

Caso de estudio: diagnóstico de procesos expansivos en represa de hormigón en Uruguay

Segura-Castillo, Luis¹; Cetrangolo, Gonzalo¹; Aulet, Alina²; Morquio, Atilio³

¹ Dr. Ing. Prof., Universidad de la República, lsegura@fing.edu.uy

² Dr. Física Prof., Universidad de la República

³ Dr. Ing. Prof., Universidad de la República

Resumo: Este estudio surge al analizar la situación de agrietamiento del hormigón de una represa de hormigón, la cual se encuentra, en algunas zonas, en contacto permanente con el agua, y muestra a su vez un patrón de fisuración concordante con el generado en procesos expansivos. En este trabajo se presentan la metodología y los ensayos realizados a muestras extraídas de dicha estructura, con el objetivo de determinar la presencia de reacciones expansivas en el material. Se obtuvieron testigos y se realizaron ensayos a meso y micro escala. A meso escala se realizaron ensayos mecánicos destructivos, no destructivos (END) y tinciones selectivas para identificar la presencia de geles expansivos. A nivel microscópico se realizó la caracterización con Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y Sonda de Energía Dispersiva (EDS). Se obtuvieron las propiedades mecánicas del material, observándose valores de velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos y de módulo de elasticidad dinámico por debajo de los habituales. Se pudieron identificar diferentes productos de reacciones expansivas álcali-árido mediante detección elemental, según la morfología observada con MEB y los espectros obtenidos por EDS, concordante con los resultados a meso y macro escala.

Palavras-chave: Hormigón, reacción álcali-árido, MEB-EDS, END.

Abstract: The study herein presented arise from the need to study the concrete cracking present in a structure, which is in permanent contact with water, and shows a pattern of cracking that is consistent with expansive processes. In this paper, the methodology and the tests performed on samples from the structure, in order to establish the presence of expansive reactions in the material, are presented. Concrete cores were extracted from the structure and meso and micro scale tests were conducted. Mesoscale destructive mechanical tests, non-destructive tests (NDT), and selective staining methods were performed to identify the presence of expansive gels. At microscopic level, characterization with Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Probe (EDS) was performed. Mechanical properties of the material were obtained, showing values of ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity lower than usual. It was possible to identify different products of alkali-aggregate expansive reactions by elemental detection, according to the morphologies observed with SEM and the spectra obtained by EDS, in agreement with the results obtained at the meso and macro scale.

Keywords: Concrete, alkali-aggregate reaction, SEM- EDX, NDT.

1. INTRODUCCIÓN

En 2014 el Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República, Uruguay) recibió la tarea de analizar la situación de agrietamiento del hormigón de una represa ubicada en el territorio nacional. En la estructura se pueden diferenciar zonas tanto de hormigón armado como de hormigón en masa, afectando la reacción en mayor medida a las últimas.

La estructura se encuentra en algunas zonas en contacto permanente con el agua, mostrando un patrón de fisuración concordante con el generado en procesos expansivos (Figura 1), por ejemplo, el producido por la Reacción Álcali-Agregado (RAA).

El objetivo del presente estudio es, en primera instancia, confirmar o descartar esta causa, y en segundo término, conocer las características del hormigón utilizado y avanzar en la determinación de otras posibles causas del agrietamiento. Para ello, se realizó una campaña experimental, cuya metodología y resultados principales se describen a continuación.



Figura 1: Patrón de fisuración tipo “piel de cocodrilo” encontrado en los terraplenes

2. METODOLOGÍA

Para investigar la existencia de estos fenómenos se extrajeron testigos de hormigón, efectuándose sobre distintos fragmentos de los mismos, ensayos mecánicos destructivos, no destructivos (END) y tinciones selectivas para identificar la presencia de geles expansivos. A nivel microscópico se realizó la caracterización micro-estructural utilizando la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Sonda de Energía Dispersiva (EDS). Estas técnicas aplicadas en conjunto, permiten obtener propiedades mecánicas del material, así como la identificación de los procesos expansivos presentes en esta estructura. También se realizaron a agregados pruebas de reactividad a los álcalis.

