                                        | Vidrio volcánico (~3) + arcillas (~4)                                                                   |
|                               | TM      | 0,41             | R2                                    | -                  | -                                     | PR                 | Intersertal                                        | Vidrio volcánico (~5)                                                                                   |
|                               | PR      | 0,67             | R3                                    | -                  | -                                     | PR                 | Porfírica con pasta microlítica / criptocristalina | Vidrio volcánico (~1) + arcillas (~1)                                                                   |
|                               | PJ-1    | 0,09             | R0                                    | -                  | -                                     | PR                 | Intersertal                                        | Vidrio volcánico (~5)                                                                                   |

<sup>1</sup>Clasificación según petrografía.

**Tabla 4.** Valores de expansión en barras de mortero para las rocas ácidas. En amarillo (R1): moderadamente reactivo y en verde (R0): inocuo. Qtzm: cuarzo microcristalino.

| Ubicación               | Muestra | IRAM 1674 (1997) | Grado de reactividad IRAM 531 (2022) | Clas. <sup>1</sup> | Textura predominante               | Reactividad debida a la presencia de:                                |
|-------------------------|---------|------------------|--------------------------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Río Negro<br>Fm. Marfil | SC      | 0,04             | R0                                   | PR                 | Porfírica con pasta microfelsítica | Vidrio volcánico parcialmente alterado + cuarzo microcristalino (~4) |
|                         | SG      | 0,13             | R1                                   | PR                 |                                    | Vidrio volcánico parcialmente alterado + cuarzo microcristalino (~4) |
|                         | DR      | 0,14             | R1                                   | PR                 |                                    | Vidrio volcánico fresco (<3)                                         |
| Chubut<br>Fm. Marfil    | C60     | 0,12             | R1                                   | PR                 | Porfírica con pasta felsítica      | Vidrio volcánico fresco (<3) + cuarzo microcristalino (~4)           |
|                         | SCH     | 0,17             | R1                                   | PR                 |                                    | Cuarzo microcristalino (~5)                                          |
|                         | VI      | 0,03             | R0                                   | NR                 |                                    | -                                                                    |

<sup>1</sup>Clasificación según petrografía.

En estos ejemplares se vuelve a corroborar que el desarrollo de vesículas rellenas parcialmente con cuarzo microcristalino y la presencia de material clástico silíceo inciden en el comportamiento de estos basaltos, aumentando la reactividad.

La reactividad de las muestras mesopotámicas presenta registros de ensayo de prisma de hormigón a largo plazo. En el caso de los agregados LA e YR, calificados como extremadamente reactivos, clase R3 según la barra de mortero, disminuyen su reactividad a clase R1 y R2, respectivamente, en el ensayo a largo plazo. Por otro lado, los agregados de reactividad moderada clase R1 (YF y LM) según norma IRAM 1531 [6], arrojaron valores por debajo del límite establecido, clasificando a los agregados como inocuos, clase R0, en el ensayo de prisma de hormigón.

La representatividad del método acelerado de la barra de mortero es cuestionada por diversos autores [49-50] ya que el método es muy agresivo (alta alcalinidad y temperatura) lo que causa una rápida disolución del cuarzo microcristalino de la mesostasis, ocasionando

una rápida expansión inicial y una estabilización posterior, pudiendo sobreestimar los resultados y calificar ciertos agregados como potencialmente reactivos, siendo que su comportamiento en ensayos de larga duración es satisfactorio. Esto fue corroborado en el caso de los agregados de la región mesopotámica donde todas las muestras ensayadas disminuyeron su clase de reactividad medida en el ensayo según norma IRAM 1674 [8] respecto a las expansiones registradas en el método de prisma de hormigón convencional según norma IRAM 1700 [9]. A pesar de no contar con datos de ensayo de larga duración para el agregado YC, en función al comportamiento observado en los demás agregados de la región, se podría esperar que su reactividad se reduzca al menos a clase R1.

Esta variación en los resultados de ensayos de corto y largo plazo confirma la posibilidad de obtener resultados falso-negativos (agregados clasificados como inocuos por el ensayo y que presentaron efecto deletéreo en obra) y falso-positivos (agregados clasificados como reactivos por el ensayo y que desempeñaron buen comportamiento en campo) [51].

Existen antecedentes de obras en los que se han manifestado fenómenos deletéreos de diversa magnitud, donde se han utilizado agregados basálticos de la región mesopotámica como agregado grueso. Como ejemplo de ello puede citarse el pavimento urbano de la localidad de Curuzú Cuatiá, la pista de rodaje del aeropuerto en la misma localidad y el hormigón de la ruta nacional N°127 [52-55].

Las muestras pertenecientes a la Formación Somuncurá, a pesar de su arreglo textural intersertal (AG y PJ-1) no evidencian expansión en el método acelerado de la barra de mortero. Este comportamiento se condice por lo planteado por Tiecher et al. [56], quienes afirman que la cantidad de cuarzo en basaltos no es lo suficientemente significativa como para promover la RAS.

Los ejemplares estudiados donde se reconocieron texturas intergranulares (LR y BS, Neuquén) se condicen con un grado de reactividad R0 (inocuo). Esto demuestra que en este tipo de arreglos texturales los espacios entre cristales de mayor tamaño son ocupados por cristales de menor desarrollo, descartando la presencia de vidrio volcánico, incluso cuando existe variación en el tamaño de grano.

Los arreglos texturales de tipo porfíricos, representado por los basaltos de: Mendoza, Basalto Coli Toro y las muestras CS y PR de Rio Negro, presentan grados de reactividad variables, desde nulo (R0) a extremadamente reactivos (R3). El vidrio volcánico relíctico y parcialmente alterado presente en la mesostasis de las muestras determina el comportamiento deletéreo frente a la RAS de dichos agregados, como puede evidenciarse en las muestras CS y PR. Por otro lado, queda demostrado, en el ejemplar PM, que la presencia de arcillas no necesariamente guarda relación directa con el grado de reactividad de la roca.

Respecto a las rocas ácidas estudiadas, las cuales pertenecen a la Formación Marifil, comparten arreglos texturales similares con

desarrollo de pasta microfelsítica y felsítica, y una relación pasta/fenocristales promedio de 85 %/15 % en volumen.

Se reconoció un único agregado (muestra VI) con pasta totalmente cristalina, siendo coincidente con valores obtenidos en el ensayo de la barra de mortero que no superan el límite establecido por norma (reactividad nula = R0). El agregado SC registra un comportamiento similar en el ensayo físico, a pesar de presentar cuarzo microcristalino en la pasta de la roca como material potencialmente reactivo; sin embargo, su contenido no sería suficientemente como para producir expansión, calificando al agregado como R0.

Los restantes agregados riolíticos (SG, DR, C60 y SCH) presentan valores de expansión similares, medidos en barra de mortero, clasificándose como moderadamente reactivos (clase R1), aunque cercanos al límite de expansión (0,10 %); permitiendo inferir que su comportamiento en ensayos a largo plazo (IRAM 1700 [9]) arrojaría resultados favorables que determinarían un comportamiento inocuo frente a la RAS.

En trabajos donde se analiza la influencia de la mesostasis o pasta en este tipo de rocas [55-56], se concluye que su comportamiento deletéreo se atribuye a la sílice disponible proveniente tanto del vidrio como de los microlitos de cuarzo inmersos en dicha mesostasis. Por lo tanto, el análisis petrográfico para estimar la cantidad de sílice disponible en función a la relación pasta/fenocristales en este tipo de rocas, es crítico para predecir su reactividad cuando son utilizadas en la elaboración de hormigón.

## 6. Conclusiones

Las rocas volcánicas básicas y ácidas estudiadas califican como potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-sílice según el análisis petrográfico basado en la norma IRAM 1649, complementado con la norma



IRAM 1531, a excepción de los basaltos Zapala y Coli Toro (Neuquén) y la Riolita VI (Chubut).

La reactividad en las rocas basálticas varía significativamente según las texturas y grado de alteración y está directamente vinculada a la presencia de vidrio volcánico fresco o parcialmente desvitrificado, arcillas esmectíticas, intercrecimiento de cuarzo y feldespatos alcalinos, cuarzo microcristalino, sílice criptocristalina, calcedonia y material clástico silíceo.

Los basaltos con texturas intergranulares a intersetales registran los valores más altos de expansión en barras de mortero (R2-R3, IRAM 1674), mientras que los de menor tamaño de grano presentan menor expansión (R1).

La presencia de vesículas y/o fisuras rellenas con materiales silíceos aumenta la reactividad, siendo un factor determinante en el comportamiento del agregado.

Los arreglos texturales de tipo intergranulares y porfíricos con pasta intergranular, se caracterizan por presentar un entramado de cristales que no admiten vidrio volcánico y su reactividad es la esperada en el ensayo acelerado de la barra de mortero IRAM 1674, registrando un comportamiento inocuo.

Los agregados con textura porfírica presentan reactividad variable (R0-R3) según el ensayo acelerado de la barra de mortero, asociada a la heterogeneidad del tamaño cristalino.

Los agregados basálticos con textura intersetal presentan variabilidad en su reactividad (R0-R2), debido a la presencia de vidrio (fresco o alterado a otras fases) o vidrio y pequeños cristales, dando lugar a contenidos variables de materiales potencialmente reactivos. Esta reactividad no guarda relación con el tamaño de grano de la muestra.

Los agregados con texturas intersetales y de comportamiento inocuo, sugieren resultados falso-negativos en comparación con agregados de similar textura y composición.

En una misma muestra, la reactividad disminuye en prisma de hormigón en comparación con la expansión medida en barra de mortero, confirmando que el método según IRAM 1700 es más eficaz para predecir el comportamiento del agregado en el hormigón.

Las rocas volcánicas ácidas estudiadas exhiben texturas predominantes de tipo porfíricas, con pasta microfelsítica a felsítica y un grado de alteración variable. La reactividad en este tipo de rocas se atribuye a la sílice disponible proveniente tanto del vidrio volcánico (fresco o parcialmente desvitrificado) como de los microlitos de cuarzo presentes en la mesostasis de la roca.

La relación mesostasis/fenocristales no evidencia una relación directa con el grado de reactividad obtenidos en los ensayos físicos.

Las pastas totalmente cristalinas muestran un comportamiento inocuo (R0) según la norma IRAM 1674.

Las pastas microfelsíticas, derivadas de la desvitrificación parcial del vidrio volcánico, presentan resultados variables (R0 a R1) cercanos al límite inferior lo que sugiere un comportamiento favorable en ensayos a largo plazo (IRAM 1700) y una respuesta inocua frente a la RAS.

En los agregados en los que se identificó cuarzo microcristalino como material potencialmente reactivo, se registran expansiones por debajo del límite en función del ensayo acelerado de la barra de mortero. Este comportamiento permitiría inferir resultados falso-negativos, o que la identificación de materiales reactivos no siempre es condición suficiente para desencadenar la RAS.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur, por el apoyo brindado.

## Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue realizado en el marco de un trabajo final de Licenciatura en Ciencias Geológicas, para el cual el Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur ha contribuido económicamente para su desarrollo.

## Contribución de autoría

P. Arias: investigación, redacción-original-borrador. L. Madsen: conceptualización, recursos, redacción-revisión-edición. F. Bianchi: redacción-revisión-edición.

## Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

## Referencias

- [1] Marfil, S., Batic, O., Maiza, P., Grecco, L., y Falcone, D. (2010). Comportamiento de rocas basálticas de las prov. de Corrientes y Entre Ríos frente a la reacción álcali-sílice. En *SUG (Ed.), 6° Congreso Uruguayo de Geología*, (pp. 1–6). Sociedad Uruguaya de Geología.
- [2] Shayan, A., y Quick, G. W. (1988). An alkali-reactive basalt from Queensland, Australia. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10(4), 209–214. <https://doi.org/btm29c>
- [3] Vila, P. E., Bonjour, H. L., Díaz, L. J., y 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), 45–60. <https://doi.org/phzh>
- [4] Batic, O. R., y Sota, J. D. (2001). Reacciones deletéreas internas. En F. Irassar (Ed.), *Durabilidad del Hormigón Estructural* (pp. 157–216). AATH.
- [5] Madsen, L. (2018). *Influencia de la mineralogía, textura y grado de alteración de rocas volcánicas en su comportamiento como agregado en hormigón* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Sur. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4544>
- [6] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2022). *IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo*.
- [7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2008). *IRAM 1649 Agregados para hormigones. Examen petrográfico*.
- [8] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1674. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero*.
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *IRAM 1700 Agregados Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*.
- [10] Avid, F. A., Paez, G., Cosentino, J., y Sota, J. D. (2014). La durabilidad de los basaltos de la Mesopotamia en los hormigones de cemento portland. En *CPPBA (Ed.), 2° Congreso Argentino de Áridos, Buenos Aires*, (pp. 1–11). Cámara de la Piedra de la Provincia de Buenos Aires.
- [11] Maiza, P. J., Marfil, S. A., Batic, O. R., y Sota, J. D. (1995). Estudio comparativo de rocas basálticas frente a la RAS. En *AATH (Ed.), 12° Reunión Técnica AATH "Dra. Haydée V. Armándola"* (pp. 127–140). AATH.
- [12] Marfil, S. A., Locati, F., Maiza, P. J., y Lescano, L. (2013). Basaltic rocks from Argentina used in concrete structures. En F. Wu, y A. Qi (Eds.), *Global View of Engineering Geology and the Environment* (pp. 253–258). Taylor & Francis Group.
- [13] Rocco, C. G., Madsen, L., Locati, F., Tobes, J. M., Fava, C., Marfil, S., y Maiza, P. (2016). Estudio de prismas de hormigón elaborados con basaltos de la Mesopotamia argentina. En E. F. Irassar, V. F. Rahhal, y L. P. Traversa

- (Eds.), VII Congreso Internacional 21° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón "Ing. Nélida del Valle Castría" (pp. 1–8). AATH.
- [14] Batic, O., Sota, J., y Maiza, P. (1992). Montmorillonite included in some aggregates, a principal factor of AAR. En A. B. Poole (Ed.), *9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Volume 1* (pp. 53–60). Concrete Society Publication.
- [15] Batic, O. R., y Milanesi C. A. (1995). Consideraciones sobre el método de expansión de prismas de hormigón al estudio de la reactividad alcalina. En AATH (Ed.), *XII Reunión Técnica AATH Dra. Haydée V. Armándola* (pp. 149–162). AATH.
- [16] Marfil, S. A., y Maiza, P. J. (1996). Características petrográfico-mineralógicas de la alteración de basaltos de la Meseta de Somún Curá, Prov. de Río Negro. En 3° *Reunión de Mineralogía y Metalogenia, Publicación N° 5* (pp. 287–293). INREMI.
- [17] Marfil, S. A., Maiza, P. J., Bengochea, A. L., Sota, J. D., y Batic, O. R. (1998). Relationship between  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  and expansion in the determination of the alkali reactivity of basaltic rocks. *Cement and Concrete Research*, 28(2), 189–196. <https://doi.org/bjvntf>
- [18] Batic, O., Maiza, P., y Sota, J. (1994). Alkali silica reaction in basaltic rocks. NBRI method. *Cement and Concrete Research*, 24(7), 1317–1326. <https://doi.org/cwqfch>
- [19] Maiza, P. J., y Marfil, S. A. (1998). Comportamiento de rocas basálticas en hormigón, frente a la reacción álcali-sílice. En SUG (Ed.), *2° Congreso Uruguayo de Geología* (pp. 134–137). Sociedad Uruguaya de Geología.
- [20] Maiza, P. J., Marfil, S. A., Bengochea, A. L., Batic, O. R., y Sota, J. D. (1998). Aplicación de un modelo estadístico para evaluar la reactividad alcalina potencial en rocas basálticas. En *5° Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses* (pp. 135–143). Universidad Nacional de Mar del Plata y Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires.
- [21] Maiza, P. J., Batic, O. R., Grecco, L. E., Marfil, S. A., y Sota, J. D. (2006). Rocas volcánicas de la Patagonia - Su comportamiento frente a la RAS. En J. Sota (Ed.), *XVI Reunión Técnica "Prof Agrim Antonino Bonforte"* (pp. 233–240). AATH.
- [22] Tiecher, F., Gomes, M. B., y Dal Molin, D. C. C. (2018). Alkali-aggregate reaction: A study of the influence of the petrographic characteristics of volcanic rocks. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(1), 2399–2404. <https://doi.org/phzn>
- [23] Maiza, P., y Marfil, S. (2003). Rocas riolíticas en agregados para concreto. Su factibilidad de uso basada en la petrografía. En E. S. Campos (Ed.), *10° Congreso Geológico Chileno* (pp. 1–7). Universidad de Concepción.
- [24] Maiza, P., Batic, O. R., Marfil, S. A., y Sota, J. D. (2003). Reactividad alcalina potencial de rocas riolíticas como agregados para hormigón. En AATH (Ed.), *XV Reunión Técnica de la AATH "Ing. Marcelo Wainstein"* (pp. 1–15). AATH.
- [25] Malvicini, L., y Llambías, E. J. (1974). Geología y génesis del depósito de manganeso Arroyo Verde, provincia de Chubut, República Argentina. En AGA (Ed.), *Actas del V Congreso Geológico Argentino, Actas 2* (pp. 185–202). AGA.
- [26] Cortés, J. M. (1981). El sustrato precretácico del extremo nordeste de la provincia de Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 36(3), 217–235.
- [27] Giacosa, R. (1993). El ciclo eruptivo Gondwánico en el área de Sierra Pailemán, Macizo Nordpatagónico, Argentina. En AGA (Ed.), *Actas del XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 4 (pp. 113–119). AGA.
- [28] Wildner, W., Hartmann, L. A., y Lopes, R. C. (2007). Serra Geral magmatism in the Paraná Basin, a new stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. En R. Iannuzzi, D. R. Boardman (Eds.), *Workshop Problems in the Western Gondwana Geology* (pp. 189–197). UFRGS.
- [29] Chebli, G. A., Mozetic, M. E., Rossello, E. A., y Bühler, M. (1999). Cuencas sedimentarias de la Llanura Chacopampeana. En R. Caminos (Ed.), *Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29* (pp. 627–644). SEGEMAR.

- [30] Pezzi, E. E., y Mozetic, M. E. (1989). Cuencas sedimentarias de la Región Chacoparanense. En G. A. Chebli, y L. A. Spalletti (Eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas, Serie Correlación Geológica*, 6 (pp. 65–78). Instituto Superior de Correlación, Universidad Nacional de Tucumán.
- [31] Cucchi, R., Busteros, A., y Lema, H. (1999). *Hoja Geológica 4169-II, Los Menucos, Provincia de Río Negro* (Boletín 265). Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino.
- [32] Bellido Mulas, F. (1998). *Informe preliminar de la campaña Los Menucos-Sierra Colorada*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino.
- [33] Ardolino, A. A., y Franchi, M. (1993). El vulcanismo cenozoico de la meseta de Somún Curá, provincias de Río Negro y Chubut. En AGA (Ed.), *Actas del XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 4 (pp. 225–235). AGA.
- [34] Maro, G., y Remesal, M. B. (2012). El vulcanismo bimodal del volcán Cerro Corona, alta tierra de Somún Curá, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(1), 142–151.
- [35] Ardolino, A. A. (1981). El vulcanismo cenozoico del borde suroriental de la meseta de Somuncurá. En AGA (Ed.), *Actas del XVIII Congreso Geológico Argentino*, 3 (pp. 7–23). AGA.
- [36] Remesal, M., Salani, F., Franchi, M., Ardolino, A. A., Dalponte, M. R., Espejo, P. M., y Lizuaín, A. (2001). *Hoja Geológica 4169 IV Maquinchao* (Boletín 312). Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Argentino, Buenos Aires.
- [37] Linares, E., y González, R. R. (1990). *Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina - 1957-1987*. Serie “B” (Didáctica y Complementaria), 19, Asociación Geológica Argentina.
- [38] Bermúdez, A., y Delpino, D. (1989). La Provincia Basáltica Andino Cuyana (35–37°L.S.). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 44(1-4), 35–55.
- [39] Bermúdez, A., Delpino, D., Frey, F., y Saal, A. (1993). Los basaltos de retroarco extraandinos. En V. A. Ramos (Ed.), *Geología y Recursos Naturales de Mendoza. XII Congreso Geológico Argentino* (pp. 173–195). AGA.
- [40] González Díaz, E. F. (1979). *Descripción geológica de la Hoja 31d, La Matancilla, provincia de Mendoza* (Boletín 173). Servicio Geológico Nacional.
- [41] Narciso, V., Santamaría, G. R., Zanettini, J. C. M., y Leanza, H. A. (2004). *Hoja Geológica 3769-I Barrancas* (Boletín 253). Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Argentino.
- [42] May, V. R., Chivas, A. R., Dosseto, A., Honda, M., Matchan, E. L., Phillips, D., y Price, D. M. (2018). Quaternary volcanic evolution in the continental back-arc of southern Mendoza, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 84, 88–103. <https://doi.org/gdsfh2>
- [43] Streckeisen, A. (1978). Classification and nomenclature of volcanic rocks lamprophytes, carbonatites and melilitic rocks. IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen*, 141: 1–14.
- [44] Le Maitre, R. W. (Ed.) (2002). *Igneous rocks. A classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press.
- [45] Siivola, J., y Schmid, R. (2007). Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks: List of mineral abbreviations. Web version 01.02.07. ([https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/658\\_19\\_MemExPI\\_329\\_Cano\\_Ovejas/Documento/pdf/Anexo1\\_InveRecoBibl/Siivola%20y%20Schmid%20\(2007\).%20Abreviaciones%20mineral%20C3%B3gicas.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/658_19_MemExPI_329_Cano_Ovejas/Documento/pdf/Anexo1_InveRecoBibl/Siivola%20y%20Schmid%20(2007).%20Abreviaciones%20mineral%20C3%B3gicas.pdf)). IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR).
- [46] Ingersoll, R. V., Bulard, T. F., Ford, R. L., Grimn, J. P., Pickle, J. P., y Sares, S. W. (1984). The effect of grain size on detrital modes: a text of the Gazzi-Dickinson Point Counting method. *Journal of Sedimentary*

- Petrology*, 54(1), 103–116.  
<https://doi.org/dgdfww>
- [47] Marfil, S. A., y Maiza, P. J. (2006). Assessment of the potential alkali reactivity of rhyolitic rocks from Argentina. In Proc. 10th IAEG Int. Congress.
- [48] Marfil, S. A., Maiza, P. y Salomon, R. C (2005). Correlación entre la expansión entre las barras de mortero, sílice disuelta y el contenido de montmorillonita en basaltos. In Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- [49] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2016). Aplicación del método acelerado de la barra de mortero en el estudio de combinación de agregados. En F. Irassar (Ed.), *7º Congreso Internacional y 21ª Reunión Técnica de la AATH* (pp. 397–404). AATH.
- [50] Berezosky, J. J., Falcone, D., Locati, F., y Marfil, S. A. (2023). Comparación de los 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. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 50, e013. <https://doi.org/ph4m>
- [51] Thomas, M. D. A., Fournier, B. y Folliard, K. J. (2008). Report on determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction. *Concrete International*, 30 (5): 24-30.  
<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/hif09001/hif09001.pdf>
- [52] Maiza, P., Marfil, S., Rocco, C., Fava, C., y Tobes, J. (2010). Pavimentos de hormigón elaborados con agregados basálticos y afectados por la reacción álcali sílice (RAS). Casos de estudio. En AATH (Ed.), *Congreso Hormigón Premezclado de las Américas 2010, XII Congreso Iberoamericano del Hormigón Premezclado, IV Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón y XVIII Reunión Técnica de la AATH* (pp. 1–12). AATH.
- [53] Madsen, L., Marfil, S., y Maiza, P. (2018). Geoquímica y petrografía de los basaltos de la Formación Serra Geral de las provincias de Corrientes y Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 75(4), 559–571.
- [54] Milanesi, C., Giaccio, G., Falcone, D., Giovambattista, A. y Zerbino, R. (2021). Una visión actualizada sobre la reacción álcali-sílice en Argentina y el diseño y construcción de estructuras de hormigón. *Revista Hormigón*, 60, 16–35.
- [55] Milanesi, C. A. (2008). Experiencias sobre la caracterización de algunos basaltos de la provincia de Corrientes (Argentina) frente a la reacción álcali-sílice (RAS). En V. Rahhal, y J. Sota (Eds.), *XVII Reunión Técnica de la AATH Ing. José Fermín Colina* (pp. 345–352). AATH.
- [56] Tiecher, F., Dal Molin, D. C., Gomes, M. E., Hasparyk, N. P., y Monteiro, P. J. (2012). Influence of mesostasis in volcanic rocks on the alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1130–1140.  
<https://doi.org/ph4q>



## Propiedades físico-mecánicas de adoquines de hormigón producidos en Uruguay

P. Vila<sup>a\*</sup> y M. N. Pereyra<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, CP 11300, Montevideo, Uruguay, [pvila@fing.edu.uy](mailto:pvila@fing.edu.uy), [mpereyra@fing.edu.uy](mailto:mpereyra@fing.edu.uy)

Recibido: 20 de marzo de 2025

Aceptado: 21 de mayo de 2025

### RESUMEN

Los pavimentos de adoquines de hormigón son una alternativa eficiente debido a su resistencia, durabilidad, fácil mantenimiento y su versatilidad estética. En Uruguay, la norma de adoquines (UNIT 787) está desactualizada y a nivel internacional no existe consenso en los requisitos aplicables. El objetivo de este trabajo es analizar las propiedades físico-mecánicas de adoquines de la producción nacional, con el fin de generar una base de datos que refleje la producción y contribuya a la actualización de la normativa vigente. Para ello se evaluaron las principales propiedades de interés (absorción de agua, densidad, resistencia a compresión, módulo de rotura, tracción indirecta por compresión y desgaste) y se analizó tanto la variabilidad de los resultados obtenidos como su correlación con la resistencia a la compresión, que constituye el requisito actual de la norma. Los resultados mostraron una adecuada correlación entre la resistencia a compresión y el resto, a excepción de la resistencia al desgaste.

