

Tesis de Doctorado en Geología

**Los agregados pétreos usados en hormigón en
la zona de Bahía Blanca, su comportamiento
frente a la reacción álcali-sílice**

Juan José BEREZOSKY

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geología, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Geología durante el período comprendido entre el 14 de agosto de 2015 y el 10 de octubre de 2024, bajo la dirección de la Dra. Silvina Marfil y la co-dirección del Dr. Francisco Locati (UCC, CICTERRA CONICET-UNC).

Lic. Juan José Berezosky



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Subsecretaría de Posgrado

La presente tesis ha sido aprobada el

mereciendo la calificación de

Agradecimientos

Quiero agradecer...

... el respaldo humano y profesional de Silvina Marfil, al compromiso de Francisco “Pancho” Locati y a la pasión de Pedro (Maiza) además de grandes charlas y acompañamiento de “las chicas de la oficina” (Coty, Leti, Pau y Leni);

... a mi familia Celeste, Felipe y Lorenzo por el apoyo incondicional;

... al esfuerzo de mis viejos Joseli y Adriana que pudieron brindarme lo que no tenían para alcanzar el sueño de ser profesional;

... a la Universidad Nacional del Sur y en especial al Departamento de Geología, por dejarme ser parte de su historia;

... a Vialidad Nacional y las personas que conocí en el camino que me empujaron para poder enfocarme en la investigación dentro de dicho organismo (entre ellos el Ing. Pérez[†], Fede Di Bin y Juan Méndez);

... al Ing. Falcone (Darío) y al LEMIT por la seriedad brindada al momento de realizar los ensayos;

... al Laboratorio de Estudio y Ensayos de materiales del Departamento de Ing. Civil de la UNS, en especial a la Dra. Ing. Carla Priano y su grupo de trabajo;

... a las canteras de piedra partida, arenas y canto rodado por el aporte y acceso a las mismas para el muestreo;

Resumen

El hormigón es un material fundamental para el avance de la ingeniería en el mundo. Una de sus cualidades más importantes es la versatilidad y su resistencia a las cargas axiales a partir de la combinación conveniente de agregados, cemento Pórtland y agua (y eventualmente aditivos y/o adiciones). Sin embargo, se espera que el material también sea capaz de hacer frente a los agentes internos y externos que pueden comprometer su durabilidad. La combinación entre sus componentes y los diversos factores externos, pueden provocar reacciones físico-químicas que influyen, no solo en las capacidades resistentes del material, sino también en la vida útil de las estructuras. Dentro de estas patologías, una de las más controvertidas y segunda en importancia luego de la corrosión, es la reacción álcali-sílice (RAS).

Desde hace varias décadas, en el sur de la provincia de Buenos Aires, se han identificado estructuras de hormigón con evidencias significativas de la RAS. Las mismas se relacionan indefectiblemente con los agregados pétreos utilizados, sobre todo en estructuras expuestas a las inclemencias climáticas de la zona.

En esta Tesis se realizó un relevamiento de las principales canteras proveedoras de agregados de trituración y naturales (gruesos y finos), utilizados en hormigón en la zona de influencia de Bahía Blanca. Se realizaron análisis petrográficos (norma IRAM 1649), ensayos físicos (método acelerado de la barra de mortero, norma IRAM 1674 y método del prisma de hormigón, convencional y acelerado, norma IRAM 1700), de acuerdo a los requerimientos de las normas IRAM 1512 y 1531 (para agregados gruesos y finos para hormigón, respectivamente), para evaluar su potencial reactividad frente a la RAS. Se identificó vidrio volcánico (en trizas y/o en la pasta de rocas volcánicas) y calcedonia como componentes potencialmente reactivos en las arenas y canto rodado, y cuarzo fuertemente tensionado y microcristalino en los de trituración. Además, se estudiaron pavimentos de hormigón con evidencias de deterioro por la RAS en zonas de influencia a la ciudad de Bahía Blanca. Se realizó una caracterización macroscópica, con estereomicroscopio y microscopía óptica sobre secciones delgadas.

Se identificaron los componentes reactivos, los que se vincularon con los agregados de las canteras estudiadas. Se analizaron los productos de reacción, características del mortero, desarrollo de microfisuras, coronas de reacción, etc. Los productos de neoformación se analizaron por microscopía electrónica de barrido (con electrones secundarios y retrodifundidos) y microsonda de electrones. Para evaluar el estado del hormigón y el daño a nivel microestructural se realizaron ensayos físico-mecánicos, se determinó el índice de daño (Damage Rating Index, DRI) y se determinó el daño por rigidez (SDT) mediante el análisis de curvas tensión-deformación.

Finalmente, se evaluó una adición mineral activa (AMA), en reemplazo parcial del cemento (30%), para inhibir la RAS de los agregados calificados como potencialmente reactivos, y de comprobada reactividad en los casos de estudio. Esto permite brindar una alternativa de solución para la utilización de los agregados reactivos de la zona.

Esta Tesis busca ser una contribución para la toma de decisiones al momento de realizar hormigones estructurales, enfatizando en la calidad de los agregados del sector estudiado y las consecuencias originadas por la RAS.

Abstract

Concrete is a fundamental material for the advancement of engineering worldwide. One of its most important qualities is its versatility and resistance to axial loads, achieved through the convenient combination of aggregates, Portland cement, and water (and eventually additives and/or additions). However, it is expected that the material will also be able to withstand internal and external agents that can compromise its durability. The combination of its components and various external factors can cause physicochemical reactions that influence not only the material's resistant capacities but also the lifespan of structures.

Among these pathologies, one of the most controversial and second in importance after corrosion is the alkali-silica reaction (ASR). For several decades, structures in the south of the province of Buenos Aires have been identified with significant evidence of

ASR. These are invariably related to the petrous aggregates used, especially in structures exposed to the inclement weather of the area.

This thesis conducted a survey of the main quarries supplying crushed and natural aggregates (coarse and fine) used in concrete in the area of influence of Bahía Blanca. Petrographic analyses (IRAM 1649 standard), physical tests (accelerated mortar bar method, IRAM 1674 standard, and concrete prism method, conventional and accelerated, IRAM 1700 standard) were performed according to the requirements of IRAM 1512 and 1531 standards (for coarse and fine aggregates for concrete, respectively) to evaluate their potential reactivity to ASR.

Volcanic glass (in shards and/or in volcanic rock groundmass) and chalcedony were identified as potentially reactive components in sands and gravels, and highly strained and microcrystalline quartz in crushed aggregates. Additionally, concrete pavements with evidence of ASR deterioration in areas surrounding Bahía Blanca were studied. Macroscopic characterization was performed using stereomicroscopy and optical microscopy on thin sections.

Reactive components were identified and linked to aggregates from the studied quarries. Reaction products, mortar characteristics, microcrack development, reaction rims, etc., were analyzed. Neoformation products were analyzed by scanning electron microscopy (with secondary and backscattered electrons) and electron microprobe.

To evaluate the concrete's condition and microstructural damage, physico-mechanical tests were performed, and the damage rating index (DRI) and stiffness damage test (SDT) were determined through stress-strain curve analysis.

Finally, a mineral admixture (MA) was evaluated as a partial replacement for cement (30%) to inhibit ASR in aggregates classified as potentially reactive and proven reactive in case studies. This provides an alternative solution for using reactive aggregates of the area.

This thesis aims to contribute to decision-making when creating structural concretes, emphasizing on the quality of the aggregates in the studied area and the consequences due to the ASR.

Índice

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Breve introducción a la temática	1
1.2 Reacción álcali-sílice (RAS)	5
1.2.1 Ambiente alcalino	6
1.2.2 Agregados potencialmente reactivos frente a la RAS	9
1.2.2.1 Polimorfos de la sílice	9
1.2.2.2 Vidrio volcánico	11
1.2.3 Reactividad de los componentes	11
1.2.4 Humedad	14
1.2.5 Reacción química	16
1.2.6 Expansión	18
1.3 Cien años de conocimiento	20
1.3.1 Ensayos normalizados	21
1.3.2 Análisis de estructuras	24
1.3.2.1 Testigos	29
1.3.2.2 Productos de reacción	31
1.4 Planteo de la problemática	32
1.5 Objetivos	33
CAPÍTULO II. UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO	35
2.1 Ubicación del área de estudio	35
2.2 Marco geológico	35
2.2.1 Geología de las Sierras Australes	38
2.2.1.1 Basamento	40
2.2.1.2 Grupo Curamalal	41
2.2.1.3 Grupo Ventana	43
2.2.1.4 Grupo Pillahuincó	44
2.2.2 Depósitos de arena y canto rodado	45
2.2.2.1 Depósitos neógenos	45
2.2.2.2 Depósitos pleistocenos	48
2.2.2.3 Depósitos holocenos	50
CAPÍTULO III. MATERIALES	54
3.1 Definiciones	54
3.2 Ubicación de las canteras estudiadas	57

3.3 Canteras de macizos rocosos	58
3.3.1 Cantera PIR	59
3.3.2 Cantera PIG	60
3.4 Canteras de depósitos sedimentarios	62
3.4.1 Cantera VIL	63
3.4.2 Cantera RCO	65
3.4.3 Cantera MED	66
3.4.4 Canteras ORE y CLA	68
3.4.5 Cantera NEC	69
CAPÍTULO IV. MÉTODOS	71
4.1 Introducción	71
4.2 Agregado fino para hormigón de cemento (IRAM 1512)	72
4.2.1 Sustancias nocivas y potencialmente reactivas	72
4.2.2 Comprobación de la reactividad	73
4.2.3 Medidas adoptadas para el uso de agregados reactivos	74
4.2.4 Niveles de prevención	77
4.3 Agregado grueso para hormigón de cemento (norma IRAM 1531)	79
4.3.1 Criterios de evaluación para estructuras afectadas por la RAS	79
4.3.2 Identificación de sustancias potencialmente reactivas y otras sustancias perjudiciales en agregados gruesos	80
4.3.3 Utilización de agregados reactivos	83
4.4 Examen petrográfico (IRAM 1649)	83
4.4.1 Petrografía de canto rodado	85
4.4.2 Petrografía de arenas	87
4.4.3 Petrografía de piedra partida	87
4.5 Método acelerado de la barra de mortero (Norma IRAM 1674)	87
4.6 Método convencional del prisma de hormigón (IRAM 1700)	88
4.7 Método acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700)	89
4.8 Microscopía óptica	90
4.9 Microscopía electrónica de barrido (MEB)	90
4.10 Microsonda de electrones	91
4.11 Evaluación de la efectividad de una puzolana natural para inhibir la RAS	92
4.12 Índice de daño	92
CAPÍTULO V. RESULTADOS	94

5.1 Introducción	94
5.2 Canteras de agregados de trituración	94
5.2.1 Petrografía	94
5.2.1.1 Cantera PIG	94
5.2.1.2 Cantera PIR	97
5.2.2 Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674)	99
5.2.3 Método del prisma de hormigón (IRAM 1700)	100
5.2.3.1 Convencional a 38°C	100
5.2.3.2 Acelerado a 60°	101
5.2.4 Petrografía de barras de mortero y prismas de hormigón. Cantera PIG	102
5.2.4.1 Barras de mortero	102
5.2.4.2 Prismas de hormigón	104
5.2.5 Discusión de los resultados	105
5.3 Canteras de arena y canto rodado	107
5.3.1 Petrografía	107
5.3.1.1 Cantera RCO	107
5.3.1.2 Cantera VIL	109
5.3.1.2.1 Canto rodado	110
5.3.1.2.2 Arena	113
5.3.1.3 Cantera MED	115
5.3.1.4 Cantera CLA	118
5.3.1.5 Cantera ORE	121
5.3.1.6 Cantera NEC	123
5.3.2 Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674)	125
5.3.3 Método del prisma de hormigón (IRAM 1700)	126
5.3.3.1 Acelerado a 60°	127
5.3.3.2 Convencional a 38°	128
5.3.4 Petrografía de las barras de mortero y prismas de hormigón	129
5.3.4.1 Introducción	129
5.3.4.2 Cantera MED	129
5.3.4.2.1 Barras de mortero	129
5.3.4.2.2 Prisma de hormigón acelerado	130
5.3.4.2.3 Prisma de hormigón convencional	131
5.3.4.3 Cantera VIL (arena)	131
5.3.4.3.1 Barras de mortero	132
5.3.4.3.2 Prisma de hormigón acelerado	132
5.3.4.3.3 Prisma de hormigón convencional	133
5.3.4.4 Cantera RCO	134
5.3.4.4.1 Barras de mortero	134
5.3.4.4.2 Prisma de hormigón acelerado	134
5.3.4.4.3 Prisma de hormigón convencional	135
5.3.4.5 Cantera CLA	136
5.3.4.5.1 Barra de mortero	136
5.3.4.5.2 Prisma de hormigón acelerado	136
5.3.4.5.3 Prisma de hormigón convencional	137
5.3.5 Discusión de los resultados	138

5.3.5.1 Arenas	138
5.3.5.2 Canto rodado	141
CAPÍTULO VI. CASOS DE ESTUDIO	143
6.1 Introducción y ubicación de las obras estudiadas	143
6.2 Rotonda de acceso a Pigüé	144
6.2.1 Ubicación y características de la estructura	144
6.2.2 Ensayos físicos y mecánicos	146
6.2.3 Caracterización petrográfica de los testigos	150
6.2.3.1 Observaciones con estereomicroscopio	150
6.2.3.2 Observaciones con microscopio petrográfico	151
6.2.4 Análisis de los productos de reacción	153
6.2.4.1 Microscopía electrónica de barrido	153
6.2.5 Índice de Daño (DRI)	154
6.2.6 Discusión	155
6.3 Autovía Juan Pablo II	157
6.3.1 Ubicación y características de la estructura	157
6.3.2 Ensayos físicos	158
6.3.2.1 Absorción, densidad, porosidad y carbonatación	158
6.3.3 Ensayos mecánicos	159
6.3.3.1 Resistencia a compresión, módulo elástico y ensayo SDT	159
6.3.4 Caracterización de los testigos	161
6.3.4.1 Análisis petrográfico	163
6.3.4.1.1 Observaciones con estereomicroscopio y microscopio petrográfico	163
6.3.4.2 Análisis de los productos de reacción	164
6.3.4.2.1 Microscopía electrónica de barrido	164
6.3.5 Índice de daño (DRI)	165
6.3.6 Discusión	166
6.4 Playón de estacionamiento en Bahía Blanca	167
6.4.1 Ubicación y características de la estructura	167
6.4.2 Ensayos físicos y mecánicos	167
6.4.3 Caracterización de los testigos	169
6.4.3.1 Análisis petrográfico	169
6.4.3.1.1 Observaciones con estereomicroscopio	169
6.4.3.1.2 Observaciones con microscopio petrográfico	170
6.4.4 Análisis de los productos de reacción	171
6.4.4.1 Microscopía electrónica de barrido	171
6.4.5 Índice de daño (DRI)	174
6.4.6 Discusión	175
6.5 Rotonda de acceso a Bahía Blanca	178
6.5.1 Ubicación y características de la estructura	178
6.5.2 Caracterización de los testigos	179
6.5.2.1 Análisis petrográfico hormigón original	180

6.2.2.1.1 Observaciones con estereomicroscopio	180
6.5.2.1.2 Observaciones con microscopio petrográfico	181
6.5.2.2 Análisis petrográfico del hormigón de reparación	183
6.2.2.2.1 Observaciones con estereomicroscopio	183
6.5.2.2.2 Observaciones con microscopio petrográfico	183
6.5.3 Análisis los de productos de reacción	185
6.5.3.1 Microscopía electrónica de barrido	185
6.5.4 Discusión	186
6.6 Rotonda de acceso a Médanos	187
6.6.1 Ubicación y características de la estructura	187
6.6.2 Caracterización de los testigos	188
6.6.2.1 Análisis petrográfico	189
6.6.2.1.1 Observaciones con estereomicroscopio	189
6.6.2.1.2 Observaciones con microscopio petrográfico	190
6.6.3 Análisis de los productos de reacción	191
6.6.3.1 Microsonda electrónica	191
6.6.4 Discusión	194
6.7 Pavimento de un acceso al puerto de Ing. White	196
6.7.1 Ubicación y características de la estructura	196
6.7.2 Ensayos físicos y mecánicos	196
6.7.3 Caracterización de testigos	197
6.7.3.1 Análisis petrográfico	198
6.7.4 Discusión	199
6.8 Autovía de acceso a Bahía Blanca	199
6.8.1 Ubicación y características de la estructura	199
6.8.2 Ensayos físicos y mecánicos	200
6.8.3 Caracterización de los testigos	201
6.8.3.1 Análisis petrográfico	201
6.8.4 Discusión	203
CAPÍTULO VII. MEDIDAS PARA INHIBIR LA RAS	204
7.1 Introducción	204
7.2 Medidas prestacionales	204
7.2.1 Uso de adiciones minerales activas (AMAs)	205
7.3 Evaluación de la efectividad de una AMA para inhibir la reactividad del agregado de la cantera PIG	205
7.3.1 Petrografía de las barras de mortero post ensayo	208
7.4 Evaluación de la efectividad de una AMA para inhibir la reactividad del agregado de la cantera MED	209
7.4.1 Caracterización post ensayo	211
7.4.1.1 Análisis petrográfico	211

7.4.1.2 Análisis de la reacción puzolánica con MEB-EDS	212
7.4.2 Verificación de la capacidad inhibidora de la BVZ con el método del prisma de hormigón	212
7.5 Discusión	214
CAPÍTULO VIII. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES	216
8.1 Consideraciones Finales	216
8.1.1 Agregados estudiados	216
8.1.1.1 Agregados gruesos	216
8.1.1.2 Agregados finos	217
8.1.2 Casos de estudio	218
8.1.2.1 Rotonda de acceso a Pigüé	218
8.1.2.2 Autovía Juan Pablo II	219
8.1.2.3 Playón de un estacionamiento en Bahía Blanca	220
8.1.2.4 Rotonda de acceso a Bahía Blanca	221
8.1.2.5 Rotonda de acceso a Médanos	222
8.1.2.6 Pavimento de acceso al puerto de Ing. White	223
8.1.2.7 Autovía de acceso a la ciudad de Bahía Blanca	223
8.1.3 Medidas de mitigación para los agregados reactivos estudiados	224
8.1.3.1 Agregado grueso	224
8.1.3.2 Agregado fino	225
8.2 Conclusiones	226
BIBLIOGRAFÍA	228

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Breve introducción a la temática

La historia de la construcción de grandes estructuras comienza a partir del descubrimiento de un aglomerante (cemento Pórtland) que, al mezclarse con agua, reacciona exotérmicamente (reacciones químicas de hidratación), generando un material capaz de ganar resistencia con el tiempo (pudiendo soportar grandes cargas) y, lo más importante, durable en el tiempo (Sanjuán Barbudo y Chinchón Yepes, 2014). Este producto, patentado en el año 1824 por **Josep Aspdin** revolucionó la industria de la construcción. Por supuesto, los costos de producción (para la tecnología del momento) no eran los más económicos. El proceso de “clinkerización” (cocción de piedra caliza, arcillas y yeso a 1500 °C) eran por demás elevados, por lo que se buscó la manera de reducirlos. La utilización de agregados provenientes de rocas, se convirtió en una alternativa económica que permitía la reducción de costos, ya que los áridos constituirían un esqueleto granular capaz de empaquetarse de tal manera que, junto con el aglomerante, contribuían a los fines estipulados.

En sus primeras concepciones, dichas rocas, eran concebidas como materiales inertes que sólo aportaban firmeza en la mezcla. Algunos adelantados para la época como Marco Vitrubio, en sus escritos de arquitectura mencionaba características de estos materiales que se contraponían en parte a ese concepto: **«... la toba blanca de Umbría, Piceno y Venecia, que se puede cortar, como si fuera madera...»** o **«La piedra Tiburtina, y las que tienen similares características, soportan bien el detrimento ocasionado por las condiciones meteorológicas y por el peso, pero no resisten la fuerza del fuego. Y en cuanto les afecta se hacen añicos y quedan destruidas; se debe a que son más bien piedras secas en su composición natural, poseen poca cantidad de tierra y una gran proporción de aire y de fuego»** (Oliver Domingo, 1995). Dichas cualidades nos hacen comprender que el comportamiento de las rocas dentro de la estructura de hormigón nunca fue inocuo, sino que existe una interacción con el medio circundante (otros elementos) como así también, con las condiciones donde se emplazará la estructura a construir.

Como todo en el tiempo, la utilización de este sistema de construcción comenzó a manifestar algunos problemas, muchos relacionados a los esfuerzos soportados por estas estructuras (problemas estructurales) y otros, por la interacción de los componentes intervinientes y con el medioambiente (problemas de durabilidad). En los años 40, Thomas Stanton descubrió que existía una patología en hormigones en estado endurecido que producía un deterioro significativo luego de transcurridos algunos años de servicio (Stanton, 1940) y concluyó que se trataba de una reacción química que involucraba los álcalis aportados por el cemento Pórtland (mayoritariamente) y ciertos componentes metaestables de los agregados pétreos. Así, se reconoció por primera vez la reacción álcali-agregado (RAA) que, en la actualidad, es una de las patologías más frecuentes en el hormigón, después de la corrosión (Mehta y Monteiro, 1986) (Figura 1.1).

Esta reacción, se puede dividir según la naturaleza de los agregados intervinientes. Por un lado, la reacción álcali-carbonato (RAC) donde participan ciertos tipos de rocas ricas en dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y por otro, la reacción álcali-sílice (RAS) que involucra materiales que contienen sílice (SiO_2) metaestable. Ambos tipos de reacción pueden resultar en expansión y agrietamiento de elementos de hormigón, lo que lleva a una reducción en la vida útil de estas estructuras (ACI 221, 2008). La primera es menos frecuente y hasta el momento no se han detectado en Argentina, estructuras afectadas por esta patología. Un estudio completo sobre las principales características y variables involucradas en esta reacción puede consultarse en la Tesis Doctoral de Carlos Milanesi (Milanesi, 2018a). La segunda reacción (RAS), será motivo de estudio en esta Tesis y se diferencia de la primera por el elevado número de estructuras afectadas por esta patología en todo el mundo, ya que intervienen en su desarrollo componentes de sílice metaestable, de gran distribución en la naturaleza.

Para que se produzca esta reacción, se deben cumplir tres requisitos (Diamond et al., 1981 y Xu, 1987; entre otros):

- Una cantidad suficiente de sílice reactiva (proveniente de los agregados)
- Una concentración suficiente de álcalis (principalmente del cemento Pórtland)
- Humedad relativa elevada (generalmente > 80%)

La combinación de estos factores generará un gel sílico-alcálico con cantidades variables de calcio, cuyas características distintivas son las higroscópicas, con tendencia a absorber agua e hincharse. Bajo ciertas condiciones, la reacción provoca la expansión de estos productos y por ende (al tratarse de un sistema cerrado) la expansión del hormigón, pudiendo producir agrietamiento de la estructura (Thomas et al., 2013). La eliminación o falta de cualquiera de estas variables, impedirá el desarrollo de la reacción.

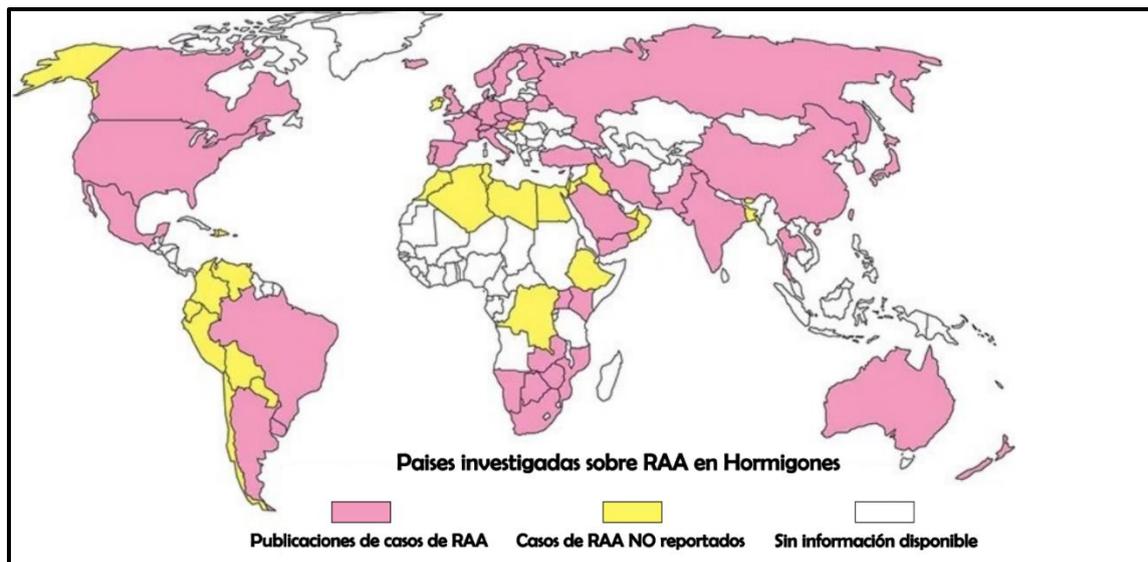


Figura 1.1 Mapa de casos de RAA en el mundo. (Imagen tomada de Sims y Poole, 2017)

Desde su identificación (hace más de 80 años), se han generado numerosas investigaciones que abordan desde las causas y efectos de la RAS, hasta la prevención y posibles soluciones al problema de dicha patología en el hormigón. Estos trabajos, han sido impulsados en parte por los costos importantes involucrados en remediar el daño que la reacción puede causar, pero también por la extensión mundial del problema (Figura 1.1). A pesar de que la ocurrencia real de daños por la RAS en estructuras de hormigón, es relativamente rara y aparentemente esporádica, la reparación o reemplazo de las mismas conlleva erogaciones importantes e imprevistas (Sims y Poole, 2017).

En Argentina desde la creación del LEMIT (Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica) en el año 1942 y hasta la fecha, se

han documentado más de 100 ejemplos de estructuras dañadas por la RAS ubicadas a lo largo y ancho del país (Milanesi et al., 2021). Los primeros antecedentes se registraron en la década del '60 a partir del estudio detallado de un pavimento de hormigón (construido entre los años 1949 y 1950) que unía la ciudad de La Plata con la localidad de Punta Lara (provincia de Buenos Aires) (Fava et al., 1961). Allí se observaron fisuras con características distintivas (tipo mapa) y de manera generalizada, concluyendo que se debía a la RAS. La misma, fue adjudicada a la utilización de agregados finos reactivos del río Paraná cuya composición incluye partículas de (o con) ópalo y calcedonia. Desde ese momento, el estudio minucioso de la patología fue cobrando importancia, a tal punto de incorporarse esta problemática al Proyecto Argentino de Regulación de Estructuras de Hormigón (Fava, 1970), cuya finalidad fue trazar los lineamientos a considerar al momento de proyectar y ejecutar una estructura.

Conjuntamente, con los avances científicos y tecnológicos, se fueron implementando técnicas para evaluar el rol de los factores desencadenantes de la reacción (agregados potencialmente reactivos, cantidad de álcalis en el cemento, humedad relativa, efecto de la temperatura, etc.), como así también los ensayos físicos para su cuantificación en términos de expansión. Dichos ensayos, lograron establecer límites normalizados (cada vez con mayor precisión) en la combinación e interacción de los elementos intervinientes.

Organismos especializados y comités internacionales como la American Society for Testing and Materials (ASTM), el American Concrete Institute (ACI) y la International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM) entre otros, así como entes nacionales como el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) y el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), incorporaron conocimientos de experiencias e investigaciones realizadas en todo el mundo para la generación de normativas, reglamentos, etc. Estos instrumentos permiten realizar abordajes integrales de dicha problemática, los cuales, no solo tienen en cuenta la evaluación de

los materiales intervinientes, sino que además proponen medidas de mitigación, diagnóstico y monitoreo de las estructuras afectadas.

Desde hace más de 80 años, diferentes estructuras fueron estudiadas y diagnosticadas con la RAS en Argentina. Se pueden citar algunos ejemplos de relevancia como son el Aeropuerto de Camba Punta en Corrientes (Batic et al., 1984), las bases de las torres de alta tensión de Salto Grande-Ezeiza (Giovambattista et al., 1986), bloques de hormigón sumergidos del Dique El Cadillal en Tucumán (Milanesi et al., 2021) y losas del pavimento de la ruta nacional N° 127 (entre Entre Ríos y Corrientes) (Milanesi et al., 2008a). En todas estas estructuras, se concluyó que existían agregados con componentes reactivos que desencadenaron la reacción, deteriorando la estructura.

1.2 Reacción álcali-sílice (RAS)

El hormigón consiste en una mezcla de agregados gruesos (piedra partida o canto rodado) y finos (arena) en un matriz de pasta de cemento (cemento y agua). Para llegar al producto final es necesaria la interacción de dichos elementos, lo cual implica reacciones químicas particulares que poseen un común denominador: el agua. Este elemento es fundamental para lograr trabajabilidad (lubricación) de los componentes al momento de su mezclado y colocación, pero además es el actor principal en la hidratación química del cemento Pórtland generando los productos que le brindaran propiedades resistentes (Maldonado y Carrasco, 2012).

Es fundamental lo que ocurre en los poros microscópicos interconectados, a través de los cuales, el agua y los iones en solución pueden migrar (Farny y Kerthoff, 2007). El agua intersticial en el hormigón es una solución altamente alcalina (pH 12 - 13), cuyos iones presentes son aportados principalmente por el cemento: Na^+ ; K^+ , Ca^{2+} y OH^- (Hobbs, 1988). A partir de estas condiciones (sumado a una elevada humedad, generalmente superior al 80%), rocas ricas en sílice metaestable pueden verse afectadas, produciéndose una inestabilidad en dichas estructuras cristalinas (Figura 1.2). La sílice disponible reacciona con los álcalis presentes en la solución de poro del hormigón produciendo una reacción química entre estos componentes, denominada reacción álcali-sílice (RAS) (ACI, 2008).

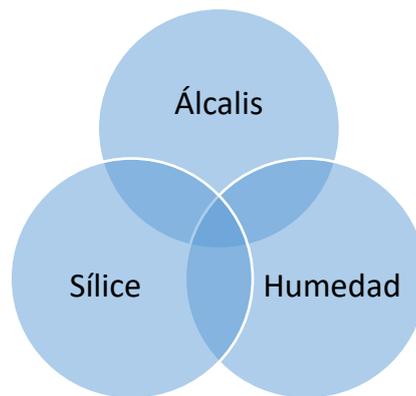


Figura 1.2 Condiciones para que se produzca la RAS

Por lo tanto, si existen condiciones determinantes y esenciales como: agregados potencialmente reactivos, alta concentración de álcalis en la solución de poro y, si la estructura se encuentra expuesta a condiciones de alta humedad (Figura 1.2), la reacción podrá desarrollarse.

1.2.1 Ambiente alcalino

Como ya se ha mencionado, el cemento Pórtland constituye la principal fuente de aporte de álcalis (Na^+ y K^+) al hormigón (Stanton, 1940). Sin embargo, el resto de los materiales componentes del mismo (adiciones minerales activas - AMA, agua, aditivos, agregados) pueden también aportar cantidades relevantes (Milanesi, 2018a; Bérubé et al., 1996). Además, experiencias de laboratorio han demostrado que sales alcalinas (ácido acético o fórmico), empleados como agentes anticongelantes en pavimentos, agravan la RAS (Thomas et al., 2013), aunque no se ha demostrado aún a escala de campo.

En el momento que el cemento Pórtland entra en contacto con el agua, comienzan a desarrollarse procesos propios de la hidratación que generan condiciones poco habituales para los agregados con componentes silíceos. Los principales iones (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- y SO_4^{2-}), presentes en la solución contenida en los poros de la pasta de cemento, durante el transcurso del tiempo, van modificando su concentración (Figura 1.3) (Diamond, 1983).

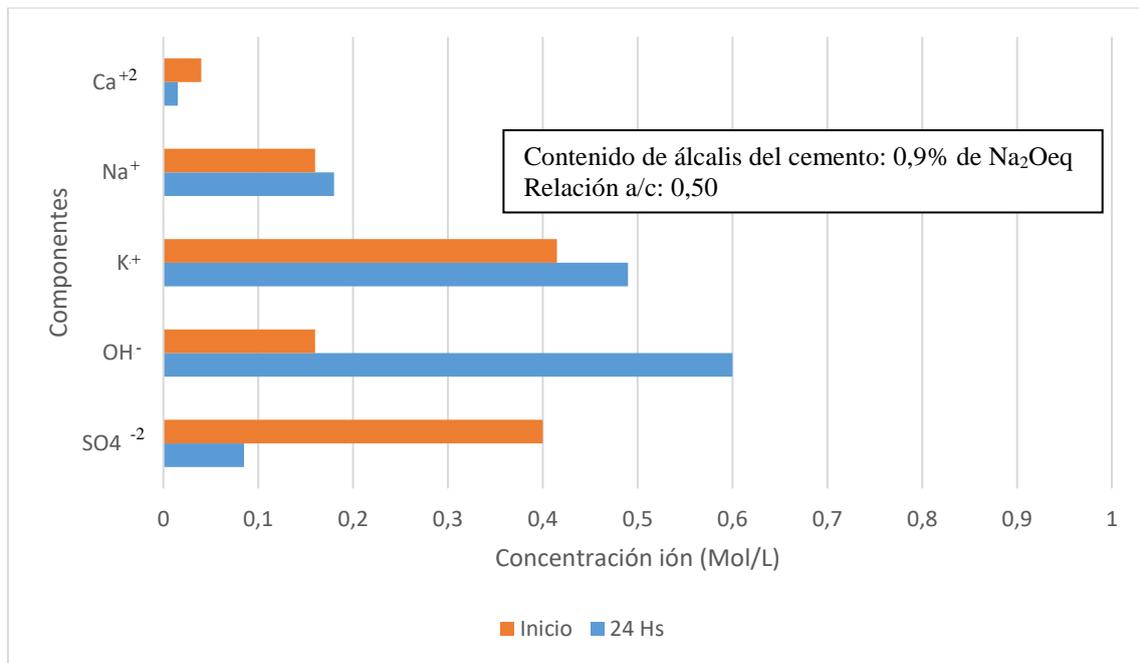


Figura 1.3 Variación de la composición química del agua capilar de una pasta de cemento de alto álcalis (0,9% de Na₂Oeq) y relación agua-cemento (a/c) = 0,50. (Modificado de Diamond, 1983)

La formación de fases sólidas de sulfatos (monosulfoaluminatos de calcio y ettringita) resulta en una reducción de la concentración de SO₄²⁻ en la solución, y los iones oxhidrilos (OH⁻) entran en solución para mantener el equilibrio con los cationes alcalinos cargados positivamente. Luego de transcurridas 24 horas, la solución de poro está compuesta casi en su totalidad por Na⁺, K⁺ y OH⁻, aunque existe aún, una baja concentración de Ca²⁺ (Thomas et al., 2013). En resumen, la solución de poro del hormigón está constituida, principalmente, por hidróxidos de sodio y potasio que le otorgan un valor de pH de 12,5 a 13.