2.1. Extracción y preparación de testigos

Los testigos extraídos fueron cortados transversalmente, con sierra diamantada, para obtener cilindros para realizar ensayos de laboratorio, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Cortes en testigo extraído para obtener un cilindro

En la Tabla 1 se presentan los testigos con datos de la geometría y observaciones. Las denominaciones M, T y V corresponden a testigos extraídos de zonas de hormigón en masa. En particular, la zona V corresponde a hormigón en masa frecuentemente en contacto con el agua. La denominación P corresponde a una zona de hormigón armado.

Tabla 1: Características de testigos extraídos

Testigo	D (cm)	L (cm)	OBSERVACIONES
M1	9,34	17	Poros blancos, con gel blanco
P1	9,35	25	Poco poroso, sin presencia de gel
P2	7,35	18	Poco poroso, sin presencia de gel
T1	9,30	35	Presenta fisuras, gel blanco en poros
T2	9,32	35	Presenta fisuras, gel blanco en poros
V1	9,35	85	Presenta fisuras, gel blanco alrededor de los agregados, y en los poros
V2	9,93	75	Presenta fisuras, gel blanco alrededor de los agregados y en los poros

Los cilindros fueron utilizados en los ensayos para obtener la porosidad, absorción y la densidad, así como también en ensayos no destructivos (ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico). Se realizaron finalmente ensayos en prensa universal para obtener módulo de elasticidad estático y resistencia a la compresión. El resto del material de los testigos se utilizó para realizar pruebas de tinciones y análisis de microscopía electrónica de barrido, como se describe a continuación.

2.2. Ensayos No Destructivos

Se realizaron los ensayos no destructivos a los testigos. Se realizó el ensayo de módulo dinámico siguiendo la normativa de la ASTM C-215 [1]. Mediante la utilización de un acelerómetro marca PCB y osciloscopio Tektronic. También se realizaron ensayos de velocidad de ultrasonido de acuerdo a la norma UNIT 58:98 [2]. El equipo empleado para la realización de los ensayos de ultrasonido fue marca Proceq, modelo PUNDIT Lab.

2.3. Ensayos mecánicos

Previo a la realización de ensayos destructivos se realizaron ensayos de absorción, densidad y porosidad de acuerdo a la normativa UNIT. Finalmente se efectuaron ensayos de módulo de elasticidad estático y de rotura a compresión en prensa universal según Norma UNIT 69:98 [3]. Los ensayos se realizaron en testigos obtenidos de diferentes zonas de la estructura.

2.4. Tinciones selectivas

Con el objetivo de detectar la presencia de geles producto de la reacción álcali-agregado (RAA) se realizaron ensayos de tinciones selectivas al hormigón obtenido de los testigos. El método utilizado fue el de tinciones del laboratorio nacional de Los Alamos [4], el cual fue presentado como una herramienta simple y rápida para identificar gel de RAA y determinar el grado de deterioro del hormigón. Los aspectos básicos de estas técnicas se describen en Powers (1999) [5]. Se utilizaron dos reactivos. En primera instancia (Etapa 1), se aplicó una solución de sodio cobalto nitrito. Si la superficie se tiñe de amarillo indica la presencia de gel conteniendo potasio. Posteriormente (Etapa 2), se aplicó un segundo reactivo, la rodamina B, que produce un contraste rosado, con manchas violetas sobre las tinciones amarillas. La tinción violeta indica la presencia de gel rico en calcio, que corresponde a una RAA en estado avanzado.

Para realizar las tinciones de la primera etapa se prepararon 250 ml de una solución saturada de cobaltonitrito sódico en agua desionizada (50g/L). Cada muestra a analizar sumergió en la solución durante 3 minutos y posteriormente se lavó con abundante agua para retirar los excesos.

Posteriormente, para realizar las tinciones de la segunda etapa, se prepararon 250 ml de solución saturada de Rodamina B en agua desionizada (50g/L). Cada muestra a analizar se sumergió nuevamente durante 3 minutos y también se lavó con abundante agua para retirar los excesos.

Como metodología para la realización de tinciones se adoptó el siguiente criterio: Se tomaron fotos de los testigos dejando fija la configuración de la cámara, y en condiciones de iluminación idénticas, antes (foto base) y después de aplicar las tinciones, para tener una base de comparación más objetiva. La foto se tomó aproximadamente media hora luego de aplicar la tinción, para permitir el secado superficial del testigo.