**PALABRAS CLAVE:** Adoquines, resistencia mecánica, abrasión, resultados individuales, rango de variación

### ABSTRACT

Concrete block pavements are an efficient alternative due to their strength, durability, easy maintenance, and aesthetic versatility. In Uruguay, the concrete block standard UNIT 787 is outdated, and there is no consensus on applicable requirements at the international level. The objective of this paper is to analyze the physical and mechanical properties of paving blocks produced in the country to generate a database that reflects local production and contributes to updating the current regulations. The main properties of interest were evaluated, including water absorption, density, compressive strength, modulus of rupture, splitting tensile strength, and abrasion resistance. The variability of the results and their correlation with compressive strength, which is the current requirement established by the standard, were also analyzed. The results showed a good correlation between compressive strength and other properties, except for abrasion resistance.

**KEYWORDS:** Paving blocks, mechanical strength, abrasion, individual results, range of variation

\*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Vila, P., y Pereyra, M. N. (2025). Propiedades físico-mecánicas de adoquines de hormigón producidos en Uruguay. *Revista Hormigón*, 68, 23–45. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/cbt83nkc2>

## 1. Introducción

Los adoquines de hormigón son piezas prefabricadas, empleadas para conformar la capa de rodadura en los pavimentos articulados de hormigón (PAH). Este tipo de pavimento es ampliamente utilizado en proyectos de infraestructuras debido a su capacidad para resistir cargas elevadas, su durabilidad en condiciones ambientales adversas (como en lugares de derrame de combustibles y aceites, así como ciclos de hielo-deshielo), su atractivo estético, facilidad de fabricación y su eficiencia en términos de costos durante su ciclo de vida. Estas características hacen que sean la opción preferida para aplicaciones como puertos, aeropuertos, estaciones de bus, estaciones de servicio, zonas de almacenamiento de contenedores, garajes, calles urbanas secundarias y vías peatonales [1]. A su vez, en el contexto de la construcción sostenible, ciertos diseños de PAH incorporan propiedades permeables, lo que contribuye a la gestión eficiente del drenaje urbano al reducir la escorrentía superficial y mejorar la infiltración de agua sin comprometer el desempeño estructural del pavimento [2]. Su capacidad para ser fabricado con materiales reciclados incrementa su sostenibilidad y reduce el impacto ambiental asociados a la extracción de recursos naturales. En tal sentido, diversos estudios han explorado la viabilidad de incorporar residuos de construcción y demolición, subproductos industriales y residuos sólidos urbanos en la producción de adoquines, obteniendo resultados favorables en términos de resistencia mecánica y durabilidad [3,4].

En la revisión de la normativa extranjera que regulan los requisitos que deben cumplir los adoquines, se constató la falta de consenso con relación a la resistencia mecánica que debe evaluarse. Mientras que en algunas se establece la resistencia a compresión como criterio principal (tal es el caso de la ASTM C936 [5], la ABNT NBR 9781 [6] y NTON 12 009 [7]), otras consideran el módulo de rotura (IRAM 11656 [8], NTC 2017 [9], NTG 41086 [10] y NTON 12 009 [7]), y otras la

resistencia a tracción indirecta por compresión (UNE-EN 1338 [11] y NTE INEN 3040 [12]). En cuanto a la absorción de agua, todas las normas incluyen este requisito, empleando el mismo procedimiento de ensayo, pero variando el límite exigido. En lo que respecta a la resistencia al desgaste, todas las normas, a excepción de la norma ASTM C936 [5], contemplan el método de desgaste por disco ancho; algunas incluso incorporan adicionalmente el método Böhme (o Dorry) [10-12]. Cabe destacar que, en la mayoría de las normas, los valores límite de cada parámetro varían en función de la solicitación a la que estará sometido el pavimento (que en general se clasifica en peatonal, vehicular liviano o vehículos especiales con elevado efecto de desgaste).

La normativa nacional vigente, UNIT 787 [13], data de 1989 y requiere una actualización. En esta se establece como requisito la resistencia a la compresión, remitiendo al procedimiento de la norma UNIT 40 del año 1948, la cual ha sido remplazada en dos oportunidades [14,15]. Además, hace referencia al uso de un encabezado adherido con mortero de azufre, una técnica que ha dejado de usarse en Uruguay. Por otra parte, Gutiérrez y Viurrarena [16] reportaron que fue imposible realizar el ensayo de desgaste allí indicado, debido a que la presión requerida del elemento de ensayo contra la pista resultó excesiva, lo que provocó el frenado y generó un desgaste acero-hormigón en lugar de arena-hormigón.

Por otro lado, todas las normas extranjeras consultadas [5-12] además de establecer requisitos expresados en valores medios de los parámetros evaluados, también limitan la variabilidad entre adoquines del mismo lote. Estas normas exigen que, además de alcanzar un valor medio específico (o no superarlo, como es el caso de la absorción de agua y el desgaste), los resultados individuales se mantengan dentro de los límites establecidos. En contraste, la UNIT 787 [13] no contempla restricciones sobre la variabilidad individual, lo que permite la aceptación de lotes con alta dispersión en los parámetros de ensayo.

Considerando además que, en Uruguay, en el sector de la construcción las normas técnicas de UNIT no son de cumplimiento obligatorio y sumado a las limitaciones indicadas en la norma vigente de adoquines, hace que los pliegos de obras no la exijan y muchas veces no se utilice. La falta de consenso en los criterios de evaluación presentes en las normas extranjeras subrayan la necesidad de un estudio unificado que proporcione antecedentes locales. Este trabajo aporta datos para la redacción de una versión actualizada de la norma nacional, permitiendo una regulación más coherente y un control de calidad más riguroso para los adoquines de hormigón. A su vez, el presente estudio exploró un nuevo método de desgaste para el medio, el de disco ancho, método empleado por las normas extranjeras.

El estudio tuvo como objetivo analizar las propiedades físico-mecánicas de los adoquines de hormigón extraídos de la producción nacional, evaluando su variabilidad y desempeño en términos de absorción de agua, densidad, resistencia mecánica (compresión, módulo de rotura y tracción indirecta por compresión) y resistencia a la abrasión. Se buscó establecer correlaciones entre estos parámetros y la resistencia a la compresión (requisito actual de la norma) y se buscó respaldar la inclusión de requisitos normativos tanto para valores medios como individuales por lote, permitiendo a futuro establecer criterios más rigurosos en la normativa nacional para optimizar el diseño de los PAH en función de su resistencia mecánica y durabilidad.

## 2. Materiales y ensayos

### 2.1 Muestras para ensayo

Los ensayos se realizaron sobre adoquines tipo Unistone de 80 mm y 100 mm de espesor nominal y de diferentes clases de resistencias (20 MPa a 50 MPa, aproximadamente). Los lotes pertenecieron a las tres principales

empresas productoras (identificadas como h, m y p) de la zona metropolitana de Montevideo, Uruguay. El trabajo involucró diferentes ensayos de acuerdo con lo que se describe en la Sección 2.2.

Los adoquines eran producidos en moldes metálicos, incluyendo seis unidades por molde (el proceso de fabricación consistió en el llenado de los moldes con hormigón fresco, seguido de la compactación mediante vibro-compresión, curado a temperatura controlada y vapor de agua y posterior desmolde). Para cada lote sometido a ensayo, se realizó una selección aleatoria de moldes, cuya cantidad se detalla en la Tabla 1.

De los seis adoquines pertenecientes a cada molde, tres fueron designados al Ensayo 1 y los otros tres al Ensayo 2 (y eventualmente al Ensayo 3). En el caso específico de la serie de ensayos de absorción de agua ( $Abs$ ) y densidad ( $D_s$ ) y la serie módulo de rotura ( $MR$ ) y desgaste ( $D$ ); en cada una, ambos ensayos se realizaron sobre el mismo adocquín, de forma tal de optimizar el uso de las muestras. Los adoquines pertenecientes al mismo lote fueron fabricados empleando la misma dosificación, la misma compactación el mismo curado y las mismas condiciones de almacenamiento, según la información suministrada por las empresas.

### 2.2 Técnicas de ensayo

#### 2.2.1 Espesor y sección real

El espesor real ( $e_r$ ), en mm, se determinó según el procedimiento en IRAM 11656 [8]. La sección real promedio ( $S_{real}$ ), en mm<sup>2</sup>, se determinó aplicando el principio de Arquímedes [17] (volumen del adocquín = volumen de agua desplazada) y considerando una densidad del agua de 998,0 kg/m<sup>3</sup> (promedio para una temperatura entre 20 °C y 25 °C) según la Ecuación 1.

$$S_{real} = \frac{M_{ss} - M_{sum}}{998 \cdot e_r} \cdot 10^6 \quad (1)$$

**Tabla 1.** Distribución de ensayos.

| Id. del lote | Empresa | Espesor nominal (mm) | Cantidad de moldes seleccionados* | Id. del Ensayo 1**    | Id. del Ensayo 2**      | Id. del Ensayo 3**                |
|--------------|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1h10         | h       | 100                  | 8 moldes                          | <i>F</i> (8 x 3 = 24) | <i>Abs</i> (8 x 3 = 24) | <i>D<sub>s</sub></i> (8 x 3 = 24) |
| 1h10         | h       | 100                  | 6 moldes                          | <i>F</i> (6 x 3 = 18) | <i>T</i> (6 x 3 = 18)   | -                                 |
| 1h10         | h       | 100                  | 6 moldes                          | <i>F</i> (6 x 3 = 18) | <i>D</i> (6 x 3 = 18)   | <i>MR</i> (6 x 3 = 18)            |
| 2h10         | h       | 100                  | 4 moldes                          | <i>F</i> (4 x 3 = 12) | <i>Abs</i> (4 x 3 = 12) | <i>D<sub>s</sub></i> (4 x 3 = 12) |
| 2h10         | h       | 100                  | 2 moldes                          | <i>F</i> (2 x 3 = 6)  | <i>T</i> (2 x 3 = 6)    | -                                 |
| 2h10         | h       | 100                  | 2 moldes                          | <i>F</i> (2 x 3 = 6)  | <i>D</i> (2 x 3 = 6)    | <i>MR</i> (2 x 3 = 6)             |
| 3h8          | h       | 80                   | 2 moldes                          | <i>F</i> (2 x 3 = 6)  | <i>Abs</i> (2 x 3 = 6)  | <i>D<sub>s</sub></i> (2 x 3 = 6)  |
| 3h8          | h       | 80                   | 3 moldes                          | <i>F</i> (3 x 3 = 9)  | <i>D</i> (3 x 3 = 9)    | <i>MR</i> (3 x 3 = 9)             |
| 4h10         | h       | 100                  | 4 moldes                          | <i>F</i> (4 x 3 = 12) | <i>Abs</i> (4 x 3 = 12) | <i>D<sub>s</sub></i> (4 x 3 = 12) |
| 4h10         | h       | 100                  | 5 moldes                          | <i>F</i> (5 x 3 = 15) | <i>T</i> (5 x 3 = 15)   | -                                 |
| 4h10         | h       | 100                  | 8 moldes                          | <i>F</i> (8 x 3 = 24) | <i>D</i> (8 x 3 = 24)   | <i>MR</i> (8 x 3 = 24)            |
| 1m10         | m       | 100                  | 2 moldes                          | <i>F</i> (2 x 3 = 6)  | <i>Abs</i> (2 x 3 = 6)  | <i>D<sub>s</sub></i> (2 x 3 = 6)  |
| 1m10         | m       | 100                  | 2 moldes                          | <i>F</i> (2 x 3 = 6)  | <i>T</i> (2 x 3 = 6)    | -                                 |
| 1m10         | m       | 100                  | 1 molde                           | <i>F</i> (1 x 3 = 3)  | <i>D</i> (1 x 3 = 3)    | <i>MR</i> (1 x 3 = 3)             |
| 2m8          | m       | 80                   | 1 molde                           | <i>F</i> (1 x 3 = 3)  | <i>Abs</i> (1 x 3 = 3)  | <i>D<sub>s</sub></i> (1 x 3 = 3)  |
| 2m8          | m       | 80                   | 2 moldes                          | <i>F</i> (2 x 3 = 6)  | <i>T</i> (2 x 3 = 6)    | -                                 |
| 2m8          | m       | 80                   | 1 molde                           | <i>F</i> (1 x 3 = 3)  | <i>D</i> (1 x 3 = 3)    | <i>MR</i> (1 x 3 = 3)             |
| 3mo8         | m       | 80                   | 2 moldes                          | <i>F</i> (2 x 3 = 6)  | <i>T</i> (2 x 3 = 6)    | -                                 |
| 1p10         | p       | 100                  | 1 molde                           | <i>F</i> (1 x 3 = 3)  | <i>Abs</i> (1 x 3 = 3)  | <i>D<sub>s</sub></i> (1 x 3 = 3)  |
| 1p10         | p       | 100                  | 1 molde                           | <i>F</i> (1 x 3 = 3)  | <i>T</i> (1 x 3 = 3)    | -                                 |
| 1p10         | p       | 100                  | 1 molde                           | <i>F</i> (1 x 3 = 3)  | <i>D</i> (1 x 3 = 3)    | <i>MR</i> (1 x 3 = 3)             |

\*cada molde contiene seis adoquines; \*\* entre paréntesis se indica la cantidad de ensayos; *F*: resistencia a la compresión; *Abs*: absorción de agua; *D<sub>s</sub>*: densidad en estado seco; *T*: resistencia a tracción por compresión; *MR*: módulo de rotura; *D*: huella de desgaste; "-": no se realizó Ensayo 3.

Donde  $M_{SSS}$  es la masa en condición saturada a superficie seca al aire y  $M_{sum}$  es la masa saturada sumergido suspendido en agua, ambas en gramos.  $e_r$  es el espesor real, en mm.

En el rango de temperatura que se trabajó, la densidad del agua puede variar entre 998,5 kg/m<sup>3</sup> a 18,3 °C y 996,6 kg/m<sup>3</sup> a 26,7 °C [18], por lo tanto, la influencia de esta variación en el resultado de  $S_{real}$ , adoptando en el cálculo una densidad de 998,0 kg/m<sup>3</sup>, fue como máximo 0,14 %.

### 2.2.2 Absorción de agua (*Abs*) y densidad del adoquín en condición seco (*D<sub>s</sub>*)

La absorción de agua (*Abs*), expresada como porcentaje respecto a la masa seca del

adoquín (Ecuación 2), se determinó según IRAM 11656 [8]. La densidad en condición seco (*D<sub>s</sub>*), expresada en kg/m<sup>3</sup>, se calculó como el cociente entre la masa seca  $M_s$  y el volumen del adoquín, este último medido según el principio de Arquímedes y considerando la densidad del agua de 998 kg/m<sup>3</sup> para una temperatura entre 20 °C y 25 °C (Ecuación 3) (respecto a la variación de la densidad del agua con la temperatura de trabajo, se realiza la misma aclaración que para  $S_{real}$ ).

$$Abs = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} * 100 \quad (2)$$

$$D_s = \frac{M_s}{(M_{SSS} - M_{sum})} * 998 \quad (3)$$

Donde  $M_s$  es la masa en condición seca,  $M_{SSS}$  es la masa a superficie seca al aire y  $M_{sum}$  es

la masa saturada sumergido suspendido en agua, expresados en gramos.

### 2.2.3 Resistencia mecánica (compresión, módulo de rotura y tracción indirecta por compresión)

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó siguiendo los lineamientos de UNIT 101 [14]. Los adoquines se ensayaron en condición de saturados a superficie seca, se utilizó encabezado de material compensado MDF de  $(4 \pm 1)$  mm de espesor y una velocidad de carga de  $(0,25 \pm 0,1)$  MPa/s. La resistencia ( $F$ ), en MPa, se determinó como el cociente entre la carga máxima de ensayo ( $C_{max}$ ), en N, y la sección transversal real ( $S_{real}$ ) en mm<sup>2</sup>. No se empleó ningún factor de corrección por esbeltez.

El módulo de rotura ( $MR$ ) se determinó siguiendo los lineamientos de IRAM 11656 [8]. Los adoquines se ensayaron en condición de saturados a superficie seca, aplicándose la carga a una velocidad de  $(0,10 \pm 0,05)$  MPa/s. El  $MR$  se calculó según la Ecuación 4.

$$MR = \frac{3 * P_{max} * L_e}{(a_r + a_i) * e_r^2} \quad (4)$$

Donde  $MR$  es el módulo de rotura, en MPa;  $P_{max}$  es carga máxima, en N;  $L_e$  es la luz libre entre apoyos inferiores del suplemento de ensayo;  $a_r$  es el ancho real del adoquín, en mm;  $a_i$  el ancho del rectángulo inscripto, en mm; y  $e_r$  el espesor real del adoquín, en mm.

El ensayo de resistencia a tracción indirecta por compresión ( $T$ ) se realizó según la norma española UNE-EN 1338, Anexo F [11]. Se utilizó un dispositivo con dos soportes rígidos; uno para la aplicación de la carga y el otro para el apoyo del adoquín. Se utilizó material compensado MDF de  $(4 \pm 1)$  mm de espesor,  $(15 \pm 1)$  mm de ancho y al menos 10 mm más largo que el plano de fractura previsto, se ensayó a una velocidad de carga de  $(0,05 \pm 0,01)$  MPa/s. Luego del ensayo se

determinó la sección de rotura ( $S_{rot}$ ), en mm<sup>2</sup> (Ecuación 5) y posteriormente la tensión de rotura ( $T$ ), en MPa (Ecuación 6). La norma del ensayo indica aplicar un factor de corrección  $k$  dependiendo del espesor del adoquín ( $k = 1,11$  para los adoquines de 100 mm de espesor y  $k = 1$  para adoquines de 80 mm de espesor).

$$S_{rot} = l_{rot} * e_r \quad (5)$$

$$T = 0,637 * k * \frac{F_{max}}{S_{rot}} \quad (6)$$

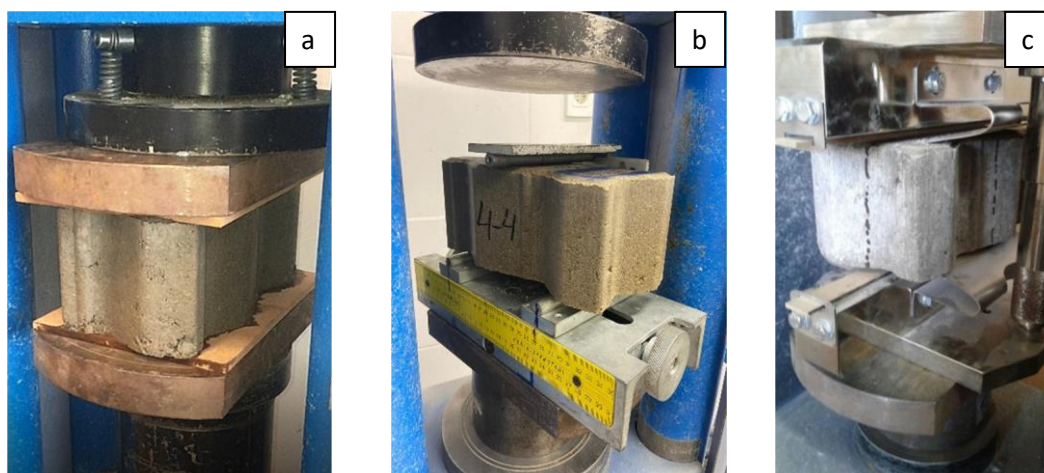
Donde,  $l_{rot}$  es la longitud promedio de rotura en sentido longitudinal del adoquín, entre la cara inferior y la cara de desgaste, en mm;  $e_r$  es el espesor; y  $F_{max}$  es la carga máxima en N.

En la Figura 1 se muestran adoquines posicionados previos a los ensayos de resistencia mecánica.

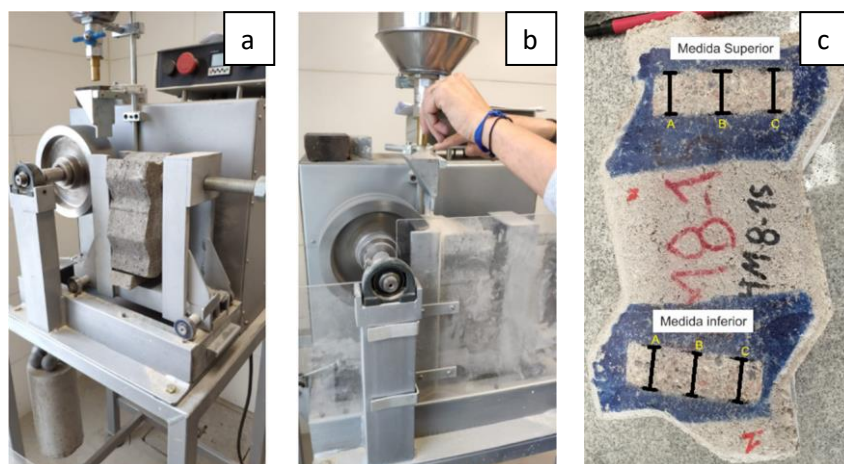
### 2.2.4 Resistencia al desgaste ( $D$ )

La resistencia al desgaste se evaluó mediante el método del disco ancho de abrasión (Figura 2). A excepción de la norma americana ASTM C936 [5], este procedimiento está contemplado en el resto de las normas consultadas (IRAM 11656 [8], NBR 9781 [6], UNE-EN 1338 [11], NTG 41086 [10], NTE 3040 [12], NTC 2017 [9]). Las principales diferencias entre ellas radican en el material de calibración utilizado y en el abrasivo empleado. En este estudio, se adoptó el procedimiento establecido por la norma IRAM 11656 [8], con la excepción del material de calibración, para el cual se utilizó una placa de vidrio común de 6 mm de espesor. Este material, indicado por la norma NBR 9781 [6], fue seleccionado debido a su mayor disponibilidad en el mercado local en comparación con el material especificado en IRAM 11656 [8] (placa de mármol). El resultado de ensayo ( $D$ ) es el ancho de huella de desgaste, expresado por la longitud del segmento B (representado en la Figura 2c), en mm.