Si se tienen en cuenta los álcalis aportados por el cemento Pórtland, su concentración depende del tipo y composición de sus materias primas. Si hay sulfatos disponibles durante el proceso de elaboración, los álcalis tienden a formar sulfato de potasio (K₂SO₄), sulfato de sodio y potasio ((K, Na)₂SO₄) y sulfato de calcio y potasio (K₂Ca₂(SO₄)₃). El resto se distribuye entre el aluminato tricálcico (C₃A), silicato dicálcico (C₂S) y, en menor proporción, en el silicato tricálcico (C₃S) y el sulfoaluminato tetracálcico (C₄AF) (Drolet et al., 2017a y b).

Vollpracht et al. (2016) hicieron una revisión de las experiencias realizadas en las últimas décadas, sobre la química de la solución de poro de pastas del cemento y concluyeron que, para las pastas con una relación agua/cemento de 0,5, la concentración de álcalis varía en dos rangos: entre 100 y 200 mmol Na⁺/L, y, 400 y 450 mmol K⁺/L, para cementos de bajo álcali (0,20%-0,31% Na₂O, 0,48%-0,75% K₂O) y, entre 250 y 350 mmol Na⁺/L, y, 400 y 800 mmol K⁺/L para cementos con alto contenido alcalino (0,32%-0,43% Na₂O, 1,04%-1,30% K₂O).

La RAS se inicia a partir de la reacción entre los iones oxhidrilo (**OH⁻**), presentes en esta solución, y la sílice lábil (SiO₂) que constituye el agregado reactivo.

Existe una relación entre el contenido de álcalis y la expansión en el hormigón. Fournier et al. (2012) definen “umbral alcalino” al contenido mínimo de álcalis requerido para iniciar la expansión en el hormigón con un determinado agregado. Dicho umbral, no solo depende del contenido de álcalis, sino también de la reactividad del agregado en dicho sistema, así como de la temperatura ambiente donde se encuentra la estructura (Sims et al., 2004; Milanesi et al., 2018).

Las diferentes normas y especificaciones a nivel mundial, históricamente limitaron el contenido de álcalis del cemento, buscando controlar los efectos nocivos de la reacción. Según la mayoría de estos documentos, el desarrollo de la RAS en presencia de agregados potencialmente reactivos podía evitarse limitando el contenido de óxido de sodio equivalente (Na₂O_{eq}) del cemento a valores inferiores a 0,6%. Sin embargo, actualmente se considera más apropiado limitar el contenido de álcalis del hormigón, en función de la reactividad del agregado y otros factores (p.ej. Milanesi et al., 2008b; Thomas et al., 2012a y b; CSA, 2014a; AASHTO, 2010), concepto que ha sido incorporado en las normativas argentinas (IRAM 1512, 2013; IRAM 1531, 2022).

No obstante, en los últimos años se han realizado numerosas investigaciones que evalúan, además, el aporte de álcalis (Na⁺ y K⁺) por parte de feldespatos y micas de los agregados (Menéndez Méndez et al., 2012 y 2016; Hagelia y Fernández, 2012; Plusquellec et al., 2017; Drolet et al., 2017a y b). Todos concluyen que la mayor

liberación de álcalis por parte de los agregados se produce al aumentar el pH y la temperatura. Si bien los agregados suelen aportar bajas cantidades de álcalis en relación a las aportadas por el cemento, para algunos agregados los valores son importantes y se suman a los aportados por el cemento (p. ej. Bérubé et al., 2002).

1.2.2 Agregados potencialmente reactivos frente a la RAS

1.2.2.1 Polimorfos de la sílice

Los agregados utilizados en la industria de la construcción como materia prima para la elaboración de hormigones, provienen de diferentes rocas que son evaluadas desde diversos aspectos (IRAM 1512, 2013; IRAM 1531, 2022; entre otras). Existen normativas que establecen los requerimientos básicos que deben cumplir los áridos para ser utilizados en este tipo de estructuras. Una de las características fundamentales es conocer su petrografía, es decir su composición mineralógica y textura (IRAM 1649, 2008), lo que permitirá dar un diagnóstico del comportamiento del agregado en su interacción con el medio (cemento y agua). En dicho ambiente (elevada alcalinidad y humedad relativa) ciertos componentes se comportarán como metaestables por lo que sufrirán cambios que repercutirán en todo el sistema.

Los silicatos son el grupo mineral más abundante en la corteza terrestre y tienen como componente básico el ion silicato (SiO_4^{4-}). Dentro del grupo, los feldespatos comprenden más del 50%, relegando al segundo lugar a otro mineral muy importante: el cuarzo, compuesto por silicio y oxígeno (Tarbuck y Lutgens, 2012).

Aproximadamente el 12% del volumen total de la corteza es sílice (SiO_2). Existen varios polimorfos de este mineral, cada uno de los cuales tiene la misma composición, pero diferente estructura cristalina. Los más conocidos son cuarzo- α , cuarzo- β , tridimita, cristobalita, coesita y stishovita (estos dos últimos se forman a muy elevada presión). Existe además una variedad de sílice amorfa denominada ópalo. Otras formas de sílice dependen de su morfología, por ejemplo, la calcedonia es la variedad fibrosa de cuarzo.

El cuarzo- α es el único polimorfo de la SiO_2 estable en condiciones de presión y temperatura ambiente y en el rango de pH de la naturaleza. Su estructura es una red 3D de tetraedros de silicato (SiO_4). Cada unidad posee un átomo de silicio en el centro, rodeado por cuatro átomos de oxígeno (Bonewitz, 2013). Las unidades tetraédricas están conectadas a través de vértices de oxígeno (conocidos como puentes de oxígeno), que forman los enlaces O-Si-O con ángulos de aproximadamente 109° . En cambio, el enlace Si-O-Si puede variar de 100° a 170° (Bonewitz, 2013). Esta variación puede resultar en estructuras cristalinas (Figura 1.4a), o criptocristalinas (Figura 1.4b) (Rajabipour et al., 2015).

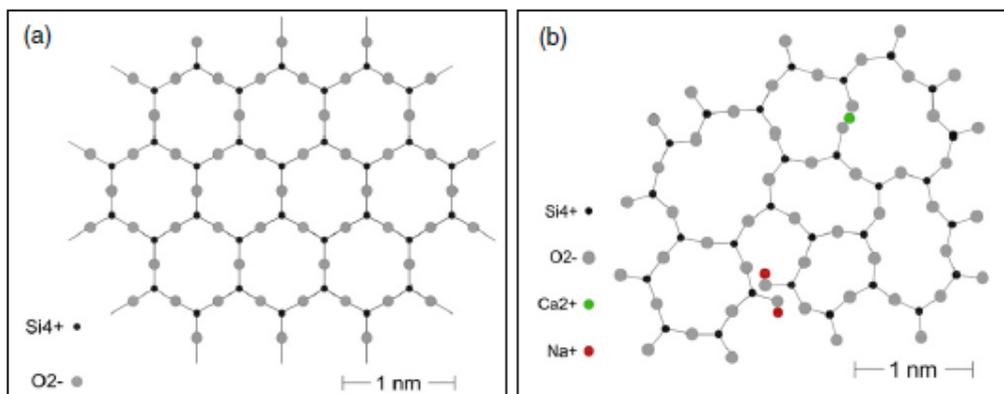


Figura 1.4 Disposición de elementos y enlaces en polimorfos de sílice (SiO_2) a) sílice cristalina; b) sílice criptocristalina. (Tomado de Rajabipour et al., 2015)

La reactividad de los agregados que contienen polimorfos de sílice depende del tamaño de grano y de la cristalinidad. Así, las variedades criptocristalinas (tridimita y cristobalita) y amorfas (ópalo) son las más reactivas. El cuarzo- α como se mencionó anteriormente es estable, sin embargo, cuando es microcristalino su solubilidad se incrementa debido a su mayor superficie específica (Grattan-Bellew, 1992).

La reducción del tamaño de grano del cuarzo se debe, en general, a procesos de deformación en la corteza terrestre. Esto incrementa la reactividad potencial ya que aumenta el área disponible para la reacción (p.ej. Wigum, 1995; Locati et al., 2010; Alaejos y Lanza, 2012).

La reactividad dependerá, además, de la concentración y naturaleza de las especies cuando se encuentren en solución. A $\text{pH} < 7,5$ la solubilidad de la sílice es muy baja,

entre 7,5 y 12,5 es intermedia y, a partir de este valor, se incrementa exponencialmente (Choquette et al., 1991).

1.2.2.2 Vidrio volcánico

El vidrio volcánico es un material metaestable que presenta muy elevada reactividad debido a que no tiene estructura cristalina. Se trata de un material que reacciona fácilmente en condiciones de elevada alcalinidad, aunque su reactividad se incrementa cuanto mayor es el grado de alteración (p.ej. Locati et al., 2022). En los agregados se presenta en general en las pastas de las rocas volcánicas y tobas y como componente individual (trizas), en especial en los agregados finos.

Katayama (2010) manifiesta que es necesario un contenido superior al 50% de sílice en su composición, para que las rocas desarrollen reactividad. Estudios sobre diferentes rocas volcánicas respaldan esta teoría ya que las rocas con pastas intermedias a ácidas (andesitas y riolitas) arrojaron resultados positivos para los ensayos de expansión. En cambio, las rocas de composición básica tuvieron un comportamiento inocuo frente a la RAS (Tapan, 2015).

1.2.3 Reactividad de los componentes

No todos los componentes mencionados reaccionan de la misma manera. La metaestabilidad en sus componentes se vuelve esencial, así como el contenido total de sílice (Rızaoğlu, 2017).

Dependiendo de su velocidad de reacción, se diferencian dos tipos de agregados:

- de reacción rápida: aquellos que están compuestos por variedades criptocristalinas y amorfas de sílice (tridimita, cristobalita, calcedonia y ópalo), y vidrio volcánico.
- de reacción lenta: aquellos que están compuestos por cuarzo microcristalino (<62 μm), fuertemente tensionado o microfracturado (generado por deformación durante procesos metamórficos).

Para ciertos agregados de reacción rápida, la relación que existe entre el contenido del componente reactivo presente (ópalo, chert, tridimita, etc.) y la magnitud de la expansión medida en el mortero u hormigón, no guarda una relación directamente proporcional. El porcentaje de expansión crece con el contenido de material reactivo, sólo hasta cierto punto, a partir del cual, la expansión comienza a disminuir para contenidos crecientes de éste (Figura 1.5). Stanton (1940), introdujo el concepto de “pessimum”, para referirse al contenido de agregado reactivo que produce la máxima expansión en las estructuras. Dicho efecto depende de varios factores (tipo de agregado, contenido de álcalis del mortero u hormigón, método de ensayo utilizado, etc.) (Arrieta Martínez, 2012).

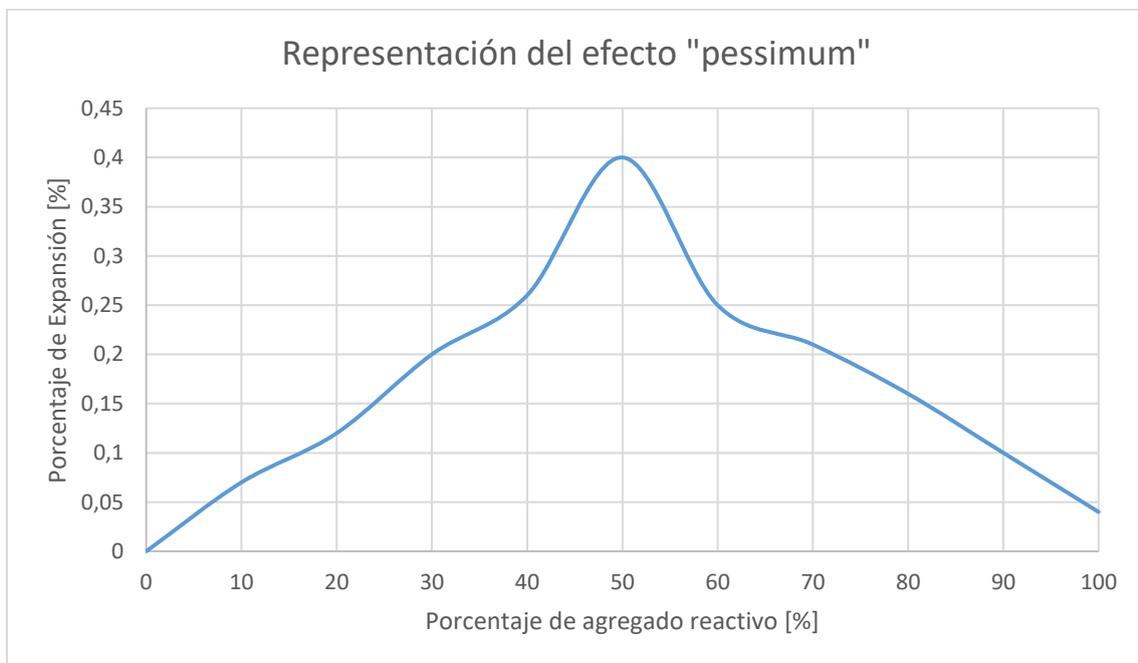


Figura 1.5 Representación gráfica del efecto “pessimum” en la RAS

Las normas IRAM 1512 (2013) y 1531 (2022) detallan los constituyentes silíceos potencialmente reactivos (Tabla 1.1). Sin embargo, para evaluar la potencial reactividad de los agregados es condición necesaria valorar dicha reactividad a partir de la realización de ensayos físicos (IRAM 1674, 1997 y/o IRAM 1700, 2013). Así mismo, existen clasificaciones determinadas a partir de los resultados de dichos ensayos normalizados, que califican al agregado entre inocuo y extremadamente

reactivo (Anexo B de IRAM 1531, 2022). En el capítulo 4 de esta Tesis se describen estas normas en detalle.

Lindgård et al. (2010), realizó una experiencia a partir del estudio de 22 agregados reactivos, ensayados con diferentes métodos normalizados y comparó los resultados con su comportamiento en estructuras en servicio. A partir de los resultados diferenciaron tres grupos definidos de agregados dependiendo el tiempo en el que se manifiesta la RAS en la estructura:

- de reactividad “normal” (5-20 años)
- de reactividad “lenta” (+15-20 años)
- no reactivo

Tabla 1.1 Constituyentes silíceos potencialmente reactivos (Tomado de IRAM 1531, 2022)

Tipo de material	Reacción frente a los álcalis
Calcedonia	Reactivo, posiblemente por su fino tamaño cristalino
Cristobalita	Reactivo, debido a su meta-estabilidad térmica y a su pequeño tamaño cristalino
Ópalo (sílice amorfa)	Altamente reactivo, por su pobre arreglo estructural y su pequeño tamaño cristalino
Cuarzo (sílice cristalina)	Puede ser reactivo cuando se presenta deformado-tensionado o en un tamaño de grano muy pequeño, o ambos
Vidrio volcánico (natural o artificial)	Tanto el vidrio volcánico amorfo como el desvitrificado son reactivos. La tridimita o cristobalita o ambas, podrían estar presentes cuando se desvitrifica. El vidrio volcánico alterado o parcialmente desvitrificado o hidratado es especialmente deletéreo.
Granos y subgranos	La presencia de subgranos, sobre todo de cuarzo, es importante para determinar la reactividad de un agregado.
Tridimita	Altamente reactivo debido a su meta-estabilidad y pequeño tamaño cristalino

Por su parte, el ACI Committee 221, no solo indica las sustancias potencialmente reactivas, sino que además brinda una valoración de la reactividad de cada una ellas (Tabla 1.2) (ACI, 2008). Es importante destacar, que los materiales amorfos o pobremente cristalinos (ópalo, tridimita, vidrio volcánico, etc.) son altamente metaestables en medio alcalino y reaccionarán de manera rápida aún cuando se

encuentren en bajas proporciones. En cambio, el cuarzo microcristalino, tensionado o deformado reacciona en forma más lenta y se necesitarán mayores porcentajes de dichos componentes para causar efectos deletéreos (Thomas et al., 2013).

Tabla 1.2 Valoración de reactividad según el carácter físico de sustancias susceptibles a reaccionar con los álcalis del hormigón. (Tomado de ACI, 2008)

Sustancia reactiva	Característica física	Reactividad
Calcedonia	Microcristalino o criptocristalino, comúnmente fibroso	Reactivo
Cristobalita	Cristalino	Reactivo
Ópalo	Amorfo	Elevada reactividad
Cuarzo (sílice cristalina)	a) Microcristalino o criptocristalino b) Cristalino, intensamente fracturado, deformado y/o con inclusiones	Reactividad baja
Vidrio volcánico	Vítreo o material criptocristalino como constituyente de la matriz de la roca volcánica o como fragmentos de tobas	Reactivo
Vidrio silíceo sintético	Vítreo	Reactividad moderada a elevada
Tridimita	Cristalino	Reactivo

Diversas tesis doctorales y trabajos publicados, mencionan las características petrográficas de los agregados utilizados en el sur de la provincia de Buenos Aires (Marfil y Maiza, 2008; Pérez Marfil, 2022; Berezosky et al., 2016a 2016b; entre otros). A partir de ello, se reconocieron diversas canteras, cuyos agregados presentan muchos de estos componentes.

1.2.4 Humedad

El agua tiene un rol de vital importancia tanto en la elaboración como en la durabilidad del hormigón. Permite el desarrollo de los enlaces químicos para la activación del cemento Pórtland que le dará las propiedades buscadas en dicho material. Su disponibilidad en exceso será favorable para lograr una trabajabilidad adecuada, pero

también influirá en el desarrollo la reacción álcali-sílice, procesos de congelación y deshielo (Stark, 1991) y carbonatación (González et al., 1995), entre otros.

Existen varios ensayos para medir la humedad en el hormigón (Olajide et al., 2024) aunque el uso de sensores para medir la humedad relativa (HR) es el más aconsejable para detectar su variabilidad (Yang, 1999; Lindgård et al., 2006). De esta manera, diferentes experiencias de laboratorio, lograron determinar que una HR entre el 60% y 85% (Nilsson y Peterson, 1983; Olafsson, 1983; Pedneault, 1996; Reed, 2016; entre otros), es la necesaria para que pueda desarrollarse la RAS, aunque la misma depende de la temperatura y el tamaño del agregado (Olajide et al., 2024) (Figura 1.5).

Olajide et al. (2024) muestran cómo, para diferentes tipos de agregados existen rangos de humedad (“umbrales”) donde la reactividad varía con la temperatura y el tamaño de la partícula. Por lo tanto, un mismo material que reacciona a una determina humedad relativa, puede reaccionar de igual forma a mayor temperatura, aunque la humedad sea menor. Lo mismo sucede cuando el tamaño de partícula es menor, ya que disminuye la HR necesaria para que se produzca la reacción (Figura 1.6).

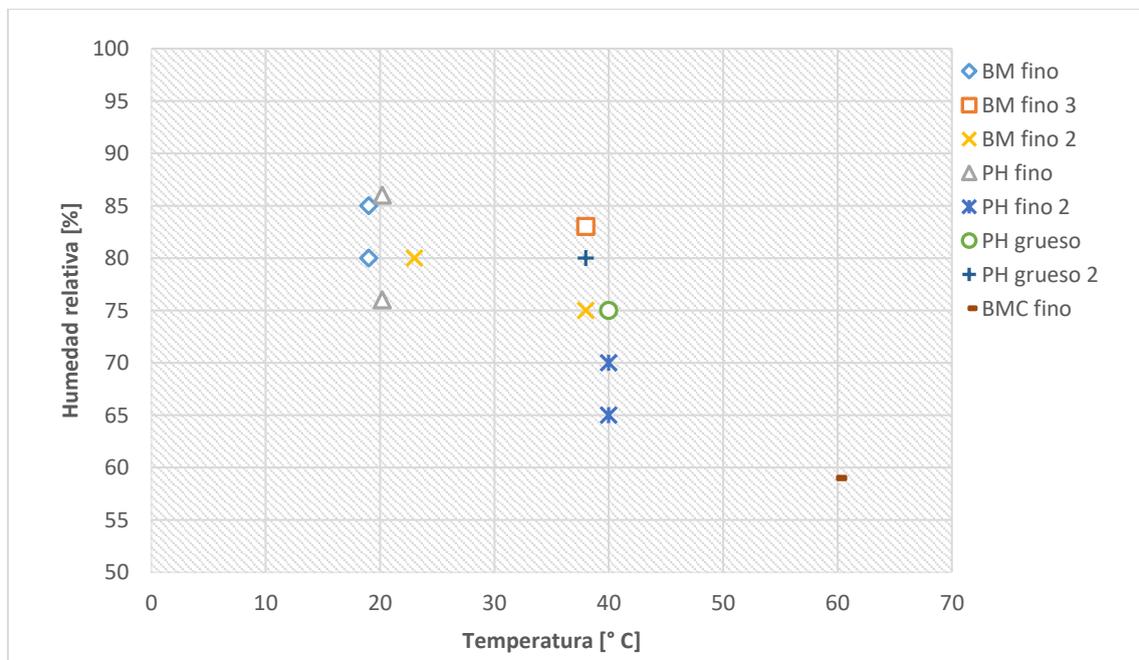


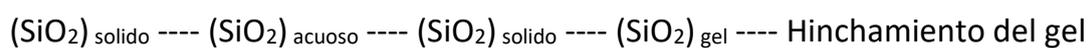
Figura 1.6 Umbral de humedad relativa en función de la temperatura, el tipo de muestra y el contenido reactivo de varios estudios. Ref.: Barra de mortero (BM); Prisma de hormigón (PH); Barra de mortero cilíndrica (BMC). (Modificado de Olajide et al., 2024)

Otro factor importante que influye en la humedad, es la exposición de la estructura a varios ciclos de humedecimiento y secado durante su vida útil; modificando la humedad disponible en el hormigón y favoreciendo el desarrollo de la RAS (Olajide et al., 2024). Cuando el hormigón está expuesto a humedad (mojado), la humedad relativa interior aumenta rápidamente en un corto período de tiempo y luego alcanza un nivel estable; por supuesto esto depende del tipo de hormigón, la permeabilidad, el tamaño de la estructura, duración del ciclo de humectación; etc. Por el contrario, durante el secado, la humedad relativa interior se reduce gradualmente (Zhang et al., 2012). Según estos autores, el ciclo de secado no volverá a alcanzar el valor inicial de humedad, y se mantendrá por encima de este. Mediante ensayos de mediciones de HR, se confirmó que las condiciones cíclicas de humectación y secado podrían estimular el inicio y mantenimiento de la RAS. Esto podría deberse a la duración del ciclo de humedecimiento (Stark et al., 1993).

1.2.5 Reacción química

A partir de las condiciones generadas por la interacción de los factores y elementos descritos en los apartados anteriores se crea el ambiente propicio para el desarrollo de una reacción química que, de mantenerse en el tiempo, podrá provocar el acortamiento en la vida útil de la estructura.

Una generalización de la reacción podría representarse de la siguiente manera: (1) disolución de sílice metaestable, (2) formación de nanocoloides sólidos de sílice, (3) gelificación del sólido y (4) hinchamiento del gel (Rajabipour et al., 2015):



Esta sílice metaestable presente en los agregados, entrará en contacto con la solución de poro del hormigón, constituida principalmente por iones Na^+ y K^+ , balanceados eléctricamente por iones OH^- (solución de elevado pH), en presencia de Ca^{2+} (Thomas et al., 2013).

En primer lugar, se producirá la neutralización de los grupos *silanol* (sílice cristalina desordenada en la superficie de los minerales) con los iones oxhidrilos, resultando iones **Si-O⁻**, los cuales se equilibrarán eléctricamente con los iones **K⁺** y **Na⁺**, abundantes en la solución de poro (Figura 1.7).

Además, con el elevado pH, los iones **OH⁻** comenzarán a atacar el núcleo de la red cristalina (grupos *siloxanos*), generando la ruptura de la estructura, el agrupamiento de la sílice disuelta y su inmediata precipitación a partir de la presencia de **Ca⁺** (Cyr y Pouhet, 2015). El resultado será un gel compuesto por Si, K y/o Na y pequeñas cantidades de Ca (Ichikawa y Miura, 2007; Kim y Olek, 2014; Cyr y Pouhet, 2015).

La reacción puede proseguir al reaccionar este gel alcalino con el hidróxido cálcico que proviene de la hidratación del cemento (Velasco Torres, 2014), produciéndose un intercambio iónico en el que se liberan nuevamente los álcalis que pueden volver a intervenir en las reacciones de expansión. Los productos de la RAS tienen una gran afinidad por la humedad. Al absorber agua, estos geles pueden inducir presión y micro expansión, iniciando la fisuración interna de la estructura. De todas maneras, existen estudios que determinaron que las tensiones expansivas efectivas (observaciones de geles expansivos sobre estructuras de hormigón en el laboratorio) son significativamente menores que las derivadas de la teoría osmótica (Diamond, 1989). Además, a partir de varios ensayos que restringen o permiten la absorción de agua por muestras de hormigón que se expanden debido a la RAS, se concluyó que tanto la imbibición de agua por los productos de la RAS como la ósmosis no pueden ser la causa principal de la expansión (Larive et al., 2000).

Finalmente, los productos sintéticos y naturales de la RAS a diferentes niveles de humedad, han demostrado que no producen hinchamiento por encima del 35% de humedad relativa y que la absorción de agua de dichos productos fue significativamente menor que la del silicato de calcio hidratado (C-S-H), principal producto de la hidratación del cemento (Geng et al., 2021; Shi et al., 2019).

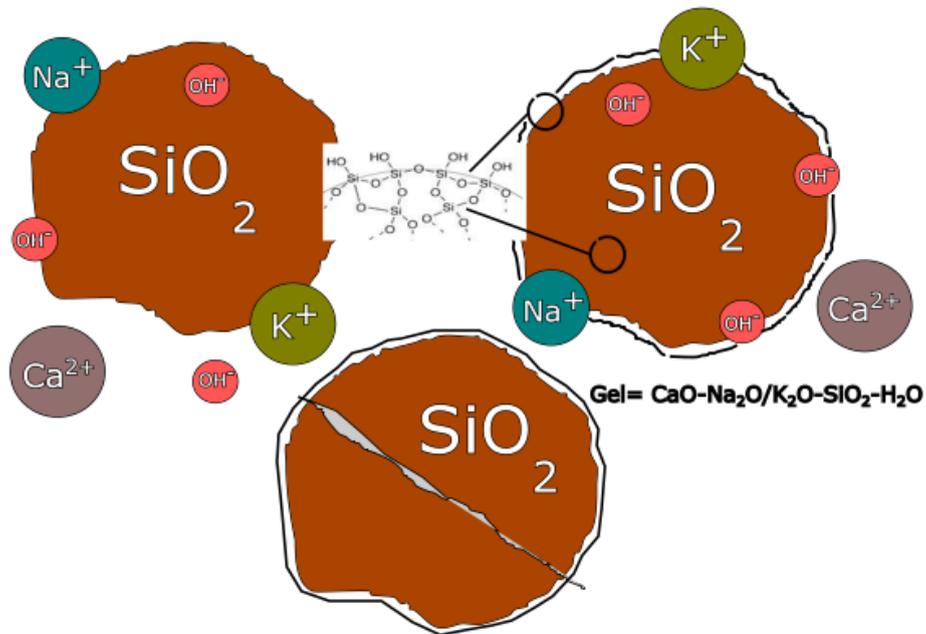


Figura 1.7 Esquema de reacción química y formación de gel sílico-alcálico

1.2.6 Expansión

Desde hace más de 70 años los mecanismos involucrados en la generación de presiones internas que llevan al fisuramiento masivo de la estructura, son motivo de investigación.

Existen enfoques que mencionan la formación de una celda osmótica a partir de la generación de una membrana semipermeable (compuesta por la pasta de cemento hidratado) alrededor del agregado reactivo. La misma solo deja pasar fluidos (agua y solución) los cuales generan presiones hidrostáticas desde el núcleo del agregado hacia la pasta de cemento (por la diferencia de energía), generando su fisuramiento (Hansen, 1944).

McGowan y Vivian (1952) sugieren que la membrana generada no es la que finalmente determina la expansión y posterior rotura. El agrietamiento de la “membrana” de pasta de cemento circundante debido a la reacción, aliviaría la presión hidráulica en el sistema. De esta manera, los autores proponen que el gel originado en la reacción, es el que determina el aumento del fisuramiento a partir de la incorporación de agua.

Una teoría más minuciosa explica el mecanismo de reacción dependiendo de la concentración de los diferentes componentes (Ca^{2+} o Na^+/K^+) en solución. La reacción inicial sobre la sílice amorfa produce una delgada capa de gel (no expansivo), constituido por sílice, álcalis y calcio. A medida que progresa la reacción, a través de esta capa, se genera un flujo de iones (Ca^{2+} o Na^+/K^+) desde la pasta hacia el agregado, cuya proporción dependerá de la concentración inicial de sus componentes. Si la cantidad relativa de álcalis transportada es mayor, se formará un gel sílico-alcalino, capaz de absorber agua y generar la expansión en el mortero u hormigón (Powers y Steinour, 1955).

En conclusión, las teorías descritas se reducen a que la causa fundamental del hinchamiento se debe a la entrada de agua a una región donde el efecto de un soluto o de adsorción reduce su energía libre (Thomas et al., 2013).

Otras teorías sacan de la escena al agua como generadora del hinchamiento y posterior expansión, aunque sí será necesaria para el desarrollo del proceso. Leemann et al. (2024), consideran que la generación de presión por los productos de la RAS se produce a partir de su formación dentro de los agregados. Dicho mecanismo se puede dar por la duplicación en volumen de la sílice disuelta, luego precipitada en espacios confinados o, a partir de la cristalización de los productos de reacción, en aquellas fases acuosas donde generalmente se relaciona con el alto grado de sobresaturación del sólido precipitante. Estos autores, realizaron un estudio detallado de las fuerzas superficiales que desarrollan presiones de cristalización y de repulsión electrostática en la superficie de los agregados donde comienzan a depositarse los productos de reacción, por medio de un instrumento sensible diseñado para medir fuerzas superficiales (eSFA). Mediante esta técnica determinaron que las energías de solidificación se repelen alcanzando valores de 6 a 11 MPa. Además, utilizaron láminas de mica sumergidas en diferentes soluciones alcalinas, las que, medidas en laboratorio, mostraron un comportamiento similar en las caras de fisuras de los agregados donde se desarrollan los productos de la RAS. Dichas fuerzas, generan repulsión de cargas que terminan fisurando desde el agregado hacia la pasta (Figura 1.8).

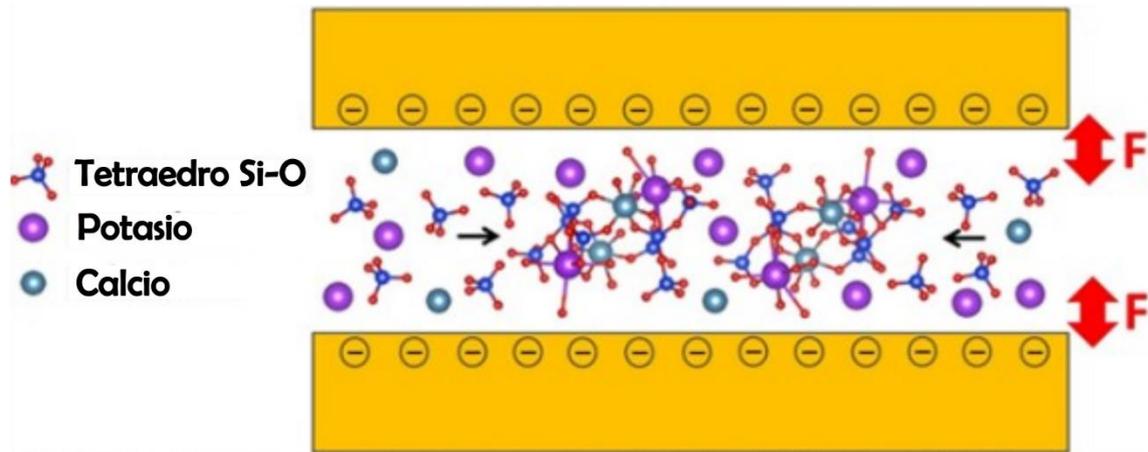


Figura 1.8 Esquema sobre las fuerzas actuantes en uno de los escenarios planteados en el ensayo de eSFA (Tomado de Leemann et al., 2024).

La presencia de gel no indica necesariamente RAS destructiva. Algunos geles expanden muy poco o nada. En cambio, existen geles que pueden exceder la resistencia a la tracción del hormigón, lo que resulta en el agrietamiento del mismo, y una alta tasa de migración de los fluidos desde los poros al sitio de reacción. Éste, además, puede estar influenciado por la temperatura que acelera significativamente el proceso (Diamond et al., 1981). En consecuencia, la presencia de gel debe estar relacionada con el agrietamiento destructivo para una identificación positiva de la RAS perjudicialmente expansiva.