Las fotos se obtuvieron con una cámara fotográfica digital, con los siguientes parámetros fijos: ISO100, apertura de diafragma: f=22, tiempo de exposición: 1/2s.

La cámara se ubicó apoyada en trípode y a una distancia al testigo de 50 cm. Se utilizó la iluminación normal del laboratorio (tubos de luz de techo) más un foco incidiendo en un ángulo oblicuo.

2.5. Microscopía Electrónica de Barrido

El análisis con Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) es considerado hoy en día indispensable para la detección de los geles de RAA y sus productos asociados [6]. En este trabajo se utilizó esta técnica para la caracterización micro-estructural de los testigos de hormigón, entregando información morfológica del material analizado. Las medidas y fotos se obtuvieron usando el “Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL 5900LV”, con Microanálisis por sonda EDS para el análisis químico elemental.

2.6. Reactividad de agregados

En un sector cercano a la construcción se detectó una zona donde se depositaban los agregados gruesos, de naturaleza granítica, para ser utilizados en la obra. Estos eran extraídos de una cantera próxima y posteriormente molidos en ese lugar.

En la Figura 3 se muestran estos agregados, donde se percibe la presencia de mica y una estructura con cierta laminación y textura esquistosa. De acuerdo a consultas realizadas, se debe considerarse este agregado como un granito modificado. Se entendió conveniente realizar ensayos de reactividad a los efectos de descartar si estos agregados podían reaccionar con el álcali del cemento.



Figura 3: Agregados de origen granítico

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Ensayos No Destructivos

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos no destructivos realizados. Considerando que la resistencia característica a la compresión de los hormigones, según proyecto, era de 20 MPa, se observa que los valores de módulo de elasticidad estático muestran, en algunos casos, valores inusualmente bajos.

Tabla 2: Resultados de los ensayos no destructivos sobre los testigos

Testigo	Diámetro (cm)	Largo (cm)	Masa (g)	Frecuencia onda fL (Hz)	Velocidad onda (m/s)	Módulo Elástico Dinámico (GPa)	Módulo Elástico Estático (GPa)
M1	9,34	16,7	2703,5	10840	4840,6	31,0	-
P1	9,35	18,6	2854,0	8639	4017,3	23,1	18,7
P2	7,35	10,2	1003,9	13331	4285,7	17,1	-
T1	9,30	18,7	2848,0	8108	4328,7	20,6	12,4
T2	9,32	18,0	2810,0	8253	4534,0	20,2	13,4
V1	9,35	18,5	2927,0	4712	3503,8	7,0	7,4
V2	9,93	17,8	3209,0	8056	3803,4	19,1	15,4

3.2. Ensayos mecánicos

Previamente al ensayo a compresión de las probetas se realizaron ensayos de absorción, densidad y porosidad de acuerdo a la normativa ASTM C97 [7]. En la Tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos.

La rotura de las probetas se realizó utilizando prensa universal. Los resultados se muestran en la Tabla 4, donde se presenta en una columna la tensión de rotura sin correcciones, en otra columna la tensión de rotura corregida según el documento ACI 214, y en la última columna la tensión de rotura corregida según la norma UNIT 69:98 [3] (solamente corrección por esbeltez).

Tabla 3: Resultados de los ensayos

Testigo	Masa Seca (g)	Masa Saturada (g)	Masa en Agua (g)	Absorción (%)	Densidad (g/cm ³)	Volumen (cm ³)	Porosidad (%)
M1	2703,5	2747,0	1572,5	1,61	2,30	1174,5	3,70%
P1	2854,0	2964,0	1655,0	3,85	2,18	1309,0	8,40%
P2	987,0	1036,5	602,0	5,02	2,27	434,5	11,39%
T1	2848,0	2940,0	1632,0	3,23	2,18	1308,0	7,03%
T2	2810,0	2880,0	1621,5	2,49	2,23	1258,5	5,56%
V1	2881,0	3028,0	1767,0	5,10	2,28	1261,0	11,66%
V2	3156,0	3309,0	1925,0	4,85	2,28	1384,0	11,05%

Los resultados muestran que los valores más bajos de tensión de rotura fueron los obtenidos de los testigos "V", extraídos del hormigón en masa, lo cual es consistente con los resultados de ultrasonido.