**Figura 1.** Ensayos de resistencia mecánica. a) Resistencia a la compresión. b) Módulo de rotura. c) Tracción indirecta por compresión.



**Figura 2.** Ensayo de desgaste de disco ancho. a) Previo al ensayo. b) Durante ensayo, regulando boquilla salida material abrasivo. c) Lectura de la huella de desgaste.

## 2.3 Técnicas de análisis

### 2.3.1 Rango de variación de resultados individuales

Como se indicó en la Sección 2.1, de cada molde compuesto por seis adoquines, se conformaron series de tres unidades para cada ensayo (Tabla 1). Los parámetros evaluados fueron: absorción de agua ( $Abs$ ), densidad en condición seco ( $D_s$ ), resistencia a la compresión ( $F$ ), módulo de rotura ( $MR$ ), resistencia a tracción indirecta por compresión ( $T$ ) y huella de desgaste ( $D$ ). Cabe destacar que, en las series de ensayos - absorción de agua y densidad, por un lado, módulo de rotura

y desgaste, por el otro - los ensayos se realizaron sobre el mismo adoquín en cada caso. En los adoquines sometidos a los ensayos de módulo de rotura y desgaste, primero se realizó el ensayo de desgaste, el cual afecta únicamente la zona superficial del adoquín, alejada de la región central donde posteriormente se aplicó la carga para el ensayo de flexión.

Por lo tanto, para cada serie de tres adoquines, se obtuvieron tres resultados individuales para cada parámetro de ensayo. A estos tres resultados se le calculó la media aritmética, el rango de variación absoluto ( $R_3$ ) y el rango de variación relativo  $R_{3\%}$ . El  $R_3$  se definió como la

diferencia entre el valor máximo ( $Ind_{m\acute{a}x}$ ) y mínimo ( $Ind_{m  n}$ ) de las tres determinaciones (Ecuación 7) (su unidad corresponde a la del parámetro de ensayo) y  $R_{3\%}$  correspondió a esta misma diferencia, expresada como porcentaje respecto a la media aritmética de las tres determinaciones (Ecuación 8).

$$R_3 = Ind_{m\acute{a}x} - Ind_{mín} \quad (7)$$

$$R_{3\%} = \frac{Ind_{m\acute{a}x} - Ind_{m  n}}{Media\ aritmética} * 100 \quad (8)$$

### 2.3.2 Modelos de regresión entre los diferentes parámetros y la resistencia a la compresión

Se analizó la correlación de la resistencia a la compresión ( $F$ ) con la absorción ( $Abs$ ), con la densidad en estado seco ( $D_s$ ), el módulo de rotura ( $MR$ ), la resistencia a tracción indirecta ( $T$ ) y la resistencia al desgaste ( $D$ ). Para ello, se utilizó el modelo de regresión lineal simple (con una única variable explicativa).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Parámetros de ensayo y su variabilidad

#### 3.1.1 Absorción de agua

En la Figura 3 se muestran los resultados individuales de absorción de agua ( $Abs$ ) y la media aritmética de los tres resultados individuales por molde.

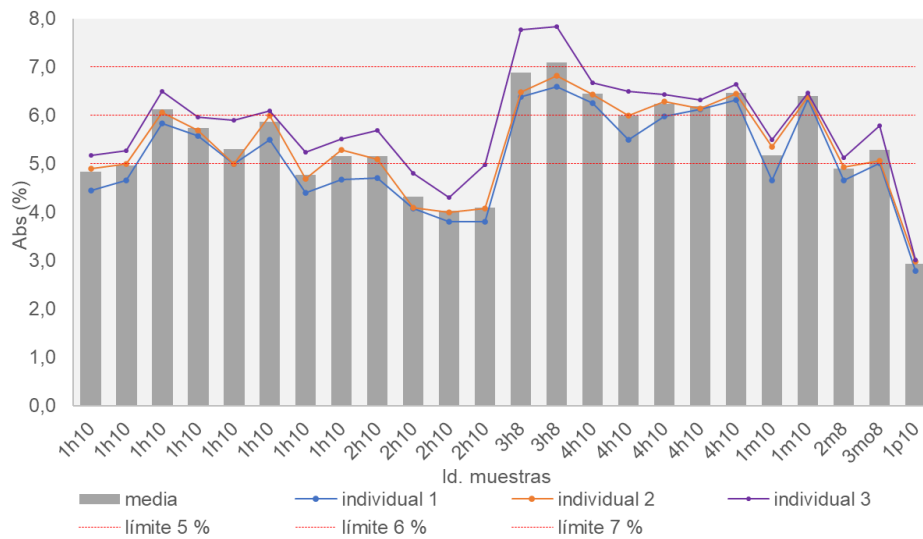
Los valores individuales de absorción de agua oscilaron entre 2,8 % y 7,8 %, mientras que los valores medios estuvieron comprendidos entre 2,9 % y 7,1 %. De acuerdo con el límite normativo nacional vigente (UNIT 787 [13]), que establece un máximo del 7 % en los valores individuales, la mayoría de los resultados se ubicaron por debajo de este límite, con excepción de dos valores correspondientes a la partida 3h8. La norma ABNT NBR 9781 [6] establece un límite de 7 % para los valores individuales y de 6 % para los valores medios. Considerando estos límites

dos resultados no cumplen con el individual (en 3h8) y ocho valores medios superan el 6 %, es decir el 33 % de los moldes ensayados. Por su parte, las normas IRAM 11656 [8] y ASTM C936 [5] adoptan el límite de 7 % en los valores individuales y de 5 % en los valores medios. Para este último límite, dieciseis valores medios lo superaron. Esto representó el 67 % de los moldes ensayados.

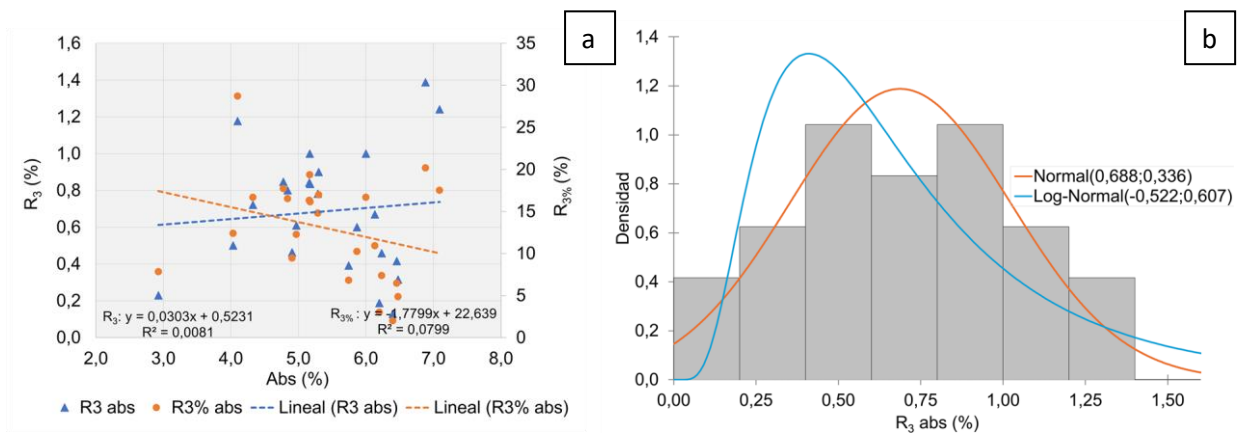
En la Figura 4a se presenta  $R_3\ abs$  y  $R_{3\%}\ abs$  en función de la absorción media, mientras que la Figura 4b muestra el histograma de  $R_3\ abs$ . Las líneas punteadas representan la tendencia de ambos parámetros, cuya horizontalidad o inclinación refleja la variabilidad de  $R_3$  o  $R_{3\%}$  con el nivel del parámetro de ensayo (en este caso la absorción de agua). En el gráfico de histograma se representa la curva de distribución normal y la log-normal, ambas determinadas a partir de la media aritmética y desviación estándar de los datos experimentales.

El rango de variación de tres resultados individuales  $R_3$  en un total de 24 moldes presentó un mínimo de 0,13 %, un máximo de 1,39 % y una media de 0,69 %. No se observó un aumento significativo en  $R_3\ abs$  con el incremento del nivel de absorción. Respecto del ajuste de los datos a la distribución normal, se observó una adecuada simetría entorno del valor medio. Sin embargo, la ‘‘cola izquierda’’ de la curva teórica penetra a la izquierda del eje de las ordenadas, resultando en valores de  $R_3$  absurdamente negativos. La distribución log-normal no presenta valores negativos, sin embargo, presenta un menor ajuste a la simetría de los datos.

Considerando los límites de la norma ABNT NBR 9781 [6] (6 % en la media y 7 % en el individual), la tolerancia permitida entre la media y el resultado individual máximo es 1 % para este nivel de absorción. En cambio, según IRAM 11656 [8] y ASTM C936 [5] (que fijan el límite de 5 % en la media y 7 % en el individual) la tolerancia es 2 %. Extrapolando estas tolerancias al parámetro  $R_3$ , representan una diferencia máxima entre el valor máximo y



**Figura 3.** Resultados individuales de Abs (en %) y su media aritmética por molde.



**Figura 4.** Variabilidad de la absorción por molde. a) Gráfico de  $R_{3abs}$  y  $R_{3\%abs}$ . b) Histograma de  $R_{3abs}$ .

mínimo de 2 % y 4 % respectivamente. De los datos experimentales se observó que la variabilidad en el molde fue inferior a la tolerancia establecida por la norma ABNT NBR 9781 [6], representando la media de  $R_3$  el 35 % de la tolerancia normativa (0,69 % / 2 %). Por otro lado, respecto a la tolerancia de 2 % de la IRAM 11656 [8] y de la ASTM C936 [5], la media de  $R_3$  resultó ser el 17 % (0,69 % / 4 %). Se debe tener en cuenta que las normas mencionadas anteriormente hacen referencia a la variabilidad total del lote. Sin embargo, el presente trabajo expone resultados de variabilidad de adoquines pertenecientes al

mismo molde, con lo cual es esperable que sea menor.

Consultadas otras normas de ensayos en hormigón endurecido, la ASTM C 642 [19] no proporciona valores de variabilidad de ensayo ni para la densidad ni para la absorción. La norma CSA 23.2-11C [20] establece que la diferencia en el resultado de la absorción de agua en hormigón no debe superar el 0,5 % (precisión del ensayo). En los adoquines extraídos de la producción más de la mitad de los moldes presentaron una variabilidad superior a la establecida en la norma

canadiense. Se debe tener en cuenta que esta norma considera la variabilidad del ensayo realizado por el mismo operador, sobre el mismo material y en un período corto de tiempo, empleando el mismo equipamiento. Si bien los adoquines para el estudio de variabilidad fueron extraídos del mismo molde, son elementos diferentes, por lo cual es esperable que sea mayor.

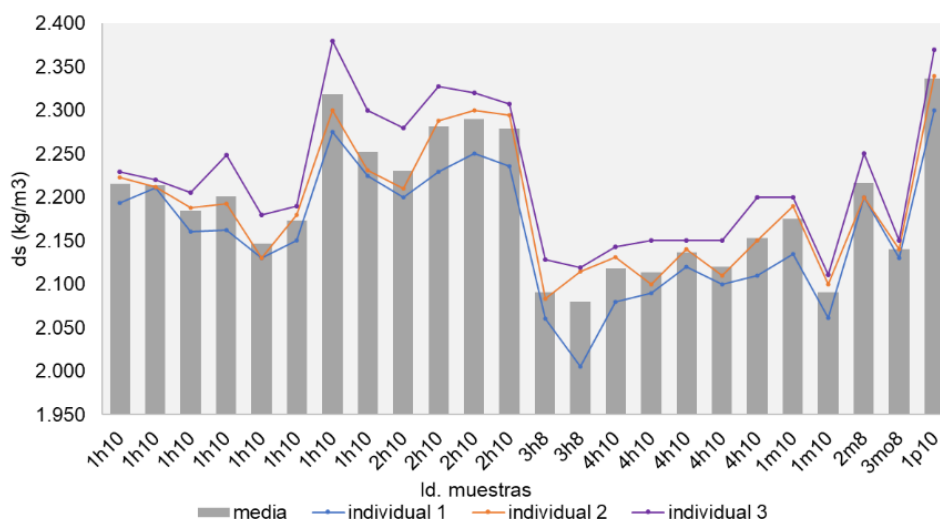
### 3.1.2 Densidad del adoquín en condición seco

En la Figura 5 se muestran los resultados individuales y promedio de la densidad ( $D_s$ ). Los resultados individuales estuvieron comprendidos entre 2005 kg/m<sup>3</sup> y 2380 kg/m<sup>3</sup>, mientras que los resultados medios por molde entre 2080 kg/m<sup>3</sup> y 2337 kg/m<sup>3</sup>. Estos resultados están entre los valores habituales para hormigón convencional según lo reportado en la literatura [23,24].

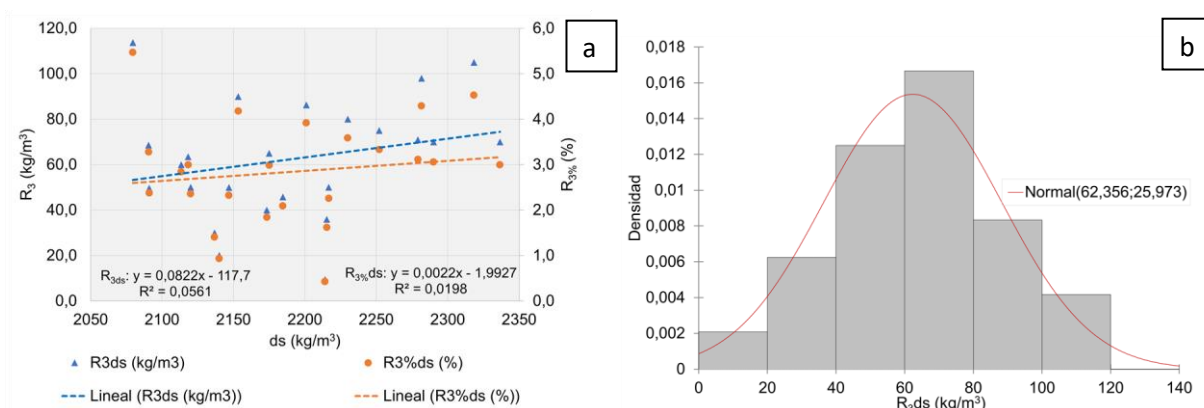
El rango de variación de tres resultados individuales  $R_3$  en un total de 24 moldes presentó un mínimo de 9,4 kg/m<sup>3</sup>, un máximo de 113,7 kg/m<sup>3</sup> y una media de 62,4 kg/m<sup>3</sup> (Figura 6). No se observó un aumento significativo de  $R_3$  con el aumento del nivel de densidad.

Las normas consultadas de adoquines no hacen referencia a la variabilidad del ensayo de densidad. A su vez y como ya se comentó, la norma ASTM C 642 [19] no cuenta con datos de variabilidad ni para el ensayo de densidad ni absorción. La norma canadiense CSA 23.2-11C [20] hace referencia a la diferencia en el resultado de ensayo de densidad del hormigón en estado endurecido, considerando el ensayo realizado por el mismo operador y en el mismo material, en un corto período de tiempo, no debería diferir en más de 20 kg/m<sup>3</sup>. La norma española UNE-EN 12390-7 [23] hace referencia a la variabilidad de la densidad saturada del hormigón endurecido empleando el método hidrostático y el método geométrico. En el primero la desviación estándar máxima esperada es de 6,5 kg/m<sup>3</sup> (que corresponde a un  $R_3$  máximo de 21,5 kg/m<sup>3</sup>). En el segundo la desviación estándar máxima es de 13,9 kg/m<sup>3</sup> (que corresponde a un  $R_3$  máximo de 45,9 kg/m<sup>3</sup>).

Por lo tanto, la variabilidad del ensayo de tres adoquines de cada molde extraídos de la producción local, resultó en la mayoría de los casos mayor a lo indicado en las normas de hormigón (Figura 6). Como ya se comentó para la absorción, los tres adoquines, aunque fueron extraídos del mismo molde, son



**Figura 5.** Resultados individuales y media aritmética por molde de  $D_s$  (en kg/m<sup>3</sup>).



**Figura 6.** Variabilidad de la densidad seca por molde. a) Gráfico de  $R_{3ds}$  y  $R_{3\%ds}$ . b) Histograma de  $R_{3ds}$ .

elementos diferentes por lo tanto con una variabilidad asociada diferente a las condiciones de precisión de ensayo de la norma canadiense y de la norma europea, por lo cual fue razonable un resultado mayor. Sin embargo, el resultado máximo obtenido de  $113,7 \text{ kg/m}^3$  resultó en más de 5 veces la variabilidad máxima del ensayo según la norma europea ( $21,5 \text{ kg/m}^3$ ), diferencia que resultó excesiva. Con lo cual, se considera oportuno evaluar en laboratorio las condiciones de repetibilidad del método de ensayo.

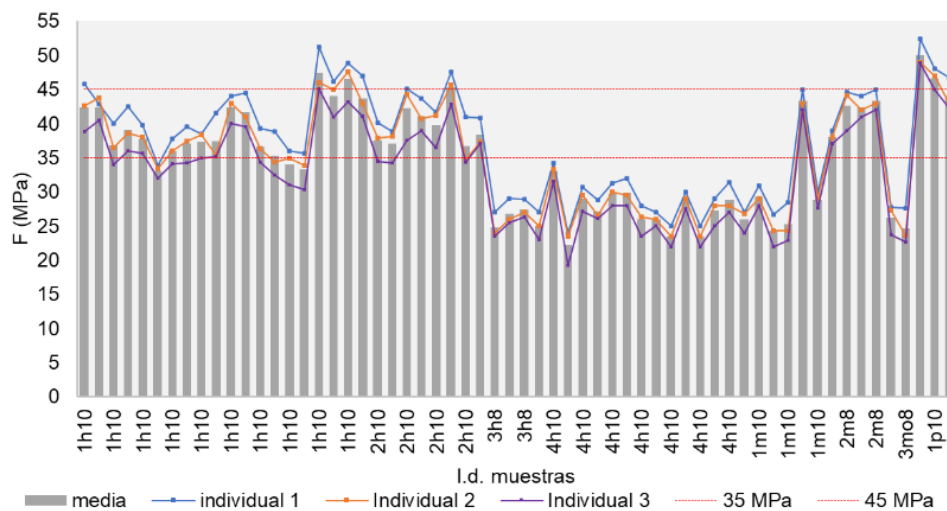
### 3.1.3 Resistencia a compresión

En la Figura 7 se muestran los resultados individuales y promedio de resistencia a la compresión ( $F$ ). Los resultados individuales estuvieron comprendidos entre  $19,2 \text{ MPa}$  y  $52,4 \text{ MPa}$  y la media por molde entre  $22,2 \text{ MPa}$  y  $50,1 \text{ MPa}$ . La normativa nacional UNIT 787 [13] considera dos clases de resistencia media,  $35 \text{ MPa}$  y  $45 \text{ MPa}$ . La primera, para uso en circulación peatonal y vehicular común y, la segunda, para uso en pavimentos con circulación de vehículos especiales. Considerando la clase de menor resistencia, 24 moldes presentaron resultados por debajo de este límite, lo que representó el 40 % de los moldes ensayados.

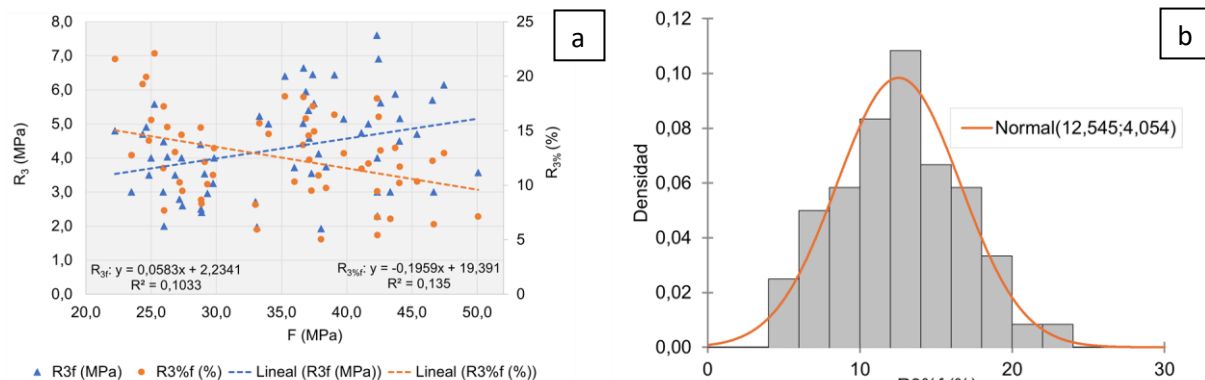
En la Figura 8a se graficó el rango absoluto ( $R_3$ ) y el rango relativo ( $R_{3\%}$ ) en función de la resistencia a compresión media y en la Figura 8b se muestra el histograma del rango relativo. En la resistencia mecánica la variabilidad suele expresarse relativa al nivel de resistencia [24-27]. En los datos propios se observó, de igual forma que en las referencias, el aumento de  $R_3$  con el aumento del nivel de resistencia (línea de tendencia azul en el gráfico de la Figura 8a) por lo que se consideró más adecuado adoptar el rango de variación relativo ( $R_{3\%}$ ).

$R_{3\%}$  presentó una media de  $12,5 \%$ , mínimo de  $5,1 \%$  y máximo de  $22,5 \%$ . Las normas de adoquines no hacen referencia al rango de variación entre resultados individuales y medios en la resistencia a la compresión, por lo tanto, fueron consultadas otras normas y reglamentos que hacen referencia al ensayo de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón. En tal sentido, el reglamento CIRSOC 201 [28] hace referencia al límite normativo para validar la media de tres resultados de probetas de  $150 \text{ mm}$  de diámetro y  $300 \text{ mm}$  de altura, fabricadas de una misma canchada. Aquí el rango de variación relativo máximo es  $15 \%$ . En los adoquines la variabilidad máxima correspondió a 1,5 veces la variabilidad en probetas ( $22,5 \%$  /  $15 \%$ ).





**Figura 7.** Resultados individuales y media aritmética por molde de  $F$  (MPa).



**Figura 8.** Variabilidad de  $F$  por molde. a) Gráfico de  $R_3 f$  y  $R_{3\%} f$ . b) Histograma de  $R_{3\%} f$  (%).

La norma ASTM C 39 [25] considera una precisión (rango de variación de tres resultados de ensayos en probetas de una misma canchada, fabricadas en el mismo laboratorio, ensayadas empleando el mismo equipamiento y por el mismo operario, en un corto período de tiempo) de 7,8 % para probetas de 150 mm x 300 mm fabricadas en condiciones de laboratorio y 9,5 % para probetas de 150 mm x 300 mm fabricadas en obra. La variabilidad máxima en los adoquines resultó en 2,4 veces mayor a la variabilidad del ensayo en probetas de obra (22,5 % / 9,5 %).