1.3 Cien años de conocimiento

Han transcurrido casi 100 años desde aquel trabajo de Stanton (1940), y los conocimientos sobre la RAS se han ido incrementando. Las diferentes metodologías de estudio, así como los antecedentes, permiten definir con cierta precisión, la potencialidad de reacción de los agregados a utilizar, así como las medidas disponibles para contrarrestar o mitigar dicha problemática (uso de inhibidores, control de álcalis, etc.)

Si bien, la mejor forma de considerar la aptitud de un agregado para determinar su comportamiento frente a la RAS es el antecedente en servicio, muchas veces dicha información no está disponible (nuevos yacimientos o falta de trazabilidad de los materiales), por lo que se debe recurrir a los ensayos de laboratorios normalizados y

actualizados. Éstos, son permanentemente evaluados por la comunidad técnica y calibrados a partir del comportamiento de dichos agregados en condiciones reales de campo (Borchers y Müller, 2012; Hooton et al., 2013).

Los ensayos normalizados para evaluar la potencial reactividad de los agregados, han evolucionado en el tiempo con el avance del conocimiento. Actualmente se considera que el método convencional del prisma de hormigón según la norma IRAM 1700 (2013) (52 semanas de curado a 38° C), es el más confiable.

1.3.1 Ensayos normalizados

En Argentina las normas IRAM 1531 (2022) e IRAM 1512 (2013) establecen los requisitos que deben cumplir los agregados gruesos y finos para hormigón respectivamente, así como los métodos para su evaluación.

En relación con la RAS, los métodos de ensayo adoptados para evaluar la potencial reactividad de los agregados (con algunas variaciones metodológicas), siguen los lineamientos de los propuestos a nivel internacional (Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Ensayos normalizados (nacionales e internacionales) para evaluar la potencial reactividad de los agregados

Ensayo	Denominación			
	IRAM ⁽¹⁾	ASTM ⁽²⁾	RILEM ⁽³⁾	CSA ⁽⁴⁾
Examen petrográfico	1649 (2008)	C 295 (2008)	ARR-1.1 (2003)	A23.2-15A (2019)
Barra de mortero (acelerado)	1674 (1997)	C1260 (2022)	AAR-2 (2016)	A23.2-25A (2014)
Prisma de hormigón	1700 (2013)	C1293 (2008)	AAR-3 (2016)	A23.2-14A (2014)
Prisma de Hormigón (acelerado)			AAR-4.1 (2016)	

- ⁽¹⁾ Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- ⁽²⁾ American Society for Testing and Materials
- ⁽³⁾ International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
- ⁽⁴⁾ Canadian Standards Association

El estudio petrográfico es el primer ensayo que se realiza y resulta determinante al momento de definir los pasos a seguir para evaluar la potencial reactividad de los agregados. De forma resumida, los ensayos propuestos por las normas IRAM 1512 y 1531 son los siguientes:

- Realizar un examen petrográfico (IRAM 1649, 2008) para caracterizar los agregados. Dicho examen no es concluyente para aceptación o rechazo del mismo. A partir de verificar sus componentes potencialmente reactivos, su reactividad debe ser comprobada por algún método. Las diferentes alternativas dependerán del tipo de agregado reactivos (reacción rápida o lenta).

- Realizar el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) cuya finalidad es verificar la expansión generada por el agregado a 16 días de ensayo. Para agregados con componentes de reacción lenta o muy rápida (extremos) se reduce la eficacia del mismo. El método consiste en elaborar barras de mortero de 25 mm x 25 mm x 300 mm que se colocan a 80 °C de temperatura en una solución 1N de NaOH durante 14 días (más 2 días de curado), midiendo periódicamente la expansión. Si ésta supera el 0,10% a la edad establecida, el agregado se considera potencialmente reactivo.

- Realizar el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013). El mismo es considerado como el ensayo más confiable. El método consiste en elaborar prismas de hormigón de 75 mm x 75 mm x 275 mm, almacenados en agua durante 15 semanas a 60 °C (versión acelerada) o 52 semanas a 38 °C (versión convencional). Si la expansión supera el 0,04% (o 0,08% para agregados de reacción lenta en el ensayo acelerado) a la edad de ensayo, se considera al agregado como potencialmente reactivo.

Además, existen otros métodos normalizados como el ensayo químico (IRAM 1650, 1968) que consiste en colocar 25 gramos del agregado en estudio triturado (fracción #50-#100) en una solución 1N de NaOH a 80 °C durante 24 horas. Al cabo de ese tiempo se filtra la solución, se determina la cantidad de sílice soluble y la reducción en alcalinidad, y se compara con una curva patrón que establece límites en función de la expansión obtenida en el método convencional de la barra de mortero (IRAM 1637, 1992). Este último consiste en elaborar una barra de 25 mm x 25 mm x 250 mm que se

cura en agua, a 38 °C durante 6 meses. El límite de expansión para considerar un agregado potencialmente reactivo es de 0,05% a los 3 meses y 0,1% a los 6 meses. Si bien estas normas aún siguen vigentes, están en desuso a nivel nacional e internacional y se encuentran desactualizadas.

En el capítulo 4 de esta Tesis se describirán en detalle los diferentes ensayos normalizados.

Una vez determinada la potencial reactividad de un agregado, existen métodos que brindan soluciones concretas para mitigar o inhibir la RAS en el caso de no poder reemplazarlos (Sims et al., 2004). Éstas dependen del grado de reactividad, de la importancia de la estructura y de los recursos disponibles (insumos, capacidad técnica, etc.), fundamental en la toma de decisiones. De manera general, se pueden diferenciar tres estrategias bien definidas:

- **Restringir la alcalinidad en el hormigón (solución de poro):** la disminución del contenido de álcalis en el sistema, disminuye el pH y por lo tanto el riesgo de disolución de los componentes lábiles. En las normas IRAM 1512 (2013) y IRAM 1531 (2022) se mencionan 3 opciones:
 - Utilización de cementos resistentes a la RAS según norma IRAM 50001 (2020).
 - Restringir la cantidad de cemento y por lo tanto los kilogramos de álcalis a partir de cierto grado de exposición de la estructura a construir (Anexo B. IRAM 1531, 2022).
 - Utilizar adiciones minerales activas (AMA), tanto como parte de la elaboración de cemento, como incorporado en una mezcla en planta, las cuales, en determinado porcentaje de reemplazo, logran disminuir la concentración de iones alcalinos en la solución de poro a través del intercambio catiónico, adsorción y reacción puzolánica (Feng y Hao, 1998). Además, su reactividad parece estar relacionada con la gran superficie específica externa y la metaestabilidad, que favorecen su disolución en la solución saturada de calcio y la subsiguiente precipitación de fases de

silicato de calcio hidratado (\pm Al) (Držaj et al., 1978; Mertens et al., 2009; Snellings et al., 2010).

- **Restringir la capacidad de expansión del gel:**

- Mediante la aplicación de sales de litio (LiNO_3 , entre otros): el mismo se incorpora a la estructura del gel e inhibe su capacidad de expansión (Falcone y Milanesi, 2013).
- A partir de la generación de hormigones poco permeables o cuya estructura no esté expuesta a las inclemencias climáticas.

- **Diluir la capacidad de reacción de los agregados:**

- Utilizar agregados inocuos combinados con aquellos reactivos para disminuir el riesgo de ocurrencia de la RAS.

1.3.2 Análisis de estructuras

Como se mencionó anteriormente, la RAS se manifiesta a partir de las condiciones necesarias para generar y mantener la reacción: a) agregados potencialmente reactivos; b) elevado contenido de álcalis (Na^+ , K^+ y OH^-) y c) suficiente humedad relativa. El tiempo transcurrido en el periodo de inducción (Figura 1.9), está supeditado a las variantes que estos factores presenten, aunque predominantemente será el tipo de agregado, el “regulador” de dicha etapa. En un determinado momento, en la estructura afectada se manifestará dicha reacción a través de síntomas visuales comunes (Thomas, 2013):

- Fisuración
- Expansión que causa deformación, movimiento relativo o desplazamiento
- Trituración localizada del hormigón
- Extrusión de material de junta (sellador)
- Levantamientos superficiales
- Decoloración superficial y exudación de gel

Dichas manifestaciones, están condicionadas por las características propias de la estructura (geometría, densidad, porosidad, armadura) y, su visualización dependerá del comportamiento en conjunto de todos estos factores (Milanesi, 2018a).

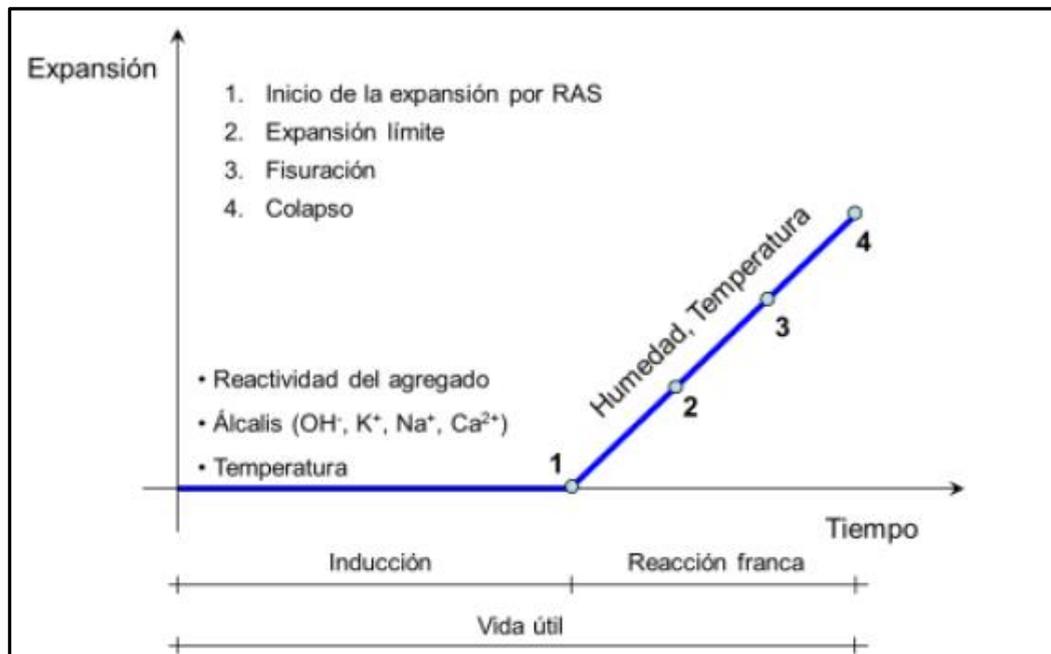


Figura 1.9 Esquema de Tutti aplicado a la RAS. (Tomado de Milanesi, 2018a)

El periodo desde la fisuración (3) es comúnmente donde es detectada la reacción y permite verificarla mediante la aplicación de diversas técnicas que brindan información acerca de su génesis como así también su evolución. La probabilidad que exista un colapso por la RAS (4) es baja ya que el proceso es lento y los síntomas externos alertan sobre el desarrollo y magnitud del proceso en marcha (Milanesi, 2018a). Es importante que los organismos responsables de la construcción de obras de hormigón (sobre todo, las financiadas por el estado), realicen el seguimiento necesario en las instancias mencionadas. De todas formas, se deberá poner énfasis sobre los controles previos de los materiales a utilizar, para mitigar o anular dicha patología.

La Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA) propuso un enfoque global para el diagnóstico y pronóstico de la RAS en estructuras vinculadas con el transporte (carreteras, puentes, etc.) (Fournier et al., 2010a) (Figura 1.10). Dicho diagnóstico, brinda la posibilidad de realizar la mejor selección de medidas correctivas

apropiadas para las estructuras afectadas por la RAS. Para ello, se requiere el conocimiento del estado actual del hormigón y una proyección de deterioro futuro.

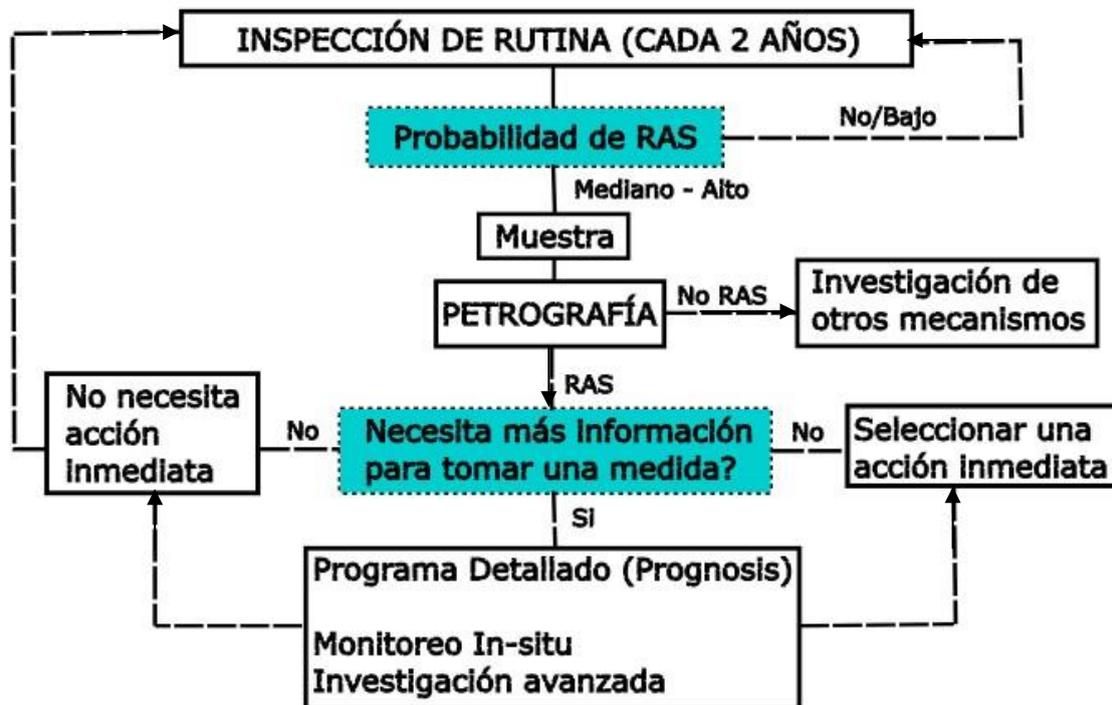


Figura 1.10 Esquema de la FHWA para análisis de estructuras posiblemente afectadas con RAS. (Modificado de Fournier et al., 2010a)

Mediante un análisis visual, se determina si la estructura analizada arroja evidencias o manifestaciones de RAS. A partir de allí, y con el fin de generar la información requerida para la selección de acciones correctivas, se propone una combinación de actividades/investigaciones de campo (pruebas in situ) y de laboratorio esenciales para la intervención.

Como punto de partida para el análisis de las estructuras (tanto aquellas que ya están afectadas como aquellas a construir) es la determinación del potencial de ocurrencia de la reacción a partir de las condiciones de exposición (Thomas et al., 2013). Dicha evaluación/clasificación primaria ayudará a respaldar las observaciones de los síntomas de deterioro. Thomas et al. (2013), clasifican las condiciones de exposición de las estructuras de la siguiente manera:

- Bajo potencial de RAS: Elemento en un entorno seco y protegido.

- Medio potencial de RAS: Elemento expuesto al aire libre pero protegido de un humedecimiento constante.
- Alto potencial de RAS: Partes de componentes frecuentemente expuestos a la humedad, como lluvia, agua subterránea o agua debido a la función natural de la estructura (por ejemplo, una presa hidráulica o puente).

Los ensayos in-situ se basan fundamentalmente en la inspección del sitio, expansión y/o deformación de la estructura, así como también la medición de desplazamientos (Tabla 1.4) (Fournier et al., 2010a).

La FHWA menciona los exámenes y ensayos a realizar para poder recabar la mejor información sobre la estructura afectada y, a partir de allí, brindar un diagnóstico certero sobre la afectación por RAS.

Tabla 1.4 Pruebas realizadas en estructuras. (Modificado de Fournier et al., 2010a)

Información	Pruebas in-situ	Pruebas en laboratorio
Expansión alcanzada	Supervisión Anchos de fisuras en el hormigón afectado.	Prueba de daño de rigidez modificada realizado sobre testigos
Estado actual del hormigón	Inspección visual detallada Ensayos no destructivos (velocidad de pulso, eco de impacto) Condiciones de estrés (sobrecorriente, barras extensométricas sobre armaduras) Medición de temperatura y humedad	Examen petrográfico Ensayos mecánicos (resistencia a la compresión y a la tracción directa, relación de resistencia a la tracción directa y a la compresión, módulo de elasticidad)
Tasa de expansión actual	Monitoreo de la expansión (mínimo 3 años)	Prueba de expansión remanente en testigos (1 año) Medición de álcalis solubles
Expansión futura	Determinación del plan de monitoreo	Estimación a partir de todas las pruebas realizadas anteriormente

En Argentina, la norma IRAM 1874-2 (2004), establece los requisitos mínimos que permiten evaluar si una estructura de hormigón está afectada por la RAS. A partir de la recolección de datos (configuración de fisuras, tipo de agregado utilizado, tipo de cemento, exposición de la estructura a la humedad, humedad relativa, etc.) se realiza una proyección del comportamiento de los agregados a utilizar en futuras estructuras en condiciones similares a las evaluadas (Figura 1.11).

Propiedad por evaluar	Estructura de hormigón		Son comparables		
	Por construir	En servicio	Sí	No	
Tipología estructural	4.1.1	4.2.1.1 ó 4.2.2.1			
Dimensiones típicas					
Contenido de agua en la estructura					
Contacto con agua					
Humedad relativa mayor que el 75 %					
Petrografía (IRAM 1649)	4.1.2.1	4.2.2.4			
Absorción de agua			Agregado fino (IRAM 1520)		
			Agregado grueso (IRAM 1533)		
Tamaño máximo nominal					
Tipo de cemento y su composición (IRAM 50000 – IRAM 50001)	4.1.2.3	4.2.2.5			
Contenido de óxido de sodio y potasio (IRAM 1504)					
Adiciones minerales	4.1.2.4	4.2.2.5			
			"Filler" calcáreo (IRAM 1593)		
			Escoria granulada de alto horno (IRAM 1667)		
Puzolanas (IRAM 1668)					
Descripción del clima	4.1.3	4.2.1.1 ó 4.2.2.3			
Condiciones de exposición					

Figura 1.11 Comparación de elementos en estructuras afectadas por la RAS y a construir para una mejor toma de decisiones. (Tomado de IRAM 1874-2, 2004)

Por lo general, se adopta como evidencia del desarrollo de la RAS (aunque no es concluyente) un típico fisuramiento en forma de mapa (Figura 1.12), cuya característica es la bifurcación de fisuras desde un punto, formando ángulos entre ellas de aproximadamente 120°, aunque este patrón puede verse afectado por la presencia del refuerzo de acero.



Figura 1.11 Potencialidad de RAS según la exposición a) Baja; b) Moderada; c) Alta. (Tomado de Thomas et al., 2013)

Habiendo agotado los estudios no destructivos, se procede a la extracción de testigos de hormigón y su estudio.

Se deben extraer testigos con los que se pueden realizar exámenes macro y microscópicos. El primero se trata de la observación bajo lupa binocular o estereomicroscopio de las características distintivas de la reacción. En ellas se pueden incluir fisuras (visualizadas desde el exterior del testigo hacia el interior del mismo); microfisuras internas (distinguibles de aquellas producidas de manera mecánica); tinción de la pasta de cemento por la presencia del gel alrededor de fisuras superficiales, reacción en los bordes de partículas de agregados reactivos, fisuras dentro de partículas de agregados reactivos que a veces se extienden hacia la pasta de cemento (con/sin productos de reacción tipo gel), gel sílico-alcálico en las cavidades de la pasta de cemento y depósitos de productos de reacción en las superficies fisuradas de los testigos (Thomas et al., 2013).

1.3.2.1 Testigos

Existen diversos procedimientos para determinar la presencia y extensión del daño generado por la RAS en estructuras de hormigón:

Caracterización del hormigón a partir de estudios **macro y microscópicos**. Mediante este procedimiento se estudian los agregados, pasta de cemento, y el contacto entre ambos (zona de interfase). La caracterización de los agregados gruesos y finos utilizados, permite determinar si existen minerales susceptibles de generar la RAS y definirlos como potencialmente reactivos. Además, se evalúan aquellos aspectos vinculados con la reacción propiamente dicha como son: los macros y microfisuramientos, coronas de reacción en los agregados, rellenos de fisuras y cavidades y tipo de anomalía que indique una alteración desencadenada o desarrollada a partir de la RAS.

El **índice de valoración de daño** o **índice de daño (Damage Rating Index)**, permite tener una noción del deterioro general de la estructura a partir de la cuantificación de sus fisuras y la relación que existe entre ellas (Shrimer, 2000). Este método

semicuantitativo permite estimar el nivel de daño del hormigón, a partir del conteo de ciertas características de deterioro (principalmente fisuras), en áreas de 1 cm x 1 cm dibujadas sobre la superficie del hormigón pulido, trabajando bajo estereomicroscopio a una magnificación de 16x (Sanchez et al., 2015). Estas características, son ponderadas para balancear su importancia relativa y así obtener una valoración del daño general.

La evaluación de **la expansión remanente** es un parámetro importante en el proceso de evaluar la condición actual del hormigón afectado y seleccionar las acciones de remediación adecuadas sobre la evolución de la reacción en estructuras ya afectadas (Fournier et al., 2010b). Existen dos procedimientos de ensayo: 1) expansión en aire y con 95% de humedad relativa a una temperatura de 38°C, y 2) expansión en solución de NaOH 1N a 38°C (Fournier et al., 2010b).

Dentro del análisis o diagnóstico de estructuras, se realizan otros ensayos complementarios sobre los testigos extraídos. Entre ellos se pueden mencionar la **resistencia a la compresión** (IRAM 1551, 2000) y la determinación de su **densidad, absorción y espacios vacíos** (ASTM C 642, 2021). Dichos valores, permiten comparar la situación actual de la estructura (con respecto a estos parámetros medibles) en relación a aquellos obtenidos al momento de su ejecución.

Según la bibliografía, la resistencia a la compresión recién comienza a decrecer cuando se alcanzan altos niveles de expansión en el hormigón por lo que es necesario, en algunos casos, recurrir a ensayos complementarios (Sanchez et al., 2016 y bibliografía allí citada). La determinación de **curvas de esfuerzo-deformación**, se lleva a cabo mediante ciclos de carga y descarga y, a partir de las curvas obtenidas, además de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad estática, se determinan varios parámetros, como el índice de daño de rigidez (SDI), el índice de deformación plástica (PDI) y el índice de no linealidad (NLI) (Sanchez et al., 2016). Estos parámetros permiten obtener valores cuantitativos en relación al grado de deterioro del hormigón y la extensión de daño por la RAS.

1.3.2.2 Productos de reacción

Según una descripción simplificada, la solución de poro alcalina del hormigón disuelve SiO_2 de materiales metaestables de los agregados, lo que lleva a la formación de productos de la RAS. Este proceso va acompañado de la generación de tensiones en los agregados, lo que eventualmente conduce a la formación de fisuras en la estructura. De todas formas, los volúmenes de productos de la RAS formados son muy pequeños. Allí se presentan dos dificultades para su análisis: el tamaño de los productos, que está en el rango de micrones, y la cantidad. Sin embargo, el conocimiento detallado sobre la secuencia de reacción y una caracterización profunda de los productos de la RAS son la base para comprender los mecanismos que llevan a la expansión y generación de tensiones (Leemann, 2021).

Por lo tanto, los productos de reacción desarrollados a partir de la evolución de la misma, ayudan a comprender el comportamiento del sistema para tomar medidas sobre la ejecución de estructuras futuras. Exámenes detallados sobre los productos de reacción mediante microanálisis (microscopía electrónica de barrido o microsonda de electrones), son de gran interés para relacionar los componentes del hormigón y su comportamiento en el sistema. En los últimos años se ha avanzado sobre el estudio de las variaciones químicas de estos productos en su contexto microestructural a través de análisis cuantitativos con microsonda de electrones (Katayama, 2010; 2012a). Mediante este tipo de análisis, es posible evaluar no solo la composición química cuantitativa de los productos de reacción, sino también estudiar su interacción con los agregados pétreos y la pasta de cemento (Locati et al., 2020a).

A partir del análisis de los productos de la RAS en diferentes sectores de la microestructura del hormigón y de los componentes hidratados del cemento como son los silicatos de calcio hidratados (SCH), se pueden establecer tendencias evolutivas analizadas mediante diagramas composicionales (Katayama, 2010).

En forma general, los productos de reacción muestran una clara tendencia evolutiva textural y composicional, desde su formación en el interior de los agregados y hacia la pasta de cemento (p.ej. Leemann et al., 2016; 2022; Leemann, 2022). En el interior de

los agregados están compuestos por silicio, sodio, potasio y calcio, con cantidades menores de aluminio, hierro y magnesio, y son de hábito laminar, dispuestos en forma de rosetas. Poseen una relación atómica $(Na+K)/Si$ y Ca/Si ambas de aproximadamente 0,2 a 0,3. Hacia la interfase, con la pasta de cemento el contenido de calcio se incrementa mientras que los álcalis decrecen y morfológicamente son masivos (generalmente amorfos). Cuando los productos avanzan hacia la pasta de cemento el contenido en calcio crece notablemente y su composición se asemeja cada vez más a la de los SCH, de la pasta de cemento (Katayama, 2008).

1.4 Planteo de la problemática

La problemática mencionada en los párrafos que anteceden, pone en evidencia la complejidad del proceso. A pesar de los avances realizados en la materia, son varias las incógnitas que aún se plantean al evaluar las estructuras afectadas por la RAS como, por ejemplo, ¿es la RAS la que provoca el microfisuramiento interno que genera la pérdida del comportamiento homogéneo en términos estructurales?, ¿una falla mecánica o constructiva genera que el sistema se fisure y por lo tanto se active la reacción?, ¿es diferente el comportamiento de la reacción según la geometría de la estructura y su sollicitación a cargas?, entre otras. Estas preguntas ayudan a comprender que, desde la mezcla de los componentes generadores del hormigón y hasta el fin de la vida útil de la estructura, existen diversas variables que pueden desencadenar la RAS, aunque indefectiblemente es necesaria la presencia de agregados potencialmente reactivos en una solución de alta alcalinidad y elevada humedad relativa.

La complejidad composicional de los materiales que se utilizan como agregados en el sur de la provincia de Buenos Aires y los antecedentes relacionados con su potencial reactividad (Maiza et al., 1988; Marfil y Maiza, 1993; entre otros), son los principales puntos que llevaron al planteo de esta Tesis. Por otra parte, las investigaciones relacionadas con la RAS, requieren cada vez más, de trabajos interdisciplinarios entre diferentes áreas como la ingeniería civil y la geología, asegurando una mejor comprensión e interpretación de la problemática.

Con el desarrollo de este trabajo se genera valiosa información sobre la distribución de áreas potenciales de provisión de agregados en la región, así como pautas a considerar frente a su utilización en estructuras de hormigón. Se analiza el comportamiento de los diferentes materiales utilizados como agregado grueso y fino en estructuras con antecedentes concretos en el área de influencia de Bahía Blanca, y se evalúan yacimientos de materiales potenciales tendientes a la búsqueda de agregados de calidad para minimizar riesgos del desarrollo de la RAS. Se priorizan aquellas áreas que permitan un uso sustentable del recurso y que el mismo sea económicamente factible de extracción y comercialización. Paralelamente, se evalúa el uso de puzolanas, que permitan minimizar la expansión en aquellas obras en las que deban utilizarse agregados potencialmente reactivos de la región.

1.5 Objetivos

- Relevar las principales canteras de arena, canto rodado y piedra partida de la zona de Bahía Blanca y áreas de influencia.
- Evaluar su potencial reactividad frente a la RAS.
 - Estudiar los distintos tipos litológicos mediante estudios petrográficos, haciendo énfasis en la mineralogía, las características texturales, el desarrollo de minerales de alteración y su incidencia en los procesos expansivos.
 - Confeccionar barras de mortero y prismas de hormigón a fin de evaluar su potencial reactividad en condiciones aceleradas. Una vez cumplido el tiempo de ensayo realizar estudios petrográficos de hormigones y barras para identificar las especies deletéreas, productos de neoformación y en especial analizar la microtextura y la zona de interfase agregado-mortero.
- Evaluar el comportamiento de los agregados en servicio, mediante el estudio de estructuras de hormigón de la región, especialmente aquellas que presenten evidencias de la RAS.
 - Inspección in situ de las estructuras y extracción de testigos

- Análisis con microscopía electrónica de barrido y EDS, para identificar los productos de reacción.
 - Análisis cuantitativos con microsonda electrónica en los sectores que sea posible para determinar composiciones (y variaciones composicionales mediante perfiles y mapas composicionales) de los productos desarrollados en las interfaces agregado mortero y en el interior de microfisuras.
 - Estimación del nivel de daño mediante la determinación del DRI.
 - Determinación de propiedades físico-mecánicas (resistencia a la compresión; densidad, absorción y espacios vacíos; curvas de esfuerzo-deformación; expansión remanente).
- Evaluar el uso de una puzolana natural (brecha vítrea zeolitizada) a fin de minimizar la expansión en los agregados calificados como potencialmente reactivos, determinando el porcentaje óptimo de reemplazo.

CAPÍTULO II. UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

2.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio de esta Tesis abarca el cuadrante establecido entre las latitudes 37° 35' 18,5" S y 39° 54' 43,6" S y las longitudes 58° 33' 28,5" O y 63° 4' 7,5" O (Figura 2.1). Se evaluaron tres canteras proveedoras de agregados gruesos y cinco de agregados finos del sur de la provincia de Buenos Aires.

La totalidad de los yacimientos son canteras de agregados comerciales, cuya finalidad es la producción de áridos para abastecer la zona de Bahía Blanca (principalmente), Río Colorado, Patagones, Villarino, Viedma, Punta Alta, Coronel Dorrego, Tres Arroyos, Necochea, Pigüé y Coronel Suarez; como las más importantes.

Los agregados gruesos estudiados corresponden a aquellos de origen natural, cuya explotación necesita de un proceso de trituración y selección (granito y cuarcita en macizos rocosos) o donde solo es necesario su selección por tamaño (canto rodado).

Los agregados finos son arenas naturales, cuya variación composicional y morfológica está en función de su origen (marino o continental).

2.2 Marco geológico

La geología de la zona de estudio es muy variada (Figura 2.2). La columna estratigráfica regional abarca desde unidades precámbricas – paleozoicas a aquellas más modernas de edades cenozoicas. Las primeras, comprenden todas las unidades ígneo-metamórficas (basamento) al oeste del arco de las Sierras Australes y una secuencia sedimentaria que decrece en edad (hasta el Pérmico Medio) hacia el este. Por otra parte, serán motivo de estudio, las formaciones modernas que abarcan desde el Mioceno temprano al Holoceno tardío, y se corresponden con unidades sedimentarias de origen fluvial-continental a marino.

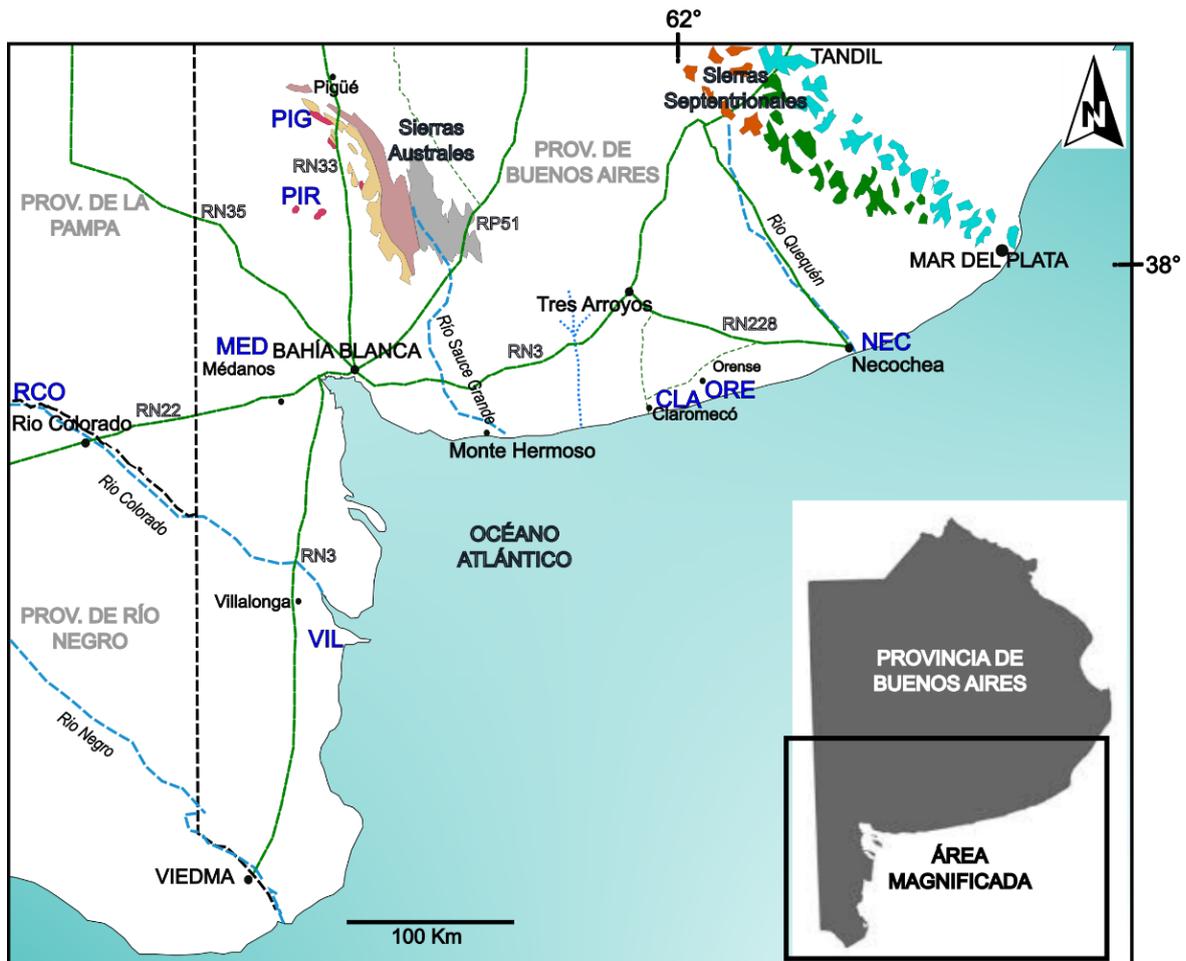


Figura 2.1 Ubicación de la zona de estudio. Canteras estudiadas: Cantera PIR. Cantera FIG. Cantera RCO. Cantera VIL. Cantera CLA. Cantera ORE. Cantera NEC. Ver referencias litológicas en la Figura 2.2

Las rocas precámbricas están expuestas en el sector occidental de las Sierras Australes. Se encuentran como afloramientos aislados de granitos, riolitas e ignimbritas que constituyen el basamento cristalino de la cubierta sedimentaria paleozoica.