Tabla 4: Resultados de los ensayos de rotura

Testigo	Diámetro (cm)	Largo (cm)	Tensión de rotura sin corrección σ rot (MPa)	Tensión de rotura corrección ACI σ rot (MPa)	Tensión de rotura corrección UNIT σ rot (MPa)
M1	9,34	16,7	31,0	32,7	30,5
P1	9,35	18,6	28,1	29,7	28,0
P2	7,35	10,2	28,6	29,8	27,2
T1	9,30	18,7	29,0	30,8	29,0
T2	9,32	18,0	26,7	28,3	26,5
V1	9,35	18,5	14,1	14,9	14,0
V2	9,93	17,8	21,7	22,8	21,3

3.3. Tinciones

Se ensayaron distintos fragmentos que abarcan varias posiciones y condiciones del hormigón. Con respecto a la posición, se ensayaron testigos de zona de hormigón en masa (V), de los terraplenes (T) y de los pilares (P). Por otro lado, se ensayaron superficies cortadas con sierra (P1 y T1-cara lisa), y superficies fracturadas, tanto las caras rugosas producto de la rotura del testigo en un plano débil en el momento de extracción (V1, V2 y T1-cara rugosa), como las caras rugosas producto de la rotura del testigo por tracción indirecta producida en el laboratorio (T2, P2-testigo, V2DN).

Para la segunda etapa se ensayaron cuatro fragmentos de testigos, 3 de la zona de hormigón en masa y uno de un pilar. Dos de los fragmentos (V1B y V2DR) no tenían tratamiento alguno, y los otros dos (V2B y P2-testigo) ya habían sido tratados con sodio-cobalto-nitrito, por lo que fueron sometidos a las dos etapas de tinciones.

3.3.1. Tinciones con sodio-cobalto-nitrito (Etapa 1)

En la Figura 4 se muestran dos ejemplos de testigos sometidos a la etapa 1 del proceso de tinción. En primer lugar, se puede mencionar que varios testigos reaccionaron fuertemente a la tinción, confirmando la rica presencia de potasio en el gel, lo cual debe ser considerado como un indicio de la presencia de RAA.

Asimismo puede mencionarse que se observan distintos grados de tinción en los distintos testigos. A simple vista se pudo observar diferencias notables entre testigos, desde casos donde la zona analizada se tiñó con un amarillo intenso, hasta el extremo opuesto, en donde sólo con una observación detallada se observan los cambios de color.



Figura 4: Testigos luego de la tinción con sodio cobalto nitrito (etapa 1)

3.3.2. Tinciones con Rodamina B (Etapa 2)

Este reactivo indica la presencia de Calcio (Ca). Los geles de procesos avanzados de la RAA son ricos en Calcio, sin embargo, éste también es muy abundante en la matriz cementicia, lo que produce la tinción generalizada de los fragmentos. En consecuencia, para obtener información del avance de la reacción se deben comparar los testigos luego de la etapa 2, con las zonas ya teñidas de la etapa 1. Esto es, que una zona teñida de amarillo (que estaría indicando la presencia de gel de RAA) se tiña de rosado intenso (mayor presencia de Ca), indicaría un estado avanzado de la reacción.

En la Figura 5 se muestra una foto general de los testigos que fueron sometidos a la segunda etapa (Rodamina B) del proceso de tinción. Se puede observar que las zonas sometidas a la tinción reaccionaron casi totalmente, quedando sin reaccionar casi exclusivamente las áreas donde se encontraban los áridos de mayor tamaño. La intensificación de la coloración púrpura alrededor de algunos áridos indicaría un grado avanzado de la reacción en la zona estudiada.



Figura 5: Testigos luego de la tinción con Rodamina B (etapa 2)

3.4. Microestructura por Microscopía Electrónica de Barrido

Las muestras fueron fijadas a un porta-muestras a través de una cinta bi-adhesiva (cinta de carbono) y las superficies de las mismas fueron metalizadas con oro (Au) para garantizar la calidad de las imágenes. Luego se analizaron mediante Microscopía zonas de muestras extraídas del testigo V1 (Fig 6).