Por otro lado, los resultados de resistencia a compresión fueron comparados con datos previos reportados en la literatura. En particular, se adoptaron los valores de

resistencia a compresión de 22 lotes de producción nacional analizados en el estudio de Gutiérrez y colaboradores [29], donde se registró una desviación estándar del lote de 7 MPa (lo que correspondió a un coeficiente de variación de 23,3 % y a un  $R_{3\%}$  de 76,9 %). A su vez, Dowson [30] indicó que, para sistemas de producción de alta capacidad con tecnología de vibración, se podría adoptar una desviación estándar de 7 MPa, en concordancia con los valores reportados por Gutiérrez et al. [26]. Ambos estudios hacen referencia a la variabilidad total del lote reflejada en la desviación estándar (o coeficiente de variación), mientras que en este trabajo se evaluó específicamente la variabilidad de tres ensayos extraídos del mismo molde de producción. Esta distinción es relevante, ya que la variabilidad dentro de un

lote completo suele ser mayor debido a diferencias en materias primas, procesos de curado y condiciones operativas. En consecuencia, es esperable que los valores obtenidos del estudio sean inferiores a los reportados previamente en la literatura.

### 3.1.4 Módulo de rotura

En la Figura 9 se muestran los resultados individuales y promedio del módulo de rotura ( $MR$ ). Los resultados individuales estuvieron comprendidos entre 4,1 MPa y 7,9 MPa y los resultados medios entre 4,4 MPa y 7,6 MPa. La norma argentina IRAM 11656 [8] indica entre sus requisitos un valor medio de 4,2 MPa y un mínimo individual de 3,8 MPa. La norma colombiana NTC 2017 [9] además de los límites anteriores, adopta el límite de 5,0 MPa para la media y en correspondencia 4,2 MPa de mínimo en el resultado individual. De un total de 72 ensayos, todos los resultados individuales fueron mayores a 3,8 MPa, solo tres resultaron por debajo de 4,2 MPa y la media por muestra fue en todos los casos mayor de 4,2 MPa y cinco estuvieron por debajo de 5,0 MPa.

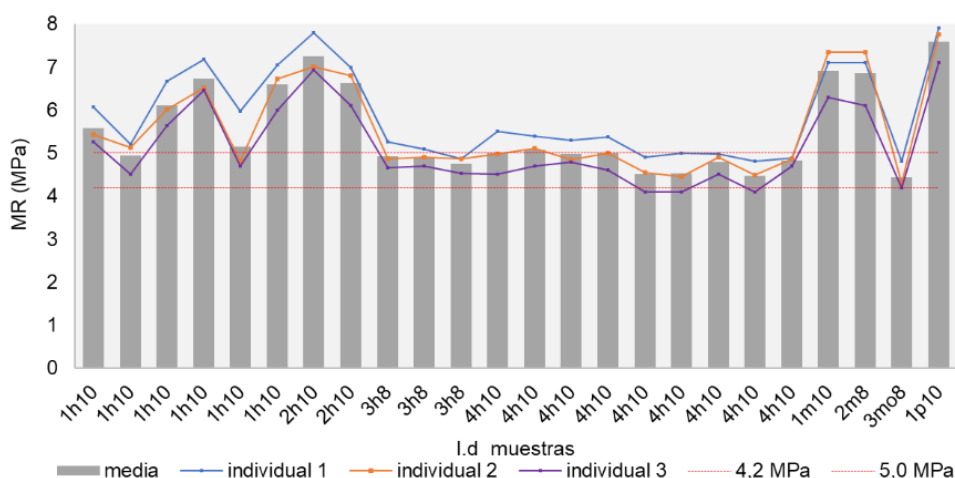
El rango de variación relativo de tres resultados individuales del mismo molde ( $R_{3\%}$ ) presentó una media de 13,6 %, mínimo de

3,9 % y máximo de 24,7 % (Figura 10). De forma similar a lo sucedido en la resistencia a la compresión, se observó el aumento de  $R_3$  con el aumento del nivel de resistencia.

Considerando los límites en la norma argentina (4,2 MPa en la media y 3,8 MPa en el individual), la diferencia entre ambos es de 0,4 MPa. Extrapolando esta diferencia al parámetro  $R_3$  a este nivel de resistencia media, correspondería a 0,8 MPa y expresado en  $R_{3\%}$  a 20 % (0,8 MPa / 4,2 MPa x 100). Por lo tanto, la variabilidad media del molde  $R_{3\%}$  correspondió al 70 % de la diferencia entre ambos límites indicados en la norma argentina. De igual forma, pero adoptando la diferencia entre la resistencia media de 5 MPa y la individual de 4,2 MPa (0,8 MPa) de la norma colombiana, lo cual corresponde a  $R_3$  de 1,6 MPa y a  $R_{3\%}$  de 32 % (1,6 MPa / 5 MPa x 100), el  $R_{3\%}$  de los datos en adoquines correspondió al 43 % de esta diferencia.

### 3.1.5 Resistencia a tracción indirecta por compresión ( $T$ )

Los resultados individuales estuvieron comprendidos entre 3,6 MPa y 8,1 MPa y la media aritmética de tres ensayos entre 3,9 MPa y 7,4 MPa (Figura 11). La norma europea UNE-EN 1338 [11] indica entre sus



**Figura 9.** Resultados individuales y media aritmética por molde de MR (MPa).

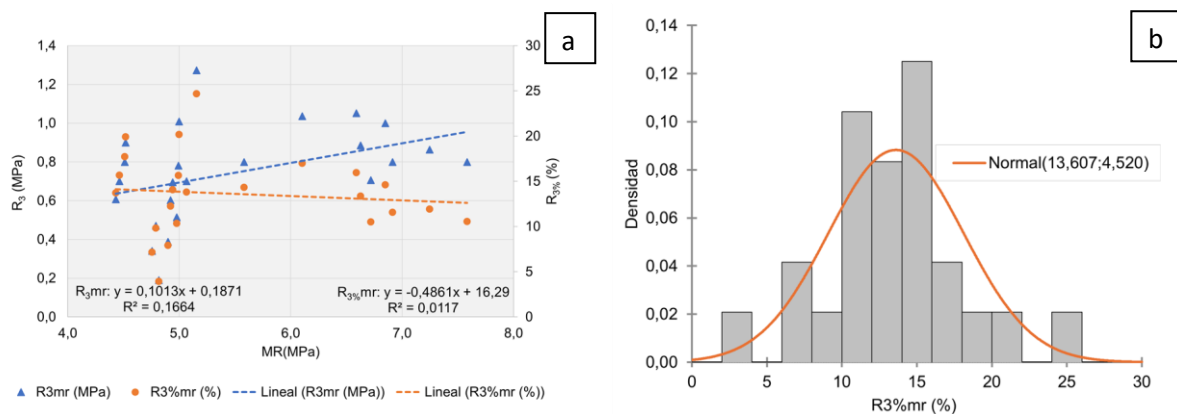


Figura 10. Variabilidad de MR por molde. a) Gráfico de  $R_3$  mr y  $R_{3\%}$  mr. b) Histograma de  $R_{3\%}$  mr (%).

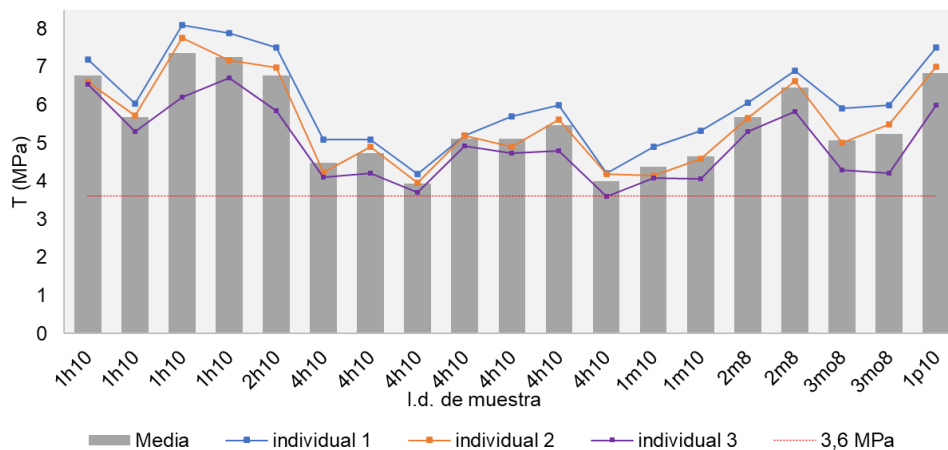


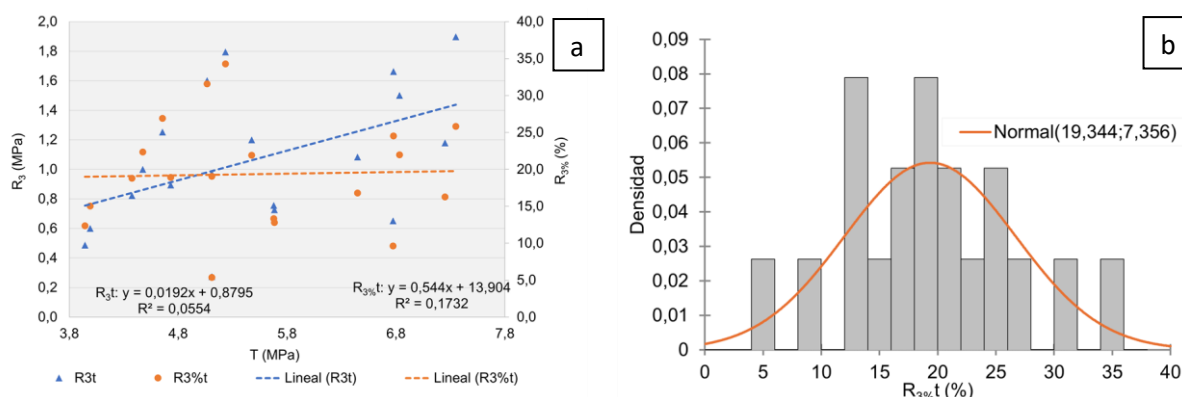
Figura 11. Resultados individuales y media aritmética por molde de  $T$  (MPa).

requisitos una resistencia característica mínima de 3,6 MPa (calculada a partir de seis resultados de ensayo) y un valor individual mínimo de 2,9 MPa. Si bien la media aritmética no se puede comparar de forma directa con el límite normativo expresado en resistencia característica, todos los moldes presentaron una media aritmética mayor de 3,9 MPa. Todos los resultados individuales resultaron mayores de 2,9 MPa.

El rango de variación relativo de tres resultados individuales del mismo molde ( $R_{3\%}$ ) presentó una media de 19,3 %, con un mínimo de 5,4 % y un máximo de 34,3 % (Figura 12). De forma similar a lo sucedido en la resistencia a la compresión y el módulo de rotura, se

observó el aumento de  $R_3$  con el aumento del nivel de resistencia.

Las normas de adoquines no hacen referencia al rango de variación en este método de ensayo. Consultadas las normas de hormigón, la ASTM C 496 [27] considera que el rango de variación de tres resultados del mismo laboratorio, en probetas de una misma canchada, ensayadas por el mismo operario, empleando el mismo equipamiento y en un lapso corto de tiempo, no debe exceder de 12 % para probetas de 150 mm x 150 mm x 510 mm. Por lo tanto, la variabilidad máxima en los adoquines resultó 2,8 veces mayor a la variabilidad indicada en la norma para probetas de hormigón. Como ya se comentó, si bien los adoquines fueron extraídos del



**Figura 12.** Variabilidad de  $T$  por molde. a) Gráfico de  $R_3 t$  y  $R_{3\%} t$ . b) Histograma de  $R_{3\%} t$  (%).

mismo molde, son elementos diferentes, por lo cual era esperable una mayor variabilidad.

### 3.1.6 Resistencia al desgaste ( $D$ )

Los resultados individuales estuvieron comprendidos entre 18,5 mm y 29,5 mm y la media aritmética de tres ensayos entre 19,5 mm y 28,0 mm (Figura 13).

La normativa nacional UNIT 787 [13] no incluye dentro de sus requerimientos esta evaluación, ya que emplea una metodología diferente, específicamente el ensayo de desgaste Dorry. Las normas UNE-EN 1338 [11], NBR 9781 [6] y NTE 3040 [12] establecen un límite de huella media, empleando el mismo método de ensayo, de 23 mm para pavimentos expuestos a tránsito común y de 20 mm para tránsito pesado. Por otro lado, la normativa IRAM 11656 [8] y NTC 2017 [9] adoptan un único límite para todos los tipos de pavimentos, de huella media de 23 mm. La norma UNE-EN 1339 [31] (para baldosas de hormigón) define cuatro clases de resistencia al desgaste: Clase 1, sin requisito; Clase 2, 26 mm, Clase 3, 23 mm, Clase 4, 20 mm. Estos requisitos son indicados a la media aritmética de tres resultados de ensayo, sin especificar requisitos a los resultados individuales. En las muestras ensayadas todos los lotes presentaron resultados medios de la huella mayores de 20 mm, salvo en uno de los moldes del lote 4h10. Respecto al límite de 23 mm,

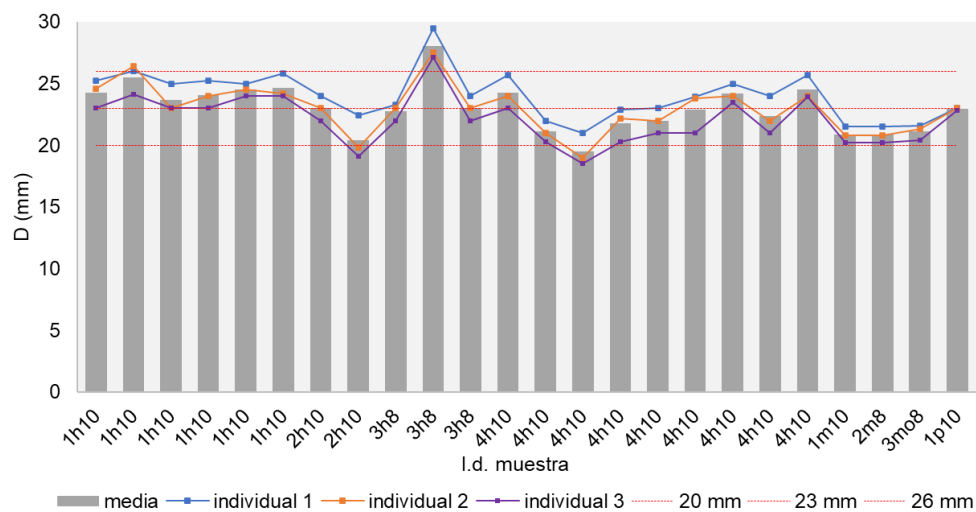
sólo trece resultados estuvieron por debajo y el resto alcanzaron ese límite (lo que representó el 46 % de los moldes).

El rango de variación  $R_3$  presentó una media de 2 mm, con un mínimo de 0,2 mm y un máximo de 3,3 mm (Figura 14). A su vez, no se observó un aumento de  $R_3$  con el aumento del nivel de desgaste.

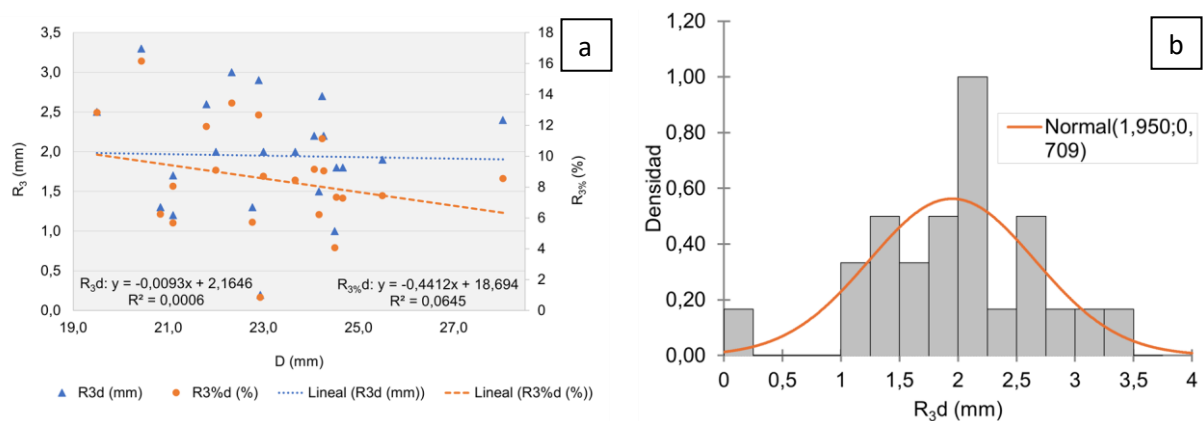
Existe algún trabajo previo en donde fue empleado el mismo método de ensayo, aunque estos son escasos. Dowson [30], evaluó la variabilidad del ensayo de desgaste en adoquines de seis empresas. La desviación estándar media de 14 ensayos fue de 0,37 mm (lo que correspondió a  $R_3$  de 1,2 mm, aproximadamente), resultando algo inferior a lo obtenido en el presente trabajo). Por otro lado, Reaple [32] evaluó la dispersión de la producción de dos empresas en un período de 5 años (2010 a 2015). La desviación fue 3,7 mm (lo que correspondió a  $R_3$  de 12,2 mm, aproximadamente), resultando en una variabilidad excesiva comparado con los datos del presente trabajo.

### 3.2 Análisis del rango de variación de los resultados de ensayo

En la Tabla 2 se presenta el resumen del análisis estadístico del rango de variación para cada uno de los parámetros de ensayo. Los resultados indican que, en todos los casos, el



**Figura 13.** Resultados individuales y media aritmética por molde de  $D$  (mm).



**Figura 14.** Variabilidad de  $D$  por molde. a) Gráfico de  $R_3 d$  y  $R_{3\%} d$ . b) Histograma de  $R_3 d$  (%).

$p$ -valor asociado a la prueba de normalidad fue superior al nivel de significancia adoptado ( $\alpha = 0,05$ ). En consecuencia, se puede afirmar que los conjuntos de datos correspondientes al rango de variación de tres adoquines ensayados por molde siguen una distribución normal. A partir de esta distribución se calculó el límite inferior (LI) y superior (LS) de  $R_3$  o  $R_{3\%}$  según se indica.

El hormigón, por su naturaleza heterogénea, presenta una variabilidad inherente. Asimismo, sus propiedades son evaluadas empleando magnitudes de naturaleza estocástica, por lo que también tienen asociada una variabilidad de carácter aleatoria. De esta forma, la variabilidad en los resultados de los ensayos en hormigón puede estar asociada a cuatro

fuentes principales: a los materiales constituyentes, al proceso de producción y construcción, a la toma de la muestra y al ensayo en sí. La acumulación de todas resulta en la variabilidad global o general del resultado [24].

Cuando se evalúa la calidad de la producción a partir de la variabilidad de los resultados de los ensayos se debe considerar que este puede incluir no solo la variabilidad propia de la producción, sino también la variabilidad de la toma de muestra, así como del ensayo en sí. Estas dos últimas fuentes de variabilidad están asociadas exclusivamente al responsable de la toma de muestra y al laboratorio de ensayo y es independiente del productor. Adoptando procedimientos normalizados tanto para la



**Tabla 2.** Resumen de variabilidad de los parámetros de ensayo.

| Parámetro de ensayo | # de moldes | $R_3$ (o $R_{3\%}$ )          | $p$ -valor (bilateral) | Interpretación             | Media aritmética de la distribución de $R_3$ (o $R_{3\%}$ ) | Desviación estándar (s) o coef. de variación (cv) | Límite Inferior (LI) | Límite Superior (LS) |
|---------------------|-------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| <i>Abs</i>          | 24          | $R_3$ (en %)                  | 0,811                  | $R_3$ con dist. normal     | 0,7 %                                                       | 0,3 %                                             | 0,1                  | 1,4                  |
| $D_s$               | 24          | $R_3$ (en kg/m <sup>3</sup> ) | 0,857                  | $R_3$ con dist. normal     | 62,4 kg/dm <sup>3</sup>                                     | 26,0 kg/dm <sup>3</sup>                           | 19,6                 | 105,2                |
| $F$                 | 60          | $R_{3\%}$ (en %)              | 0,951                  | $R_{3\%}$ con dist. normal | 12,6 %                                                      | 4,1 %                                             | 5,9                  | 19,2                 |
| $MR$                | 24          | $R_{3\%}$ (en %)              | 0,982                  | $R_{3\%}$ con dist. normal | 13,6 %                                                      | 4,5 %                                             | 6,2                  | 21,0                 |
| $T$                 | 21          | $R_{3\%}$ (en %)              | 0,961                  | $R_{3\%}$ con dist. normal | 19,3 %                                                      | 7,4 %                                             | 7,2                  | 31,4                 |
| $D$                 | 24          | $R_3$ (en mm)                 | 0,904                  | $R_{3\%}$ con dist. normal | 1,95 mm                                                     | 0,7 mm                                            | 0,8                  | 3,1                  |

$p$ -valor: valor de significancia (se compara con  $\alpha = 0,05$ ) en la prueba de Normalidad Shapiro-Wilk; s: desviación estándar; cv: coeficiente de variación; y LI y LS: límite inferior y límite superior del rango de variación de los datos al 95 %, considerando las observaciones con distribución normal.

toma de muestra como para los ensayos, la variabilidad asociada al muestreo y al ensayo es de carácter aleatorio y la distribución de resultados al repetir el ensayo sigue una distribución normal o gaussiana, caracterizada por una media aritmética y una desviación estándar (s) o coeficiente de variación (cv o s%).

Sin embargo, en la práctica es difícil evaluar s (o s%) del ensayo en el laboratorio dado la cantidad de repeticiones de ensayo sobre una misma muestra para que sea válido la determinación de s. Por lo tanto, para evaluar la variabilidad es habitual trabajar con el concepto de rango de variación. Por este motivo en la mayoría de los ensayos de hormigón o de sus componentes, tanto las normas americanas como europeas, junto con s (o s%), incluyen el rango de variación de dos o más determinaciones realizadas por el mismo operario, empleando el mismo equipamiento y en un corto período de tiempo [23,25-27]. Es posible la vinculación de carácter estadístico entre s (o s%) y el rango de variación absoluto (o relativo) para resultados de ensayos que pertenecen a una misma población de distribución normal. La norma ASTM C670, Tabla 1 [33], indica la vinculación entre ambos para la variabilidad de

los métodos de ensayo, y dependiendo de la cantidad de ensayos. Por ejemplo, considerando dos ensayos, s o s% se debe multiplicar por 2,8 para obtener d2 o d2% respectivamente y considerando tres ensayos, s o s% se debe multiplicar por 3,3 para obtener d3 o d3% (estos últimos equivalen a los parámetros  $R_3$  o  $R_{3\%}$  del trabajo).