Hacia el este se encuentra en primer término el Grupo Curamalal (Cámbrico Inferior), integrado por una potente secuencia silicoclástica, predominantemente arenosa de ambiente de plataforma. El Grupo Ventana (Ordovícico Medio-Devónico Inferior), está compuesto principalmente por cuarcitas que se disponen transgresivamente y en discordancia erosiva sobre la secuencia anterior (Harrington, 1947). El Grupo Pillahuincó (Carbonífero Superior-Pérmico), comprende la sucesión sedimentaria paleozoica más joven. Su composición es de diamictitas, conglomerados, pelitas y areniscas. La sienita de López Lecube, asignada al Pérmico Superior, corresponde al afloramiento más oriental del Grupo Choiyoi (Folguera et al., 2017).

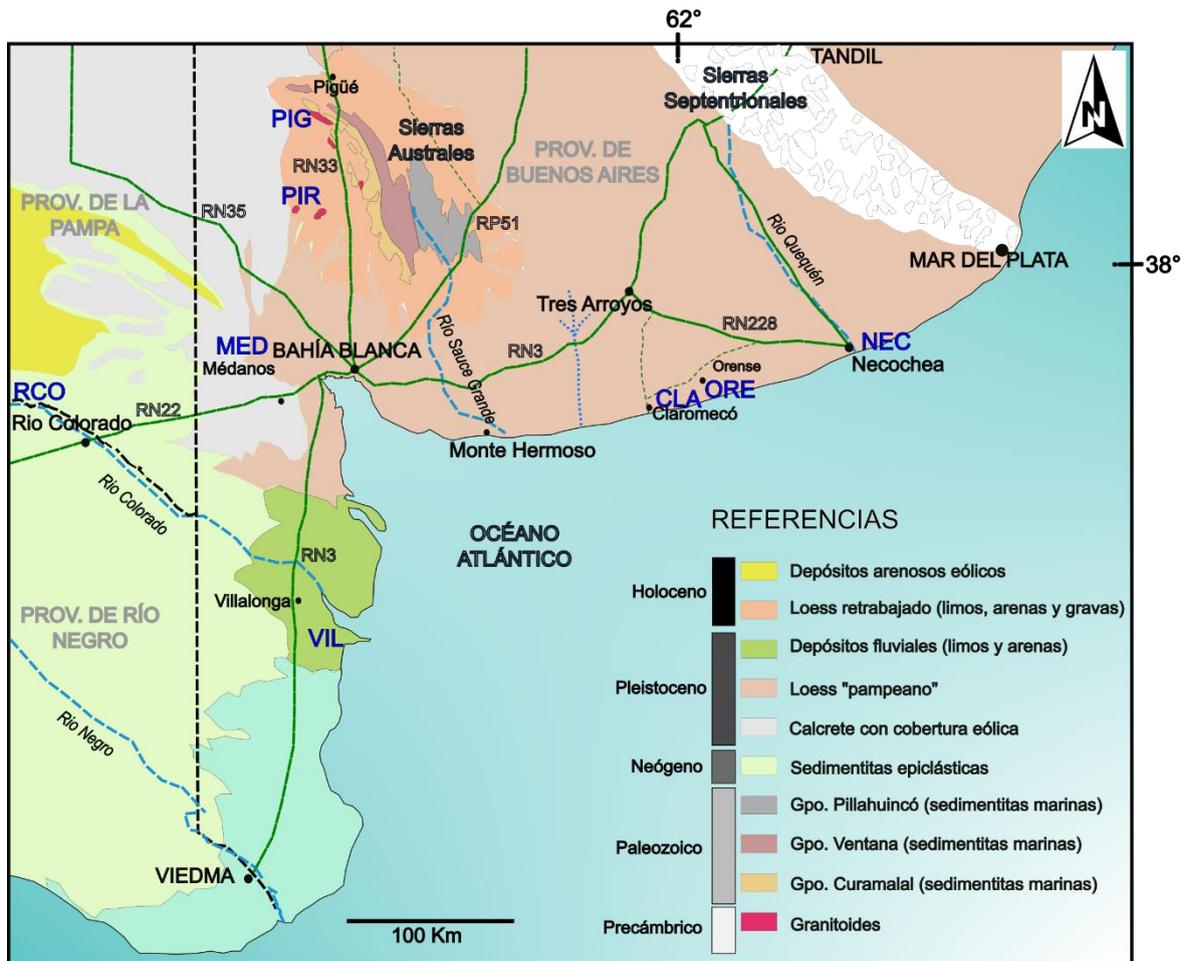


Figura 2.2 Mapa geológico del sector de estudio. (Modificado de Etcheverría et al., 2018)

Cubriendo las unidades mencionadas, se encuentra una secuencia sedimentaria estratigráfica "moderna" que se extiende desde el Mioceno Superior hasta el Holoceno tardío. Las unidades más antiguas presentes están constituidas por limolitas y areniscas y depósitos fluviales del Mioceno Medio al Pleistoceno. La columna se completa con unidades pleistocenas y holocenas, las cuales se distribuyen ampliamente en la región (Etcheverría y Folguera, 2009). En el ámbito continental están representadas por sedimentos eólicos finos, depósitos arenosos originados por la acción del viento (campos de dunas) y por depósitos coluviales, aluviales y evaporíticos. En el ambiente litoral se encuentran sedimentos finos correspondientes a ambientes de planicies de marea y estuáricos, depósitos arenosos que forman playas, barreras de playa, cordones litorales e islas barrera y, depósitos de rodados y gravas que conforman cordones litorales (Bértola y Cortizo, 2005).

En la región, se reconocen dos ambientes geomorfológicos bien diferenciados: uno es netamente continental con un paisaje que responde principalmente a procesos fluviales y, otro litoral, donde el agente modelador más significativo es el marino. En ambos casos se pueden diferenciar diversos procesos eólicos que han actuado en forma subordinada sobre los mencionados (Etcheverría y Folguera, 2009).

Por lo tanto, dentro de este marco geológico es importante diferenciar dos zonas: aquella donde las rocas precámbricas y paleozoicas conforman las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires y otra que abarca los sedimentos que geomorfológicamente modelan el paisaje desde las zonas elevadas antes mencionadas hacia el sudeste, sudoeste y sur de la provincia de Buenos Aires y este de la provincia de Río Negro.

2.2.1 Geología de las Sierras Australes

En el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, se constituye la provincia geológica **Ventania**. La misma está constituida por la unidad orográfica denominada Sierras Australes. Esta unidad, formada por cordones subparalelos, alcanza los 180 km de longitud en dirección NO a SE y un ancho de 50 km en su parte central (Sellés-Martínez, 2001).

En la región, las rocas ígneas precámbricas afloran en el flanco occidental (Figura 2.3) y en general se disponen a lo largo de una faja delgada que acompaña la parte cóncava del arco noroccidental Paleozoico (Grecco, 1990). Dentro de los afloramientos graníticos, el más occidental se encuentra en el área de Cerros Colorados, al sur de la laguna de Los Chilenos, en el partido de Saavedra. Las unidades sedimentarias parcialmente metamorfizadas de edad paleozoica dominan espacialmente el complejo litológico del área de Sierra de la Ventana (Rapela y Kostadinoff, 2005).

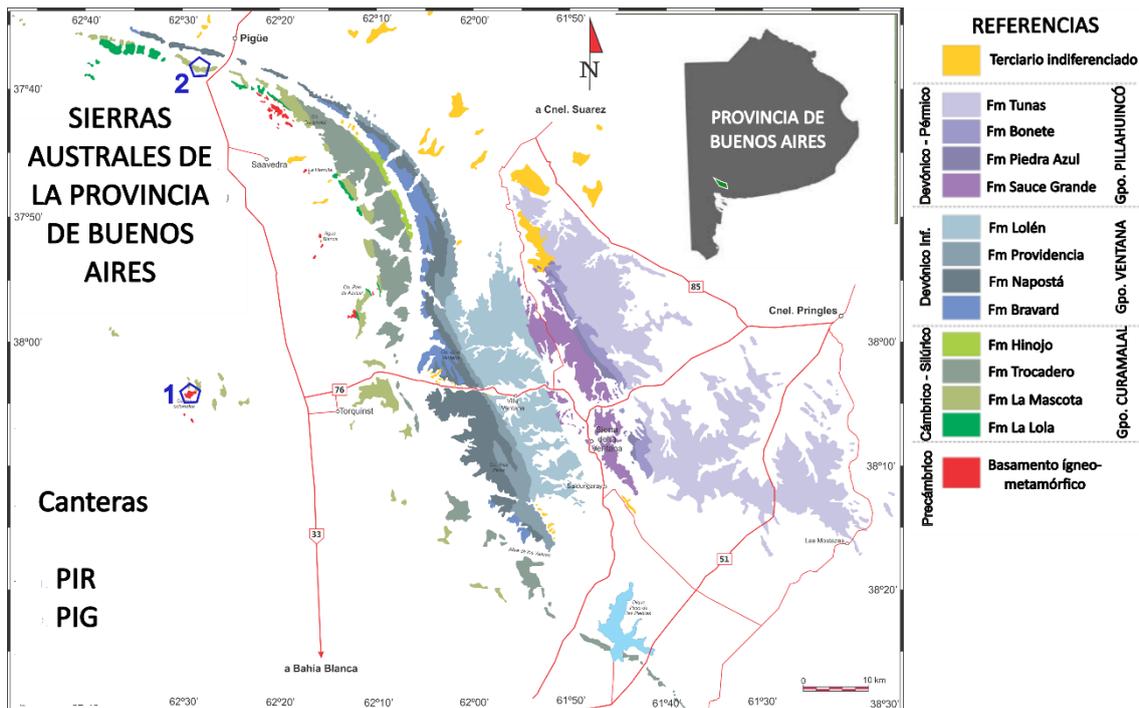


Figura 2.3 Ubicación de las canteras estudiadas en las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. Cantera PIR (1) y Cantera PIG (2). (Modificado de Dimieri et al., 2005)

Las Sierras Australes, constituyen una unidad morfoestructural compleja en la que se han planteado distintos modelos estructurales para poder explicar su evolución geológica. Están localizadas entre los 37° y 39° S y los 61° y 63° O y forman un cordón orográfico curvado, de rumbo general noroeste, que alcanza alturas máximas de 1.200 m sobre el nivel del mar en el cerro Tres Picos (Grecco, 1990).

Sellés-Martínez (2001), concluyó que existió una cuenca sedimentaria paleozoica de gran extensión (afloramientos en Cordón del Cabo en Sudáfrica y Montes Ellsworth en Antártida) la cual sufrió una extensión sobre lo que actualmente se conoce como Placa Sudamericana. Dichos movimientos, tuvieron lugar al final del Paleozoico - principios del Mesozoico sobre el margen gondwánico y dieron origen a las estructuras denominadas Gondwánides (la provincia geológica de Ventania constituye sólo un fragmento de éste).

En las Sierras Australes afloran rocas con edades que van desde el Precámbrico Superior hasta el Pérmico, que se disponen en bandas arqueadas según la geometría del orógeno, encontrándose las más antiguas hacia el oeste y las más modernas hacia

el este. Depósitos cenozoicos cubren en discordancia a estas unidades. La vergencia general de la cadena es nororiental disminuyendo la intensidad de la deformación de oeste a este (Tomezzolli y Cristallini, 2004).

2.2.1.1 Basamento

Los afloramientos del basamento se extienden en forma dispersa exclusivamente sobre el sector occidental de la Sierra, desde la localidad de Pigüé (Estancia La Mascota), pasando por el sector central de arco (afloramientos en La Ermita y Agua Blanca) y al sur entre los Cerros del Corral y Pan de Azúcar (Selléz-Martínez, 2001). El mismo se encuentra definido por pequeños afloramientos que alcanzan los 1,5 km² de superficie y se componen en su totalidad por rocas ígneas ácidas. Las mismas poseen una composición litológica dominada por granitos (los afloramientos más grandes son los de Cerros Colorados), cuerpos subordinados de riolitas (La Mascota y Cerro del Corral) y afloramientos menores de paragneises (Rapela y Kostadinoff, 2005; Ballidian Justiniano, 2020).

Las recientes dataciones por el método U-Pb son consideradas menos susceptibles a la disturbación por deformación y efectos térmicos de bajo grado y, por lo tanto, representativas de las edades de cristalización de las unidades ígneas.

El periodo post-orogénico con magmatismo alcalino y calco-alcalino, está representado por la Ignimbrita Cerro del Corral ($577,3 \pm 3,9$ Ma; $\epsilon_{Nd577} = -6,29$; TDM=1.73 Ga) y la riolita del Cerro Pan de Azúcar Riolita ($543,6 \pm 4,0$ Ma; $\epsilon_{Nd544} = -3,38$; TDM=1,32 Ga) respectivamente. Los granitos alcalinos de Cerro Colorado y Agua Blanca (ca. 533–524 Ma), el calco-alcalino San Mario (ca. 524 Ma), y las riolitas peralcalinas de La Ermita y La Mascota (ca. 509–505 Ma), constituyen el magmatismo post-orogénico del Cámbrico Temprano-Medio del Complejo Sauce Chico (Ballidian Justiniano, 2020).

Los granitos Cerros Colorados y Agua Blanca son leucomonzogranitos de bajo calcio y restringidos composicionalmente a altos contenidos de sílice ($SiO_2 = 73\%–77\%$). Dada la marcada similitud geoquímica entre estos granitos, se infirió que el granito Agua Blanca pertenece al mismo ciclo intrusivo de edad cámbrica inferior, que el granito

Cerros Colorados (Rapela et al., 2003). La fluorita es el mineral accesorio más común, con un contenido de flúor en roca total entre 0,82% y 1,37%, y una conspicua alteración hidrotermal (Grecco y Gregori, 1993). Ambos corresponden a granitos de tipo A o de intraplaca, subgrupo A2 (Eby, 1992) que representa a magmas derivados de una corteza continental que ha sido afectada previamente por un ciclo orogénico que involucró anatexis (Rapela et al., 2003).

Comparado con los cuerpos de Cerros Colorados y Agua Blanca, el monzogranito biotítico de San Mario muestra un rango de sílice más amplio (68%–76%) y alto contenido de Al_2O_3 y Sr (Rapela et al., 2003).

Las riolitas de alto contenido en sílice de las áreas de La Ermita y La Mascota (75% - 77%) muestran, en ocasiones, una bien preservada disyunción columnar y fábrica esferulítica (Japas y Sellés-Martínez, 1998), característica típica de desvitrificación por enfriamiento rápido de magmas ácidos. Se les asignó la categoría de rocas ácidas tipo “A”, subgrupo A1 (Eby, 1992). Este subgrupo está asociado a magmas derivados de fuentes tipo basalto de islas oceánicas (basaltos OIB), y que se emplazan en rift continentales o en magmatismo de intraplaca (Eby, 1992).

En la zona del Cerro del Corral, afloran riolitas de un tipo distinto a las de La Ermita-La Mascota. En los sectores que no fueron afectados por la milonitización, estas vulcanitas muestran una textura porfírica con fenocristales de feldespato alcalino y cuarzo dentro de una pasta de grano fino (Varela y Cingolani, 1976). Tienen características sub-alcálicas que las asemejan a la composición química del granito San Mario (Grecco et al., 1997). Basándose en evidencias geológicas y en el contenido de Rb y Sr, Varela y Cingolani (1976) infirieron que las riolitas del área de Cerro del Corral pertenecen a un evento ígneo diferente que las del área La Ermita-La Mascota, lo cual es consistente con las diferencias geoquímicas indicadas (Rapela y Kostadinoff, 2005).

2.2.1.2 Grupo Curamalal

Este grupo ha sido dividido en cuatro unidades bien definidas (Harrington, 1972) que corresponden en orden cronológico a las formaciones: La Lola, La Mascota, Trocadero

e Hinojo. Las mismas, se corresponden a depósitos clásticos (conglomerados, areniscas y en menor medida pelitas) que se disponen como el primer evento sedimentario en discordancia sobre las rocas ígneas y metamórficas del basamento Precámbrico (Cingolani y Varela, 1976).

Los depósitos basales (**Formaciones La Lola y Mascota**), corresponden a depósitos deltaicos con aportes de flujos fluviales someros. A partir de un análisis minucioso, se reconocieron 7 facies (Zavala et al., 2000), donde las dos primeras son conglomerados matriz-sostén a clasto-sostén, con matriz de arenas gruesas y clastos de cuarcitas, redondeados. Las facies 3 a la 5 se corresponden con bancos tabulares de areniscas gruesas a medias que pasan a laminación entrecruzada de areniscas medias a finas. Las últimas facies presentan sedimentos más finos que se disponen en láminas de areniscas entrecruzadas con pequeños lentes pelíticos, a cuerpos masivos o tabulares de pelitas (Zavala et al., 2000).

La **Formación Trocadero**, tercera unidad del Grupo Curamalal, presenta una composición semejante a la Formación Mascota, ya que está formada mayoritariamente por cuarcitas y arenitas cuarzosas, de grano fino a mediano, con buen redondeamiento de clastos, cemento silíceo y parcialmente ferruginoso. Las rocas presentan color gris, desde rosado hasta lila, siendo su espesor total del orden de los 700 metros (Gregori, 2002).

La **Formación Hinojo**, con 150 m de espesor, consiste de una alternancia de ortocuarcitas y pelitas esquistosas (en parte pizarras y filitas sericíticas). Algunos estudios acerca de las características petrográficas de las areniscas del Grupo Curamalal dan como resultado tres tipos principales de areniscas (Varela et al., 1986): 1) ortocuarcitas (las más frecuentes), 2) wackes cuarzosos y 3) escasas arenitas feldespáticas (subarcosas). Estas últimas no son muy frecuentes y fueron descritas en las serranías de Chasicó y cerro Cortapié (Andreis et al., 1987).

2.2.1.3 Grupo Ventana

En este Grupo, se reconocen 4 facies bien diferenciadas. Las mismas corresponden a las Formaciones Bravard, Napostá, Providencia y Lolén (Harrington, 1947). Se distingue una secuencia predominantemente cuarcítica de similares características a la anterior, aunque existe mayor presencia de bioturbación, pelitas basales y depósitos tipo wakes (Andreis et al., 1987)

La **Formación Bravard** (espesor de 250 metros en la localidad tipo) es de naturaleza areno-psefítica. Las rocas más abundantes son areniscas, que van desde cuarzosas (las más abundantes) hasta feldespáticas, predominantemente de grano medio a grueso y color desde amarillo hasta rojizo. Las psefitas, tanto clasto como matriz-soportadas, conforman estratos lenticulares, desde medianos hasta muy gruesos, generalmente de carácter macizo y con menor frecuencia con entrecruzamiento tabular. Los clastos son predominantemente de cuarcitas y cuarzo lechoso, inmersos en una matriz arenosa gruesa (Gregori, 2002).

La **Formación Napostá** es casi exclusivamente arenosa, mayormente compuesta por ortocuarcitas y arenitas cuarzosas, todas ellas caracterizadas por un bajo contenido de matriz, buen redondeamiento de clastos y cemento silíceo dominante. Estas psamitas son mayormente de grano fino a mediano, color amarillento hasta blanco lechoso y brillo vítreo. Se estratifican en bancos tabulares, predominantemente medianos y gruesos, tanto macizos como exhibiendo estratificación entrecruzada, principalmente del tipo tabular planar. Es de destacar la existencia de niveles bioturbados dentro de las cuarcitas de la Formación Napostá. En estos niveles, han sido reconocidas formas asimilables a *Skolithos* y a los géneros *Daedalus*, *Corophioides* y *Diplocraterion* (Buggisch, 1987; Dimieri y Japas, 1986) los que sugerirían una edad ordovícica para las rocas portadoras. El espesor total de esta unidad sugerido es de unos 400 metros (Harrington, 1972).

La **Formación Providencia** tiene una mayor participación de pelitas (lutitas y en parte pizarras o filitas), aunque las areniscas siguen siendo las rocas dominantes. En estas últimas son frecuentes las ortocuarcitas, de color rojizo hasta rosado pálido e incluso

en ocasiones gris blanquecino, frecuentemente macizas, que suelen mostrar, esporádicamente, estratificación horizontal o entrecruzada de bajo ángulo. El pasaje a la Fm. Napostá es de tipo transicional, mientras que hacia la Fm. Lolén parece ser más abrupto (Gregori, 2002).

La **Formación Lolén**, es la más potente del grupo, alcanza unos 600 m de espesor (Harrington, 1972) y muestra mayor diversidad litológica. Entre las areniscas, que resultan dominantes, pueden distinguirse ortocuarzitas, arenitas cuarzosas, arenitas feldespáticas y wackes cuarzo-micáceos (Massabie y Rossello, 1984). Todas estas rocas presentan colores grisáceos (desde gris oscuro hasta gris amarillento) y se estratifican en bancos tabulares (principalmente medianos y gruesos), los que internamente suelen mostrar estratificación entrecruzada, capas planas o resultar macizos (Harrington, 1972). Asociadas con las areniscas, especialmente en el tercio inferior de la unidad, aparecen delgados niveles de areniscas guijarrosas que en muchos casos gradan a conglomerados finos. Estas rocas conforman horizontes delgados, que varían su espesor lateralmente hasta desaparecer. Se evidenciaron algunos niveles de conglomerados finos intraformacionales leptometamorfizados en la parte superior de la unidad (Massabie y Rossello, 1984). Finalmente, las pelitas (en ocasiones transformadas en pizarras y pelitas micáceas) conforman varios niveles distribuidos irregularmente dentro de la unidad.

La mitad inferior de la Formación Lolén muestra al menos tres niveles de areniscas fosilíferas (Harrington, 1972), en las que se han preservado moldes de braquiópodos pertenecientes a *Cryptonella sp. cf baini* y *Schellwienella sp.* Estos braquiópodos fueron asignados por el mismo autor al Devónico Inferior.

2.2.1.4 Grupo Pillahuincó

Comprende el tercer ciclo sedimentario (Andreis et al., 1987) y se compone de 4 unidades litológicas: **Fm. Sauce Grande**, Piedra Azul, Bonete y Tunas (Harrington, 1947). La primera, yace mediante una discordancia angular sobre las cuarcitas del Grupo Ventana y se compone de diamictitas, conglomerados, ortocuarzitas, areniscas y lutitas (Gregori, 2002). La formación alcanza un espesor máximo de 900 metros en el

Cerro Pillahuincó, perdiendo gradualmente potencia hacia el NNE, donde en la zona de Estancia Sauce Corto llega a los 500 metros.

La **Formación Piedra Azul**, se compone de pizarras azules a negruzcas que alcanzan potencias de hasta 300 metros en zona del arroyo que le da el nombre. Además, se diferencian areniscas amarillentas y limolitas grises, a veces silicificadas (Andreis et al., 1987). Al igual que la Formación que le antecede, los espesores van disminuyendo hacia el NNE (Cerro Bombero Grande), además de observarse un cambio a facies más arenosas y la desaparición de las areniscas amarillas (Gregori, 2002).

La **Formación Bonete** alcanza, en su localidad tipo (Cerro Bonete), los 400 metros de espesor. Se caracteriza por ser un banco de ortocuarcitas verdosas con motas de color blanquecino y areniscas arcillosas verdosas (oscuras y olivas) que, en algunos sectores, pasan a lutitas arenosas y fangolitas macizas. Estas últimas poseen fauna de *Glossopteris* que indica la edad pérmica (Harrington, 1969).

Culminando la secuencia sedimentaria de las Sierras Australes, se encuentra la **Formación Tunas**, la cual se diferencia de las demás por poseer lutitas o fangolitas de colores verdosos con manchas moradas o simplemente moradas. Hacia la parte alta, se alternan areniscas moradas y amarillentas culminado con una roca volcánica de grano muy fino (toba) de color blanquecino (Gregori, 2002). Los espesores encontrados en la Sierra de Pillahuincó son de casi 2000 metros para todo el grupo, aunque hacia el NNE se reduce significativamente a 600 metros (Suero, 1957).

2.2.2 Depósitos de arena y canto rodado

2.2.2.1 Depósitos neógenos

En la región de estudio, los depósitos sedimentarios, tienen una gran extensión areal, cuya edad varía desde el Mioceno tardío hasta la actualidad (Figura 2.4). Las unidades más antiguas presentes están constituidas por limolitas y areniscas de la Formación Cerro Azul (Mioceno Superior); areniscas, limolitas, arcilitas y cineritas de la Formación Río Negro (Mioceno Superior – Pleistoceno Inferior) y depósitos fluviales del Plioceno Medio-Pleistoceno. La columna se completa con unidades pleistocenas y holocenas, las

cuales se distribuyen ampliamente en la región (Etcheverría y Folguera, 2009). En el ámbito continental están representadas por sedimentos eólicos finos, depósitos arenosos originados por la acción del viento (campos de dunas) y depósitos coluviales, aluviales y evaporíticos. En el ambiente litoral se encuentran sedimentos finos correspondientes a ambientes de planicies de marea y estuárico, depósitos arenosos que forman playas, barreras de playa, cordones litorales e islas barrera y, depósitos de rodados y gravas que conforman cordones litorales (Etcheverría y Folguera, 2009).

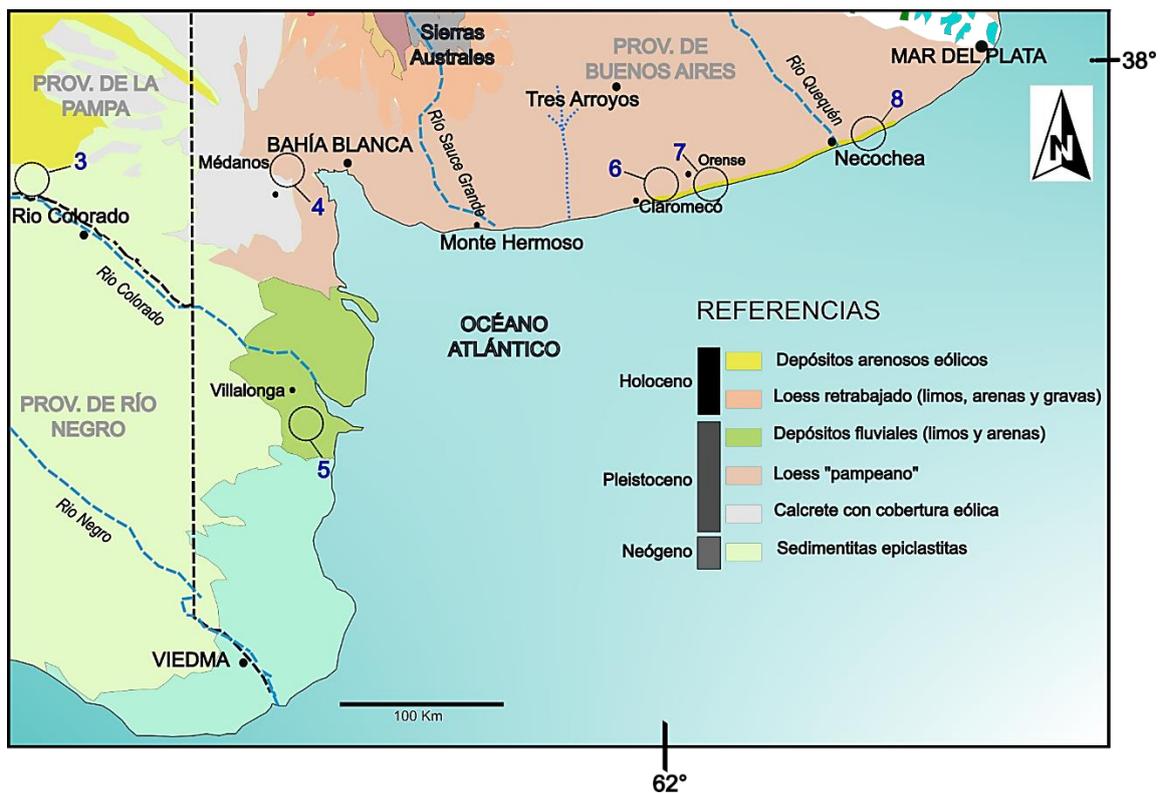


Figura 2.4 Geología de los depósitos sedimentarios. Cantera RCO (3). Cantera MED (4). Cantera VIL (5). Cantera CLA (6) y ORE (7). Cantera NEC (8)

La secuencia estratigráfica comienza con la **Formación Cerro Azul** (Llambías, 1975) y equivalentes (Fm. Monte Hermoso y Fm. Saldungaray). Se trata de limolitas y limoareniscas de origen fluvio-eólico de edad miocena tardía. Su color es castaño rojizo, con aspecto general homogéneo y estratificación mal definida, son frecuentes los nódulos carbonáticos y las evidencias pedogenéticas. Tienen una importante extensión areal (Figura 2.5) y se las puede observar aflorantes en los bordes de los principales valles, bajos y acantilados costeros (Folguera et al., 2017). El ambiente depositacional fue interpretado como loessitas, transportadas en suspensión y retrabajadas en

ocasiones por acción fluvial. La presencia de niveles de paleosuelos tiene connotaciones ambientales y tectónicas, ya que permite sugerir una alternancia de períodos de estabilidad tectónica y climática (Visconti, 2007).

La **Formación Río Negro**, de edad pliocena (Visconti, 2007), sobreyace discordantemente sobre la Formación Cerro Azul. Litológicamente predominan las areniscas medias a finas, de color gris a gris azulado, con estratificación diagonal, e intercalaciones de limolitas rosadas.

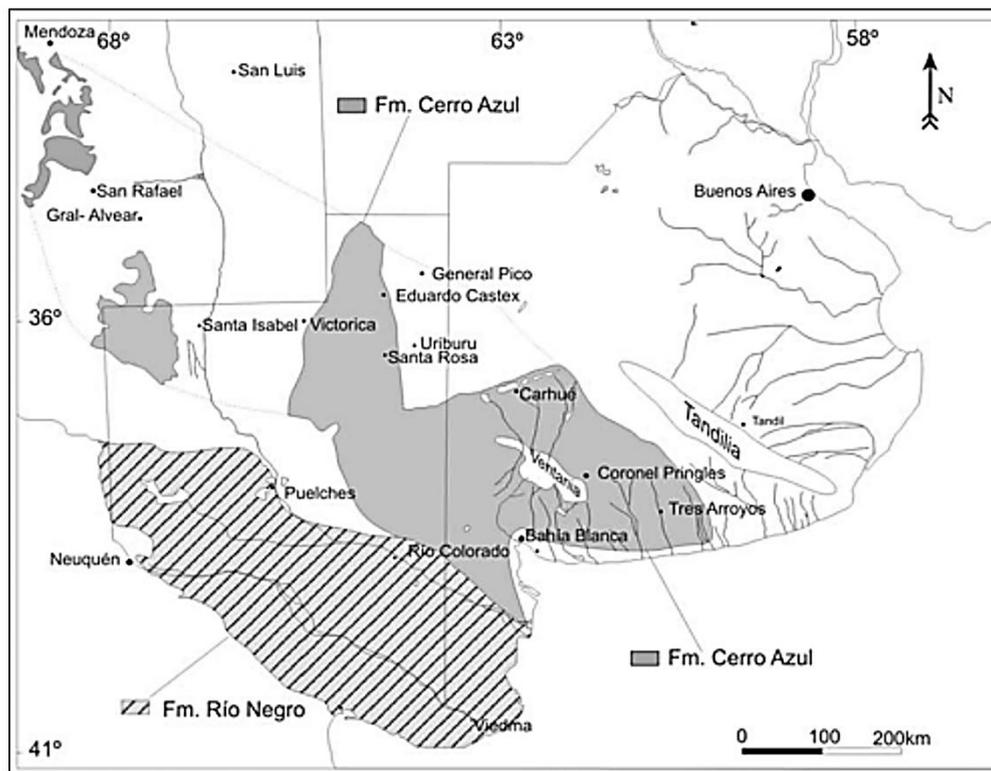


Figura 2.5 Distribución areal de las Formaciones Cerro Azul y Río Negro en la zona de estudio. (Tomado de Folguera y Zárate, 2009)

Hacia el techo suelen incluir delgados mantos arcillosos, niveles cineríticos y calizas terrosas. Se reconocen en las márgenes de los ríos principales y en los bajos sin salida. Por su posición estratigráfica la Formación Río Negro sería equivalente a la **Formación La Toma**, aunque sus características litológicas son diferentes debido a que fueron depositadas en diferentes ambientes con distintas áreas de aporte (Folguera et al., 2017).