En la Figura 6 se muestran imágenes obtenidas durante el análisis correspondiente a un fragmento del testigo V1. Se observó en primer lugar la zona de acumulación

de producto blanco, remarcada con un recuadro rojo en la Figura 6a. En la Figura 6b se observa una formación cuarteada, con alguna deposición de productos. La formación se corresponde con la morfología de deposiciones de gel de RAA. En la Figura 6c se muestra un zoom de la zona encuadrada, para observar su morfología. En esa imagen micro-estructural de 10 micras, se aprecia gran abundancia de formaciones tipo “aguja” ó “hilos”. El espectro correspondiente al área total de la imagen, realizado por método EDS muestra un bajo contenido de Ca en esa zona (Fig.6d).

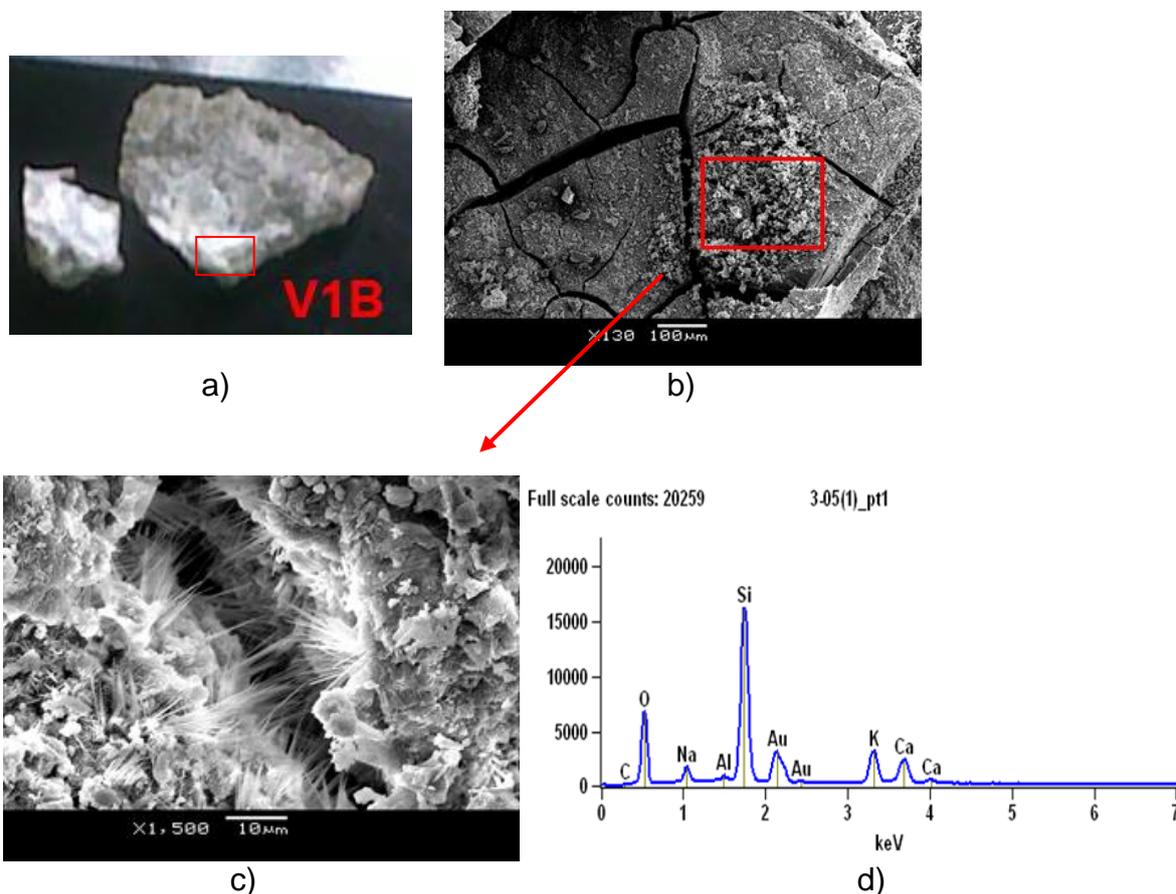


Figura 6: a) Porción de la muestra analizada con MEB/EDS señalizada en recuadro; b) MEB tamaño: 100 micras; c) Zoom de recuadro rojo (10 micras) de b; e d) EDS del área total de la imagen de c

En otra sección del fragmento del testigo V1, fuera de la parte “blanca” (como se muestra en la (Fig. 7), se observa una morfología del tipo “placas”, que también representa a un producto de la RAA, similar al indicado en [6]. En el análisis EDS (Fig. 7c), aparece un aumento de calcio (Ca) en comparación con el potasio K, a diferencia de la muestra anterior (Fig. 6d). Como se indicó anteriormente, esta diferencia relativa denota una reacción en estado más avanzado. Este análisis de microscopía confirma la presencia de geles producto de la reacción álcali-agregado.