En particular, los adoquines son elementos de hormigón y de igual forma a lo expuesto anteriormente, presentan variabilidad asociada a la producción (en los materiales, en la dosificación y mezclado, en la compactación y curado) y al ensayo [30]. En su producción se emplea arena, gravillín (habitualmente piedra partida de 5 mm a 14 mm), cemento pórtland y agua. Se mezclan los componentes, se llena un molde (de varios adoquines) y luego se vibro-compacta. Los adoquines son colocados en estanterías y curados en horno de vapor a una temperatura entre 50 °C y 70 °C. Finalizado el curado, estos se desmoldan, se colocan en pallets y son llevados al depósito de stock. De este depósito son extraídos aleatoriamente las muestras para realizar los ensayos de control de calidad. El control de calidad se realiza por lote. Un lote está constituido por un conjunto de adoquines de iguales características, producidos bajo las

mismas condiciones y con los mismos materiales. Los adoquines son extraídos de forma aleatoria del lote, por lo tanto, la variabilidad de los resultados de ensayo incluirá la variabilidad entre moldes y la variabilidad entre elementos pertenecientes al mismo molde. Como se expuso en la Tabla 2, el presente trabajo permitió estimar la variabilidad de los resultados de ensayo considerando la variabilidad propia del ensayo y la variabilidad entre muestras extraídas de un mismo molde.

### 3.3 Correlación entre la resistencia a la compresión y el resto de las propiedades físico-mecánicas

En la Figura 15 se expone la correlación de la absorción de agua ( $Abs$ ) con la resistencia a compresión ( $F$ ) y de la densidad en estado seco ( $D_s$ ) con la resistencia a la compresión ( $F$ ). En la Tabla 3 se presenta los datos de cada modelo de regresión y la estimación de  $Abs$  y  $D_s$  en función de los niveles de resistencia de la norma UNIT 787 [13].

En ambos parámetros de ensayo se obtuvo una razonable correlación con la resistencia a la compresión, esto se reflejó en el coeficiente de correlación  $R^2$  (0,670 y 0,761 respectivamente), el coeficiente “a” del modelo de regresión no incluyó al 0 entre sus posibles valores y la prueba de normalidad de los residuos (prueba Shapiro-Wilk) dio un  $p$ -valor mayor al nivel de significación ( $\alpha = 0,05$ ) en ambos casos. La mayor absorción está relacionada a mayor porosidad y a una menor resistencia a la compresión. Por lo tanto, existe una relación inversa entre ambas variables. Respecto a la densidad, cuanto mayor sea la masa volumétrica del elemento, menor su porosidad y por lo tanto mayor la resistencia a la compresión, existiendo una relación directa. Ambos comportamientos han sido reportados previamente por otros autores [23,24].

En la Figura 16 se expone la correlación del módulo de rotura ( $MR$ ) con la resistencia a

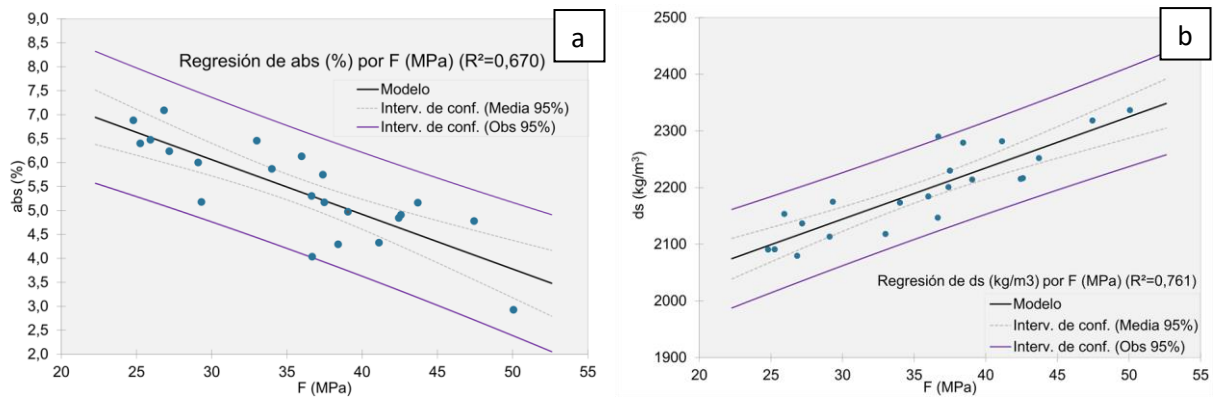
compresión y de la resistencia a tracción indirecta ( $T$ ) con la resistencia a compresión. En la Tabla 4 se presentan los datos de cada modelo de regresión y la estimación de  $MR$  y  $T$  en función de los niveles de resistencia de la norma UNIT 787 [13].

Si bien ambos parámetros de ensayo presentaron una razonable correlación lineal con la resistencia a la compresión (esto se reflejó en el  $R^2$ , en el rango de variación del término “a” el cual excluye al 0 y en la prueba de normalidad a los residuos del modelo de regresión), se obtuvo una mejor correlación entre el módulo de rotura ( $MR$ ) y la resistencia a la compresión que entre la resistencia a tracción indirecta ( $T$ ) y la resistencia a la compresión ( $R^2$  de 0,855 y 0,753, respectivamente).

Por lo tanto, partiendo de los niveles de resistencia a compresión que existe actualmente en la norma UNIT 787 [13] de 35 MPa y 45 MPa, para cada nivel se sugiere tomar como referencia los valores medios de los otros parámetros de ensayo (absorción, densidad en estado seco, módulo de rotura y resistencia a tracción por compresión) comprendidos en los rangos indicados en las Tablas 3 y 4.

A 35 MPa (clase de resistencia menor en UNIT 787 [13]), la absorción estuvo por debajo de 7,0 %, por lo tanto y considerando la producción local, en la práctica este no sería una limitante ya que, al cumplir con el requisito de resistencia, la absorción sería menor. En caso de adoptar un límite se propone reducirlo a 6 % al nivel de 35 MPa y 5 % al nivel de 45 MPa.

El rango de densidades estimado para ambos niveles de resistencia se consideró dentro de los niveles esperados para hormigón fabricado con agregados naturales y cemento pórtland normal [21,22,34]. Si bien no se considera necesario la adopción de una exigencia en este parámetro, puede ser un dato útil para calcular el peso por unidad de superficie del pavimento.

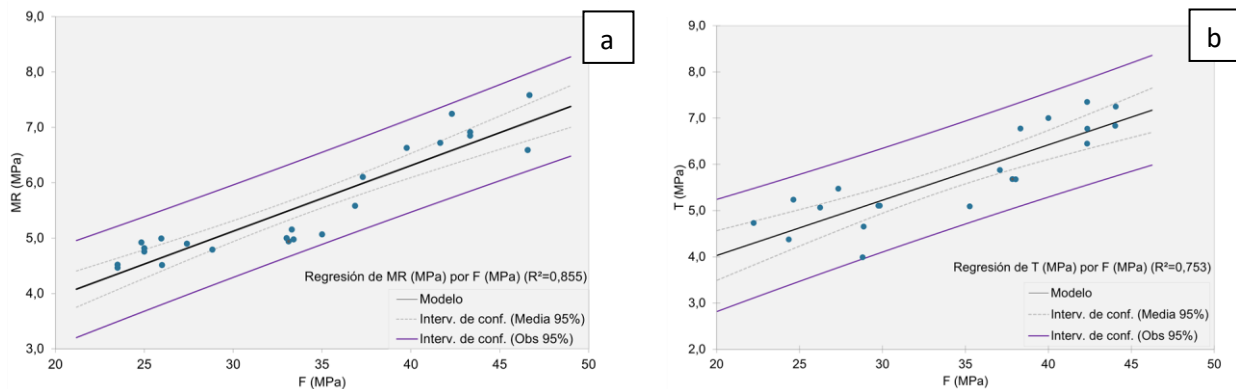


**Figura 15.** Gráficos de modelos de regresión lineal. a) *Abs* en función de *F*. b) *D<sub>s</sub>* en función de *F*.

**Tabla 3.** Resumen del modelo de regresión lineal y estimación de los parámetros *Abs* y *D<sub>s</sub>* en función de *F* (para 35 MPa y 45 MPa).

|                                           | Modelo: $y_i = a * f_i + b + e_i$ |                            |                       | Prueba normalidad $e_i$ | <i>F</i> = 35 MPa |        | <i>F</i> = 45 MPa |        |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|--------|-------------------|--------|
|                                           | <i>b</i>                          | <i>a</i>                   | <i>R</i> <sup>2</sup> |                         | LI                | LS     | LI                | LS     |
| <i>Abs</i> (%)                            | 9,487<br>[8,128; 10,846]          | -0,114<br>[-0,152; -0,077] | 0,670                 | <i>p</i> -valor = 0,134 | 4,2               | 6,7    | 3,0               | 5,7    |
| <i>D<sub>s</sub></i> (kg/m <sup>3</sup> ) | 1873,387<br>[1787,479; 1959,294]  | 9,028<br>[6,666; 11,390]   | 0,761                 | <i>p</i> -valor = 0,589 | 2108,3            | 2270,5 | 2195,7            | 2363,3 |

Entre [ ] se representó el rango de variación de los coeficientes *b* y *a*. LI: límite inferior en la estimación del parámetro de ensayo a partir de la resistencia a la compresión; LS: límite superior. El modelo de *Abs* y *D<sub>s</sub>* es válido para *F* entre 24,8 MPa y 50,1 MPa.



**Figura 16.** Gráficos de modelos de regresión lineal. a) *MR* vs. *F*. b) *T* vs. *F*.

A 35 MPa de resistencia a compresión media, la estimación del módulo de rotura medio estuvo comprendido entre 4,9 MPa y 6,5 MPa y la resistencia a tracción indirecta por compresión entre 4,7 MPa y 7,1 MPa. Para 45 MPa de resistencia a compresión media, el

módulo de rotura estuvo entre 6,0 MPa y 7,8 MPa. Como se observa en la Figura 16b, a 45 MPa de resistencia a la compresión no se tuvieron resultados de tracción indirecta, por lo que no es válido extrapolar el modelo de correlación hasta ese nivel de resistencia.

**Tabla 4.** Resumen del modelo de regresión lineal y estimación de los parámetros  $MR$  y  $T$  en función de  $F$  (para 35 MPa y 45 MPa).

|            | Modelo: $y_i = a * f_i + b + e_i$ |                         |       | Prueba normalidad $e_i$     | $F = 35 \text{ MPa}$ |     | $F = 45 \text{ MPa}$ |           |
|------------|-----------------------------------|-------------------------|-------|-----------------------------|----------------------|-----|----------------------|-----------|
|            | b                                 | a                       | $R^2$ |                             | LI                   | LS  | LI                   | LS        |
| $MR$ (MPa) | 1,567<br>[0,800; 2,335]           | 0,119<br>[0,096; 0,141] | 0,855 | $p\text{-valor} =$<br>0,134 | 4,9                  | 6,5 | 6,0                  | 7,8       |
| $T$ (MPa)  | 1,632<br>[0,444; 2,819]           | 0,120<br>[0,086; 0,154] | 0,753 | $p\text{-valor} =$<br>0,264 | 4,7                  | 7,1 | Sin datos            | Sin datos |

Entre [ ] se representó el rango de variación de los coeficientes  $b$  y  $a$ . LI: límite inferior en la estimación del parámetro de ensayo a partir de la resistencia a la compresión; LS: límite superior. El modelo en  $MR$  es válido para  $F$  entre 23,5 MPa y 46,7 MPa y en  $T$  es válido para  $F$  entre 22,2 MPa y 44,1 MPa.

Rachman y colaboradores [35] evaluaron la producción de adoquines con la incorporación de ceniza proveniente del té. El rango de resistencia a la compresión estuvo comprendido entre 7 MPa y 20 MPa y el módulo de rotura entre 1,5 MPa y 3,7 MPa. Los coeficientes del modelo de regresión lineal entre ambas variables fueron 0,16 y 0,67 ( $a$  y  $b$ , respectivamente). Por lo tanto, la pendiente de la regresión resultó similar a la obtenida en los datos propios (0,16 contra 0,12).

Benítez y colaboradores [36] realizaron un trabajo experimental donde se obtuvieron resistencias a la compresión entre 25,6 MPa y 43,2 MPa, el módulo de rotura estuvo comprendido entre 5,1 MPa y 7,8 MPa. En este, el módulo de rotura representó cerca del 20 % de la resistencia a compresión. En los datos propios esta relación fue algo menor, 16 % aproximadamente. Para vigas de hormigón y según lo reportado en la bibliografía para el método de ensayo de tres puntos (equivalente al ensayo en adoquines) la relación entre ambas resistencias está comprendida entre 15 % y 25 % [34].

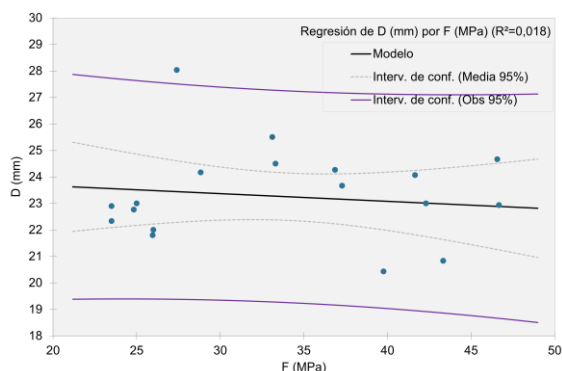
La norma IRAM 11656 [8] adopta un mínimo en el valor medio del módulo de rotura de 4,2 MPa. Considerando la producción nacional, este límite resultó por debajo del nivel de resistencia a la compresión de 35 MPa. La norma NTG 41086 [10] para tránsito industrial pesado adopta un límite más exigente en el valor medio de módulo de rotura de 5,4 MPa.

Este límite se ajustaría mejor a los niveles de resistencia a la compresión obtenidos de la producción nacional. Aplicando el modelo de regresión lineal, este límite estaría dentro del rango obtenido para 35 MPa de resistencia a la compresión. La norma NTC 2017 [9] (adoptada como referencia en IRAM y UNIT) además del límite de 4,2 MPa ya mencionado, adopta el límite de 5,0 MPa para el valor medio. De los datos experimentales, este límite quedó dentro del rango obtenido para 35 MPa de resistencia a la compresión. Límites similares aplican para la NTON 12 009 [37].

La norma UNE-EN 1338 [11] y la NTE 3040 [12] exigen un valor característico de 3,6 MPa en la resistencia a tracción indirecta. Por ser un valor característico no se puede extrapolar a los datos propios de correlación.

Por otro lado, se analizó la correlación entre la resistencia al desgaste (a través del parámetro ancho de huella de desgaste  $D$ ) y la resistencia a la compresión ( $F$ ). En las muestras ensayadas no se observó correlación alguna ( $R^2$  de 0,018). Se evidencia en la Figura 17 la disposición de los resultados sobre una franja predominantemente horizontal, lo cual indicó la independencia de  $D$  respecto de  $F$ .

Intuitivamente se podría esperar que, al mejorar las propiedades mecánicas de los adoquines, mejorara la resistencia al desgaste. Sin embargo, esto no fue observado en los datos experimentales. Se considera un



**Figura 17.** Gráfico de modelo de regresión lineal  $D$  vs  $F$ .

parámetro importante el que debe estar incluido como requisito normativo, ya que no presentó correlación con la resistencia a compresión, pero es fundamental para el comportamiento y durabilidad de estos pavimentos. Es conocido [37,38] que la resistencia al desgaste se ve afecta por la calidad y dureza de los componentes que se encuentran cerca de la superficie del elemento, mientras que la resistencia mecánica es una propiedad de volumen. En la resistencia a la abrasión influyen diversas características de los materiales; tanto la pasta de cemento como el mortero presentan menor resistencia a la abrasión que los agregados. A la vez, distintos tipos de agregados proporcionan diferente resistencia a la abrasión en función de su dureza, pero puede no ser tan significativo su efecto en la resistencia a la compresión. También el uso de adiciones (en forma de puzolanas o cementantes), incrementa la resistencia a la compresión, pero no aporta incrementos significativos en la resistencia a la abrasión [39]. Esta falta de correlación ya había sido reportada por Arango [40]. El autor evaluó la correlación de diferentes propiedades físicas-mecánicas, ensayando adoquines procedentes de diferentes productores de Colombia. En relación con la evaluación del desgaste empleó el mismo método que en la presente investigación y no observó correlación con ninguna de las otras propiedades.

A su vez se hace una mención crítica al método de ensayo de desgaste. La metodología está

normalizada en otras regiones, pero su aplicación en Uruguay es nueva. El equipo fue fabricado en el marco de la tesis doctoral “Propiedades físico-mecánicas en adoquines y evaluación de la capacidad estructural de pavimentos articulados”. Si bien se realizó la calibración con el material patrón según lo indica el procedimiento normativo, no se realizó un estudio de repetibilidad y de reproducibilidad para evaluar la confiabilidad de los resultados.

#### 4. Conclusiones

Este estudio evaluó las propiedades físico-mecánicas de adoquines de hormigón de producción nacional, generando una base de datos que podrá contribuir a la actualización de la normativa vigente. Se incluyeron los parámetros de absorción de agua, densidad, resistencia a compresión, módulo de rotura, resistencia a tracción indirecta por compresión y resistencia a la abrasión. Se analizó la variabilidad entre los resultados de ensayo en adoquines pertenecientes a un mismo molde de producción y la correlación entre los diferentes parámetros y la resistencia a la compresión.

Se propone que la evaluación de cada una de las propiedades físico-mecánicas se realice considerando requisitos tanto para la media aritmética, como para los resultados individuales de tres adoquines ensayados. Como antecedente local, se sugiere adoptar los siguientes valores de variabilidad máxima: 1,4 % en la absorción de agua (diferencia absoluta entre máximo y mínimo), 105,2 kg/m<sup>3</sup> en la densidad en estado seco (diferencia absoluta entre máximo y mínimo), 19,2 % en la resistencia a la compresión (diferencia relativa entre máximo y mínimo), 21,0 % en el módulo de rotura (diferencia relativa entre máximo y mínimo), 31,4 % en la tracción por compresión indirecta (diferencia relativa entre máximo y mínimo) y 3,1 mm en la huella de desgaste (diferencia absoluta entre máximo y mínimo), correspondientes al límite superior de  $R_3$  (o  $R_{3\%}$ ), según se detalló en la Tabla 2. Se deberá



tener en cuenta que estos valores reflejan la variabilidad obtenida a partir de muestras provenientes de un mismo molde de producción. Por lo tanto, para una serie de tres adoquines extraídos de diferentes moldes la variabilidad podría incrementarse, aspecto que deberá contemplarse al establecer criterios de aceptación.

La absorción de agua en la mayoría de los casos cumplió con el límite normativo nacional vigente ( $\leq 7\%$  para resultados individuales), aunque se identificó que este umbral resultó relativamente laxo, por lo que se sugiere su revisión y posible ajuste hacia un valor más restrictivo, cercano a  $6\%$ . Por su parte, la densidad en estado seco se encontró entre los valores habituales para hormigón convencional (entre  $2080\text{ kg/m}^3$  y  $2337\text{ kg/m}^3$ ), aunque se observó una variabilidad considerablemente mayor a lo que indican las normas para hormigón endurecido, alcanzando  $105,2\text{ kg/m}^3$  en los adoquines frente a  $21,5\text{ kg/m}^3$ , según la norma UNE-EN 12390-7 [23], considerando un método de ensayo similar.

El  $40\%$  de los moldes ensayados presentó una resistencia a compresión menor a la resistencia de  $35\text{ MPa}$  establecido en la norma UNIT 787 [13], evidenciando una heterogeneidad en la producción local. Esto sugiere la necesidad de incorporar nuevas clases de resistencia en futuras actualizaciones normativas para reflejar mejor la variabilidad observada en el mercado.

Si bien tanto el módulo de rotura como la resistencia a tracción indirecta presentaron una adecuada correlación con la resistencia a la compresión, se obtuvo una mejor correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión. Entre las tres resistencias mecánicas se propone adoptar el módulo de rotura como requisito en la actualización normativa. Además de ser la forma en que el adoquín se comporta estructuralmente en el pavimento, para el ensayo se necesita una carga máxima menor, presenta menor dispersión de los resultados individuales en

comparación con la resistencia a tracción por compresión, a la vez que se puede hacer su determinación a continuación del ensayo de desgaste, ambos sobre el mismo adoquín.

Por otro lado, la resistencia a la abrasión mostró una elevada variabilidad ( $R_3$  podría alcanzar  $3,1\text{ mm}$  de diferencia entre huellas de distintos adoquines) y no presentó correlación con la resistencia mecánica, lo que sugiere que otros factores influyen significativamente en esta propiedad. Dado que el método de ensayo y el equipo utilizado para la evaluación de la abrasión han sido recientemente incorporados al laboratorio, se recomienda realizar estudios adicionales de repetibilidad y reproducibilidad para validar su aplicación, habida cuenta que otros investigadores también han reportado elevada variabilidad con este método de ensayo.

Como limitante del trabajo se menciona que las correlaciones establecidas se basan en un conjunto de muestras extraídas de la producción local, sin haberse analizado su representatividad respecto a la totalidad de la producción de adoquines en Uruguay.

## Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue financiado por el Departamento de Construcción del Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería.

## Contribución de autoría

P. Vila: Metodología, Recursos, Investigación, Análisis formal, Redacción y Visualización. M. N. Pereyra: Conceptualización, Supervisión y Adquisición de fondos.

## Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

## Referencias

- [1] Arjun Siva Rathan, R. T., y Sunitha, V. (2024). *Structural design of interlocking concrete block pavements* (1ra ed.). CRC Press. <https://doi.org/ppwg>
- [2] Arjun Siva Rathan, R. T., Aravinda Sai, V., y Sunitha, V. (2021). Mechanical and structural performance evaluation of pervious interlocking paver blocks. *Construction and Building Materials*, 292, 123438. <https://doi.org/qjvwrs>.
- [3] Mohamad, H. M., Bolong, N., Saad, I., Gungat, L., Tioon, J., Pileh, R., y Delton, M. (2022). Manufacture of concrete paver block using waste materials and by-products: a review. *International Journal of GEOMATE*, 22(93), 9–19. <https://doi.org/ppwk>
- [4] Contreras Llanes, M., Romero Pérez, M., Gázquez González, M. J., y Bolívar Raya, J. P. (2022). Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(7), 9826–9840. <https://doi.org/gv57sw>
- [5] American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C936/C936M-20 Standard specification for solid concrete interlocking paving units*.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *ABNT NBR 9781 Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio*.
- [7] Normas Técnicas Obligatorias Nicaragüenses (2010). *NTON 12 009 Adoquines de concreto. Requisitos*.
- [8] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2019). *IRAM 11656 Adoquines de hormigón para pavimentos intertrabados. Requisitos y métodos de ensayo*.
- [9] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *NTC 2017 Adoquines de concreto para pavimentos*.
- [10] Comisión Guatemalteca de Normas. (2012). *NTG 41086 Adoquines de concreto para pavimentos. Especificaciones*.
- [11] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2004). *UNE-EN 1338 Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo*.
- [12] Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2015). *NTE INEN 3040 Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*.
- [13] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (1989). *UNIT 787 Adoquines de hormigón de cemento Pórtland*.
- [14] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (1998). *UNIT-NM 101 Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cilíndricas*.
- [15] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2020). *UNIT-ISO 1920-4 Ensayos de hormigón – Parte 4: Resistencia del hormigón endurecido*.
- [16] Gutiérrez, Á., y Viurrarena, S. (2004). Ensayos de desgaste en adoquines de hormigón para los pavimentos de la terminal logística M'Bopicuá. En *XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural* (pp. 0–9).
- [17] Tippens, P. E. (2005). *Physics*. McGraw-Hill Companies.
- [18] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2003). *IRAM 1548 Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos*.
- [19] American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM C642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*.
- [20] Canadian Standards Association. (2019). *CSA A 23.1/CSA A 23.2 Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practices for concrete*.
- [21] Fernández Cánovas, M. (2007). *Hormigón: adaptado a la instrucción de recepción de cementos y a la instrucción de hormigón estructural EHE* (8a ed.). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [22] Neville, A. M., y Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology* (2 ed.). Pearson.