2.2.2.2 Depósitos pleistocenos

Las unidades pleistocenas tienen amplia distribución dentro del área de estudio y están representadas por sedimentos eólicos finos, areniscas fluviales, depósitos arenosos originados por la acción del viento (campos de dunas), depósitos coluviales y aluviales, evaporitas, gravas y arenas litorales. La cubierta sedimentaria cuaternaria y la vegetación dificultan la observación de los rasgos estructurales superficiales, tanto los vinculados con la evolución del margen continental pasivo, así como los relacionados con la tectónica andina y con la dinámica propia de la Cuenca del Colorado. Geomorfológicamente se destaca una planicie estructural donde imperan los procesos fluviales y litorales, donde el agente modelador más significativo es el marino, en ambos casos existen procesos eólicos que han actuado en forma subordinada (Etcheverría y Folguera, 2009).

Los **Depósitos fluviales gruesos** (Etcheverría et al., 2006), sobreyacen discordantemente a la Formación Río Negro y están cubiertos, también en forma discordante, por una costra calcárea (calcrete), que en muchos casos cementa los sedimentos (Etcheverría y Folguera, 2014). Se trata de paquetes amalgamados de conglomerados polimícticos de grano mediano a grueso, con matriz arenosa. Sus principales características son una grosera estratificación de gran escala, con estructuras de canales de hasta 50 cm de espesor e intercalación de lentes arenosos. En general, los paquetes inferiores son matriz sostén, mientras que los términos superiores son clasto sostén y están fuertemente cementados por carbonatos. Su distribución es bastante amplia y se disponen coronando las mesetas. Vistos en planta y en sentido regional, presentan una disposición triangular, homologable a la de un gran abanico aluvial, y están fuertemente disectados por una intrincada red de paleocanales. Su distribución es extensa y va, desde cercanías a Colonia Julia en dirección noroeste – sudeste, hasta Bahía Anegada (Etcheverría y Folguera, 2009).

Asociados a los depósitos fluviales gruesos, se encuentran **depósitos aluviales antiguos** que, geomorfológicamente, corresponden a una intrincada red de paleocanales asociados a los niveles de abanicos aluviales antiguos (Etcheverría y Folguera, 2009). Se trata de sedimentos inconsolidados de color castaño claro a gris,

cuyo tamaño de grano dominante varía entre arena mediana y guijarro, con menores proporciones de arena fina y limo. Estos niveles ocupan los paleocanales que afectan a los depósitos fluviales gruesos y se disponen en los fondos de las cañadas poco profundas. Su estrecha relación con la unidad mencionada anteriormente, le asigna una edad pleistocena (González Díaz y Malagnino, 1984).

La **Formación Agua Blanca** (De Francesco, 1970), se corresponde con depósitos fluviales que rellenan valles en el sector occidental de las Sierras Australes. Se definen tres miembros bien diferenciados (Rabassa, 1989): uno psefítico inferior, con clastos de areniscas paleozoicas en una matriz arenosa, estratificadas, de color castaño; uno arenoso medio, compuesto por arenas y arenas limosas castañas a grises, bien estratificadas, con ocasionales lentes psefíticos; y un miembro limo-arenoso superior, donde predominan limos y limos arenosos grises masivos propios de un ambiente palustre. Los miembros inferior y medio de esta unidad corresponden al piso/edad Lujanense, y los fósiles hallados en el miembro superior al piso/edad Platense (Deschamps y Tonni, 1992).

En toda la zona de estudio se reconocen grandes extensiones de arenas loésicas denominadas **depósitos eólicos finos**. En el norte, abarca extensiones de oeste a este, como una fina capa que corona las mesetas, apoyada directamente sobre niveles de calcretes. Hacia el sur, en la Cuenca del Colorado, donde gradualmente aumenta de espesor, cubre homogéneamente altos y bajos generando un paisaje suavemente ondulado sólo interrumpido por bajos aislados (Folguera et al., 2017). Estos sedimentos son importantes para la región, ya que constituyen el material originario de los principales suelos productivos de la zona. Es una arena limosa a limo arenosa, sin estratificación, compacta, castaña oscura, en muchos casos bioturbada. Es común la participación de carbonatos que se manifiestan en forma disgregada, como agregados pulverulentos o como pequeñas concreciones dispersas de hasta 1 cm de diámetro, que dominan hacia la base (Etcheverría y Folguera, 2009). A partir del análisis composicional se determinó que el aporte principal es volcánico con proporciones variables de material piroclástico, similar a los sectores pampeanos ubicados más al norte (Teruggi, 1957). Existe una concordancia entre los diferentes

investigadores sobre el origen de dichos sedimentos del sureste de la provincia de Buenos Aires (Zárate y Blasi, 1993; Etcheverría et al., 2006). Los mismos indican que desde el Pleistoceno tardío el aporte principal del loess provino, durante las épocas secas, de la deflación de los sedimentos aluviales de los ríos Colorado y Negro y que los vientos predominantes habrían sido del oeste (Andes neuquinos y norte de Patagonia extraandina).

2.2.2.3 Depósitos holocenos

Tras el retiro de los hielos en el “Ultimo Máximo Glacial” finalizado aproximadamente hace 14 mil años en Patagonia, la ingresión marina del Holoceno dejó depósitos de planicie de marea, depósitos de cordones litorales marinos y depósitos de cordones litorales de estuario. La fase ingresiva está representada básicamente por depósitos de planicies mareales y albúfera del Querandinense y la fase regresiva por los cordones litorales Platense marino. Estos depósitos, en sus diferentes facies, se encuentran bien representados al sur de Bahía Blanca (Pereyra, 2018).

Finalmente se observan depósitos de deltas antiguos tributarios, como por ejemplo de los ríos Paraná y Colorado, depósitos fluviales de planicies interdistributarias y depósitos fluviales de fajas de meandros (delta del Paraná antiguo) así como depósitos de dunas activas, depósitos de planicies aluviales de orden menor y depósitos de planicie deltaica actual, todos de edades recientes a actuales. Los depósitos estuáricos han progradado sobre los sedimentos de la ingresión marina holocena. Por último, los depósitos litorales arenosos actuales ocupan todas las costas de acumulación de la provincia (Pereyra, 2018).

En la zona de Bahía Anegada (sur de la provincia de Buenos Aires) se encuentran sedimentos denominados **depósitos marinos gruesos** y **depósitos marinos arenosos** (Etcheverría y Folguera, 2009). Los primeros se disponen como cuerpos relícticos de aproximadamente 300 m a 400 m de ancho y 4 km a 6 km de largo y dan al paisaje un aspecto suavemente ondulado. Los depósitos están formados por grava mediana a fina y arena mediana a gruesa. Los clastos, que provienen de la erosión del sustrato de rodados (depósitos fluviales gruesos), son redondeados y mayormente volcánicos

(riolitas, andesitas y basaltos) y, en los sectores más occidentales, están cementados por carbonatos. Los depósitos situados en el sector continental representarían una sucesión de crestas de playa relacionadas con antiguas líneas de costa, mientras que el depósito que se encuentra al oriente correspondería a una espiga en forma de gancho, cuya presencia indicaría que la bahía fue tan profunda como para permitir que se originaran corrientes costeras con la suficiente energía para el transporte de rodados. Los segundos corresponden a arenas de grano mediano a fino con abundantes restos de gastrópodos y pelecípodos, que pertenecen a antiguos cordones litorales cuya orientación norte-sur representaría diferentes posiciones de la línea de costa (Weiler, 1983). Los sedimentos más alejados de la costa serían coetáneos con los depósitos marinos gruesos mencionados con antelación (Weiler, 1983 y 1996).

Existe una gran extensión de **depósitos aluviales-coluviales** que se hallan diseminados por toda la comarca (Figura 2.5), ocupan las zonas deprimidas y tapizan las barrancas que marginan los bajos. Son mayormente depósitos inconsolidados de color castaño claro a gris. El tamaño de grano varía entre arena mediana a guijarro, con menores proporciones de arena y limo. Han sido dispersados por los cursos de agua que surcan las Sierras Australes y tienen granulometría decreciente a medida que la distancia al área de aporte aumenta. Estos depósitos están aún en formación por lo que se los considera del Holoceno Superior (Folguera et al., 2017).

Por último, en el sector estudiado en esta Tesis se diferencian grandes extensiones de **arenas eólicas** que se agrupan formando campos de dunas de importante extensión areal. Se reconocieron dos sectores bien diferenciados: uno ubicado en el sector suroccidental, que se extiende de oeste a este desde la laguna Chasicó hacia la depresión del salitral de la Vidriera y hacia el sur hasta Mayor Buratovich y otro con dirección prácticamente este-oeste localizado a lo largo de la costa, desde Bahía Blanca hacia Necochea. Los primeros campos de dunas se los reconoce como **Formación Médanos** y se habrían formado por la acción de vientos, provenientes del oeste, que provocaron la deflación del material, no consolidado, del interior de los bajos que se encuentran al oeste (Isla, 2002).

Los segundos, son cordones de dunas que se disponen como cubierta superficial de los depósitos marinos arenosos y forman pequeñas acumulaciones muy degradadas y con diferentes grados de edafización. Tienen orientación paralela a subparalela a la línea de costa actual y están fijos por abundante vegetación. Dichos sedimentos son estructuras de barreras de arenas finas a medias, de color gris pardo claro y bien seleccionadas (Weiler, 1983) y se las reconoce como Barreras Oriental y Austral de Buenos Aires (Isla, 1989), las cuales se originaron como consecuencia de la fluctuación holocena del nivel del mar que dejó abundante sedimento litoral que migró hacia el interior.

Las barreras medanosas (Figura 2.6) forman parte de la denominada provincia geológica Llanura Chaco-pampeana; en particular de áreas costero-litorales de las Cuencas del Salado, de Claromecó y de los ríos Negro y Colorado (Isla y Bujalesky, 1995). La barrera medanosa oriental (BMO) se extiende desde Punta Rasa hasta Mar Chiquita, mientras que la barrera medanosa austral (BMA), lo hace desde Miramar hasta Punta Alta. Una tercera se ubica en la desembocadura del río Colorado y de escasa dimensión (barrera del Colorado) y, finalmente, una cuarta se extiende desde el Sur de la isla del Jabalí, hasta la desembocadura del río Negro (barrera de Patagones).

Las cuatro barreras se originaron bajo diferentes condiciones de disponibilidad de sedimento, relación con las zonas de aporte, régimen de vientos y en diferentes momentos (Isla et al., 2001). En todas las barreras, las modificaciones más sustanciales ocurren en los ambientes mixtos/marinos, donde se pueden identificar dos geoformas relacionadas a diferentes agentes: eólicas y ácueas (Bértola y Cortizo, 2005).

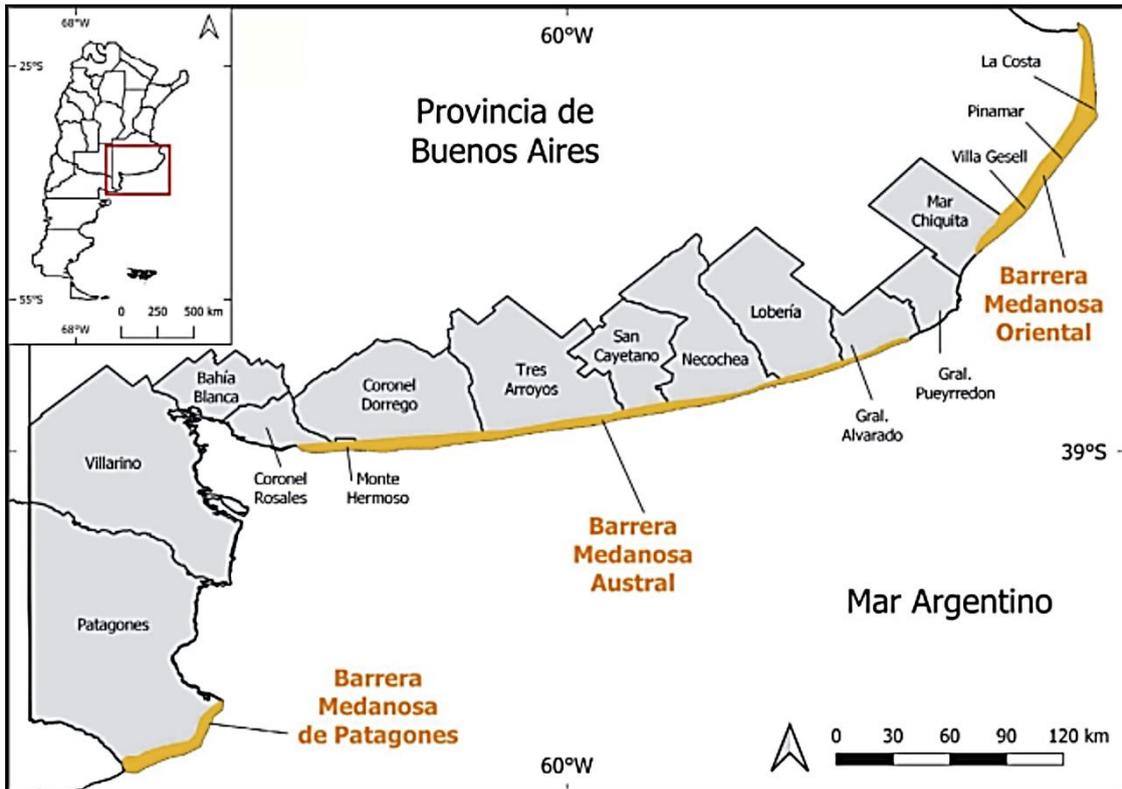


Figura 2.6 Barreras medanosas del Holoceno. (Tomado de Isla et al., 2022)

CAPÍTULO III. MATERIALES

3.1 Definiciones

La American Society for Testing and Materials, define como agregado a aquellos materiales granulares, tales como arena, grava, piedra partida o escoria de alto horno (ASTM C 125, 2021). En Argentina, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación lo describe como el material granular resultante de la desintegración natural o el desgaste de las rocas, o que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas o de otros materiales, que permiten obtener partículas de forma y tamaños estables (IRAM 1569, 1992). Dicha descripción, podría completarse a partir de su clasificación por: su origen geológico, el modo de producción u obtención, el tamaño de sus partículas, el peso y la densidad (AATH, 2012).

Como es conocida en la industria, la estructura granular de un hormigón cuenta con una granulometría diversa, la misma comprende tamaños desde los 0,075 mm y hasta los 53 mm de diámetro (o más), en hormigones de uso común, definida muy bien en el Reglamento CIRSOC 201 (2005).

Por convención existe un límite establecido ($\sim 4,75$ mm) para separar entre los agregados gruesos y los agregados finos (IRAM 1531, 2022 y 1512, 2013). Esta separación, así como el estudio de la distribución de los tamaños de partículas que componen la mezcla de agregados, se establece mediante el procedimiento de tamizado (IRAM 1505, 2019).

La composición del esqueleto granular dentro de una estructura de hormigón, está dada por las combinaciones de porcentajes en masa de diferentes fracciones de agregados. Dichas fracciones se comercializan en rangos de tamaños aproximados (fracciones 10 mm-30 mm; 6 mm-20 mm; 6 mm-12 mm; 3 mm-9 mm y 0 mm-6 mm), así la industria puede garantizar costos aceptables de producción y comercialización. De todos modos, para lograr una curva granulométrica uniforme (abatar costos, empaquetamiento adecuado, menor demanda de agua, etc.), se deben utilizar y combinar agregados gruesos y finos, los cuales tienen que cumplir ciertos

requerimientos que se encuentran muy bien especificados en las normas vigentes para tal fin.

Existen normas particulares para agregados finos y gruesos cuyo objetivo es establecer especificaciones técnicas concretas para su uso en hormigón. Estas son: **IRAM 1531 (2022). Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo** e **IRAM 1512 (2013) Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos;** normas sobre la combinación de granulometrías (**IRAM 1627, 1997**). **Agregados. Granulometrías de agregados para hormigones** y normas sobre el análisis de la composición petrográfica de la muestra de agregados (**IRAM 1649, 2008**). **Examen petrográfico de agregados para hormigón.**

De acuerdo al origen de los agregados se clasifican en dos grandes grupos:

- Aquellos cuyo ciclo geológico logró una selección natural tal que se pueden extraer (mediante un proceso mecánico de selección) diversos tamaños.
- Y, aquellos que, por más que sean de origen natural se necesita una ingeniería para lograr obtener fracciones (tamaños) para su utilización. Dentro de éstos, además, existen agregados mixtos o reciclados, obtenidos a partir de la misma manufactura, pero que difieren de los anteriores por no tener una conformación totalmente natural (agregados con incrustaciones de mortero o pasta de cemento)

Salvo en casos especiales, las dosificaciones se realizan a partir de la combinación de agregados de rocas generadas mediante la trituración de macizos rocosos (agregados triturados) y/o la explotación de yacimientos naturales (cantos rodados y arenas). El aprovechamiento de dichos recursos está condicionado por el origen de la roca y su distribución. Estas características son tenidas en cuenta no solo para su explotación, sino para la caracterización de los agregados obtenidos.

La provincia de Buenos Aires, es proveedora de grandes volúmenes de roca para su uso como agregados para hormigón, tanto en su propio territorio, como en el resto del

país. Los nodos de producción de agregado grueso más importantes, se ubican en la zona centro, en cercanías a las ciudades de Olavarría, Azul, Tandil, Mar del Plata (Sierras Septentrionales), y próximas a las localidades de Pigüé, Tornquist, Pringles y Bahía Blanca (Sierras Australes). Los agregados finos están más diseminados por la provincia y se trata mayormente de arenas litorales que abarcan la mayor parte de la costa atlántica, así como también depósitos de paleocauces de antiguos valles continentales.

Hasta el año 2015, el 54% de los agregados utilizados en el país, provenían de la región pampeana y aproximadamente el 75% de este total, de la provincia de Buenos Aires, (Bouso Aragonés, 2015). El Censo Nacional de la Actividad Minera (CENAM) publicó en el año 2018 (Tabla 3.1), datos sobre la producción de **Rocas de Aplicación** en el país (Figura 3.1). Allí, se informó un total de 37.894.112 toneladas de áridos para construcción, lo que equivale al 41,7% de la categoría de roca de aplicación (CENAM, 2018).

Tabla 3.1 Producción de las rocas de aplicación en el año 2016 en Argentina. (Modificado de CENAM, 2018).

Roca de aplicación	Producción (Tn)	Porcentaje (%)
Arena común para construcción	17.556.701	19,9
Arenas y gravas silíceas	764.828	1,1
Rocas para triturados pétreos (incluye basalto, granito, caliza, etc.) sin clasificar	14.742.673	16,9
Canto rodado, granza y/o ripio	4.847.910	3,8
Total	37.894.112	41,7

La Cámara Argentina de la Construcción (CAMARCO), en sus indicadores de actividad (producción y consumo), menciona datos para el año 2022, sobre el consumo de cemento portland y asfalto (12,9 millones de Ton y 448000 Ton, respectivamente). Esto permite inferir que se utilizaron más de 80 millones de toneladas de agregados (gruesos y finos), para ese año (CAMARCO, 2023). No obstante, el Global Aggregates

Information Network (GAIN), en el año 2024 menciona una producción de 140 millones de toneladas de agregados en 2023 para Argentina.

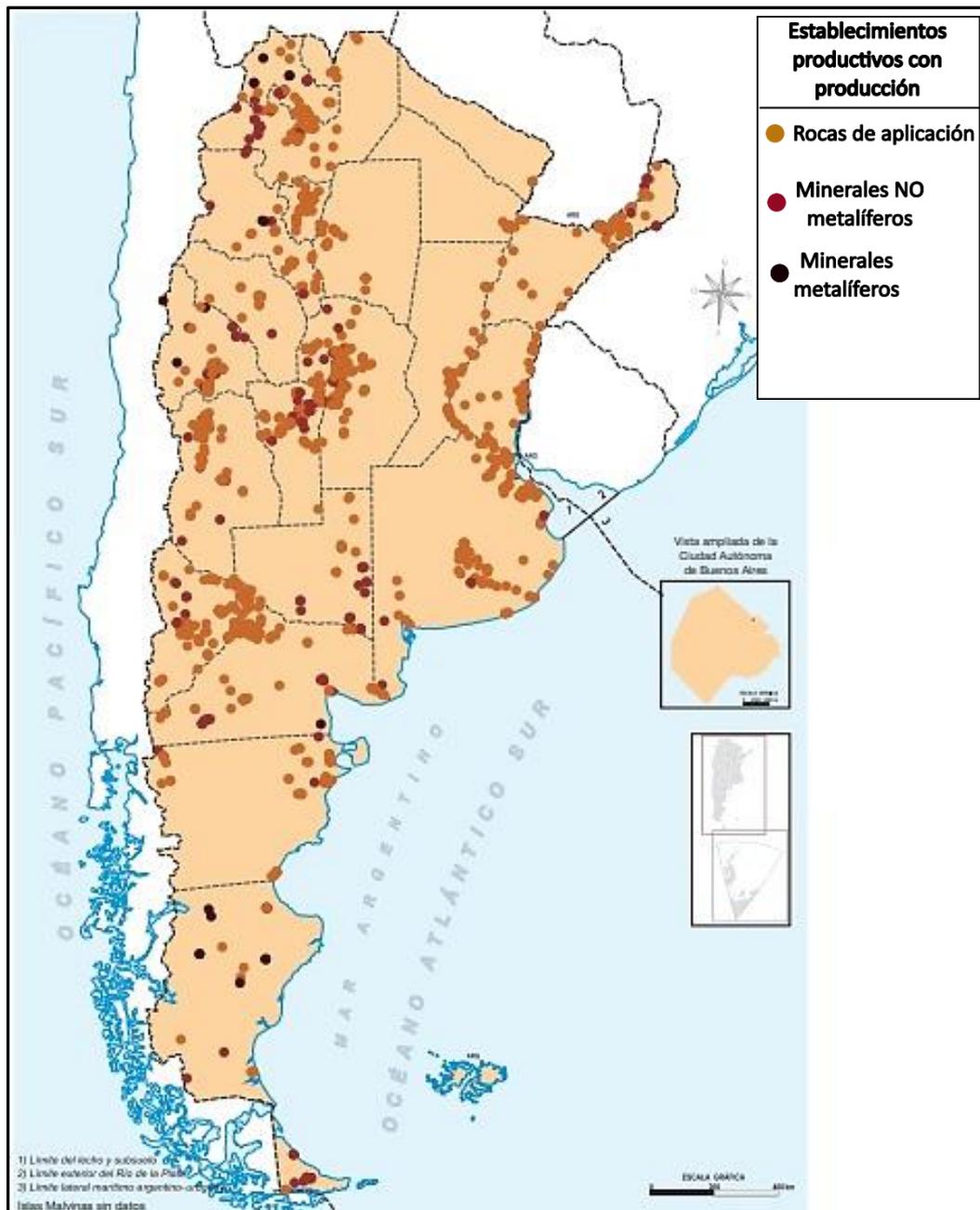


Figura 3.1 Mapa minero con producción en Argentina hasta el año 2016. (Tomado del Censo Nacional de Actividad Minera, 2017)

3.2 Ubicación de las canteras estudiadas

Los materiales estudiados en esta Tesis se pueden diferenciar en 2 tipos: por un lado, aquellos que se obtienen de la fragmentación de macizos rocosos de naturaleza ígnea-metamórfica y, por otro, aquellos que se explotan mediante la extracción mecánica a

partir de yacimientos sin consolidar (o poco consolidados). Los primeros, se ubican en la zona oeste de la localidad de Tornquist (PIR) y al sur de la localidad de Pigüé (PIG) mientras que los segundos se desarrollan al sur de la provincia de Buenos Aires (VIL), oeste de la localidad de Río Colorado (RCO), al oeste de la localidad de Médanos (MED) y al sudeste de la provincia de Buenos Aires (ORE, CLA y NEC) (Figura 3.2).

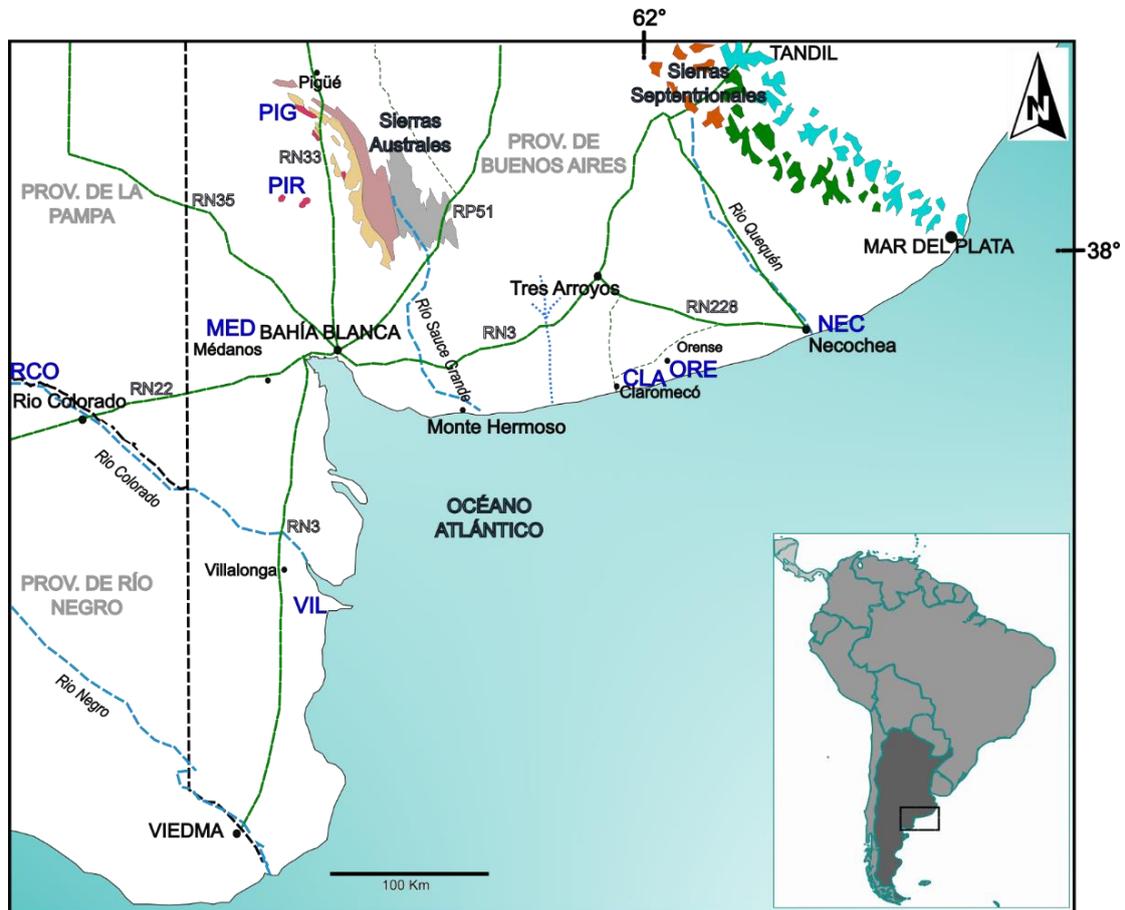


Figura 3.2 Canteras estudiadas en esta Tesis (PIR; PIG; RCO; MED; VIL; CLA; ORE y NEC). Ver referencias litológicas en la Figura 2.2

3.3 Canteras de macizos rocosos

En la zona existen dos canteras en explotación en las cuales se trituran las rocas para obtener piedra partida en diferentes granulometrías. Las canteras se ubican al oeste del denominado Sistema de Ventania, aunque su origen difiere totalmente uno del otro. Dichas canteras producen agregados cuyos diámetros son los comerciales y los más utilizados en la industria: 10 mm-30 mm, 6 mm-20 mm, 6 mm-12 mm y 0 mm-6 mm. Estos productos son usados en la industria vial (carpeta asfáltica o de hormigón) y en la civil (estructuras de hormigón).

3.3.1 Cantera PIR

La cantera PIR se encuentra ubicada 15 km al oeste del km 86 de la Ruta Nacional N° 33 en la provincia de Buenos Aires ($38^{\circ} 4' 12''$ S y $62^{\circ} 28' 08''$ O). El yacimiento se encuentra cercano a las localidades de Tornquist, Pigüé, Sierra de la Ventana y Bahía Blanca.



Figura 3.3 Cantera PIR. Imagen tomada de Google Earth ®

La roca es un cuerpo intrusivo granítico tipo A o de intraplaca (Pearce et al., 1984; Leat et al., 1986; Whalen et al., 1987 y Eby, 1992), perteneciente al basamento de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires.

Actualmente, la cantera se encuentra en su tercer nivel de explotación, el cual se desarrolla a aproximadamente 42 metros de la superficie y en un área explotada hasta el momento que abarca los 100.000 m^2 (Figura 3.3 y 3.4a). La explotación de dicha roca data del año 1971 llegando a alcanzar una producción de 25.000 Tn mensuales. Las fracciones comercializadas por la cantera son: piedras 3 mm-9 mm; 6 mm-12 mm; 6 mm-20 mm; 10 mm-30 mm; 30 mm-50 mm y para balasto (diámetros mayores a 50 mm). Además, poseen fracciones de arenas de trituración 0 mm-3 mm y 0 mm-6 mm.

El granito de la cantera PIR, posee una textura porfiroide con sectores diferenciados aplíticos y pegmatoideos (venillas de cuarzo) (Figura 3.4b). Presenta evidencias de cataclasis, fajas milonitizadas y un diaclasamiento importante (Figura 3.4c). En el flanco

oeste se distinguen procesos de alteración superficial característicos de niveles relacionados con el ambiente exógeno.

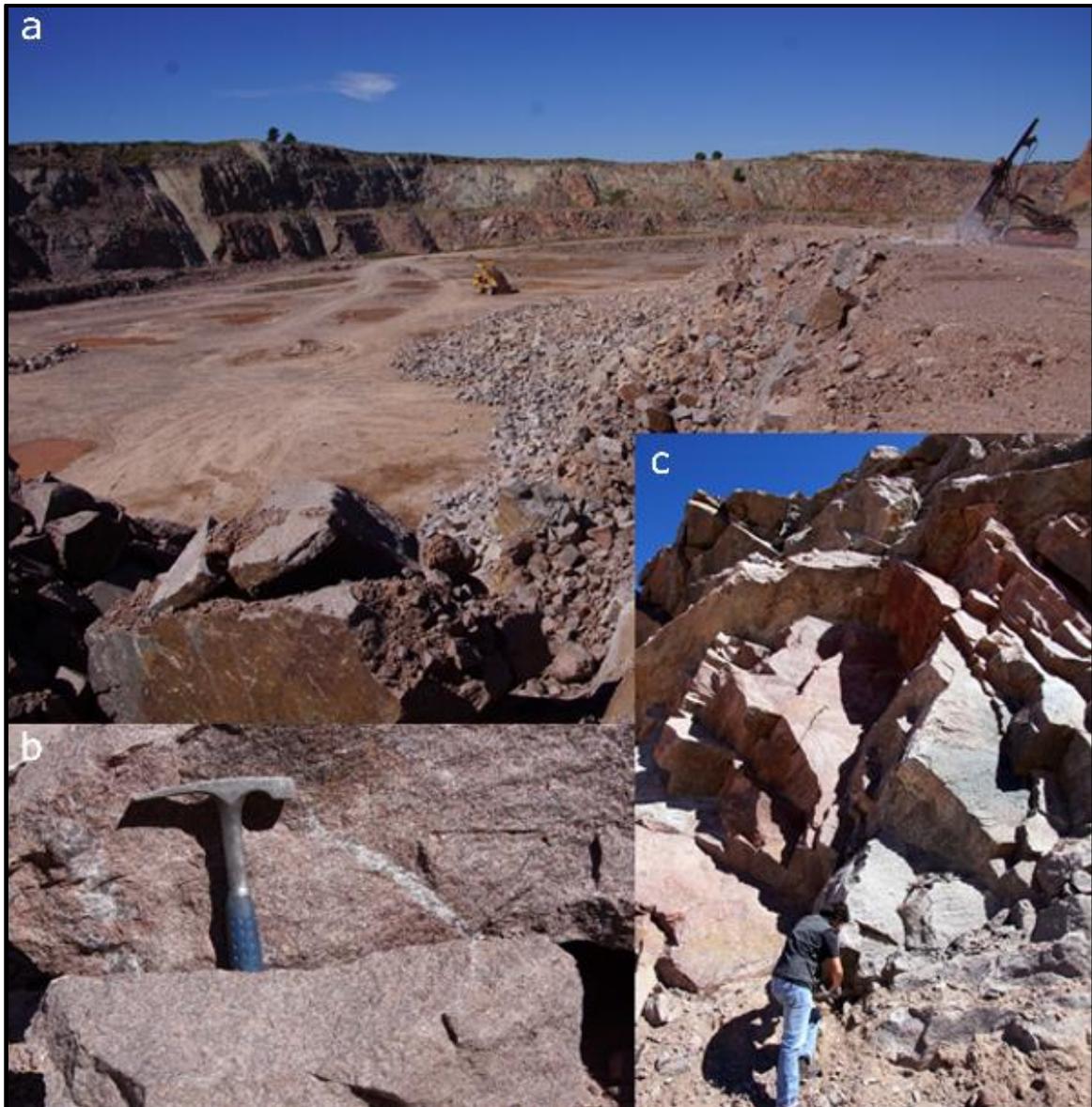


Figura 3.4 Cantera PIR a) cantera de granito. 2do nivel de explotación; b) fracciones de granito de voladura; c) familias de diaclasas típicas de la formación

3.3.2 Cantera PIG

Se encuentra ubicada a 3 km al oeste de la localidad de Pigüé en la provincia de Buenos Aires ($37^{\circ} 38' 26''$ S y $62^{\circ} 27' 26''$ O) (Figura 3.5). El yacimiento se emplaza en el noroeste del denominado Sistema de Ventania. Son cuerpos tabulares (Figura 3.6a y b) de una ortocuarcita, constituida por granos subredondeados de cuarzo, cementados

por este mismo mineral. A ellos se asocian pequeños cristales de illita y caolinita (Figura 3.6c).