A su vez, durante el análisis se observaron otras morfologías, indicando otros procesos, de las cuales una se muestra a continuación como ejemplo. En una sección del fragmento de otro de los testigos analizados, el M1, en la parte “blanca”, como se muestra en la Figura 8, se observa una morfología del tipo “aguja”, que corresponde a un producto que se presenta en ataques sulfáticos como la etringita.

En el análisis EDS, se detecta la presencia de azufre S, de calcio Ca, y la de aluminio Al, elementos consistentes con la composición de la etringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$).

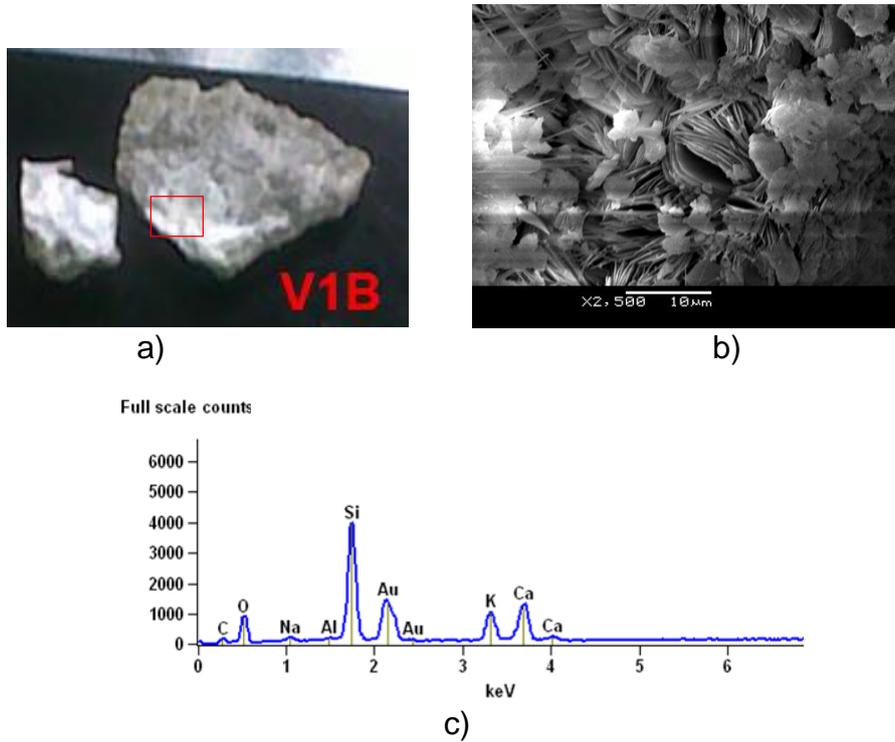


Figura 7: a) Porción de la muestra analizada con MEB señalizada en recuadro; b) Tamaño: 10 micras y morfología del tipo “placas”; e c) EDS del área total de la imagen