- [23] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2004). *UNE-EN 12390-7-2001 Ensayos en hormigón endurecido Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*.
- [24] Gudimettla, J., Mcdaniel, L., Praul, M. F., Grove, J., Conway, R., Ccm, P. E., y Dev, S. (2019). Variability of Fresh and Hardened Properties of Paving - Concrete Mixtures. En *Transportation Research Board 98th Annual Meeting* (pp. 1–23).
- [25] American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C39/C39M-10. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.
- [26] American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C293 / C293M Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)*.
- [27] American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C496 / C496M Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*.
- [28] Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación (2005). *INTI-CIRSOC. Reglamento argentino de estructuras de hormigón CIRSOC 201*. <https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/vigencia-2013/area100/area100a/reglamento201completo.pdf>
- [29] Gutiérrez, Á., Pereyra, M. N., Bauer, G., y Montero, C. (2012). Control de calidad de adoquines de hormigón: ensayos tendientes a modificar la normativa uruguaya vigente. En *XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural* (pp. 1–15).
- [30] Dowson, A. J. (1998). A manufacturer's persective of variation within the production process of concrete paving blocks. En *Third International Workshop on Concrete Block Paving* (pp. 1–9).
- [31] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2004). *UNE-EN 1339 Baldosas de hormigón. Especificaciones y método de ensayo*.
- [32] Realpe Rivadeneira, G. R. (2020). Desgaste superficial de adoquines: implementación y ajustes en la normativa ecuatoriana. *Métodos y Materiales*, 9, 27–38. <https://doi.org/g57s38>
- [33] American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C670 Standard practice for preparing precision and bias statements for test methods*.
- [34] Maldonado, N. G., y Carrasco, M. F. (Eds.) (2012). *Este material llamado hormigón* (1ra ed.). Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- [35] Rachman, A., Akbar, M., Tjaronge, M. W., Lando, A. T., y Irmawaty, R. (2020). Evaluation of sustainable concrete paving blocks incorporating processed waste tea ash. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00325. <https://doi.org/gpb42b>
- [36] Benítez, A., Bertone, J., y Civitillo, P. (2009). Implementación del ensayo a flexión de adoquines de hormigón. En *9a. Conferencia Internacional sobre Pavimentos de Adoquines de Hormigón* (pp. 1-11).
- [37] Juradin, S., y Babić, M. (2024). Influence of fines less than 0.125 mm on abrasion resistance of concrete. *MATEC Web of Conferences*, 396, 02012. <https://doi.org/ppwz>
- [38] Cao, A., Ma, Y., Li, Z., Du, X., Li, G., y Wang, A. (2025). Study of the influence of desert sand-mineral admixture on the abrasion resistance of concrete. *Materials*, 18(2), 446. <https://doi.org/ppw2>
- [39] Poon, C. S., y Chan, D. (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 20(8), 569–577. <https://doi.org/fc5pc9>
- [40] Arango, J. F. (2006). Adoquines de concreto: propiedades físico mecánicas y sus correlaciones. *TecnoLógicas*, 16, 121–137. <https://doi.org/ppw3>

## Método acelerado del cilindro de hormigón. Evaluación del comportamiento de mezclas de obra frente a la reacción álcali-sílice

C. Milanesi<sup>a</sup>, S. Orlando<sup>a</sup>, F. Pastrengo<sup>a</sup>, M. Rearte<sup>a</sup>, D. Falcone<sup>b</sup>, C. N. Bournod<sup>c</sup> y S. A. Marfil<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Cementos Avellaneda S. A., CP C1107, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, [carlos.milanesi@cemavellaneda.com.ar](mailto:carlos.milanesi@cemavellaneda.com.ar), [sebastian.orlando@cemavellaneda.com.ar](mailto:sebastian.orlando@cemavellaneda.com.ar), [franco.pastrengo@cemavellaneda.com.ar](mailto:franco.pastrengo@cemavellaneda.com.ar), [maximiliano.rearte@cemavellaneda.com.ar](mailto:maximiliano.rearte@cemavellaneda.com.ar)

<sup>b</sup>Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC), CP 1900, La Plata, Argentina, [durabilidad@lemit.gov.ar](mailto:durabilidad@lemit.gov.ar)

<sup>c</sup>Departamento de Geología – Universidad Nacional del Sur (UNS), CGAMA (CIC-UNS), CP 8000, Bahía Blanca, Argentina, [cbournod@hotmail.com](mailto:cbournod@hotmail.com), [smarfil@uns.edu.ar](mailto:smarfil@uns.edu.ar)

Recibido: 26 de diciembre de 2024

Aceptado: 11 de junio de 2025

### RESUMEN

Si bien existen métodos de ensayo normalizados para evaluar la potencial reactividad de un agregado frente a la RAS (IRAM 1674, IRAM 1700), ninguno de ellos es capaz de evaluar el comportamiento de la denominada fórmula de obra. En este trabajo se dan a conocer los primeros resultados de la implementación del nuevo método de ensayo acelerado basado en desempeño, desarrollado por la Universidad de New Brunswick (Canadá), denominado "método del cilindro de hormigón". El método consiste en poner las probetas de ensayo en contacto con una solución de NaOH, equivalente a la solución de poro del hormigón bajo estudio, de manera de acotar la lixiviación alcalina. Se presentan los valores de expansión obtenidos sobre nueve mezclas de hormigón, elaboradas con tres combinaciones de agregados de conocida reactividad frente a la RAS en servicio, y con contenidos variables de álcalis. Se analizan las ventajas y limitaciones del método.

**PALABRAS CLAVE:** RAS, método acelerado del cilindro de hormigón, ensayo de desempeño, mezcla de obra

### ABSTRACT

Although there are standardized test methods to evaluate the potential alkali-silica reactivity (ASR) of an aggregate (IRAM 1674, IRAM 1700), none of them are capable of assessing the behavior of the so-called job mix formula. This paper presents the first results of implementing the new accelerated, performance-based test method, developed by the University of New Brunswick (Canada), known as the "concrete cylinder method". The method consists of placing the test specimens in contact with a NaOH solution, equivalent to the pore solution of the concrete under study, in order to limit alkali leaching. The expansion results obtained from nine concrete mixtures, prepared with three combinations of aggregates of known ASR in service and with variable alkali loading, are presented. The advantages and limitations of the method are then analyzed.

**KEYWORDS:** ASR, accelerated concrete cylinder method, performance test, job mix

\*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Milanesi, C., Orlando, S., Pastrengo, F., Rearte, M., Falcone, D., Bournod, C. N., y Marfil, S. A. (2025). Método acelerado del cilindro de hormigón. Evaluación del comportamiento de mezclas de obra frente a la reacción álcali-sílice. *Revista Hormigón*, 68, 46–62. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/si4d6a14e>

## 1. Introducción

El deterioro prematuro de estructuras de hormigón por el desarrollo de la reacción álcali-sílice (RAS) se conoce desde el año 1940 [1] y los casos se han extendido por todo el mundo [2], convirtiéndose en el principal problema de durabilidad, después de la corrosión del acero.

Si bien existen numerosos métodos de ensayo para evaluar la potencial reactividad alcalina de los agregados, algunos de ellos fueron desestimados con los años, debido a su limitado alcance [3,4]. Además, las normas se encuentran en permanente revisión y cambios [5,6]. Uno de los métodos de mayor aceptación en Argentina y a nivel mundial, es el método del prisma de hormigón, el cual, con algunas variantes, ha sido normalizado por diferentes organismos [7-9]. Sin embargo, a pesar de su reconocida confiabilidad, este método presenta dos inconvenientes que limitan su aplicación práctica: falta de celeridad y dificultad para controlar los efectos de la lixiviación alcalina (el agua necesaria para la expansión del gel de la RAS también lava los álcalis disueltos en la solución de poro del hormigón e inhibe el proceso de reacción) [10].

El fenómeno de la lixiviación de los álcalis y su efecto sobre la disminución de la expansión del mortero u hormigón se conoce desde el inicio en el conocimiento de la RAS [11,12]. La norma IRAM 1700 [9], por ejemplo, exige que el contenido de álcalis del hormigón se eleve a 5,25 kg de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ , mediante la adición de NaOH al agua de amasado, para compensar la disminución de los álcalis que, inevitablemente, experimentan las probetas de ensayo durante el curado húmedo. Debido a que la cantidad de álcalis lixiviados es mayor cuanto mayor es el tiempo de estacionamiento de las probetas, este fenómeno es particularmente más grave cuando se requiere evaluar la eficiencia de una adición mineral activa, ya que las normas argentinas, para estos casos, exigen un período de evaluación de dos años [13-15]. Por lo tanto, la consecuencia práctica del fenómeno de

lixiviación alcalina es que el método del prisma de hormigón, en su versión actual [9], no puede ser utilizado para evaluar el efecto de la disminución del contenido de álcalis del hormigón, como recurso estratégico para el control de la RAS, ni para evaluar el desempeño de la “fórmula de obra”, es decir, el hormigón que resulta de la combinación de los materiales propuestos para la obra, en la proporción específica escogida para la mezcla.

En los últimos años, muchas investigaciones se han orientado al estudio de las variables que impactan en la lixiviación alcalina [16], en la búsqueda de un método de ensayo que permita evaluar el desempeño de la “fórmula de obra” o la determinación del “umbral alcalino” [17,18].

En este trabajo se presentan los resultados de las primeras experiencias realizadas en el país para la implementación de un método de ensayo acelerado, desarrollado, recientemente, por la Universidad de New Brunswick (Canadá), denominado “método del cilindro de hormigón” (MACH) [19]. En esta oportunidad, se dan a conocer los avances sobre resultados de expansión arrojados por el MACH, informados en el Congreso de la AATH del año 2024 [20]. Se realiza una caracterización petrográfica de los agregados utilizados y se analizan los resultados de expansión obtenidos con tres combinaciones de agregados reactivos (grueso + fino), con antecedentes de RAS en servicio, bajo diferentes contenidos de álcalis en el hormigón, a fin de evaluar el desempeño de este método.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Materiales

Los agregados y los cementos utilizados en la elaboración de las mezclas de hormigón se indican en la Tabla 1. Además, para la elaboración de los prismas de hormigón [9] usados como referencia, se utilizó como

**Tabla 1.** Materiales utilizados.

| Materiales |         |                          | Procedencia                   | Nombre                                 | PUV  | MF   |
|------------|---------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|------|------|
| Agregados  | Gruesos | Basalto toleítico        | Curuzú Cuatía (Corrientes)    | B CC                                   | 1696 | 6,67 |
|            |         | Canto rodado silíceo     | Río Uruguay (Entre Ríos)      | CR ER                                  | 1674 | 6,69 |
|            |         | Canto rodado polimíctico | Río Vipos (Tucumán)           | CR T                                   | 1710 | 6,89 |
|            | Finos   | Arena silícea            | Colonia Mabragna (Entre Ríos) | AR ER                                  | -    | 2,10 |
|            |         | Arena polimíctica        | Río Vipos (Tucumán)           | AR T                                   | -    | 3,30 |
| Cemento    | CPN40   | Bajo álcalis             |                               | 0,35 % Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> |      |      |
|            |         | Moderado álcalis         |                               | 0,79 % Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> |      |      |
|            |         | Alto álcalis             |                               | 1,04 % Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> |      |      |

agregado grueso un basalto olivínico de la provincia de San Luis (B SL) y una arena silícea del Río Uruguay (AR UR) de conocido comportamiento inocuo.

Se trabajó con tres tipos de cemento pórtland normal (CPN 40), de diferente origen y contenido de álcalis (Tabla 1), a fin de diseñar mezclas de hormigón de bajo, medio y alto contenido alcalino (entre 1,8 y 4,0 kg Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>/m<sup>3</sup>), sin necesidad de adicionar NaOH al agua de mezclado. En la Tabla 1 se muestra también la densidad a granel del agregado grueso (PUV), compactado y seco, determinada según la IRAM 1548 [21] y el módulo de finura (MF) del agregado fino.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Examen petrográfico

El análisis petrográfico de los agregados utilizados en la elaboración de los hormigones se realizó según lo establecido en la norma IRAM 1649 [22]. Se utilizó un estereomicroscopio Leica S9i para el análisis sobre grano suelto y un microscopio de polarización Leica DM 750 P para el estudio sobre secciones delgadas de los agregados y

de los cilindros luego de cumplido el tiempo de ensayo.

### 2.2.2 Evaluación de la reactividad alcalina potencial de los agregados

La determinación de la reactividad alcalina de los agregados se realizó mediante el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) [23] y el método acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700 a 60 °C) [9]. En el primer caso, se confeccionaron barras de mortero de 25 mm x 25 mm x 300 mm, con una parte de cemento, 2,25 partes de agregado y una relación agua/cemento de 0,47. Se curaron durante un día a temperatura ambiente, se desmoldaron y se tomó una primera lectura de referencia. Luego se sumergieron en agua a 80 °C (± 2 °C) durante 24 horas y se registró la lectura inicial. Por último, se sumergieron en una solución 1N de NaOH y se colocaron en estufa a 80 °C (± 2 °C), tomando lecturas periódicas hasta los 16 días (14 días en solución de NaOH). Según el criterio adoptado por la norma IRAM 1531 [13] y 1512 [14], el agregado se considera potencialmente reactivo si la expansión supera el límite de 0,10 % a los 16 días.



Para la realización del ensayo acelerado del prisma de hormigón se siguieron los lineamientos establecidos en la norma IRAM 1700 [9]. Para evaluar el agregado grueso, el agregado fino que se utiliza debe ser inocuo y viceversa, y se adicionó NaOH al agua de amasado para elevar el contenido de álcalis del hormigón a 5,25 kg de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ . Se confeccionaron prismas de 75 mm x 75 mm x 300 mm. Se colocaron en recipientes de almacenamiento a 23 °C durante 24 horas. Luego se desmoldaron y se tomó la lectura inicial. Se envolvieron en una tela de algodón 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. Luego, se colocaron en un contenedor con 35 mm de agua en el fondo, en una cámara a 60 °C. Se realizaron lecturas periódicas de los cambios de longitud de los prismas a 5, 8, 10, 13 y 15 semanas. De acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 1531 [13] y 1512 [14], se considera que el agregado es inocuo si la expansión a las 13 semanas no supera el límite de 0,04 % para agregados de reacción rápida o de 0,08 % para los de reacción lenta.

### 2.2.2 Método acelerado del cilindro de hormigón (MACH)

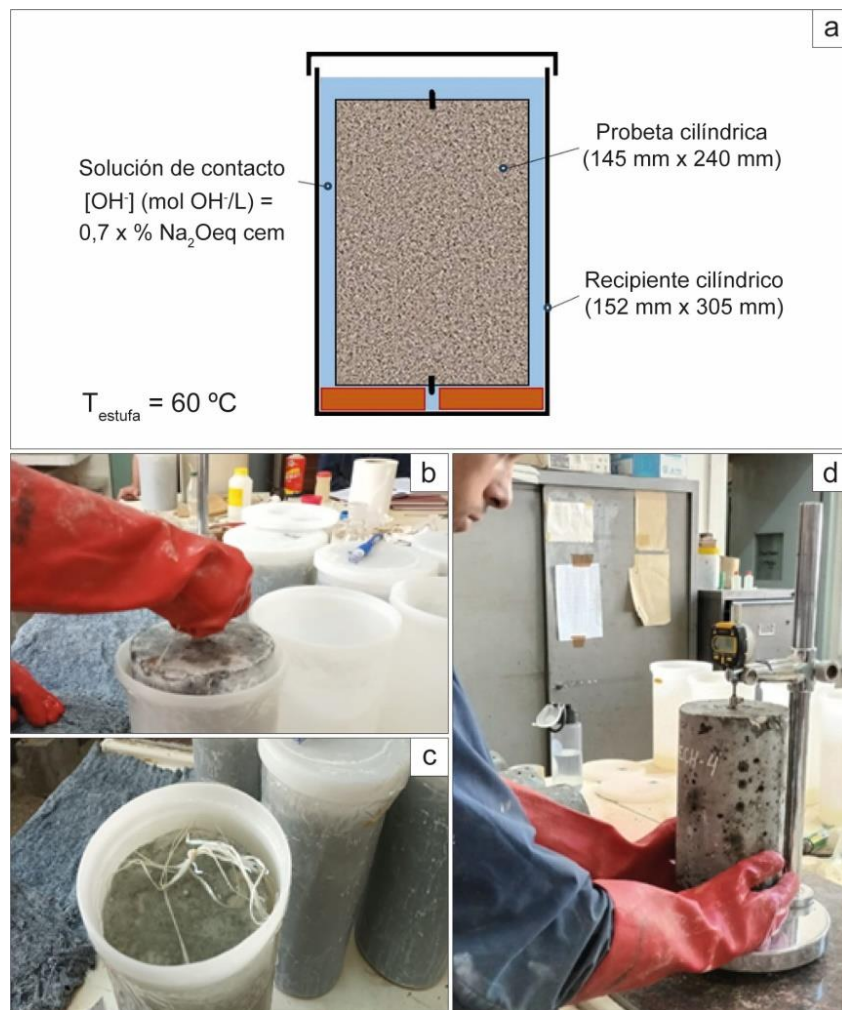
El MACH, desarrollado por la Universidad de New Brunswick [19], consiste en moldear cilindros de hormigón de 145 mm de diámetro y 240 mm de altura, con pernos insertados en los extremos para evaluar el cambio de longitud. Al cabo de las primeras 24 horas, las probetas se desmoldan, se realiza la lectura inicial y se colocan dentro de un recipiente plástico, de diámetro ligeramente superior a ellas.

Dentro del espacio anular que queda entre la probeta y la pared del recipiente ( $\approx 3$  mm), se coloca una solución alcalina de NaOH, cuya concentración es determinada en base a la composición del cemento de la fórmula de obra

(Figura 1a). La concentración de esta solución “modelo” se determina en base a la hipótesis de que la solución contenida en los poros del hormigón (en mol  $\text{OH}^-/\text{L}$ ) es igual a 0,7 veces el porcentaje de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  del cemento ( $0,7 \times \% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  cemento), según los trabajos de Diamond y Penko [24]. El recipiente que contiene la probeta (Figura 1b y 1c), cerrado y sellado (con cinta adhesiva), se pesa (para controlar la evaporación de la solución) y se lleva a la estufa a 60 °C (igual que la norma IRAM 1700 en la versión acelerada del ensayo), hasta la próxima lectura. Las lecturas se realizan en forma periódica, a temperatura ambiente, cada 3 semanas, hasta las 15 semanas de comenzado el ensayo (Figura 1d).

La dosificación de las mezclas se realizó ajustando el porcentaje de combinación de los cementos indicados en la Tabla 1 y el contenido unitario de cemento del hormigón, de forma de lograr tres contenidos diferentes de álcalis del hormigón, para cada combinación de agregados (Tabla 2). La cantidad de cemento del hormigón fue ajustada entre  $305 \text{ kg}/\text{m}^3$  y  $395 \text{ kg}/\text{m}^3$ , de acuerdo con el contenido de álcalis de los cementos seleccionados para el estudio (Tabla 1). El valor de la relación agua/cemento se mantuvo constante en todas las mezclas e igual a 0,45. El contenido de agregado grueso se determinó mediante el método del ACI 211.1 [25], en función del módulo de finura del agregado fino (MF, Tabla 1), del tamaño máximo del agregado grueso (19,0 mm) y la densidad a granel del agregado grueso (PUV, Tabla 1). El asentamiento promedio de las mezclas fue igual a 7,0 cm, ajustado con la incorporación de un aditivo fluidificante de alto rango. El volumen sólido de agregado fino fue el necesario para alcanzar el  $\text{m}^3$  de la mezcla.

Complementariamente, con las mezclas indicadas en la Tabla 2, se moldearon prismas de 75 mm x 75 mm x 300 mm, que se sometieron al mismo curado que el indicado en la norma IRAM 1700 (a 60 °C) [9].



**Figura 1.** a) Esquema de las condiciones de almacenamiento del MACH. b) Colocación de las probetas en el recipiente. c) Llenado con la solución de contacto. d) Medición de la expansión del cilindro.

**Tabla 2.** Designación y composición de las mezclas bajo estudio.

| Denominación de las mezclas | Agregados grueso / fino | Álcalis del hormigón<br>(kg Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> /m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| ER1                         | CR ER / AR ER           | 1,8                                                                           |
| ER2                         |                         | 3,0                                                                           |
| ER3                         |                         | 4,0                                                                           |
| T4                          | CR T / AR T             | 2,4                                                                           |
| T5                          |                         | 3,0                                                                           |
| T6                          |                         | 4,0                                                                           |
| B7                          | B CC / AR ER            | 2,4                                                                           |
| B8                          |                         | 3,0                                                                           |
| B9                          |                         | 4,0                                                                           |

### 3. Resultados

#### 3.1 Análisis petrográfico de los agregados utilizados en el MACH

##### 3.1.1 Basalto toleítico de Corrientes (B CC)

El basalto B CC es una roca volcánica compacta, homogénea, color gris oscuro, afanítica, con moderada cantidad de polvo adherido a la superficie de las partículas. Los fragmentos son masivos y densos. No se observaron clastos porosos ni alveolares. Algunas partículas incluyen fenocristales oscuros de minerales máficos, de tamaño milimétrico, y pequeños xenolitos dentro de una pasta muy fina. El 92 % de las partículas tienen formas irregulares equidimensionales y el 8 % son irregulares planares.

Vista al microscopio óptico sobre secciones delgadas, se destacan fenocristales de plagioclasa, parcialmente corroídos en sus zonas periféricas que llegan a dimensiones mayores a 1,5 mm. Su composición es An<sub>40</sub> y presenta muy poca alteración. Además, se encuentran relictos de olivino de 100 µm - 200 µm totalmente alterados, reconocibles por su hábito y *parting* destacado por óxidos de hierro. La pasta de la roca está constituida por tablillas de plagioclasa, de composición An<sub>45-55</sub> (andesina-labradorita), de 150 µm - 250 µm, con macla polisintética, acompañadas por pequeños granos de piroxenos (principalmente augita) de

40 µm - 60 µm, óxidos de hierro, minerales arcillosos y escaso vidrio relíctico, distribuidos de manera intersticial. Se observaron escasos xenolitos constituidos por plagioclasas de composición semejante, junto a fenocristales de augita y augita titanífera. La textura de la roca es porfírica a glomeroporfírica con pasta intersertal, con aproximadamente 15 % de vidrio (color pardo a verdoso) y, en sectores, intergranular. Se identificó escaso vidrio fresco relíctico en la mesostasis, la mayor parte se encuentra desvitrificado dando lugar a la formación de minerales arcillosos. Su participación en la muestra total se estima en ~ 2 %. La roca se califica como basalto toleítico.

##### 3.1.2 Canto rodado silíceo de Entre Ríos (CR ER)

El canto rodado CR ER es un material polimíctico, constituido por 38 % de calcedonia, 29 % de areniscas (silíceas y ferruginosas) y 34 % de cuarzo. El detalle de la composición (en % en peso) en los diferentes tamaños y en la muestra total se indica en la Tabla 3.

La calcedonia presenta fractura concoidea y variados colores. El cuarzo es cristalino, de grano grueso y fractura irregular. Las areniscas ferruginosas contienen componentes líticos heterogéneos, con matriz silícea ferruginosa.