Figura 3.5 Cantera PIG. Imagen tomada de Google Earth ®



Figura 3.6 Cantera PIG a) Frentes de explotación; b) equipos de trituración y clasificación de materiales; c) frente de explotación norte. Niveles de ortocuarcita con intercalaciones de arcilla

Geológicamente se pueden atribuir dichas rocas a las formaciones sedimentarias de grano fino a medio del Grupo Curamalal pertenecientes al Cámbrico-Silúrico (Varela et al., 1986 y Andreis et al., 1987).

En el siguiente perfil (Figura 3.7) sobre el frente de cantera actual, se midió el rumbo de los estratos, el cual arrojó N-S 177° con un buzamiento oeste de 18° a 22°. En el mismo se observan paquetes de hasta 1,5 metros de potencia de ortocuarcita de grano fino a medio, masiva, e intercalaciones de niveles de hasta 0,2 metros de un mineral arcilloso amarillento, de aspecto laminar.

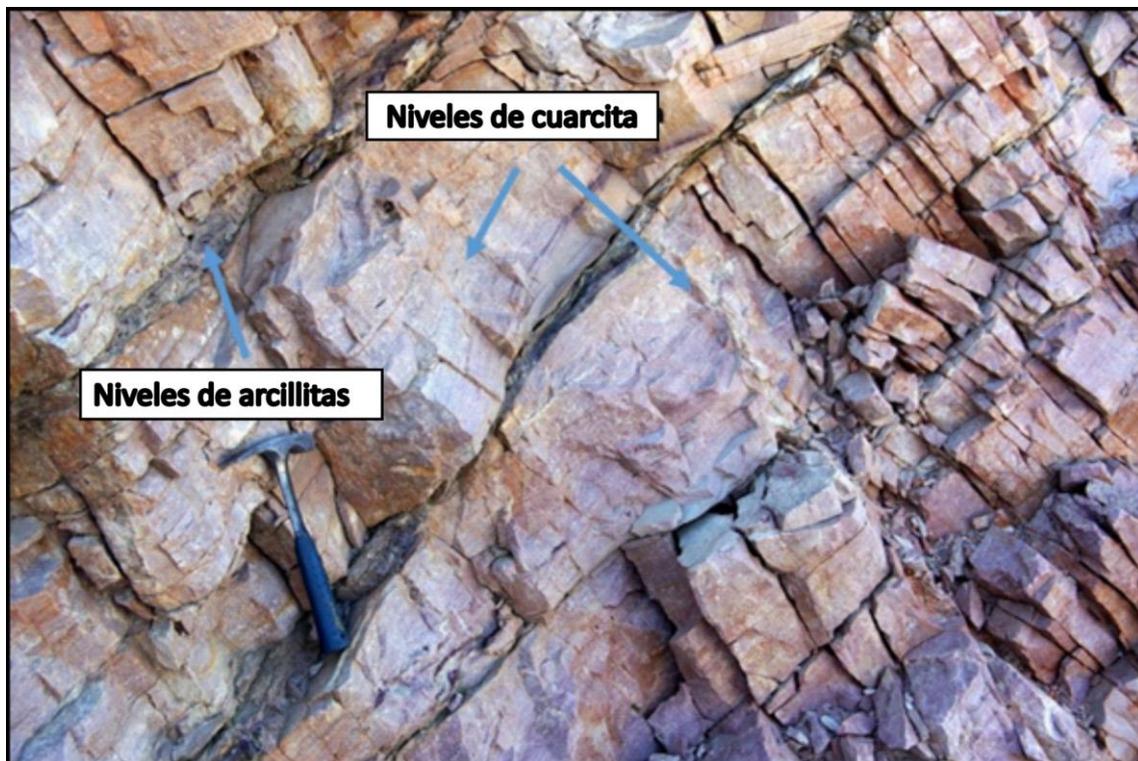


Figura 3.7 Paredón N-S donde se observan los niveles de arcilla entre los paquetes cuarcíticos

3.4 Canteras de depósitos sedimentarios

Los agregados finos y gruesos, a partir de la explotación de yacimientos naturales son de mucha importancia para la industria de la construcción. Los primeros tienen gran variabilidad de extensión a lo largo de toda la costa atlántica, predominando la del Río Paraná como la zona de mayor producción a nivel nacional. Según datos del Censo Nacional Minero de 2004, en la provincia de Buenos Aires se producían alrededor de 5,4 Mt/año de arenas naturales para construcción (Cabrera et al., 2010). En la provincia

de Buenos Aires, para el mismo año, la producción de arena alcanzó las 720.000 toneladas por mes, poniendo de manifiesto su importancia como fuente de agregados finos para la construcción (Caballé et al., 2005).

La mayoría de las canteras de la región explotan arenas, las cuales se utilizan principalmente para la elaboración de hormigón. Para una mejor organización, se agruparon por origen y localización.

3.4.1 Cantera VIL

Se encuentra ubicada en la costa del sur bonaerense ($40^{\circ} 6' 41''$ S y $62^{\circ} 20' 44''$ O), a unos 3,3 km al sudeste de la ciudad de Villalonga y a unos 168 km de la ciudad de Bahía Blanca. La cantera posee unos 98.000 m² (Figura 3.8) y provee a la zona de canto rodado de tamaños 10 mm-30 mm, 6 mm-20 mm y 3 mm-9 mm, y arena de tamaño 0 mm-6 mm (Figura 3.9).



Figura 3.8 Cantera VIL de canto rodado y arena. Imagen tomada de Google Earth®

El canto rodado constituye un material ampliamente utilizado como agregado para hormigón en el sur de la provincia de Buenos Aires y en la región patagónica. Estos materiales originariamente se asocian a depósitos de origen fluvial, aunque en la zona costera han experimentado el retrabajo y redepositación por acción marina. Los depósitos de áreas costeras suelen formar cordones con niveles de conchillas o fragmentos de valvas calcáreas marinas mezcladas con los rodados (Nicolas et al., 1986; Maiza y Marfil, 1997). Por lo tanto, los depósitos de grava pueden mostrar variaciones (composicionales, granulométricas, etc.) relacionadas con su origen y la calidad del material, depende de los puntos de extracción y de los procesos que los han afectado (Bournod et al., 2024).

El yacimiento se encuentra emplazado de sur a norte, formando un cordón de no más de 3 metros de altura (Figura 3.10), en el que se pueden visualizar fracciones más gruesas dentro de una matriz arenosa fina, intercalados con niveles de arenas de tamaños medianos a finos. Se pueden observar estratificaciones paralelas tanto en las fracciones gruesas como en las finas.



Figura 3.9 Cantera VIL de canto rodado y arena a) y b) equipos de selección de material vía tamizado



Figura 3.10 Cantera VII. Frente de explotación de la cantera (arena)

3.4.2 Cantera RCO

Se encuentra próxima a la localidad de Río Colorado en la provincia de Río Negro, inmediatamente al norte del km 873, traza de la Ruta Nacional N° 22 ($39^{\circ} 01' 19''$ S y $64^{\circ} 16' 42''$) (Figura 3.11).



Figura 3.11 Cantera RCO de gravas y arenas fluviales. Imagen tomada de Google Earth®.

En la Figura 3.12 se observa un horizonte edáfico poco desarrollado, típico de la zona. Por debajo se desarrolla una capa de hasta 0,5 metros de calcrete que cubre de manera discordante un depósito bien cementado, formado por clastos de diferente

tamaño (desde gravas a limos) de rocas volcánicas de variada composición (andesítica, riolítica, dacítica, entre otras) en matriz arenosa mediana a fina, que muchas veces se encuentra cementada por carbonato de calcio.

La superficie de la cantera es de aproximadamente 80.000 m² y el espesor explotable de hasta 3 metros. El material es utilizado en la zona de Río Colorado y la Adela.

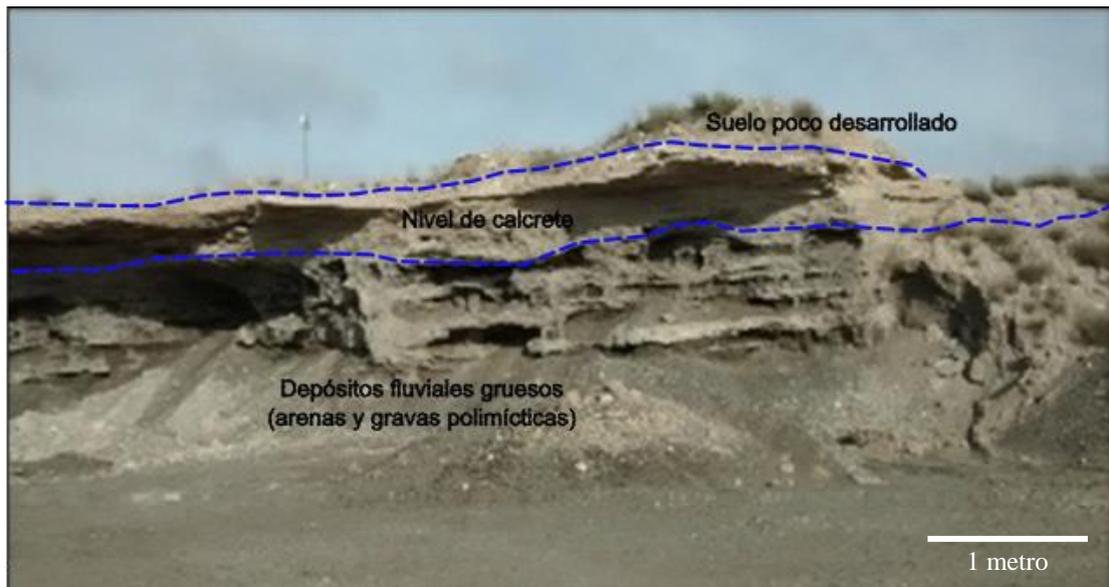


Figura 3.12 Perfil del yacimiento RCO de arenas y gravas fluviales

3.4.3 Cantera MED

Existen diferentes canteras de extracción de agregados finos en la zona cercana a localidad de Médanos. En una primera instancia, se relevaron tres canteras (Berezosky et al., 2016a), aunque por ser litológicamente similares, se seleccionó aquella que tiene mayor desarrollo comercial. La cantera MED, se emplaza al oeste de la localidad de Médanos (38° 47' 20'' S y 62° 48' 25'' O) y al sudeste de la laguna Salinas Grandes, a la vera de la Ruta Nacional N°b22 (Figura 3.13). Posee una extensión de 76.000 m² y su potencia no excede los 2,5 metros.



Figura 3.13 Cantera MED. Yacimiento de sedimentos arenosos. Imagen tomada de Google Earth®

Son depósitos inconsolidados de color castaño claro a gris (Figura 3.14). El tamaño de grano varía entre arena mediana a guijarro, con menores proporciones de arena y limo. Han sido dispersados por los cursos de agua que surcan las Sierras Australes y tienen granulometría decreciente a medida que la distancia al área de aporte aumenta. Estos depósitos están aún en formación por lo que se los considera del Holoceno Superior (Folguera et al., 2017).

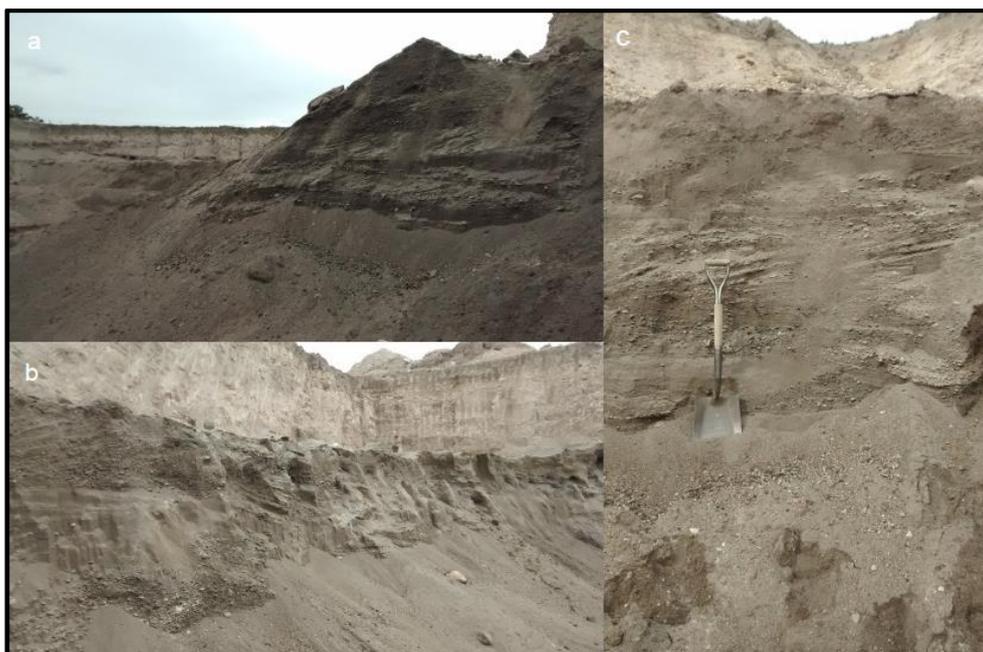


Figura 3.14 Cantera MED a) frente norte arenas finas y limos poco consolidados; b) loess pampeano se apoya discordante sobre las arenas de explotación; c) frente de explotación oeste de 5 metros de potencia

3.4.4 Canteras ORE y CLA

La faja costera del océano atlántico constituye un importante recurso de arenas para la construcción que se extiende de norte a sur a lo largo de unos 850 kilómetros, desde cabo San Antonio y hasta Punta Redonda, en cercanías a Carmen de Patagones (Marfil y Maiza, 2011). En esta zona se estudiaron dos canteras denominadas ORE y CLA.

La cantera ORE se encuentra en la costa sudeste de la provincia de Buenos Aires, a 11,5 km de la localidad de Orense y a 2 km del balneario del mismo nombre ($38^{\circ} 47' 23''$ S y $59^{\circ} 44' 30''$ O) (Figura 3.15).



Figura 3.15 Cantera ORE. Imagen tomada de Google Earth®

La cantera CLA se ubica 4,5 km al este de la localidad de Claromecó ($38^{\circ} 50' 01''$ S y $60^{\circ} 00' 19''$ O). Se extraen arenas litorales acumuladas a partir de un ambiente de barra litoral generada mediante el ascenso y descenso del nivel del mar en el Holoceno (Figura 3.16).



Figura 3.16 Cantera CLA. Imagen tomada de Google Earth®

Las arenas de los yacimientos mencionados poseen una granulometría que va de finas a medias, cuyos tamaños se encuentran por debajo de los 2 mm, encontrando su mayor distribución en los 150 μm y 300 μm . Los yacimientos alcanzan los 5 metros de potencia (Figura 3.17), con pequeñas estratificaciones paralelas.



Figura 3.17 Canteras de arena a) frente de cantera CLA; b) frente de cantera ORE

3.4.5 Cantera NEC

Se encuentra ubicada en la zona oeste de la ciudad de Necochea, sobre la Ruta Provincial N° 188, a unos 15 km de la ciudad de Quequén ($38^{\circ} 32' 13''$ S y $58^{\circ} 34' 36''$ O), ocupa unos 11.000 m² (Figura 3.18) y provee material a las localidades de Miramar, Necochea y Tres Arroyos como los puntos más importantes. El frente de cantera alcanza los 10 metros de altura.

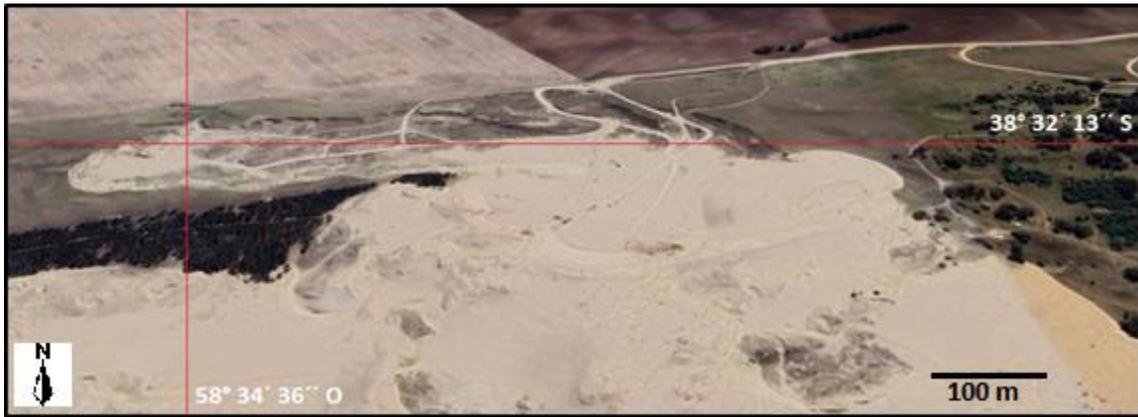


Figura 3.18 Cantera NEC. Imagen tomada de Google Earth®

El material es litológicamente heterogéneo. En la Figura 3.19 se muestra un frente de cantera, con estructuras laminares de unos pocos centímetros de espesor.



Figura 3.19 Frente de explotación de Cantera NEC. Potencia de 8 metros de altura

CAPÍTULO IV. MÉTODOS

4.1 Introducción

En este capítulo se describen los ensayos normalizados y los métodos de estudio complementarios utilizados para caracterizar los agregados estudiados y para determinar su potencial reactividad. Además, se describen los métodos empleados en el estudio de estructuras en servicio afectadas por la RAS. Algunos métodos específicos implementados en ciertas estructuras no son descriptos en este apartado y se describen en particular para la estructura estudiada.

Antes de detallar los métodos utilizados es importante realizar una aclaración respecto a las normas IRAM 1512 (2013) y 1531 (2022), que establecen los requisitos que deben cumplir los agregados finos y gruesos, respectivamente para su uso en hormigón, así como los métodos para su evaluación. Estas normas son actualizadas con cierta periodicidad y, si bien el espíritu es que ambas concuerden en línea general en cuanto a procedimientos, límites de aceptación y ensayos (con las adecuaciones particulares en función del tipo de agregado en estudio), por lo general transcurre un tiempo (a veces años) hasta que ambas se sincronizan. Por lo tanto, en esta Tesis se realiza un abordaje integral, adoptando los últimos criterios establecidos en las normas mencionadas, remarcando sus diferentes enfoques.

Para evaluar la potencial reactividad de los agregados se realiza, en primera instancia, el ensayo petrográfico según lo establecido en la norma IRAM 1649 (2008). De acuerdo al tipo de componente potencialmente reactivo identificado se realiza el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) o el prisma de hormigón convencional y acelerado, a 38 °C y 60 °C respectivamente (IRAM 1700, 2013), adoptando límites de aceptación específicos en función de los componentes potencialmente reactivos presentes. Los agregados de reacción rápida suelen dar falsos positivos con el método acelerado de la barra de mortero, mientras que los de reacción lenta pueden dar falsos negativos. Por ello, en caso de discrepancia entre los resultados obtenidos por los métodos de ensayo IRAM 1674 e IRAM 1700, el método que define la potencial reactividad es el prisma de hormigón. Para poder realizar una

evaluación integral y efectuar comparaciones entre los agregados estudiados, en esta Tesis se implementaron ambos ensayos, siendo una parte fundamental el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC) con quien se trabajó en colaboración durante esta etapa.

4.2 Agregado fino para hormigón de cemento (IRAM 1512)

4.2.1 Sustancias nocivas y potencialmente reactivas

El agregado fino debe estar constituido por partículas resistentes, durables y estables. No deben tener sustancias nocivas en proporciones que superen las establecidas en la norma (Tabla 4.1). Pueden ser arenas naturales o una mezcla de arenas naturales y de trituración, estas últimas no deben superar el 30%.

Tabla 4.1 Contenido máximo de sustancias nocivas para arenas naturales (IRAM 1512, 2013)

Requisitos	Máximo admisible (%)
Terrones de arcilla y partículas friables	3,0
Finos que pasan el tamiz IRAM 75 μm :	
Hormigón expuesto a desgaste superficial	3,0
Otros hormigones	5,0
Materias carbonosas:	
a) Cuando es importante el aspecto superficial	0,5
b) Otros casos	1,0
Sulfatos, expresados como SO_3	0,1
Sales solubles totales	1,5
Otras sustancias perjudiciales (*)	2,0

(*) Incluye pizarras, micas, fragmentos blandos en escamas desmenuzables y partículas cubiertas por películas superficiales.

Respecto a las sustancias potencialmente reactivas la norma establece que, si el agregado se utilizará en hormigones o morteros que estén en contacto con agua, ya sea en forma permanente o periódica, suelos húmedos o atmósferas con humedad relativa mayor que 60%, debe ser analizado desde el punto de vista de la reacción álcali-agregado. Si el agregado resulta potencialmente reactivo, la norma indica medidas preventivas para su utilización.

El análisis petrográfico es sumamente necesario para identificar los componentes potencialmente reactivos presentes en el agregado. El mismo, se debe realizar según la norma IRAM 1649 (2008). El agregado que contenga cualquiera de los minerales indicados en la Tabla 4.2, en cantidades mayores de las allí mencionadas, debe ser considerado potencialmente reactivo. En el caso de mezcla de agregados de diferente origen, es necesario la evaluación y aplicación de los límites para cada grupo de agregados individualmente. Cuando el agregado contenga dos o más componentes de los indicados en la Tabla 4.2, debe ser considerado potencialmente reactivo, independientemente del contenido en el que se hallen presentes.

Tabla 4.2 Minerales y rocas potencialmente reactivos (IRAM 1512, 2013)

Reacción	Minerales / Rocas	Contenido máximo (%)
Reacción álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	5,0
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 μm)	
	Ftanita, chert	3,0
	Calcedonia	
	Tridimita	1,0
	Cristobalita	
	Ópalo	0,5
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3,0

4.2.2 Comprobación de la reactividad

Si de esta evaluación surge que el agregado fino es potencialmente reactivo, su reactividad debe ser comprobada por el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) o por el método de ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013). En cambio, los que no resulten potencialmente reactivos, pueden ser utilizados sin restricciones en lo que respecta a la reacción álcali-agregado (RAA).

Por lo tanto, el examen petrográfico aporta información acerca de la composición de un agregado, incluyendo la identificación y la determinación de las cantidades aproximadas de los componentes reactivos. Esto es importante, ya que permite determinar cuáles son los métodos de ensayo más convenientes para estudiar su comportamiento y ayuda a interpretar los resultados obtenidos en los ensayos físicos.

Si bien un agregado desde el punto de vista petrográfico, puede ser aceptado como no reactivo, existe un cierto nivel de riesgo asociado con esta decisión ya que algunas fases reactivas pueden no ser detectadas mediante microscopía óptica. En cambio, cuando el agregado fino esté constituido por minerales de elevada reactividad (ópalo y calcedonia) que puedan dar lugar a la existencia de un efecto *pessimum*, es necesario ensayar distintas combinaciones del agregado estudiado (cinco combinaciones como mínimo), con otro de comportamiento conocido y de características inocuas (no reactivo), de manera de evaluar la posible existencia de tal fenómeno.

Si, a partir del ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997), el agregado fino, es considerado potencialmente reactivo, este comportamiento debe ser confirmado con el método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013). Como alternativa, si no se posee ningún dato (desde el punto de vista de la RAS), sobre el agregado a utilizar, el mismo deberá ser considerado altamente reactivo. Así, su factibilidad de uso en la elaboración de hormigones, quedará supeditada al empleo de algún método preventivo que inhiba los efectos deletéreos que pudieran surgir a causa de la reacción.

Cuando se disponga de información de obras en servicio que hayan sido construidas con un conjunto de materiales similares al propuesto para la obra nueva, según el criterio de la IRAM 1874-2 (2004) se deben seleccionar, como mínimo, cuatro estructuras para efectuar un relevamiento preliminar y para evaluarlas según la citada norma. Preferentemente se deben seleccionar estructuras de similar tipología estructural que las previstas a construir.

4.2.3 Medidas adoptadas para el uso de agregados reactivos

Cuando se requiera el uso de un agregado fino que, según la norma, resulte potencialmente reactivo frente a la RAS, se deberá utilizar conjuntamente con alguna de las medidas prescriptivas o prestacionales que se mencionan a continuación.

Medidas Prescriptivas

- a) Utilizar un cemento RRAA (resistente a la reacción álcali-agregado), que cumpla con la IRAM 50001.
- b) Limitar el contenido de álcalis del hormigón, aportado por el cemento, de acuerdo a los valores máximos indicados en la norma IRAM 1512, en función del nivel de prevención requerido.
- c) Utilizar un cemento para uso general que cumpla con la IRAM 50000 y contenga, además, adiciones minerales activas (AMA) en cantidad igual o mayor que la indicada en la norma IRAM 1512, en función del nivel de prevención requerido.
- d) Incorporar al hormigón una AMA que cumpla con la norma IRAM que corresponda, según la adición que se trate, utilizando un porcentaje de reemplazo del cemento mayor que el mínimo indicado en la norma IRAM 1512 y en función del nivel de prevención requerido.
- e) Para el nivel de prevención E determinado, utilizar en cantidad suficiente y en forma combinada una mezcla de hormigón de bajo contenido de álcalis con una AMA que cumpla con la norma IRAM que corresponda, según la adición que se trate. A tal efecto, los contenidos máximos de álcalis del hormigón y mínimo de AMA deben ser los que correspondan al nivel de prevención D, indicados en la norma IRAM 1512.

Medidas Prestacionales

- a) Utilizar un cemento para uso general, que cumpla con la IRAM 50000 o IRAM 50001, que haya demostrado ser efectivo para inhibir la RAS con los agregados de obra.
- b) Utilizar un material cementicio obtenido por mezcla, en planta de hormigón, de un cemento de uso general, que cumpla con la IRAM 50000, más una AMA que cumpla con la norma IRAM que corresponda, según la adición que se trate, y, además, demuestre ser efectiva para inhibir la RAS con los agregados de obra.
- c) Incorporar al hormigón un inhibidor químico a base de litio en proporción suficiente para evitar que se produzcan expansiones y otros daños perjudiciales por la RAS.
- d) Cambiar parcialmente el agregado fino por otro no reactivo. La efectividad de esta solución debe ser verificada por los ensayos y las condiciones antes descriptas.

Una vez determinado el grado de reactividad del agregado, se debe determinar el nivel de riesgo de la RAS, en función de las condiciones de exposición de la estructura, según lo indicado en la Tabla 4.3. En función del nivel de riesgo de la RAS y el tipo de estructura a construir, se debe definir el nivel de prevención requerido, según lo indicado en la Tabla 4.4.

Tabla 4.3 Determinación del grado de reactividad alcalina del agregado (IRAM 1512, 2013)

Grado de reactividad alcalina del agregado	Expansión del hormigón utilizando la metodología y técnica de la IRAM 1700 (%)		Expansión del mortero a 16 d en el ensayo IRAM 1674 ^(*) (%)
	A 52 semanas en el ensayo tradicional (38 °C)	A 13 semanas en el método acelerado (60 °C) ^(*)	
No reactivo	≤ 0,04	≤0,04	≤ 0,10
Moderadamente reactivo	> 0,04 a 0,12	(*)	(*)
Altamente reactivo	> 0,12	> 0,04	> 0,10

(*) Los métodos de ensayo de las normas IRAM 1674 (1997) e IRAM 1700 (2013) (acelerado) no son adecuados para distinguir entre agregados de moderada y elevada reactividad. Por esta razón, en ausencia de datos del ensayo utilizando la metodología y técnica de la norma IRAM 1700 (2013) (tradicional), los agregados que producen expansiones iguales o mayores que 0,10% en la norma IRAM 1674 (1997) o de 0,04% en la norma IRAM 1700 (2013) (acelerado), se consideran altamente reactivos.

Tabla 4.4 Determinación del nivel de riesgo de RAS (IRAM 1512, 2013)

Dimensión del elemento estructural y ambiente que lo rodea	Grado de reactividad alcalina del agregado		
	No reactivo	Moderadamente reactivo	Altamente reactivo
No masivo y seco	1	1	2
Masivo y seco	1	2	3
Hormigón expuesto al aire húmedo, enterrado o sumergido	1	3	4

En los elementos masivos, en contacto con ambientes secos, el riesgo de RAS existe debido a que la humedad necesaria para la reacción es provista por la humedad interna del hormigón. Un ambiente se considera seco cuando el valor medio anual del porcentaje de humedad relativa ambiente es menor que 60%.

Un elemento de hormigón, no masivo, inmerso continuamente en agua de mar no presenta un riesgo de RAS mayor que el de un elemento similar expuesto al aire húmedo, enterrado en el suelo o sumergido en aguas no salobres.

4.2.4 Niveles de prevención

Por último, la norma clasifica las estructuras en función del grado de severidad de las consecuencias estructurales, económicas o ambientales derivadas de los efectos nocivos de la RAS (Tabla 4.5) y determina el nivel de prevención requerido para el control de la RAS (Tabla 4.6).

Tabla 4.5 Clasificación de la estructura en función del grado de severidad de las consecuencias de la RAS (IRAM 1512, 2013)

Categoría de la estructura	Riesgo asociado	Ejemplos ¹⁾
S1	Bajo	a) Elementos temporarios (vida útil en servicio requerida menor o igual a 5 años); b) Elementos de fácil reemplazo.
S2	Normal	La mayor parte de las construcciones y estructuras de ingeniería civil con vida útil en servicio prevista entre 5 años y 75 años.
S3	Elevado	Hormigones de alto desempeño o estructuras altamente críticas con vida útil en servicio prevista mayor que 75 años o para las cuales una reparación importante es imposible o muy costosa. Por ejemplo: a) instalaciones nucleares; b) presas; c) túneles; d) puentes o viaductos importantes; e) estructuras de contención de productos peligrosos.
¹⁾ Si bien es responsabilidad de la autoridad responsable de la estructura, definir, en cooperación con el proyectista, el grado de severidad de las consecuencias estructurales, económicas y ambientales derivadas de los efectos nocivos de la RAS, el listado propuesto en esta tabla no debe considerarse taxativo y sólo busca asistir a aquéllos en la definición de la categoría de la estructura a construir.		

Tabla 4.6 Determinación del nivel de prevención requerido para el control de la RAS (IRAM 1512, 2013)

Nivel de riesgo de RAS	Categoría de la estructura		
	S ₁	S ₂	S ₃
1	A	A	A
2	A	B	C
3	A	C	D
4	B	D	E
A: se acepta el agregado sin necesidad de adoptar medidas de acción preventivas. Es necesario, sin embargo, asegurar mediante controles periódicos, que la reactividad del agregado extraído no ha cambiado. B, C, D, E: se acepta el agregado adoptando medidas de acción preventivas.			

La efectividad inhibidora de las AMA puede evaluarse mediante la aplicación de la metodología del ensayo de la norma IRAM 1674 (1997). La mezcla de mortero se realiza con el agregado fino bajo estudio, el cemento propuesto para la obra y la AMA en la proporción de obra, cuando corresponda.

Se considera que las medidas de prevención son efectivas para inhibir los efectos deletéreos de la RAS cuando el ensayo acelerado de la barra de mortero, da como resultado una expansión a los 16 días de edad, igual o menor que 0,10%.

No obstante, las recomendaciones efectuadas por la FHWA (Thomas et al., 2008) y la AASHTO (2010) sugieren que, antes de aplicar el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674), es necesario verificar que los resultados obtenidos mediante los métodos IRAM 1674 (1997) e IRAM 1700 (2013) sobre el agregado fino en cuestión, se ubican en la zona indicada en la Figura 4.1. En caso contrario, la evaluación de la efectividad inhibidora de la AMA (ya sea formando parte de un cemento o de una mezcla elaborada en planta) debe efectuarse mediante la aplicación del prisma de hormigón IRAM 1700 (2013).

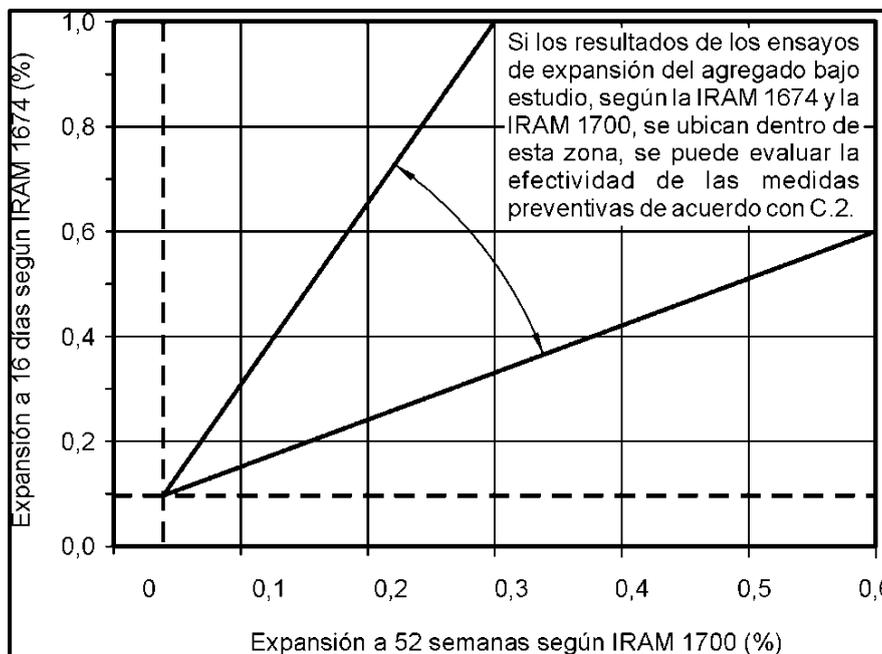


Figura 4.1 Expansión a 16 días según la norma IRAM 1674 vs. la expansión a 52 semanas según la norma IRAM 1700 (IRAM 1512, 2013)

4.3 Agregado grueso para hormigón de cemento (norma IRAM 1531)

Esta norma establece los requisitos que deben cumplir los agregados gruesos (retenido por el tamiz IRAM 4,75 mm), destinados a la elaboración de hormigones de cemento. Comprende los agregados gruesos procedentes de depósitos naturales, producto de la desintegración natural, o de la trituración y la clasificación granulométrica de rocas; la escoria de alto horno; y los agregados gruesos reciclados obtenidos de la trituración y la clasificación de residuos de hormigón.