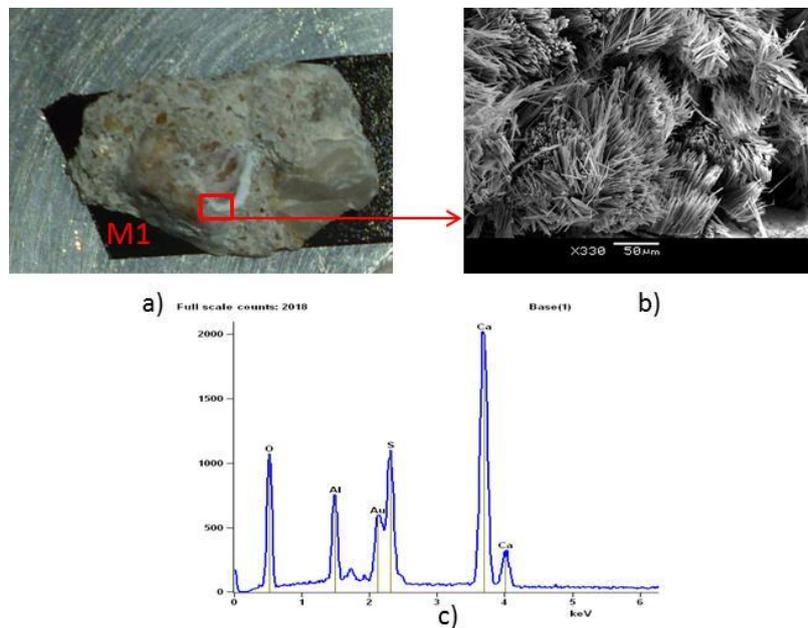


Figura 8: a) Muestra M1; b) muestra analizada con MEB señalizada en recuadro; e c) EDS del área total de la imagen

3.5. Reactividad de Agregados

De un tipo de los agregados utilizados en la construcción, se tomaron muestras para realizar ensayo de reactividad de los agregados de acuerdo a la norma IRAM 1674:1997 [8]. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5: Resultados de los ensayos de reactividad

Tiempo (días)	00	55	88	112	114	119	221	226	332
Deformación (%)	0,000	0,047	0,082	0,102	0,118	0,126	0,133	0,147	0,157

De acuerdo a los resultados obtenidos, la expansión detectada a los 14 días, se ubicó entre 0,1 y 0,2 %, lo que pone a los agregados en la categoría de potencialmente reactivos. Específicamente la norma dice que este nivel de expansión "incluyen a agregados conocidos como inocuos y también a deletéreos en experiencias de campo".

En virtud de las recomendaciones de la norma se decidió continuar el ensayo. En dichas mediciones se observa que continuó aumentando la deformación ubicándose a los 32 días por encima de 0,15 %.

Debe agregarse que en la Nota 9, detallada en el Anexo de la norma, se menciona que algunos granitos y gneises han mostrado ser deletéreos (expansivos) en campo con expansiones registradas en este ensayo a los 14 días, incluso menores de 0,1%.

Estos resultados muestran que es posible que los agregados gruesos de origen granítico puedan haber jugado algún papel en el desarrollo de la RAA.

4. CONCLUSIONES

Se obtuvieron las propiedades mecánicas del material, observándose valores de velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos y de módulo de elasticidad dinámico por debajo de los valores habituales para hormigones de ese rango de resistencia a la compresión.

Los agregados analizados demostraron ser potencialmente sensibles a la RAA. Cabe mencionar que ese tipo de agregados fue uno de los que se usó para la elaboración de hormigón, pero no fue el único tipo de agregado utilizado.

Sobre las tinciones, se detectaron zonas potencialmente reactivas alrededor de algunos agregados y en zonas fisuradas en los testigos. Las zonas de los testigos que se marcaron por la posible presencia de gel de la RAA fueron identificadas para poder realizar en zonas de similares características ensayos a nivel microestructural.

La caracterización microestructural mediante técnicas de MEB/EDS permitió identificar productos de reacciones expansivas. La morfología y la composición de los productos encontrados en las zonas estudiadas fueron consistentes con geles de la reacción RAA. Por otro lado, en otras zonas con depósitos blancuzcos se detectó la presencia de etringita. Debido al carácter masivo de la estructura, se

considera la hipótesis de formación retardada de etringita para explicar su presencia.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM C-215, “Standard Test Method for Fundamental Transverse , Longitudinal , and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens.” West Conshohocken, PA, pp. 1–7, 2008.
- [2] UNIT-NM 58, “Determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos.” Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 1998.
- [3] UNIT-NM 69, “Hormigón-Extracción, preparación y ensayo de testigos de estructuras de hormigón.” Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.
- [4] G. D. Guthrie and J. W. Carey, “A simple environmentally friendly, and chemically specific method for the identification and evaluation of the alkali-silica reaction,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 9, pp. 1407–1417, 1997.
- [5] L. Powers, “Developments in alkali-silica gel detection,” *Concr. Technol. Today*, 1999.
- [6] B. Godart, M. De Rooij, and J. G. M. Wood, *Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures*. RILEM Publications, 2013.
- [7] ASTM C97/ C97M, “Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone.” West Conshohocken, PA, 2015.
- [8] IRAM 1674, “Determinación de la Reactividad Alcalina Potencial. Método Acelerado de la Barra de Mortero.” 1997.