**Tabla 3.** Composición petrográfica de la muestra CR ER.

| Constituyentes         | Composición de las fracciones retenidas en los tamices |           |      |           |      |           |      |           |      |           |      |           | Composición<br>de la muestra<br>(% en peso) |
|------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|---------------------------------------------|
|                        | 1"                                                     |           | 3/4" |           | 1/2" |           | 3/8" |           | 4 mm |           | <4mm |           |                                             |
|                        | %                                                      | %<br>Pond | %    | %<br>Pond | %    | %<br>Pond | %    | %<br>Pond | %    | %<br>Pond | %    | %<br>Pond |                                             |
| Calcedonia             | -                                                      | -         | 45   | 3,2       | 37   | 24,8      | 34   | 5         | 41   | 4,4       | 58   | 0,2       | 37,6                                        |
| Areniscas silíceas     | -                                                      | -         | -    | -         | 18   | 12,1      | 16   | 2,4       | 13   | 1,4       | 19   | 0,1       | 16                                          |
| Areniscas ferruginosas | -                                                      | -         | 22   | 1,6       | 8    | 5,4       | 27   | 4         | 16   | 1,7       | 15   | 0,1       | 12,8                                        |
| Cuarzo                 | -                                                      | -         | 33   | 2,3       | 37   | 24,8      | 23   | 3,4       | 30   | 3,2       | 8    | <0,1      | 33,7                                        |
| TOTAL                  | -                                                      | -         | 100  | 7,1       | 100  | 67        | 100  | 14,7      | 100  | 10,8      | 100  | 0,4       | 100                                         |

Las areniscas silíceas están constituidas por granos de cuarzo cementados por sílice. Aproximadamente el 20 % presenta oquedades superficiales.

Las partículas presentan escaso polvo adherido a la superficie, contenido en las imperfecciones de los clastos, y tinción superficial por óxidos de hierro. Presentan formas predominantemente irregulares equidimensionales (65 %) con cantidades subordinadas de redondeadas (29 %) y escasas irregulares planares (6 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó calcedonia (38 %) y cuarzo criptocristalino en el cemento de las areniscas. No se observaron sustancias nocivas.

### 3.1.3 Canto rodado polimíctico de Tucumán (CR T)

El material corresponde a un canto rodado triturado, constituido principalmente por rocas metamórficas (92 %), con predominio de filitas y pizarras (59 %) sobre esquistos (33 %), y cantidades subordinadas de cuarzo (14 %). En la Tabla 4 se muestra el detalle de la composición (en % en peso) en las diferentes granulometrías y en la muestra total.

Las filitas son rocas foliadas, de grano fino, constituidas por cuarzo, feldespatos muy

argilizados y micas. Como minerales de alteración se identificaron illita y cloritas. La fábrica está definida por la orientación de los minerales micáceos, generando texturas lepidoblásticas. El cuarzo es microcristalino.

Las pizarras son composicionalmente similares, pero con una foliación más fina y definida (clivaje pizarreño). Los esquistos son cuarzo-feldespáticos, están constituidos por feldespato (plagioclasa y en menor proporción ortosa), biotita, clorita y anfíboles, distribuidos en texturas granolepidoblásticas.

Algunas partículas presentan dominios cuarzo-feldespáticos por segregación. También es común observar venillas de cuarzo o calcita en estas partículas. Se observan muy escasas partículas de rocas graníticas, con argilización de los feldespatos. El cuarzo corresponde a partículas monominerales de los fragmentos de mayor desarrollo cristalino del mismo origen.

Predominan las formas irregulares equidimensionales (70 %), con cantidades subordinadas de irregulares planares (29 %) y muy escasas redondeadas (1 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó cuarzo microcristalino (~ 7 %) y cuarzo con extinción ondulante (AEO promedio 19°), en las rocas metamórficas. No se observaron sustancias nocivas.

**Tabla 4.** Composición petrográfica de la muestra CR T.

| Constituyentes     | Composición de las fracciones retenidas en los tamices |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        | Composición de la muestra (% en peso) |
|--------------------|--------------------------------------------------------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|---------------------------------------|
|                    | 1"                                                     |        | 3/4" |        | 1/2" |        | 3/8" |        | 4 mm |        | <4mm |        |                                       |
|                    | %                                                      | % Pond | %    | % Pond | %    | % Pond | %    | % Pond | %    | % Pond | %    | % Pond |                                       |
| Esquistos          | -                                                      | -      | 100  | 0      | 33   | 10,4   | 31   | 5,3    | 36   | 14,1   | 33   | 3,7    | 33,5                                  |
| Filitas y pizarras | -                                                      | -      | 0    | 0,9    | 62   | 19,5   | 66   | 11,4   | 53   | 20,7   | 53   | 6      | 58,5                                  |
| Cuarzo             | -                                                      | -      | 0    | 0      | 5    | 1,6    | 3    | 0,5    | 11   | 4,3    | 14   | 1,6    | 8                                     |
| TOTAL              | -                                                      | -      | 100  | 0,9    | 100  | 31,5   | 100  | 17,2   | 100  | 39,1   | 100  | 11,3   | 100                                   |

### 3.1.4 Arena silíceea de Entre Ríos (AR ER)

La muestra está constituida por 45 % de cuarzo, 37 % de areniscas (27 % silíceas y 10 % ferruginosas, respectivamente) y 17 % de calcedonia. Se identificaron además escasos minerales opacos en las fracciones más finas (en el retenido y pasante tamiz #100) (< 1 %) (Tabla 5).

El cuarzo es de grano grueso, y su color va de blanco y traslúcido a opalescente. La calcedonia tiene fractura concoidal, hábito fibroso con estructura mamelonar, arriñonada, de colores variados, con predominio del color ámbar. Los minerales opacos son principalmente hematita y magnetita.

Las partículas presentan escaso polvo superficial adherido, constituido por cuarzo fino. Se concentra en las irregularidades/imperfecciones de los clastos. Se observó tinción superficial por óxidos de hierro.

Predominan las formas irregulares equidimensionales (72 %) con cantidades subordinadas de redondeadas (28 %). Son muy escasas las irregulares planares (< 1 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó calcedonia y sílice criptocrystalina en el cemento de las areniscas. No se identificaron sustancias nocivas.

### 3.1.5 Arena polimíctica de Tucumán (AR T)

La arena AR T está constituida en forma predominante por rocas metamórficas (51 %), con proporciones similares de filitas y esquistos, y cuarzo (45 %). Se identificó escasa cantidad de micas (4 %) y minerales opacos en el pasante tamiz #100 aunque su participación en la muestra total es despreciable (< 0,1 %). El detalle de la composición (en % en peso) en las diferentes granulometrías y en la muestra total, se puede ver en la Tabla 6.

El cuarzo presenta leve tinción superficial por la precipitación de óxidos de hierro, corresponde principalmente al desprendimiento de los esquistos. Presenta extinción ondulante (AEO promedio 18°) y aproximadamente un 8 % es microcristalino.

Las filitas son rocas metamórficas de color gris oscuro, casi sin segregación, de brillo lustroso generado por el contenido de micas. Los esquistos tienen foliación y presentan bandeamiento, comúnmente con segregación. Tienen abundante cuarzo microcristalino (~ 15 %), óxidos de hierro y muscovita orientada, definiendo la textura. Dentro de las micas predomina la muscovita (60 %), con cantidades menores de biotita (40 %). Estos minerales presentan sericitización y cloritización/desferrización respectivamente.

**Tabla 5.** Composición petrográfica de la muestra AR ER.

| Constituyentes         | Composición de las fracciones retenidas en los tamices |           |     |           |     |           |     |           |     |           |      |           | Composición<br>de la muestra<br>(% en peso) |
|------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|------|-----------|---------------------------------------------|
|                        | 10                                                     |           | 18  |           | 30  |           | 60  |           | 100 |           | <100 |           |                                             |
|                        | %                                                      | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %    | %<br>Pond |                                             |
| Calcedonia             | 35                                                     | 5         | 20  | 0,8       | 17  | 0,9       | 14  | 8,5       | 10  | 1,4       | 12   | 0,1       | 16,7                                        |
| Areniscas silíceas     | 22                                                     | 3,1       | 39  | 1,6       | 42  | 2,2       | 30  | 18,2      | 14  | 2         | 15   | 0,2       | 27,3                                        |
| Areniscas ferruginosas | 28                                                     | 4         | 18  | 0,8       | 6   | 0,3       | 5   | 3         | 12  | 1,7       | 15   | 0,2       | 10                                          |
| Cuarzo                 | 15                                                     | 2,1       | 23  | 1         | 35  | 1,9       | 51  | 31        | 60  | 8,6       | 53   | 0,6       | 45,2                                        |
| Minerales opacos       | 0                                                      | 0         | 0   | 0         | 0   | 0         | 0   | 0         | 4   | 0,6       | 5    | 0,1       | 0,7                                         |
| TOTAL                  | 100                                                    | 14,2      | 100 | 4,2       | 100 | 5,3       | 100 | 60,8      | 100 | 14,3      | 100  | 1,2       | 100                                         |

**Tabla 6.** Composición petrográfica de la muestra AR T.

| Constituyentes   | Composición de las fracciones retenidas en los tamices |           |     |           |     |           |     |           |     |           |      |           | Composición<br>de la muestra<br>(% en peso) |
|------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|------|-----------|---------------------------------------------|
|                  | 10                                                     |           | 18  |           | 30  |           | 60  |           | 100 |           | <100 |           |                                             |
|                  | %                                                      | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %   | %<br>Pond | %    | %<br>Pond |                                             |
| Cuarzo           | 27                                                     | 8,8       | 54  | 15,4      | 58  | 7,1       | 52  | 11,3      | 55  | 2,2       | 60   | 0,5       | 45,3                                        |
| Filitas          | 44                                                     | 14,3      | 22  | 6,3       | 17  | 2         | 9   | 2         | 13  | 0,5       | 9    | 0,1       | 25,2                                        |
| Esquistos        | 29                                                     | 9,5       | 24  | 6,9       | 19  | 2,3       | 26  | 5,6       | 25  | 1         | 22   | 0,2       | 25,5                                        |
| Micas            | 0                                                      | 0         | 0   | 0         | 6   | 0,7       | 13  | 2,8       | 7   | 0,3       | 8    | 0,1       | 3,9                                         |
| Minerales opacos | 0                                                      | 0         | 0   | 0         | 0   | 0         | 0   | 0         | 0   | 0         | 1    | <0,1      | <0,1                                        |
| TOTAL            | 100                                                    | 32,6      | 100 | 28,6      | 100 | 12,3      | 100 | 21,7      | 100 | 4         | 100  | 0,8       | 100                                         |

Los minerales opacos son principalmente óxidos de hierro.

Predominan las formas irregulares equidimensionales (88 %) con escasas irregulares planares y redondeadas, en proporciones similares (6 %).

Como componentes potencialmente reactivos se identificó cuarzo microcristalino en las rocas metamórficas (~ 10 %). No se observaron sustancias nocivas.

### 3.2 Evaluación de la reactividad alcalina

En la Tabla 7 se muestran los resultados de expansión obtenidos con el método acelerado

de la barra de mortero (IRAM 1674) [23] y el ensayo acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700) [9] de los agregados utilizados en este estudio. Los agregados inocuos empleados para el ensayo IRAM 1700, el agregado grueso basáltico (B SL) y la arena silícea (AR UR), arrojaron expansiones en el método IRAM 1674 (a los 16 días) de 0,005 % y 0,070 %, respectivamente.

En la Tabla 8 se muestran los valores de expansión (%) obtenidos con el MACH, extendido hasta las 24 semanas de edad, y se comparan con la expansión a 15 semanas de prismas moldeados con las mismas fórmulas, curadas según las condiciones de la norma IRAM 1700 [9].

**Tabla 7.** Resultados de la expansión (%) según las normas IRAM 1674 y 1700 a 60 °C.

| Agregados | Expansión (%)       |                                |
|-----------|---------------------|--------------------------------|
|           | IRAM 1674 (16 días) | IRAM 1700 a 60 °C (13 semanas) |
| CR ER     | 0,030 (R0)          | 0,088 (R1)                     |
| AR ER     | 0,123 (R1)          | 0,018 (R0)                     |
| CR T      | 0,241 (R1)          | 0,103 (R1)                     |
| AR T      | 0,220 (R1)          | 0,070 (R0)                     |
| B CC      | 0,465 (R3)          | 0,017 (R0)                     |

Grado de reactividad: R0 (Inocuo), R1 (Moderadamente reactivo), R2 (Altamente reactivo) y R3 (Extremadamente reactivo), según IRAM 1531 [13] y 1512 [14].



**Tabla 8.** Resultados de expansión (%) obtenidos para las mezclas estudiadas.

| Mezcla | Porcentaje de expansión del hormigón a 60 °C a la edad (en semanas) |       |       |       |              |       |       |       |              |
|--------|---------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|
|        | Método Acelerado del Cilindro de Hormigón (MACH)                    |       |       |       |              |       |       |       | IRAM 1700    |
|        | 3                                                                   | 6     | 9     | 12    | 15           | 18    | 21    | 24    | 15           |
| ER1    | 0,008                                                               | 0,000 | 0,006 | 0,005 | <b>0,004</b> | 0,012 | 0,011 | 0,014 | <b>0,005</b> |
| ER2    | 0,008                                                               | 0,012 | 0,013 | 0,015 | <b>0,015</b> | 0,020 | 0,019 | 0,020 | <b>0,013</b> |
| ER3    | 0,010                                                               | 0,012 | 0,015 | 0,028 | <b>0,027</b> | 0,042 | 0,037 | 0,033 | <b>0,004</b> |
| T4     | 0,014                                                               | 0,020 | 0,023 | 0,044 | <b>0,057</b> | 0,054 | 0,064 | 0,069 | <b>0,016</b> |
| T5     | 0,024                                                               | 0,052 | 0,078 | 0,089 | <b>0,105</b> | 0,114 | 0,122 | 0,132 | <b>0,008</b> |
| T6     | 0,046                                                               | 0,098 | 0,136 | 0,157 | <b>0,177</b> | 0,186 | 0,196 | 0,220 | <b>0,032</b> |
| B7     | 0,011                                                               | 0,014 | 0,017 | 0,017 | <b>0,019</b> | 0,017 | 0,020 | 0,020 | <b>0,010</b> |
| B8     | 0,007                                                               | 0,001 | 0,004 | 0,011 | <b>0,014</b> | 0,014 | 0,015 | 0,018 | <b>0,016</b> |
| B9     | 0,000                                                               | 0,001 | 0,004 | 0,007 | <b>0,011</b> | 0,013 | 0,019 | 0,026 | <b>0,014</b> |

### 3.3 Petrografía de los cilindros post-ensayo

Luego de cumplidas las 15 semanas del ensayo se observó, sobre cortes delgados, la microestructura del hormigón de los cilindros ER1, ER3, T4, T6 y B9, a fin de identificar evidencias del desarrollo de la RAS (Figura 2).

Al microscopio óptico, el hormigón ER1 presenta escasas microfisuras tanto en el agregado fino (AF) como grueso (AG) y en la pasta de cemento (Figura 2a). El hormigón ER3 también presenta microfisuras en el AG, con continuidad en la pasta de cemento y bordeando las partículas del AF (Figura 2b). Se observó carbonatación asociada principalmente a microfisuras y cavidades de aire accidental, con productos de neoformación craquelados.

En el hormigón T4 se observan microfisuras en el mortero y en el AG. Algunas están parcialmente rellenas por minerales de alto color de interferencia (calcita) y también por un material isótropo (Figura 2c). En algunos sectores se observa carbonatación de la pasta y las cavidades de aire accidental están mayormente vacías. El hormigón T6 presenta mayor desarrollo de microfisuras en el AG, con continuidad en el mortero (Figura 2d). En muchos casos, las microfisuras son muy finas

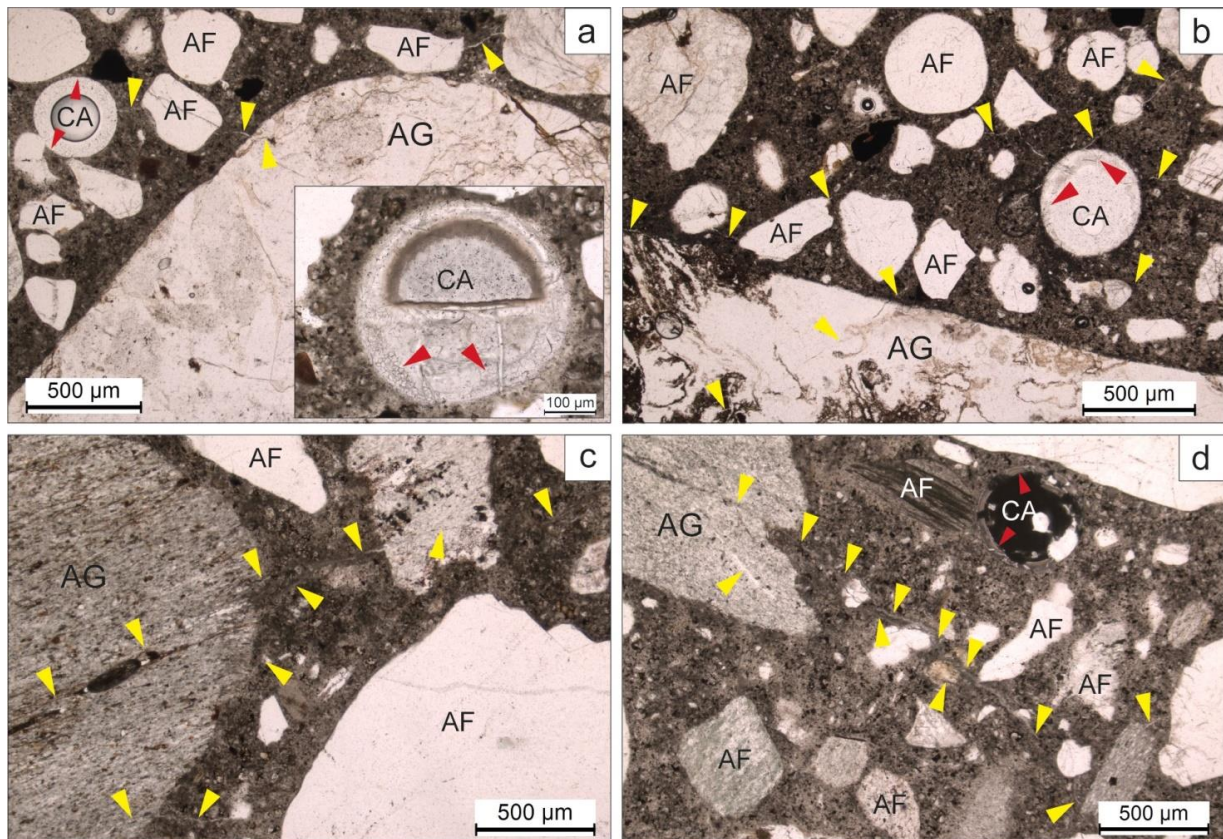
y, en ocasiones, se localizan en la interfase con el agregado. Se observan algunas partículas con bordes de reacción incipientes y oquedades asociadas a las partículas del AG tapizadas por un producto isótropo y craquelado.

En el hormigón del cilindro B9 se observan escasas microfisuras atravesando al AG y en la pasta, siguiendo el contacto de los agregados. En las partículas del AG, el vidrio volcánico intersticial está desvitrificado a un agregado de minerales secundarios arcillosos.

## 4. Discusión

Utilizando los criterios establecidos en las normas IRAM 1531 y 1512 [13,14], para agregados gruesos y finos respectivamente, de las tres combinaciones de agregados estudiadas (ER, T y B), sólo las dos primeras podrían considerarse como moderadamente reactivas (R1), debido a la reactividad del agregado grueso.

En el caso de la serie ER, no hay duda alguna de que tanto el agregado grueso como el fino, debido a su elevado contenido de calcedonia y sílice criptocristalina, deben ser considerados potencialmente reactivos. Sin embargo, de



**Figura 2.** Fotomicrografías de los cilindros vistos al microscopio petrográfico con luz paralela. a) ER1, las microfisuras son escasas, en el contacto agregado grueso (AG)-pasta de cemento, conectando con una cavidad (CA). Detalle de otra CA situada fuera de la fotomicrografía, parcialmente rellena por dos materiales, uno pardo y otro incoloro y craquelado. b) ER3, microfisuras en el AG con continuidad en el mortero. La CA está tapizada por productos de reacción. c) T4, microfisuras en el AG, atravesando el mortero. d) T6, microfisuras en el AG continúan en el mortero, atravesando una partícula de agregado fino (AF). La CA está tapizada por productos de neoformación (color pardo). Las flechas amarillas señalan microfisuras y las rojas productos de neoformación en cavidades.

acuerdo a los resultados del prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700) [9], sólo el agregado grueso debería calificarse como potencial responsable del comportamiento inestable del hormigón frente a la RAS ( $0,088 \% > 0,040 \%$ , Tabla 7), ya que el desempeño de la arena en el hormigón resultó absolutamente estable ( $0,018 \% < 0,040 \%$ , Tabla 7).

Es importante aclarar que la muy baja expansión registrada con el canto rodado de Entre Ríos (CR ER) por el método IRAM 1674 ( $0,030 \% \ll 0,10 \%$ , Tabla 7) puede ser atribuida a un falso negativo, según los considerandos en la norma IRAM 1531 [13], ya que algunos agregados provenientes del Río

Uruguay sientan precedentes de este comportamiento.

Para los hormigones de la serie T, la calificación de la reactividad del agregado grueso, a partir de los resultados obtenidos por los ensayos físicos normalizados (IRAM 1674 e IRAM 1700 a  $60^{\circ}\text{C}$ , Tabla 7), es coherente con los resultados del examen petrográfico. Por su parte, si bien la arena (AR T), desde el punto de vista petrográfico, posee minerales potencialmente reactivos, debe considerarse inocua (R0) por el nivel de expansión registrado en el ensayo del prisma de hormigón (expansión inferior al límite propuesto por la norma).

En cuanto a los hormigones de la serie B, si bien el agregado basáltico fue escogido por sus antecedentes de RAS en servicio [27], la muestra seleccionada para estos estudios resultó inocua en el ensayo del prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700) ( $0,017 \% < 0,040 \%$ , Tabla 7), lo que guarda relación con el bajo porcentaje de vidrio volcánico fresco detectado en el estudio con microscopio óptico ( $< 3 \%$ ).