Al igual que la norma IRAM 1512 (2013) para agregados finos, esta norma establece el máximo permitido sobre sustancias nocivas (Tabla 1 de IRAM 1531, 2022). En cambio, no establece límites máximos para componentes potencialmente reactivos frente a la RAS.

En relación a las sustancias reactivas, la norma considera que el agregado utilizado en hormigones masivos en determinadas condiciones (contacto con agua, suelos húmedos o atmósferas con humedad relativa mayor que 60%), no producirá expansiones o deterioros, como consecuencia de la reacción álcali agregado (RAA), siempre y cuando se disponga de antecedentes de obras en servicio que no tengan evidencias de expansión u otros daños, o ambos, asociados a dicha patología.

4.3.1 Criterios de evaluación para estructuras afectadas por la RAS

Para su evaluación, se deben seleccionar preferentemente estructuras de *“similar tipología estructural que las previstas a construir”*. Dicha selección debe estar sujeta a los criterios especificados en la IRAM 1874-2 (2004). Es fundamental constatar que el deterioro sufrido por las estructuras seleccionadas, fueron provocados por la patología analizada. Si existen varias estructuras a analizar, debe prevalecer en el criterio de selección la condición más desfavorable desde el punto de vista de la RAA (estructuras con mayor cantidad de años en servicio, en condiciones de alta humedad, con altos contenidos de cemento, con cementos de alto contenido de álcalis y sin adiciones minerales activas).

En el caso de que la evaluación de estructuras en servicio no sea posible o no se cuente con antecedentes referidos a la reactividad alcalina potencial del agregado grueso, éste debe ser evaluado a partir de diagrama de flujo que se muestra en la Figura 4.2, que indefectiblemente comenzará con el examen petrográfico (IRAM 1649, 2008).

4.3.2 Identificación de sustancias potencialmente reactivas y otras sustancias perjudiciales en agregados gruesos

El agregado debe ser evaluado mediante el examen petrográfico, según la IRAM 1649 (2008), a fin de identificar los componentes potencialmente reactivos presentes en el mismo. A partir de allí, se debe definir el ensayo físico acorde (barra de mortero o prisma de hormigón), para determinar los valores más confiables de expansión y verificar si estos sobrepasan los límites establecidos en cada caso.

El examen petrográfico es el primer método a aplicar en la caracterización del agregado por su composición y textura mineralógica, en cuanto a la reacción álcali-agregado, aportando información acerca de la composición de un agregado incluyendo la identificación y la determinación de las cantidades aproximadas de las sustancias reactivas y perjudiciales. Además, permite determinar los métodos de ensayo más convenientes para estudiar el comportamiento del agregado y contribuye a interpretar los resultados obtenidos en los ensayos físicos. La metodología para la identificación y la cuantificación de sustancias potencialmente reactivas y perjudiciales se describe en la norma IRAM 1649 (2008).

En la norma, se describen constituyentes silíceos reactivos (Tabla 4.7) y tipos de rocas álcali-reativas (Tabla 4.8). La información indicada surge de la recopilación aportada por varios países para detectar los constituyentes capaces de producir la reacción *álcali-sílice* o la reacción *álcali-carbonato*.

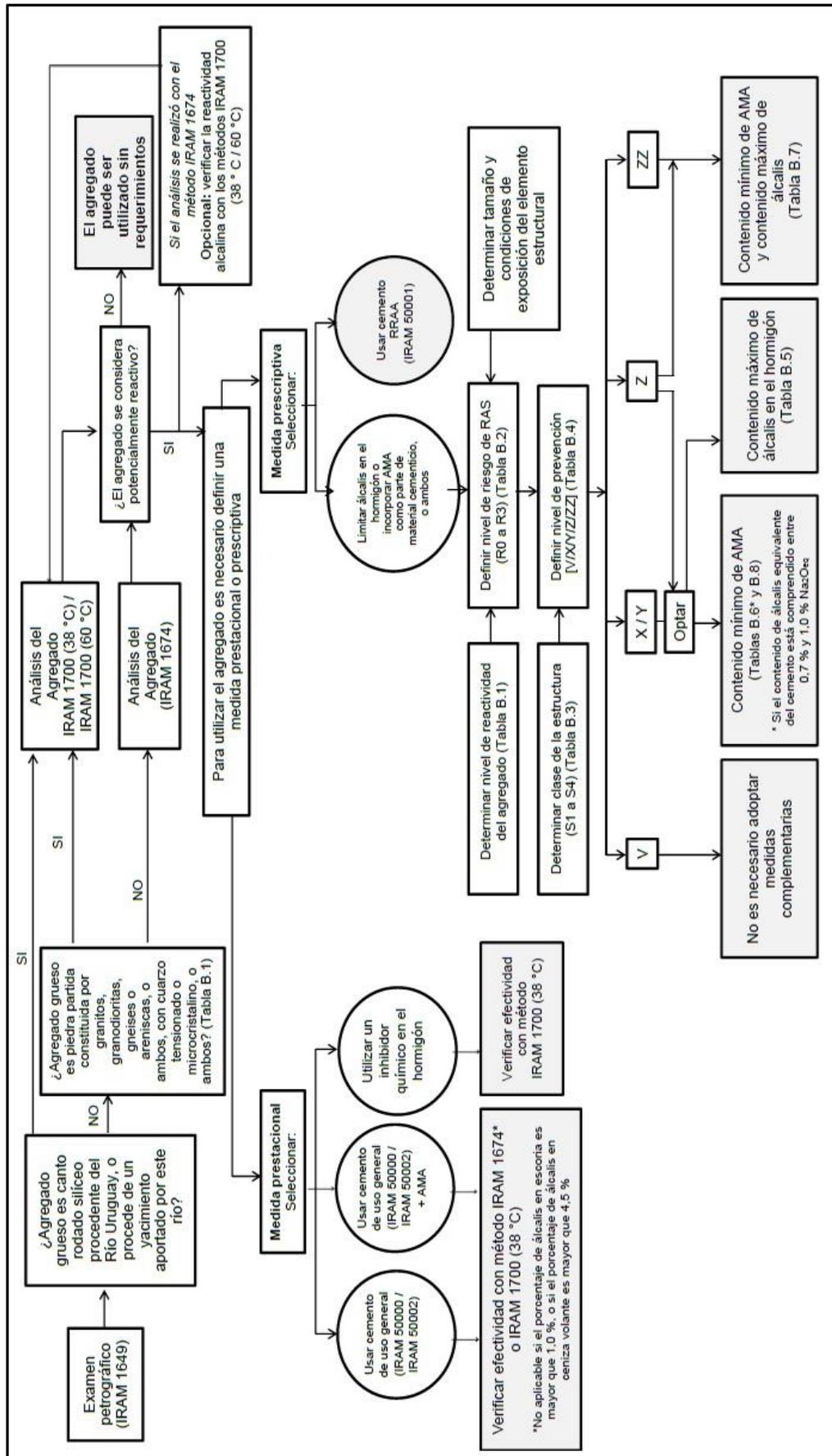


Figura 4.2 Diagrama de flujo para caracterización del agregado (IRAM 1531, 2022)

Tabla 4.7 Constituyentes silíceos potencialmente reactivos frente a la RAS (norma IRAM 1531, 2022)

Tipo de material	Reacción frente a los álcalis
Calcedonia	Reactivo, posiblemente por su fino tamaño cristalino
Cristobalita	Reactivo, debido a su <i>meta-estabilidad</i> térmica y a su pequeño tamaño cristalino
Ópalo (sílice amorfa)	Altamente reactivo, por su pobre arreglo estructural y su pequeño tamaño cristalino
Cuarzo (sílice cristalina)	Puede ser reactivo cuando se presenta <i>deformado-tensionado</i> o en un tamaño de grano muy pequeño, o ambos
Vidrio (volcánico natural y artificial)	Tanto el vidrio volcánico amorfo como el desvitrificado son reactivos. La tridimita o cristobalita, o ambas, podrían estar presentes cuando se desvitrifica. El vidrio volcánico alterado o parcialmente desvitrificado o hidratado es especialmente deletéreo
Granos y subgranos	La presencia de subgranos, sobre todo de cuarzo, es importante para determinar la reactividad de un agregado
Tridimita	Altamente reactivo debido a su <i>meta-estabilidad</i> y pequeño tamaño cristalino
NOTA. Información extraída de RILEM AAR-1.1	

La detección de otras sustancias perjudiciales y su cuantificación es relevante para el usuario del agregado en cuanto a evitar efectos indeseables en el hormigón. Entre las sustancias perjudiciales pueden indicarse: micas (como componente principal de la partícula); piritita o pirrotina; pizarras o lutitas; esmectitas; material carbonoso.

Cuando del examen petrográfico surja que el agregado grueso presenta componentes cuyo origen es del Río Uruguay o rocas que en su composición presentan cuarzo tensionado o microcristalino, su reactividad deberá comprobarse por alguno de los ensayos establecidos en la norma IRAM 1700 (convencional a 38° C y 60° C).

En cambio, si se determina la existencia de otros componentes reactivos (ver tabla 4.7), no pertenecientes a los grupos mencionados, se podrá comprobar su potencial reactividad mediante el método establecido en la norma IRAM 1674 (1997).

A partir de las verificaciones expuestas anteriormente, si el agregado es calificado como no reactivo, puede ser utilizado sin restricciones bajo los criterios de la RAS.

4.3.3 Utilización de agregados reactivos

Si se determina que el agregado resulta potencialmente reactivo, su utilización, quedará supeditada al cumplimiento de las medidas preventivas (prescriptivas, prestacionales y de prevención) aportadas en la norma en cuestión (similar a lo establecido en la norma IRAM 1512, 2013).

Lo que sigue, es una serie de pasos que permitirán tomar la mejor decisión para la prevención de la patología. Así, según el ensayo realizado y el resultado de expansión, se determinará la Clase de reactividad (Tabla 4.9). Posteriormente se debe definir el nivel de riesgo de RAS, de acuerdo a las condiciones de exposición de la estructura, según lo indicado en la Tabla 4.8. En función del nivel de riesgo de RAS y la clase de estructura a construir (Tablas 4.10 y 4.11), se determinará el **nivel de prevención** requerido (Tabla 4.12).

La evaluación de la efectividad inhibidora de un cemento, de la mezcla de un cemento con una adición mineral activa (AMA) o de un aditivo químico se realiza de manera similar a lo detallado en la norma IRAM 1512 (2013).

4.4 Examen petrográfico (IRAM 1649)

En este trabajo de Tesis, los estudios petrográficos sobre las pilas de acopio, se realizaron de acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 1649 (2008) considerando los requisitos de las normas IRAM 1512 (2013) y 1531 (2022) para agregados finos y gruesos respectivamente. A continuación, se describen los procedimientos utilizados.

Tabla 4.9 Determinación del grado de reactividad alcalina del agregado (IRAM 1531, 2022)

Clase de reactividad del agregado	Nivel de reactividad del agregado	Método de ensayo		
		IRAM 1674	IRAM 1700 (60 °C)	IRAM 1700 (38 °C)
		Expansión (E) del mortero a 16 días (%) ^{a)}	Expansión (E) del hormigón a 13 semanas (%)	Expansión (E) del hormigón a 52 semanas (%)
R0	Inocuo	$E \leq 0,10$	$E \leq 0,04 / 0,08$ ^{b)}	$E \leq 0,04$
R1	Moderadamente reactivo	$0,10 < E \leq 0,30$	$0,04 / 0,08$ ^{b)} $< E \leq 0,12$	$0,04 < E \leq 0,12$
R2	Altamente reactivo	$0,30 < E \leq 0,45$	$0,12 < E \leq 0,24$	$0,12 < E \leq 0,24$
R3	Extremadamente reactivo	$E > 0,45$	$E > 0,24$	$E > 0,24$

a) Existen referencias bibliográficas que indican que ciertos agregados, a pesar de mostrar un comportamiento deletéreo en servicio o tener una expansión mayor que 0,04 % en un año, al ser ensayado según la IRAM 1700 (38 °C), no pueden ser detectados mediante el ensayo de la IRAM 1674, debido a la reducida expansión obtenida con este método. Dentro de este grupo de agregados se encuentran algunos cantos rodados silíceos del río Uruguay y agregados ígneos, metamórficos o sedimentarios (granitos, granodioritas, gneises, areniscas) que contienen cierta variedad de cuarzo reactivo (cuarzo fuertemente tensionado, cuarzo microfracturado o cuarzo microcristalino, o todos ellos). Por este motivo, estos tipos de agregados deben ser evaluados mediante el método de ensayo del prisma de hormigón IRAM 1700 (38 °C o 60 °C, o ambos).

b) Para agregados cuya reactividad alcalina potencial puede ser atribuida exclusivamente a alguna variedad de cuarzo, se debe aplicar el límite de 0,08 %. Para el resto de los agregados que contengan o no, cualquiera de los componentes potencialmente reactivos tales como dolomita, calcedonia, tridimita, cristobalita, ópalo o vidrio volcánico, se debe aplicar el límite de 0,04 %.

Tabla 4.10 Determinación del nivel de riesgo de RAS (IRAM 1531, 2022)

Tamaño y condiciones de exposición del elemento estructural	Reactividad del agregado			
	R0	R1	R2	R3
No masivo y seco ^{1), 2)}	1	1	2	3
Masivo y seco ^{1), 2)}	1	2	3	4
Hormigón expuesto al aire húmedo, enterrado o sumergido ³⁾	1	3	4	5

1) Se considera elemento masivo cuando posee una dimensión mínima mayor que 1,0 m.

2) Se considera ambiente seco cuando la humedad relativa ambiente promedio es menor que 60%.

3) Un elemento de hormigón no masivo, seco e inmerso continuamente en agua de mar presenta un riesgo de RAS menor que el de un elemento similar expuesto al aire húmedo, enterrado en el suelo o sumergido en aguas no salobres. No deben emplearse agregados potencialmente reactivos en hormigones expuestos a acetatos, formatos o hidróxidos alcalinos, con excepción de que se demuestre que existen métodos efectivos para el control de la RAS.

Tabla 4.11 Clasificación de la estructura en función del grado de severidad de las consecuencias estructurales, económicas o ambientales derivadas de los efectos nocivos de la RAS (IRAM 1531,2022)

Clase de estructura	Consecuencias de la RAS sobre la seguridad, economía o el ambiente	Grado de aceptación del deterioro provocado por la RAS	Ejemplos
S1	Despreciables	Algún deterioro puede ser tolerado	• Elementos no estructurales de edificios
			• Elementos no expuestos a la humedad
			• Estructuras temporarias (vida útil < 5 años)
S2	Moderadas (si el daño es importante)	Un riesgo moderado de RAS es aceptable	• Veredas, cordones y cunetas
			• Estructuras con vida útil en servicio < 40 años
S3	Considerables (si los daños son pequeños)	Un riesgo mínimo de RAS es aceptable	• Pavimentos
			• Elementos de fundación, muros de contención
			• Alcantarillas, barreras de seguridad (“New Jersey”)
			• Caminos rurales, de bajo tránsito

Tabla 4.12 Determinación del nivel de prevención requerido para el control de la RAS (IRAM 1531, 2022)

Riesgo de RAS	Clasificación de la estructura			
	S1	S2	S3	S4
1	V	V	V	V
2	V	V	W	X
3	V	W	X	Y
4	W	X	Y	Z
5	X	Y	Z	ZZ

4.4.1 Petrografía de canto rodado

Se extrajo según lo indicado por norma, la cantidad de material necesario para el análisis. La muestra debe ser tamizada, según lo establecido en la Tabla 4.13 hasta obtener 500 partículas de cada fracción por cuarteo. El material retenido sobre cada tamiz debe ser examinado y sus constituyentes identificados y contados usando lupa binocular. Cuando la identificación se hace dificultosa se debe complementar con métodos como rayado y tratamiento ácido. Solo en caso de no poder identificar los componentes o si se sospecha que contienen sustancias que pueden reaccionar en el hormigón se puede utilizar el microscopio petrográfico.

Tabla 4.13 Muestreo mínimo para depósitos de arenas y gravas (IRAM 1649, 2008)

Tamaño de abertura nominal del tamiz	Cantidad	
	Kg	Trozos
Mayores de 150 mm		150 ¹⁾
75 mm a 150 mm		300 ¹⁾
37,5 mm a 75 mm	180	
19 mm a 37,5 mm	90	
4,75 mm a 19 mm	45	
Menores a 4,75 mm ²⁾	25	
¹⁾ Un trozo de cada tipo aparente de roca, como mínimo		
²⁾ Agregado fino		

Se debe establecer si las partículas presentan recubrimiento. En caso afirmativo determinar si los componentes pueden ser perjudiciales para el hormigón (ópalo, sulfato de calcio, sales solubles, materia orgánica, etc.). También se debe establecer con qué firmeza están adheridos a las partículas.

Se deben realizar tablas mostrando la composición de la muestra por fracción y el promedio ponderado de la composición. En primer lugar, se obtienen los porcentajes por pesada de la fracción sobre tamiz en el total de la muestra de la clasificación determinada. Luego se calculan los porcentajes de cada constituyente en el total de la muestra en ese tamaño (% de los constituyentes ponderados en la fracción de tamiz), multiplicando el porcentaje del constituyente en la fracción de tamiz por el porcentaje de la fracción sobre tamiz en toda la muestra. Para obtener el porcentaje ponderado de cada constituyente en el total de la muestra se suman los componentes ponderados de cada constituyente en cada fracción de tamiz.

El material se tamizó en seco utilizando un juego de tamices de 1" = 25,4 mm; ¾" = 19,1 mm; ½" = 12,5 mm; ⅜" = 9,5 mm, y 4,75 mm (IRAM 1501, 1978). Sobre cada fracción granulométrica retenida se contaron 500 partículas, clasificándolas según la litología y grado de alteración o estado físico de la roca. De forma complementaria se llevó un registro de las morfologías de las partículas (irregulares planares, equidimensionales y redondeadas).

4.4.2 Petrografía de arenas

El examen es similar al del canto rodado con las modificaciones necesarias por las diferencias en el tamaño de las partículas.

Se seleccionaron muestras de arena representativas y se las fraccionó utilizando un juego de tamices ASTM N° 10 (2 mm), N°18 (1 mm), N°30 (600 μm), N°60 (250 μm) y N°100 (150 μm). De cada fracción se seleccionaron 500 partículas, generándose grupos de rocas y componentes reactivos.

A fin de caracterizar las rocas volcánicas presentes en las arenas estudiadas, se realizaron pastillas con las fracciones más abundantes, impregnadas con resina epoxi, y, se confeccionaron secciones delgadas para su análisis mediante microscopía óptica.

4.4.3 Petrografía de piedra partida

Se deben separar los diferentes tipos de roca mediante examen visual. Si son fácilmente identificables en muestra de mano no es necesaria ninguna otra identificación. Las rocas de grano fino a muy fino que no puedan identificarse macroscópicamente o que puedan contener componentes que puedan causar deterioro en el hormigón deben ser examinadas con lupa binocular o con microscopio petrográfico.

En cada tipo de roca identificado se debe registrar la forma, textura superficial, tamaño de grano, estructura interna (porosidad, empaquetamiento de los granos, y sustancias cementantes que los unen), color, composición mineralógica, heterogeneidades, condiciones físicas, recubrimientos e incrustaciones y presencia de componentes que causen reacciones perjudiciales en el hormigón.

4.5 Método acelerado de la barra de mortero (Norma IRAM 1674)

Tanto para los agregados finos, como para los agregados gruesos se realizó la misma metodología para la confección de las barras de mortero para la evaluación de la expansión por este método. Así, se confeccionaron barras de mortero de 25 mm x 25 mm x 300 mm, con una parte de cemento Pórtland normal (CPN) y 2,25 partes de

agregado (previamente triturado, tamizado y lavado), y una relación agua/cemento de 0,47, y se curaron a temperatura ambiente durante un día. Luego se desmoldaron y se tomó una primera lectura de referencia. Se sumergieron en agua a 80 °C (± 2 °C) en un recipiente de almacenamiento durante 24 horas y se registró la lectura cero (0). Finalmente, se sumergieron en una solución de NaOH 1N y se colocaron en una estufa a 80 °C (± 2 °C), tomando lecturas periódicas hasta 16 días (14 días en solución de NaOH). Las mediciones se continuaron hasta los 28 días para evaluar la evolución de las curvas de expansión.

Según el criterio adoptado por la norma IRAM 1531 (2022), el agregado se considera potencialmente reactivo si la expansión supera el límite de 0,1% a los 16 días, aunque se deben tomar precauciones con algunas rocas reactivas que contienen cuarzo microcristalino o fuertemente tensionado y que no son detectadas por este método, como se mencionó previamente (punto 4.3.2). Cuando el agregado es considerado potencialmente reactivo por este ensayo, su reactividad debe ser comprobada con el método del prisma de hormigón acelerado o convencional (IRAM 1700, 2013). Si dicho agregado es considerado potencialmente reactivo por el método del prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700 a 60 °C), su reactividad alcalina debe ser comprobada con el método tradicional del prisma de hormigón (IRAM 1700 a 38 °C). En general se considera que el resultado de este último prevalece por sobre el resto de los métodos que evalúan la reactividad alcalina potencial de los agregados.

Este criterio, basado en experiencias y antecedentes de aplicación, fue tomado de la norma IRAM 1531, la cual fue actualizada en el año 2022. Próximamente, se espera una actualización de la norma IRAM 1512 (2013), la cual seguirá lineamientos similares.

4.6 Método convencional del prisma de hormigón (IRAM 1700)

Se confeccionaron prismas de 75 mm x 75 mm x 275 mm. Para evaluar los agregados gruesos (canto rodado y piedra partida) se utilizó una arena no reactiva (conocida comercialmente como “arena oriental”) y, para evaluar los agregados finos, se utilizó una Basalto olivínico (expansión a las 52 semanas IRAM 1700 = 0,017%) no reactiva

proveniente de provincia de Córdoba (Falcone, 2013), en ambos casos con una relación 40/60. Se utilizaron 420 kg/m³ de CPN con una relación agua/cemento entre 0,42 y 0,45 según los requisitos de trabajabilidad y la alcalinidad se ajustó hasta 5,25 kg de Na₂O/m³ en el hormigón. Se colocaron los prismas en recipientes de almacenamiento a 23 °C durante 24 horas. Cumplido el tiempo se desmoldaron y se tomó la primera lectura de referencia. Luego se envolvieron en una tela de algodón saturada en agua cubierta con una lámina de polietileno, se colocaron en una bolsa de nylon con 5 ml de agua destilada y se cerraron herméticamente. Posteriormente, se colocaron en cámara húmeda a 38 °C (± 2 °C) durante 52 semanas (1 año), tomando lecturas periódicas a 1, 2, 4, 8, 13, 18, 26 y 39 semanas, hasta cumplir el tiempo estipulado. En cada medición, los contenedores se retiraron 24 horas antes para estabilizar la temperatura de lectura a 20 °C (± 2 °C). De acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 1531 (2022), si la expansión no supera el límite de 0,04% al cabo de un año, los agregados son considerados no reactivos y pueden ser usados sin ninguna restricción, a menos que estructuras existentes muestren un comportamiento reactivo de estos agregados. Si presentan expansiones mayores a 0,04%, será necesario adoptar medidas preventivas para evitar el desarrollo de la RAS.

4.7 Método acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700)

El procedimiento es similar al descrito en el punto anterior. Se diferencia en que se eleva la temperatura de 38 °C a 60 °C (± 2 °C) y se toman lecturas periódicas a 5, 8, 10, 13, 15 y 20 semanas. Las probetas se mantuvieron por 24 horas a 20 °C con una humedad relativa mayor al 90% (HR > 90%), se sumergieron en agua durante 30 minutos a 20 °C y se realizó una lectura inicial. Luego se colocaron en un contenedor con 35 mm de agua en el fondo, en una cámara a 60 °C y 100% de humedad relativa. Se realizaron lecturas periódicas de las longitudes de los prismas, previamente enfriados a 20 °C y 100% de humedad. Se utilizaron 420 kg/m³ de CPN con un contenido total de álcalis de 5,25 kg/m³ en el hormigón.

Se considera que el agregado es no reactivo si la expansión no supera el límite de 0,04% a las 13 semanas para agregados de reacción rápida y 0,08% a las 13 semanas para los de reacción lenta.

4.8 Microscopía óptica

Para los estudios por microscopía óptica de polarización, se utilizaron: un estereomicroscopio trinocular Leica S9i y un microscopio óptico de polarización Leica DM 750 P.

Para la elaboración de las secciones delgadas las muestras se impregnaron con resina epoxi LY DICAST a 50 °C al vacío, antes de cortar con un disco de diamante. Se pulieron con abrasivos de carburo de silicio (#320, #600 y #1000) usando agua como lubricante. Luego se pegaron en portaobjetos de vidrio de 27 mm x 46 mm x 1,2 mm con la misma resina epoxi y se cortaron láminas de 1 mm con disco de banda diamantada a bajas revoluciones para su desbaste, hasta lograr un espesor de 50 μm . Finalmente, se pulieron con abrasivos #600 y #1000 hasta un espesor de 30 μm . Se cubrieron con un vidrio de 40 mm x 20 mm y 0,1 mm de espesor, excepto en aquellos casos en los que se utilizó la sección delgada para estudios por microanálisis.

A fin de estimar el grado de deformación interna de los cristales de cuarzo, se midió el ángulo de extinción ondulante (AEO), siguiendo el procedimiento propuesto por Dolar Mantuani (1981a y 1981b). Se trata del ángulo que se forma entre la primera y la última aparición de la banda de extinción en un cristal de cuarzo al girar la platina en un microscopio óptico de polarización (Grattan-Bellew 2001). Este valor es una medida indirecta de la cantidad de dislocaciones que presenta internamente el cristal, por lo que la magnitud del AEO refleja en cierta forma el grado de deformación interna. Sin embargo, actualmente no se utiliza como una herramienta definitiva, sino como un dato complementario junto con otras características microestructurales del cuarzo, ya que existen numerosas variables que influyen en su determinación (Tiecher et al. 2017, 2018).

4.9 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se utilizó un microscopio LEO EVO 40-XVP en muestras metalizadas con oro o carbono a 10 kV. Con las primeras se trabajó con electrones secundarios para observar la morfología de los productos de reacción y determinar la composición cualitativa. Sobre

las muestras metalizadas con carbono se realizaron análisis semicuantitativos con espectrómetro EDS en imágenes de electrones retrodifundidos sobre secciones delgadas pulidas a espejo (tamaño de abrasivo de hasta 1 μm) con un microscopio Carl Zeiss FE (Field Emission) -Sigma MEB-EDS de alta resolución, trabajando a 8 kV y 15 kV para imágenes y microanálisis (haz desenfocado), respectivamente. Se usaron los siguientes estándares: cuarzo (Si), Al (Al) metálico, Fe (Fe) metálico, Mg (Mg) metálico, BaF₂ (Ba), apatita (Ca), albita (Na), ortoclase (K), rutilo (Ti), rodonita (Mn), pirita (S), tugtupita (Cl) y apatita (P).

4.10 Microsonda de electrones

Se confeccionaron secciones delgadas pulidas a espejo ($\approx 30 \mu\text{m}$ de espesor) para realizar un análisis de la microtextura en imágenes de electrones retrodispersados y determinar su composición cuantitativa por medio de microsonda de electrones. Tanto la preparación como las condiciones de análisis se realizaron siguiendo las recomendaciones de Katayama (2010). Las muestras fueron impregnadas con resina epoxi de baja viscosidad para mejorar la coherencia de los hormigones. El desbaste se realizó con abrasivos (carburo de silicio) #60, #220, #320, #600 y #1000. Finalmente se pulieron a espejo en pulidora Rotopol-35 (Struers) con pastas diamantadas de 15 μm , 6 μm , 3 μm y 1 μm . Toda la preparación se realizó utilizando parafina líquida como lubricante para evitar la disolución de fases y lixiviación de álcalis.

Las secciones delgadas se metalizaron con carbono y se estudiaron en un microscopio JEOL JXA 8230 con tres detectores dispersores de longitud de onda (WDS) y un espectrómetro EDS. Se trabajó con haz desenfocado para minimizar la migración de álcalis y se analizaron primero el Na y K por este mismo motivo. Las condiciones de medición fueron 15 kV y 10 nA. Se utilizó un tiempo de conteo de 10 segundos en el pico y 5 segundos en el fondo a ambos lados del pico para cada elemento, a excepción del Na y K (5 y 2,5 segundos). Como estándares se utilizó albita (Na, Si, y Al), ortoclase (K), anortita (Ca), MgO (Mg), celestina (S), hematita (Fe), y sodalita (Cl). De forma complementaria se adquirieron mapas composicionales (Si, Ca, Na y K) utilizando un diámetro de haz de 4 μm y un tiempo de permanencia de 40 microsegundos por punto

respectivamente. Se efectuó corrección por efectos de matriz utilizando el algoritmo $\phi/(\rho z)$ ("phi-rho-z") considerando la presencia de H₂O en las fases analizadas.

4.11 Evaluación de la efectividad de una puzolana natural para inhibir la RAS

Se utilizó una brecha vítrea zeolitizada del sur de la provincia de Mendoza, cuya puzolanidad fue evaluada en trabajos realizados por Bonavetti et al. (2016 y 2020). La puzolana está constituida en forma predominante por vidrio volcánico (~70%). La zeolita es mordenita con cantidades muy subordinadas de clinoptilolita (~25%). El 5% restante corresponde a feldespatos, montmorillonita, ópalo, óxidos de hierro y sílice criptocristalina (Locati et al., 2020b). Por su composición química, Bonavetti et al. (2020) la clasificaron como puzolana clase N (ASTM C618, 2017). El material fue reducido en una trituradora de mandíbulas de laboratorio y luego se molió en un molino de bolas, utilizando cylpebs, con una relación aproximada de 1 kg de material por cada 10 kg de cylpebs. El tiempo de molienda fue de 6 hs, obteniéndose 11% de material retenido en el tamiz N° 325 (45 μ m). Antes de iniciar los ensayos, se consideró el criterio propuesto en la norma IRAM 1531 (2022) mencionado anteriormente (ver capítulo de Métodos).

Se realizaron estudios petrográficos sobre secciones delgadas una vez culminados los ensayos para evaluar la microtextura.

4.12 Índice de daño

Se determinó el índice de daño (Damage Rating Index - DRI), en estructuras de hormigón afectadas por la RAS. Este método semicuantitativo permite estimar el nivel de daño del hormigón, a partir del conteo de ciertas características de deterioro (principalmente fisuras), en áreas de 1 cm x 1 cm dibujadas sobre la superficie del hormigón pulido, trabajando bajo estereomicroscopio a una magnificación de 16x (Sanchez et al., 2015). Estas características luego se ponderan para balancear su importancia relativa y así obtener una valoración del daño general. Se adoptaron los valores de ponderación propuestos por Villeneuve y Fournier (2012). El método sugiere trabajar con una grilla mínima de 200 cm², luego se normaliza el resultado a 100 cm² y se obtiene un único valor para el DRI. Con fines prácticos, se mantuvieron las

siglas en inglés correspondientes a cada característica, tomadas del trabajo de Sanchez et al. (2015). Los testigos a estudiar se cortaron a la mitad con sierra diamantada a lo largo de su eje mayor. Luego se pulió una de las caras con abrasivos de carburo de silicio de diferente granulometría (#320, #400, #600 y #1000), utilizando agua como lubricante.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1 Introducción

Este capítulo, brinda información sobre la caracterización frente a la reacción álcali-sílice (RAS) de los materiales provenientes de las diferentes canteras estudiadas. En una primera instancia, se presentan los resultados de los análisis petrográficos efectuados sobre las muestras de agregados, describiendo los aspectos mineralógicos y texturales de cada tipo litológico, para luego definir los componentes potencialmente reactivos presentes. Es importante destacar que las descripciones fueron realizadas a partir de los agregados ya seleccionados y acopiados en la cantera.

Luego, se brinda información acerca de los resultados arrojados por los ensayos físicos normalizados (método acelerado de la barra de mortero y prismas de hormigón convencional y acelerado) y su relación con los límites establecidos por las normas correspondientes para cada tipo de agregado (grueso o fino).

5.2 Canteras de agregados de trituración

5.2.1 Petrografía

5.2.1.1 Cantera PIG

En muestras de mano su coloración varía de gris rosado a naranja. Su aspecto es masivo, presenta textura granoblástica, aunque por sectores se distinguen pequeños lineamientos asociados a procesos de depositación de las partículas, lo que indica un protolito de origen sedimentario que ha sufrido posteriormente procesos metamórficos. La roca se clasifica como cuarcita (Figura 5.1).

Vista al microscopio petrográfico, la roca está constituida mayormente por granos subredondeados de cuarzo, de bordes suturados y cementados por este mismo mineral. A ellos se asocian pequeños cristales de illita (dispuestos en venillas y entre los contactos de los granos de cuarzo) y caolinita en menor proporción. Se identificaron, además, minerales opacos y anfíboles intercalados entre los granos de cuarzo. El tamaño de los granos varía desde 2 mm hasta menos de 30 μm (microcristalino) (Figura 5.2).