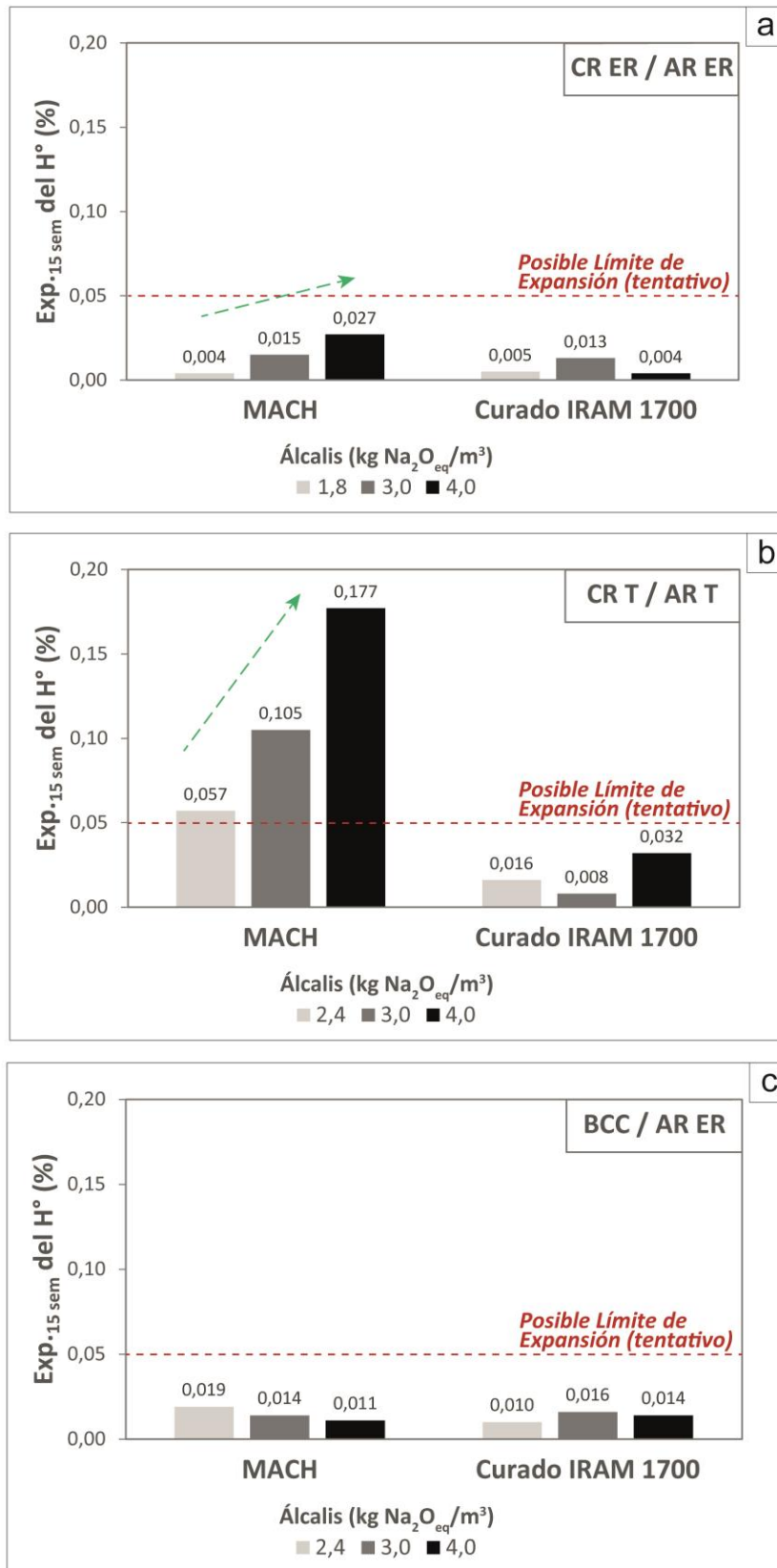
Con respecto a lo expresado en los párrafos anteriores, los resultados del MACH son coherentes. Si bien se trata de un método para el cual no se han definido aún límites de expansión para calificar el desempeño de la mezcla evaluada, los hormigones de las series ER y T muestran un comportamiento inestable frente a la RAS, especialmente para contenidos de álcalis por encima de los niveles considerados críticos ( $\geq 3 \text{ kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ). En efecto, el MACH resulta sensible al incremento en el contenido de álcalis del hormigón (Tabla 8, Figura 3). Nótese que las mismas mezclas, bajo las condiciones de estacionamiento del método IRAM 1700 ( $60^\circ\text{C}$ ), muestran un comportamiento poco variable, totalmente estable frente a la RAS, y que no guarda relación con el contenido de álcalis en el hormigón. En la Figura 3, la línea punteada de color rojo marca, sólo a modo de referencia, un posible límite de expansión ( $0,050 \%$ ). Este límite, de carácter tentativo, se ha escogido por tratarse de un nivel de expansión típico para el desarrollo de las primeras fisuras en el hormigón.

El término “lixiviación” refiere a la disolución de una sustancia soluble contenida en un sólido (en este caso, el hormigón) hacia la solución que se halla en contacto con éste. En el caso del MACH, dado que la solución de contacto sólo contiene iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{OH}^-$ , los cationes  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  presentes en los poros del hormigón se desplazan por difusión hacia la solución de contacto, aumentando la concentración de estos cationes en la misma, sin mayores cambios en la concentración del  $\text{OH}^-$  (nótese que el  $\text{OH}^-$  se encuentra presente en ambas fases, tanto en el hormigón como en la

solución de contacto). Al mismo tiempo, el catión  $\text{Na}^+$  se desplaza en sentido inverso, desde la solución de contacto hacia el interior del hormigón, debido a la baja concentración de  $\text{Na}^+$  presente en los poros de éste (los cementos pòrtland utilizados en este estudio poseen alta concentración de  $\text{K}^+$  y baja de  $\text{Na}^+$ ). El diseño del MACH, al menos desde el punto de vista conceptual, si bien no evita el desplazamiento de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , resultaría efectivo para mantener la  $[\text{OH}^-]$ , evitando así que la expansión de las probetas se detenga por consumo de uno de sus principales reactivos ( $\text{OH}^-$ ).

En el caso de que los agregados sean inocuos frente a la RAS, es de esperar que la  $[\text{OH}^-]$  se mantenga razonablemente constante dentro de la solución de poros del hormigón, ante la presencia de este mismo ion en la solución de contacto (el gradiente de concentración estaría acotado y esto limitaría el movimiento del ion  $\text{OH}^-$  hacia el exterior por difusión). Por el contrario, si los agregados fueran reactivos, la RAS consumiría parte de los iones  $\text{OH}^-$  durante la disolución de la sílice reactiva (disminuyendo su concentración en el interior del hormigón), lo cual provocaría el ingreso de éstos desde la solución de contacto externa. Este proceso pone en ventaja al MACH, frente a otros métodos de ensayo como, por ejemplo, el IRAM 1700.

Paralelamente, la sílice reactiva del agregado en contacto con el ion  $\text{OH}^-$  se disuelve y toma el  $\text{Ca}^{2+}$  para formar el gel de la RAS. Cuando la cantidad de sílice disuelta es elevada (porque el agregado es altamente reactivo) y/o la concentración del  $\text{Ca}^{2+}$  es baja (ocasionada por el fenómeno de lixiviación mencionado precedentemente), es decir la relación  $\text{Ca}/\text{Si}$  es baja, la viscosidad del gel disminuye considerablemente, provocando su desplazamiento hacia la solución de contacto, sin generar demasiada expansión en el hormigón. Este fenómeno ha sido observado en agregados del Río Uruguay en ensayos como el IRAM 1674 [23, 26], donde arrojan falsos negativos.

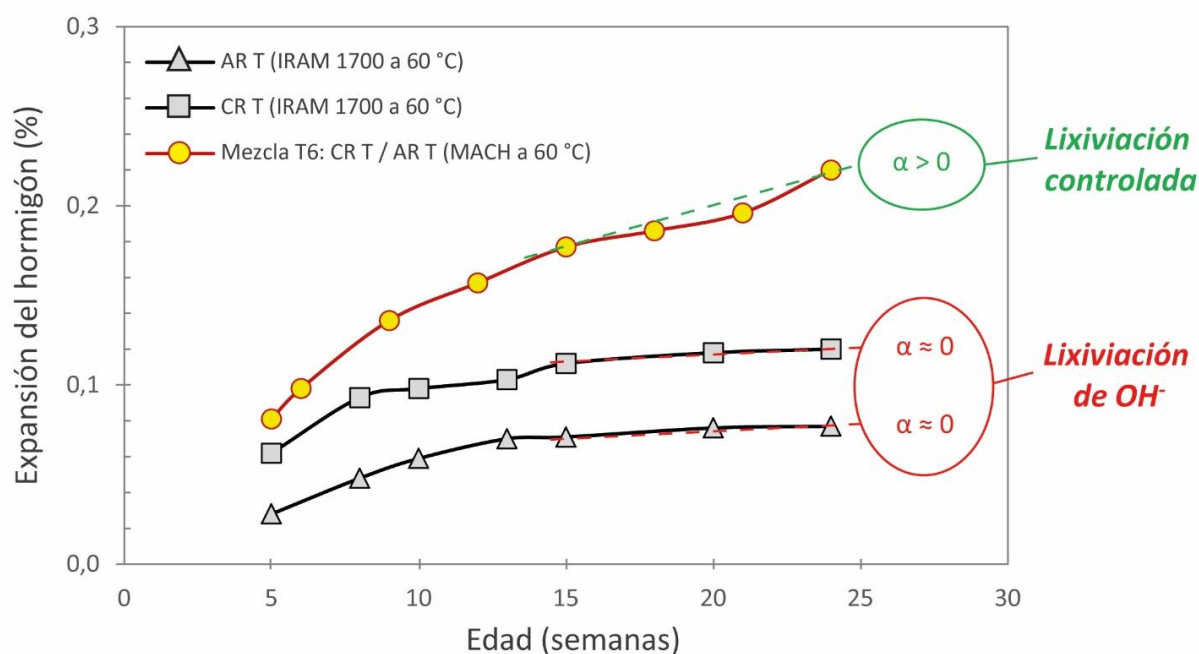


**Figura 3.** Impacto del contenido de álcalis del hormigón en los valores de expansión obtenidos para las mezclas ensayadas con el MACH vs. curado según la IRAM 1700 a 60 °C. a) Serie ER. b) Serie T. c) Serie B.

Es interesante destacar que las expansiones obtenidas por el MACH, correspondientes a los hormigones T6 (4 kg  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ), resultaron significativamente mayores que las obtenidas en el ensayo IRAM 1700 (5,25 kg  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ), contrariamente a lo que sucedió en los hormigones ER3 (4 kg  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ ). Se cree que el comportamiento de la serie ER está asociado a la elevada solubilidad y cantidad de sílice reactiva que compone el agregado grueso (del orden del 40 % de calcedonia), que pasa a la solución de contacto limitando la expansión del hormigón, según lo explicado en el párrafo anterior, de forma similar a lo que sucede en otros ensayos [23]. En cambio, en los agregados de Tucumán, la cantidad y reactividad de la sílice son mucho menores (del orden del 10 % de cuarzo microcristalino), lo cual permitiría a la sílice disuelta captar el  $\text{Ca}^{2+}$  necesario para formar un gel de mayor viscosidad y generar expansión en el hormigón. Los valores de expansión de la serie T en el MACH resultan, *a priori*, alentadores para la aplicación de este método en la

evaluación de mezclas con componentes de reacción lenta, usualmente de difícil detección en algunos ensayos acelerados.

En la Figura 4 se muestra el efecto de la lixiviación alcalina, evidenciado en la pendiente ( $\alpha$ ) de las curvas de expansión luego de las 15 semanas de ensayo, obtenidas con el MACH y el método IRAM 1700 a 60 °C, en los hormigones con los agregados de Tucumán. Del análisis comparativo de los valores de expansión vs. tiempo entre ambos métodos, surge que, aun cuando el fenómeno de lixiviación alcalina es “controlado” parcialmente (ya que existe lixiviación de  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ), las tasas de expansión de los cilindros (MACH) luego de las 15 semanas se mantienen de manera sostenida, mientras que la de los prismas de hormigón (IRAM 1700) ingresan a la fase de agotamiento (Figura 4). Lo expuesto indica que la solución de contacto resulta efectiva para mantener la  $[\text{OH}^-]$  evitando que la expansión del hormigón se detenga.



**Figura 4.** Efecto de la lixiviación alcalina en los hormigones con agregados de Tucumán, con ambos métodos (MACH vs. IRAM 1700 a 60 °C).



## 5. Consideraciones finales

A partir de los resultados obtenidos en esta experiencia, es posible realizar las siguientes consideraciones respecto del MACH:

- El método es sencillo y no requiere de equipamiento especial, fuera del utilizado en los estudios de rutina de la RAS.
- Tratándose de un método nuevo, no normalizado, del cual se desconocen sus límites de aplicación (edades a las que deben evaluarse sus resultados y los niveles de expansión que deben considerarse nocivos, entre otros), sus resultados deben analizarse en forma global (no para cada tipología de agregado) considerando especialmente las tendencias.
- El uso de una solución con un pH similar a la del hormigón en estudio (fórmula de obra), permite captar el efecto que posee el cambio en el contenido de los álcalis de la mezcla sobre la expansión del hormigón, contrariamente a lo que sucede al utilizar el procedimiento de curado del método IRAM 1700.
- Las expansiones registradas por el MACH, a una edad comprendida entre 3 y 4 meses, resultan del mismo orden que aquellas obtenidas por el método IRAM 1700 a 60 °C, lo que alienta su aplicación en el campo práctico.
- Si bien la cantera del basalto toleítico fue seleccionada por sus antecedentes de RAS en servicio, la muestra extraída para el estudio presentó un comportamiento inocuo frente a la RAS, contrariamente a lo esperado. A posteriori, a medida que se fueron disponiendo los resultados de los ensayos en marcha, quedó en evidencia que dicho comportamiento debía ser atribuido a su bajo contenido de vidrio volcánico. Con todo, la respuesta del MACH fue estable y coherente con el desempeño de un agregado inocuo.
- Los niveles de expansión obtenidos para la combinación de agregados de Entre Ríos (ER)

mediante el MACH, a pesar de que reflejan el incremento del contenido de álcalis del hormigón, son inferiores a los valores esperados, sobre todo teniendo en cuenta los antecedentes en servicio y el grado de reactividad del agregado grueso (R1 con IRAM 1700 a 60 °C). Este comportamiento, atribuido a la rápida lixiviación de la sílice “reactiva” del agregado, al igual que sucede con el ensayo de la barra de mortero (IRAM 1674), podría imponer alguna limitación a la aplicabilidad de este método.

- La respuesta de la combinación de los agregados del Río Vapos (Tucumán) en el MACH fue coherente con el resto de los métodos aplicados y con el nivel de álcalis del hormigón. La lixiviación alcalina manifiesta en los prismas de hormigón (IRAM 1700) es “controlada” por la solución de contacto en el MACH. En este sentido, se vislumbra favorable para la evaluación de mezclas con agregados de reacción lenta.
- Como corolario, a fin de acotar la lixiviación en el hormigón, la solución de contacto podría modificarse ajustando  $[\text{OH}^-]$  no sólo en base al contenido de álcalis del cemento sino también a la relación agua/cemento de la mezcla, considerar la composición química del cemento ( $[\text{K}^+]$ ,  $[\text{Na}^+]$ ) y saturar la solución en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Lautaro Iloro y Maximiliano Rodríguez del área Durabilidad y Ligantes del LEMIT, al Dpto. de Geología de la Universidad Nacional del Sur y al CGAMA (CIC-UNS), por el apoyo brindado.

## Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue financiado por Cementos Avellaneda y el LEMIT a través de un convenio de cooperación, la Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As. y la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur.



## Contribución de autoría

C. Milanesi: conceptualización, investigación, visualización, recursos, supervisión, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición. D. Falcone: metodología, validación, investigación, análisis formal, visualización. S. Orlando; F. Pastrengo y M. Rearte: investigación, recursos, conceptualización. C. Bournod; S. Marfil: investigación, visualización, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición.

## Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

## Referencias

- [1] Stanton, T. E. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66(10), 1781–1811.
- [2] Sims, I., y Poole, A. (Eds.). (2017). *Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [3] American Concrete Institute (1998). *Report on alkali-aggregate reactivity*. (ACI 221.1R-98, Reapproved 2008).
- [4] Bérubé, M. A., y Fournier, B. (1992). Accelerated test method for alkali-aggregate reactivity. En V. M. Malhotra (Ed.), *International Symposium on Advances in Concrete Technology* (pp. 583–627). CANMET/ACI.
- [5] Grattan-Bellew, P. E. (1996). A critical review of accelerated ASR tests. En A. Shayan (Ed.), *10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 27-38). CSIRO Division of Building Construction and Engineering Melbourne (Australia).
- [6] Fournier, B., Nkinamubanzi, P. C., Lu, D., Thomas, M. D. A., Folliard, K. J., y Ideker, J. H. (2006). Evaluating potential alkali-reactivity of concrete aggregates - How reliable are the current and new test methods?. En B. Fournier (Ed.), *Marc-André Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete* (pp. 21–43). RILEM.
- [7] American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C1293-17 Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction*.
- [8] Canadian Standard Association (2019). *CSA A23.2-14A Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C)*.
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *IRAM 1700 Agregados Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*.
- [10] Falcone, D., y Milanesi, C.A. (2014). Evaluación de la reacción álcali-agregado: Posibilidades y limitaciones de los métodos de ensayos disponibles. En J. D. Sota (Ed.), *XX Reunión Técnica de la AATH Ing. Alberto S.C. Fava* (pp. 319–326). AATH.
- [11] Blanks, R. F., y Meissner, H. S. (1946). The expansion test as a measure of alkali-aggregate reaction. *Journal of the American Concrete Institute*, 17(5), 517–539.
- [12] Batic, O. R., y Milanesi C. A. (1995). Consideraciones sobre el método de expansión de prismas de hormigón al estudio de la reactividad alcalina. En AATH (Ed.), *XII Reunión Técnica de la AATH Dra. Haydée V. Armándola* (pp. 149–162). AATH.
- [13] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2022). *IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo. Sexta edición*.
- [14] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2024). *IRAM 1512 Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos. Quinta edición*.
- [15] Ideker, J. H., Drimalas, T., Bentivegna, A. F., Folliard, K. J., Fournier, B., Thomas M. D. A., Hooton, D. R., y Rogers, C. A. (2012). The importance of outdoor exposure site testing.

- En T. Drimalas, J. H. Ideker, y B. Fournier (Eds.), *14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, (pp. 1–10). University of Texas at Austin.
- [16] Lindgård, J., Thomas, M. D. A., Sellevold, E. J., Pedersen, B., Andiç-Çakır, Ö., Justnes, H., y Rønning T. F. (2013). Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali-leaching and prism expansion. *Cement and Concrete Research*, 53, 68–90. <https://doi.org/ps4t>
- [17] Ghanizadeh, A., Parashar, A., Ideker, J. H., Drimalas, T., Folliard, K., Hossack, A., y Thomas, M. (2024). Using miniature concrete prism test (MCPT) and accelerated mortar bar test (AMBT) to determine alkali threshold of aggregates. En L. F. Sanchez, y C. Trottier (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. RILEM Bookseries, 49 (pp. 249–256). Springer. <https://doi.org/ps4v>
- [18] Stacey, S., Folliard, K., Drimalas, T., y Thomas, M. D. A. (2016). An accelerated and more accurate test method to ASTM C1293: The concrete cylinder test. En H. de M. Bernardes, y N. P. Hasparyk (Eds.), *Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 1–11). IBRACON.
- [19] Moffatt, E. G., Thomas, M. D. A., Kasaniya, M., y Laskey, M. (2022). A new performance test method for alkali-silica reaction. En A. Batista, A. Santos Silva, I. Fernandes, L. Oliveira Santos, J. Custódio, y C. Serra (Eds.), *16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – Volume 2* (pp. 653–661). LNEC.
- [20] Milanesi, C., Orlando, S., Pastrengo, F., Rearte, M., Falcone, D., Bournod, C. N., y Marfil S. A. (2024). Implementación del método acelerado del cilindro de hormigón para evaluar el desempeño de mezclas de obra frente a la reacción álcali-sílice. En R. Zerbino, M. E. Sosa, y F. Locati (Eds.), *Memorias del XI Congreso Internacional - XXV Reunión Técnica de la AATH* (pp. 146–153). AATH.
- [21] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2003). *IRAM 1548 Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos. Tercera edición.*
- [22] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2008). *IRAM 1649 Agregados para hormigones. Examen petrográfico. Segunda edición.*
- [23] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1674. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.*
- [24] Diamond, S., y Penko, M. (1992). Alkali silica reaction processes: The conversion of cement alkalis to alkali hydroxide. En J. Holm (Ed.), *Durability of Concrete – G.M. Idorn International Symposium*, ACI Special Publication, 131, (pp. 153–168). ACI.
- [25] American Concrete Institute (1991) *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete* (ACI-211.1-91, Reapproved 2009).
- [26] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2012). Avances en la aplicación de un nuevo método acelerado para la evaluación de la reacción álcali-agregado. En J. D. Sota, N. F. Ortega, y J. M. Moro (Eds.), *XIX Reunión Técnica de la AATH Ing. Oscar R. Batic* (pp. 207–214). AATH.
- [27] Milanesi, C. A., Souza, E., Marfil, S., y Maiza, P. J. (2008). Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra. En V. Rahhal, y J. Sota (Eds.), *XVII Reunión Técnica de la AATH Ing. José Fermín Colina* (pp. 273–280). AATH.

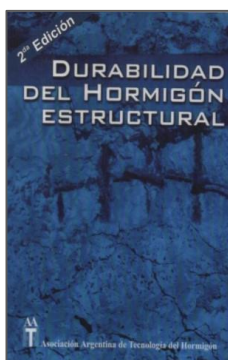
## LIBROS A LA VENTA

---



### **Ese material llamado HORMIGÓN**

Editoras, Noemí Graciela Maldonado y María Fernanda Carrasco



### **DURABILIDAD DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL (2da Ed.)**

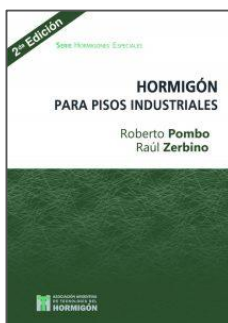
Editor, Edgardo F. Irassar



### **HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (2da Ed.)**

*Serie Hormigones Especiales*

Editor, Raúl Zerbino



### **HORMIGÓN PARA PISOS INDUSTRIALES (2da Ed. ampliada)**

*Serie Hormigones Especiales*

Editores, Roberto Pombo y Raúl Zerbino

Los libros pueden adquirirse individualmente y también, se ofrecen diferentes combos.  
Para consultar los precios puede acceder al link: <https://www.aath.org.ar/publicaciones/>

Para adquirir los libros comunicarse con la dirección de e-mail: [aath@aath.org.ar](mailto:aath@aath.org.ar)



TODO PROYECTO COMIENZA CON UNA BASE.

**EN LOMAX SABEMOS CÓMO  
CONSTRUIRLAS PARA SIEMPRE.**

**LOMAX, EL HORMIGÓN DE LOMA NEGRA.**

 Loma Negra

 Loma Negra

 lomanegra\_oficial

[www.lomanegra.com](http://www.lomanegra.com)





INSTITUTO DEL CEMENTO  
PORTLAND ARGENTINO

## INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO

### LÍDERES EN INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA



CAPACITACIONES



CERTIFICACIÓN ACI  
LABORATORISTA  
DE HORMIGÓN



MANUALES Y  
GUÍAS TÉCNICAS



INTERLABORATORIO  
DE CEMENTOS



# EN CADA CAMIÓN. EN CADA PROYECTO. ESTAMOS.

**SOLUCIONES  
INTEGRALES A MEDIDA**

**HORMIGONES  
AVELLANEDA**

**WWW.  
CEMENTOS  
AVELLANEDA.  
COM.AR**







## PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

---

La revista Hormigón publica artículos originales que abordan temas de interés y trascendencia en el campo de la Tecnología del Hormigón entre los que se encuentran: desarrollo científicos-tecnológicos, ejecución de obras de hormigón, evaluación de estructuras de hormigón, uso de materiales regionales o alternativos, nuevas técnicas de ensayo, control de calidad.

Posee periodicidad semestral, publicándose un número en el mes de marzo (cubriendo el período marzo-agosto) y otro en el mes de septiembre (cubriendo el período septiembre-febrero). Los números, se publican de forma periódica el día 10 (hábil) del mes de marzo y septiembre.

Desde el 2021 se puede acceder a los artículos de forma online y con acceso abierto a través de la página web de la revista ([www.revistahormigon.org](http://www.revistahormigon.org)). En el mismo enlace podrá encontrar las instrucciones para autores.

Los artículos deberán enviarse a la dirección de e-mail: [revistahormigon@gmail.com](mailto:revistahormigon@gmail.com)