Figura 5.1 Frente de la cantera PIG norte. Paquetes de cuarcitas

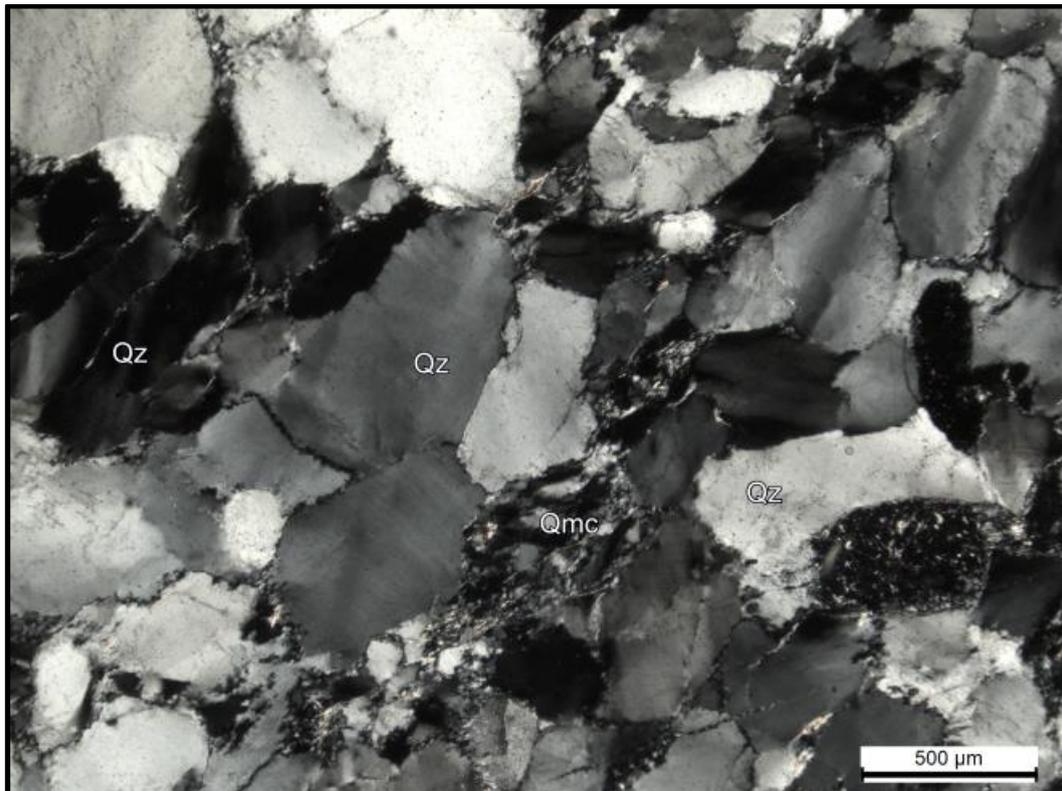


Figura 5.2 Fotomicrografía de una muestra representativa de la zona de explotación. Qz: cuarzo; Qmc: cuarzo microcristalino. Vista con nicoles cruzados

En la Figura 5.3a se muestra un detalle del contacto entre los granos de cuarzo de bordes suturados, y el cemento microcristalino principalmente silíceo. También se observa cuarzo microcristalino, con illita asociada (Figura 5.3b). El cuarzo presenta fuerte extinción ondulante (con un ángulo de extinción ondulante -AEO- promedio de 20°), granulación periférica, con orientación preferencial desarrollando una pobre foliación (Figura 5.3a). El tamaño del cuarzo microcristalino es de 30 μm en promedio y el contenido de granos menores a 62 μm supera el 8%. Los estudios petrográficos permiten reconocer abundante illita, orientada entre los granos de cuarzo, adoptando disposición planar coincidente con los lineamientos tectónicos, pequeña cantidad de caolinita dispuesta en nidos, agrupados en los espacios intergranulares y esporádicas venillas de illita. El contacto entre los granos es irregular, dando texturas tipo mortero.

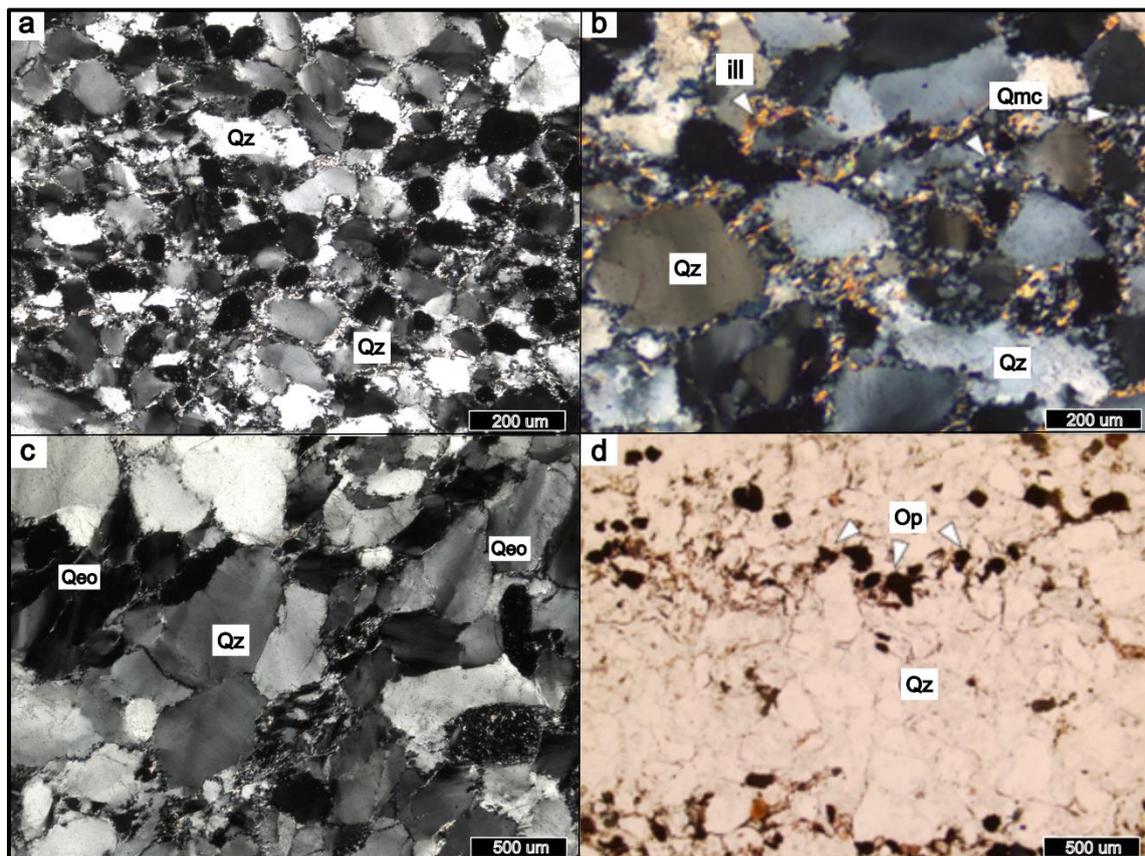


Figura 5.3 Fotomicrografías de la cuarcita de la Cantera PIG a) Textura de la roca: granos de cuarzo con contactos suturados; b) cuarzo microcristalino con tamaño promedio de 30 μm . Illita como mineral secundario; c) cuarzo con extinción ondulante y contacto suturado; d) minerales opacos entre granos de cuarzo; d). a) b) y c) visto con nicules cruzados; d) con luz paralela. Qmc: cuarzo microcristalino; ill: illita; Qz: cuarzo; Qeo: cuarzo con extinción ondulante; Op: minerales opacos

En la Figura 5.3d se observa (con luz paralela) la orientación en fajas discretas de los minerales opacos entre los granos de cuarzo. Esta orientación podría corresponder a la etapa de sedimentación, previa al proceso metamórfico.

5.2.1.2 Cantera PIR

La cantera se desarrolla en su tercer nivel de profundidad alcanzando los 45 metros desde la superficie. Se analizaron muestras de los 3 niveles y del sector oeste de la cantera, donde se evidencian signos de alteración.

La roca es un granito porfiroide con sectores diferenciados aplíticos y pegmatoideos (menos comunes). El cuerpo intrusivo presenta evidencias de cataclasis, fajas milonitizadas y un diaclasamiento importante, además de procesos de alteración superficial relacionados con el ambiente exógeno (Figura 5.4).



Figura 5.4 Segundo nivel de explotación, frente sur. Roca granítica de la cantera PIR

Macroscópicamente la roca es un granito de grano mediano a grueso. Su coloración varía de rojizo claro a gris verdoso según el predominio de los minerales que lo componen. Está constituida por feldespato potásico (30% - 40%), cuarzo (30% - 35%),

plagioclasa (20%-25%), con cantidades menores de micas (muscovita y en menor proporción biotita). Además, se identificaron minerales accesorios tales como fluorita, circón y apatito; y minerales de alteración como illita, calcita y caolinita. La textura es granular hipidiomórfica, destacándose la presencia de cristales subhedrales de plagioclasa, en general deformados, con intercrecimiento entre los cristales de feldespato potásico y cuarzo. Se observan escasos cristales de feldespato potásico y plagioclasa alterados a calcita +/- illita/caolinita.

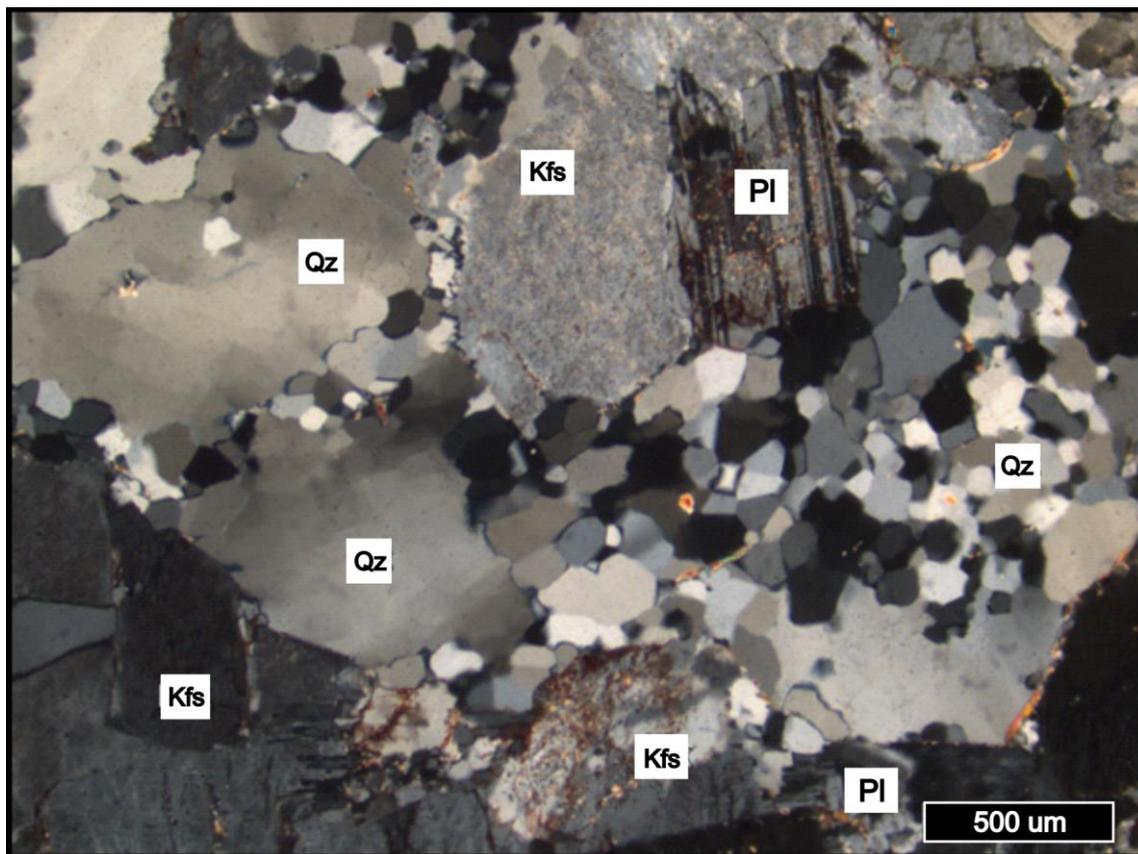


Figura 5.5 Fotomicrografía del granito de la cantera PIR. Se diferencian cristales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa de 0,5 a 1 mm, en contacto con sectores ricos en cuarzo poligonal de menor tamaño (< 0,25 mm). Los feldespatos se encuentran levemente alterados. Vista con nicols cruzados.
Qz: cuarzo; Kfs: feldespato potásico; Pl: plagioclasa

El feldespato potásico presenta buen desarrollo cristalino, con formas euhedrales a subhedrales de hasta varios milímetros y está parcialmente alterado a illita (Figura 5.6a). Las plagioclasas son subhedrales y muchas veces se encuentran alteradas a calcita (Figura 5.6b). Los feldespatos se presentan maclados, y son frecuentes las pertitas y mirmequitas. El cuarzo es anhedral a subhedral, de tamaño y contactos entre granos variables (Figura 5.6c). Gran parte de ellos, presentan extinción ondulante, con

AEO promedio de 13° y, por sectores, se observa desarrollo de bandas de deformación y subgranado incipiente. Además, se observaron cristales flexurados y cuarzo microcristalino (< 62 μm) con texturas en mortero, constituyendo este último menos del 3% (Figura 5.6d).

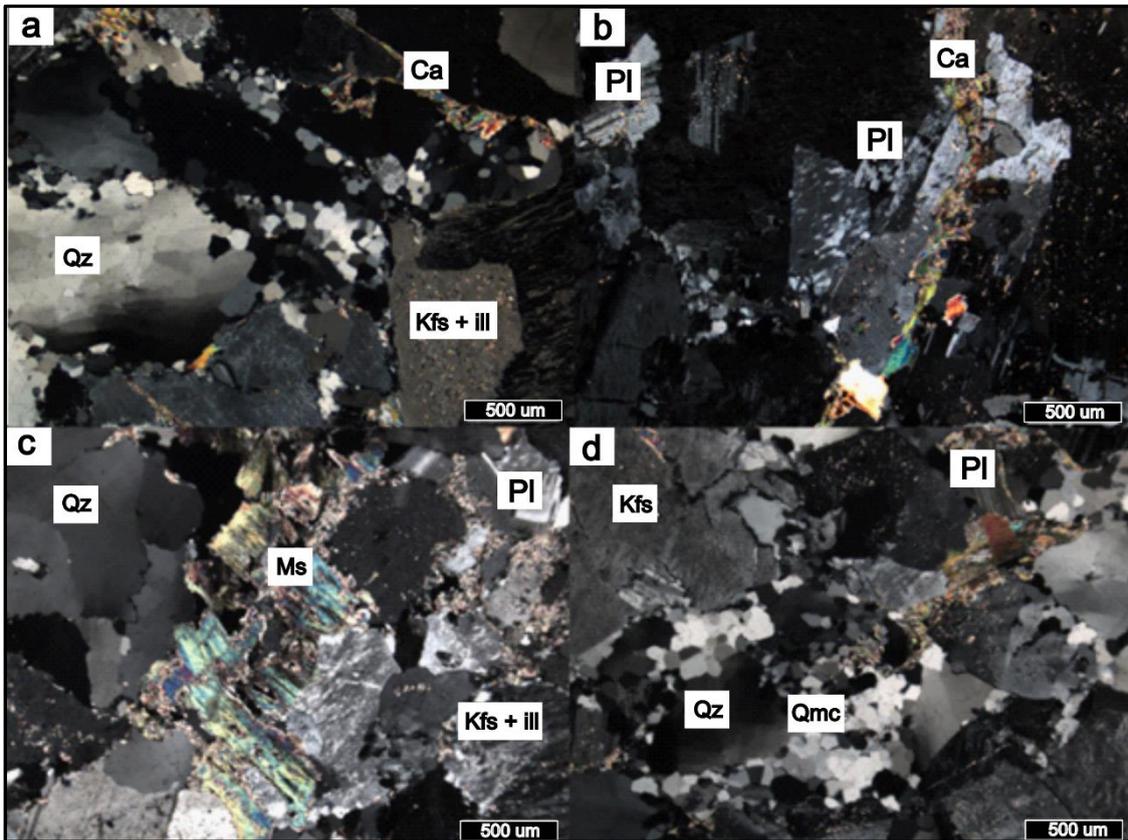


Figura 5.6 Fotomicrografías a) Textura del granito PIR donde se observan cristales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, con escasa calcita secundaria, y cristales poligonales de cuarzo intercristalino de menor tamaño; b) plagioclasa alterada a calcita; c) cristales de muscovita entre grandes cristales de cuarzo, feldespato y plagioclasa; d) cuarzo microcristalino. Qz: cuarzo; Kfs: feldespato potásico; Kfs+ill: feldespato potásico parcialmente alterado a illita; Pl: plagioclasa; Ca: calcita; Ms: muscovita; Qmc: cuarzo microcristalino

5.2.2 Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674)

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados del ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) para los agregados de las canteras PIG y PIR. El valor de expansión obtenido para la cantera PIG, supera el límite máximo de 0,10% a los 16 días, establecido en la norma IRAM 1531 (2022). El mismo alcanza el valor de 0,172% lo que lo califica como **moderadamente reactivo**, clase **R1** (Figura 5.7). Por su parte, la expansión medida para el agregado de la cantera PIR, está por debajo del límite

establecido en la norma antes mencionada (0,082%), por lo que según este ensayo se lo califica como no reactivo.

Tabla 5.1 Expansión medida en el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997)

Cantera	Expansión (%) a la edad de (días)							
	5	7	9	12	14	16	21	28
PIG	0,026	0,061	0,103	0,135	0,164	0,172	0,196	0,219
PIR	0,014	0,027	0,041	0,052	0,066	0,082	0,100	0,128

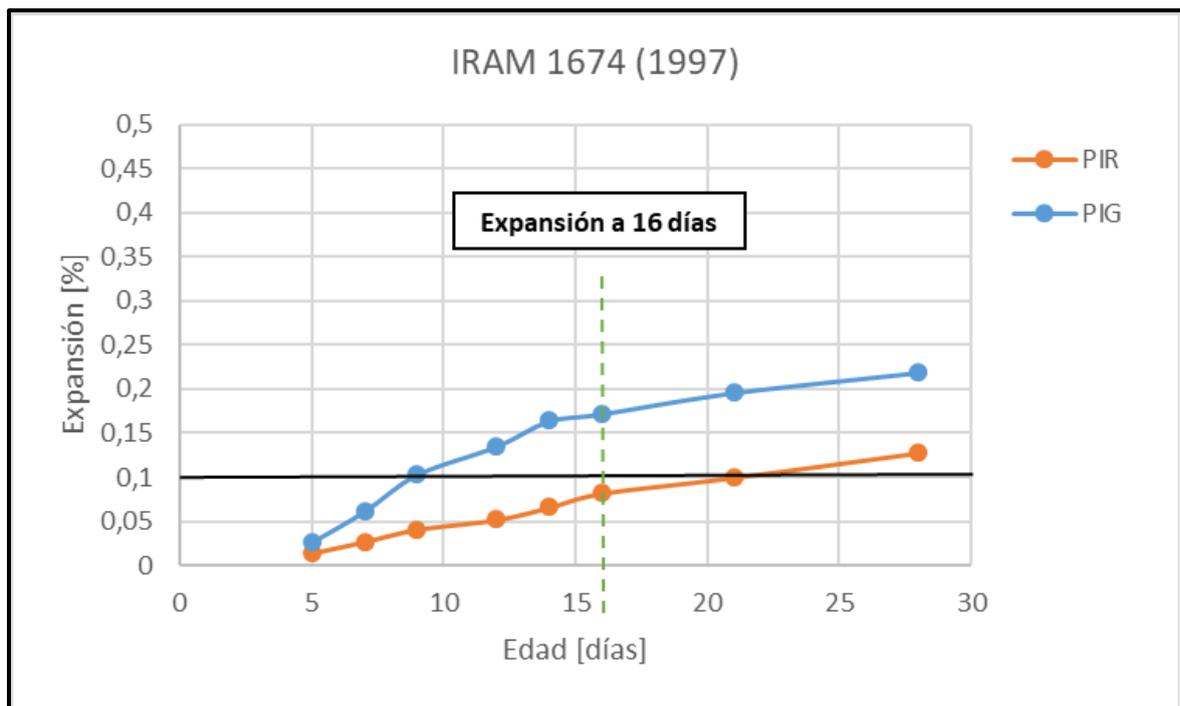


Figura 5.7 Resultados del ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997). La línea negra indica el límite máximo de expansión (0,10%) establecido en la norma IRAM 1531 (2022)

5.2.3 Método del prisma de hormigón (IRAM 1700)

5.2.3.1 Convencional a 38°C

En este ensayo, ninguno de los agregados de las canteras estudiadas supera el límite de 0,04% a las 52 semanas, establecido en la norma IRAM 1531 (2022) (Tabla 5.2 y Figura 5.8), por lo que corresponde calificarlos como inocuos.

Tabla 5.2 Expansión medida en el ensayo del prisma de hormigón convencional (IRAM 1700, 2013)

Cantera	Expansión (%) a la edad de (semanas)									
	1	2	4	8	13	18	26	39	45	52
PIG	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,010	0,014	0,020	0,029
PIR	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,006	0,008	0,008	0,015

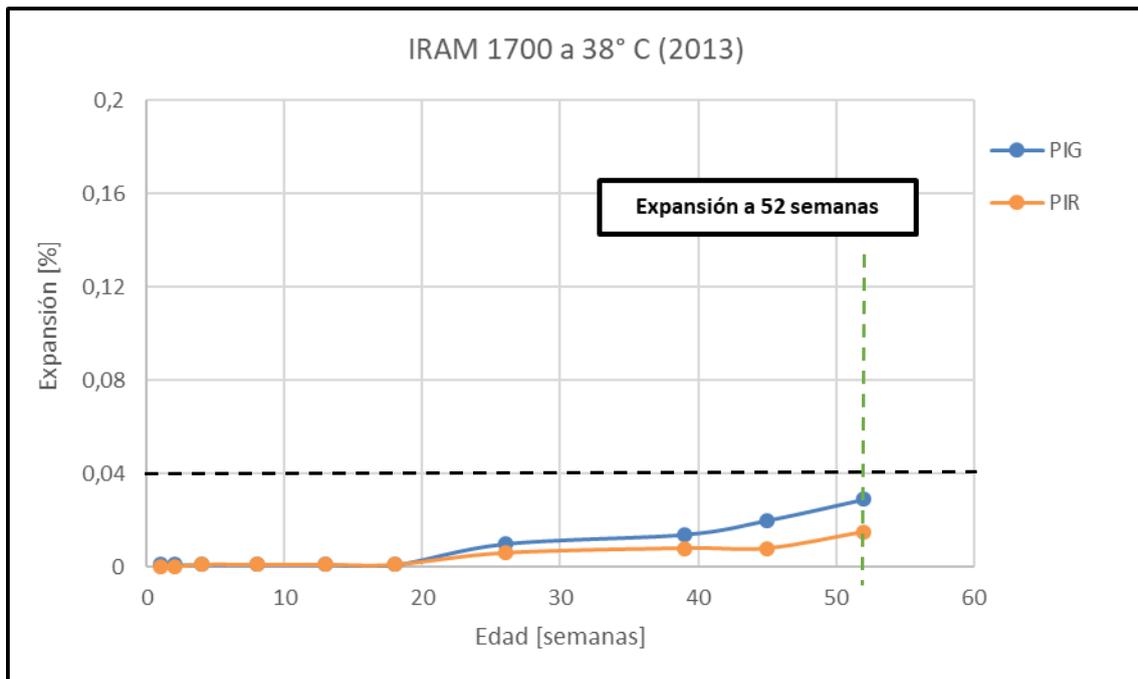


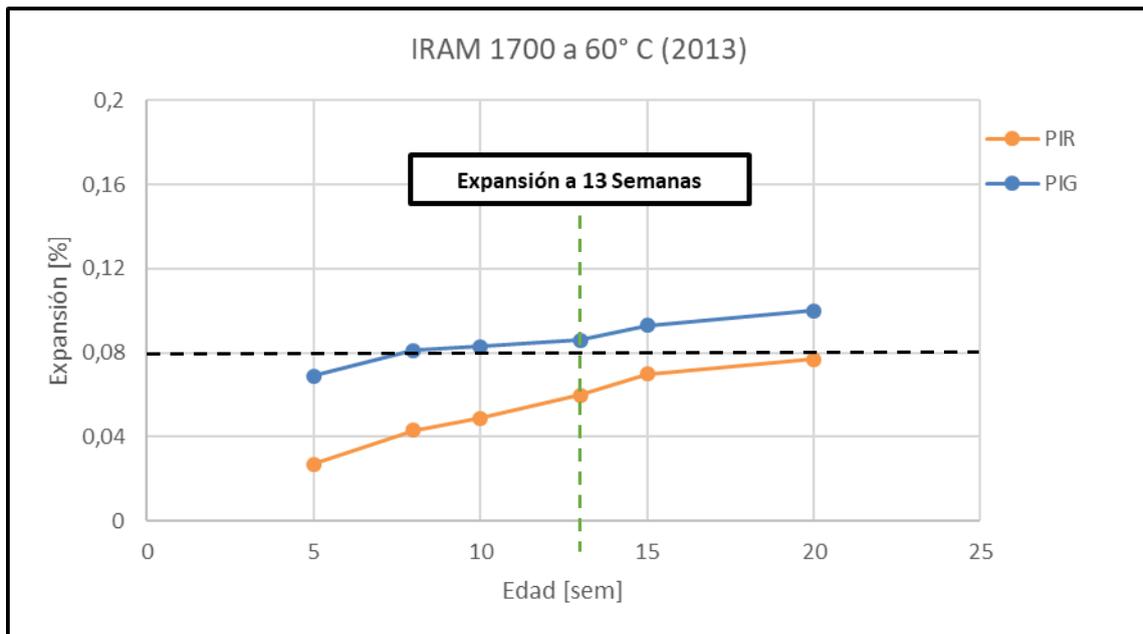
Figura 5.8 Resultados del ensayo del prisma de hormigón convencional curado a 38° C durante 52 semanas (IRAM 1700, 2013). La línea negra indica el límite máximo de expansión (0,04%) establecido en la norma IRAM 1531 (2022)

5.2.3.2 Acelerado a 60°

En la Tabla 5.3 y Figura 5.9 se muestran los resultados obtenidos en este ensayo. La expansión de los agregados de la cantera PIG supera el límite máximo de 0,08% a las 13 semanas (para agregados con componentes de reacción lenta), según lo establecido en la norma IRAM 1531 (2022). En función de la expansión alcanzada (0,086%) se califica como moderadamente reactivo. La expansión del agregado de la cantera PIR no supera el límite establecido por la norma IRAM 1531 (2022), por lo que se califica inocuo según este ensayo.

Tabla 5.3 Expansión medida en el ensayo acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013)

Cantera	Expansión (%) a la edad de (semanas)					
	5	8	10	13	15	20
PIG	0,069	0,081	0,083	0,086	0,093	0,100
PIR	0,027	0,043	0,049	0,060	0,070	0,077

**Figura 5.9** Resultados del ensayo acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013). La línea negra indica el límite máximo de expansión (0,08%) establecido en la norma IRAM 1531 (2022)

5.2.4 Petrografía de barras de mortero y prismas de hormigón. Cantera PIG

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos normalizados para las muestras de la cantera PIG, se realizaron estudios petrográficos sobre las barras de mortero y prismas de hormigón luego de cumplido el tiempo de ensayo. Se evaluaron macro y microscópicamente la textura, el desarrollo de microfisuras, coronas de reacción y desarrollo de productos de neoformación.

5.2.4.1 Barras de mortero

Sobre las barras de mortero post ensayo según norma IRAM 1674 (1997), se realizó una caracterización macro y microscópica.

Vistas con estereomicroscopio, las barras presentan fisuramiento tanto en la superficie (Figura 5.10a), como en el interior (Figura 5.10b). Las cavidades de aire accidental se

encuentran parcialmente rellenas con productos de neoformación. En la Figura 5.10b se muestra una imagen de un corte transversal al eje de la barra donde se destaca una microfisura rellena con productos de reacción.

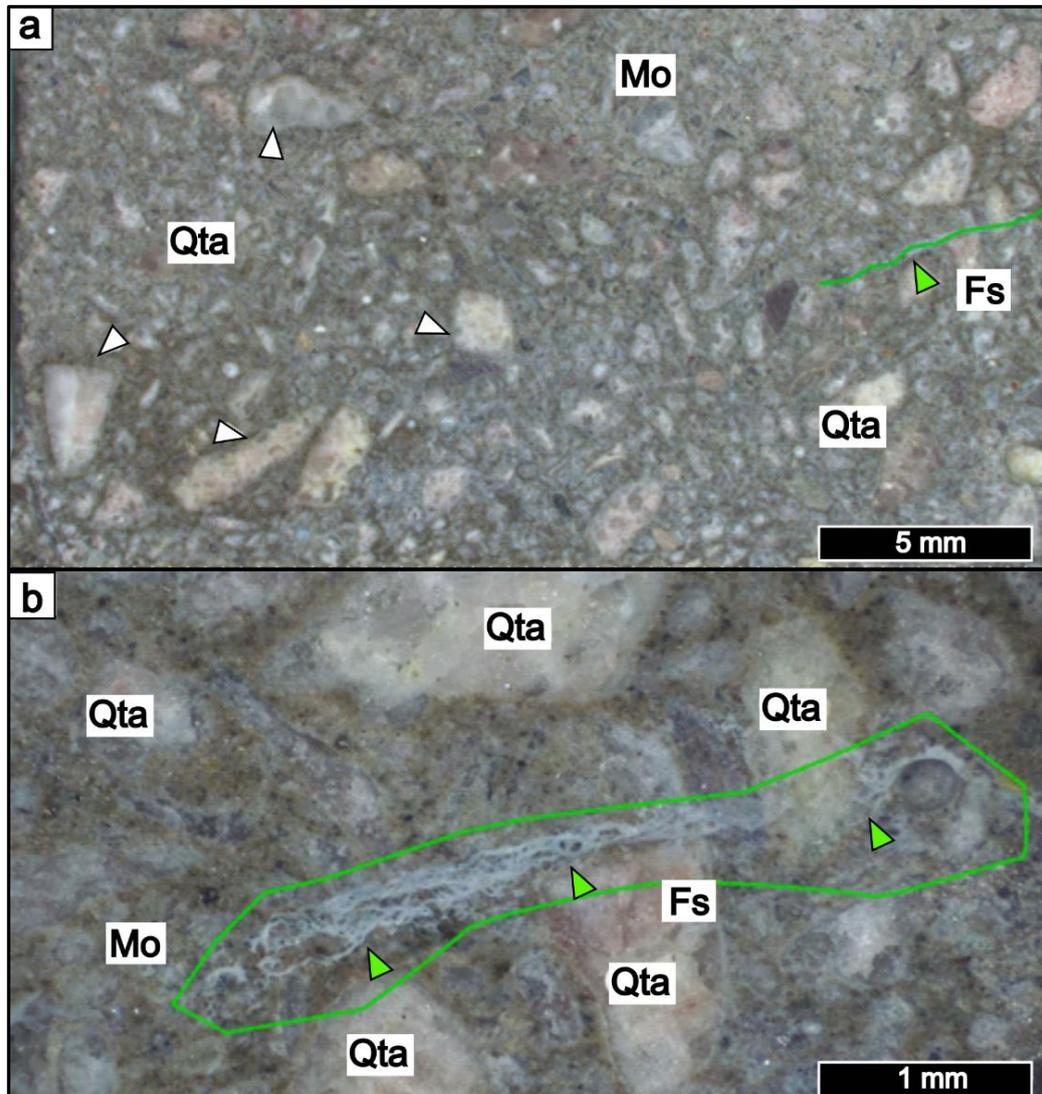


Figura 5.10 Fotografías bajo estereomicroscopio. Barra de mortero luego de 28 días de ensayo. Cantera PIG a) microfisura superficial (línea verde); b) detalle de la fisura que atraviesa el agregado y el contacto agregado-pasta de cemento. La misma se encuentra rellena por productos de neoformación. Qta: cuarcita; PC: pasta de cemento

Con microscopio petrográfico sobre secciones delgadas se analizó la microestructura del mortero. Se observaron microfisuras que afectan las partículas de la cuarcita (Figura 5.11a) y el desarrollo de productos de neoformación asociados a la RAS en la interfase con la pasta de cemento (productos de color pardo claro). En la Figura 5.11b se muestra la misma imagen donde es posible observar que la microfisura está rellena con un material anisótropo.

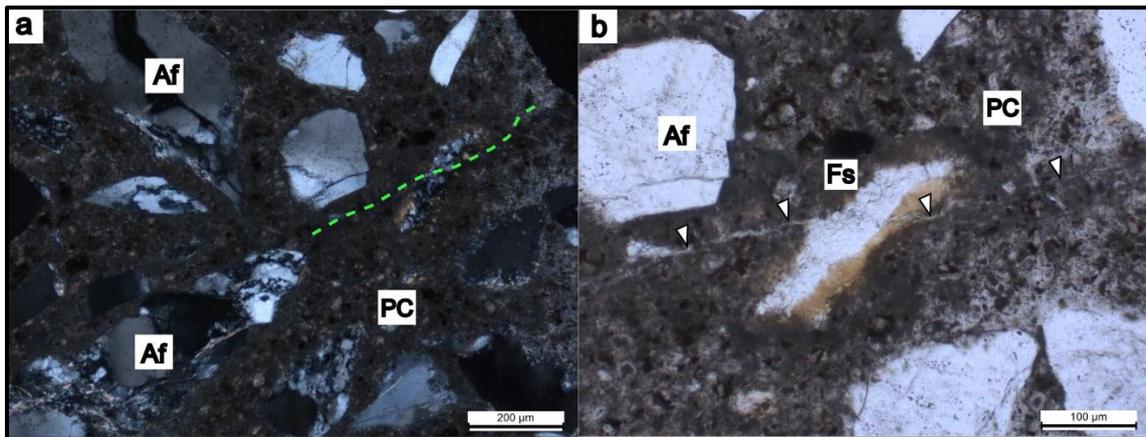


Figura 5.11 Fotomicrografía de la barra de mortero luego de 28 días de ensayo. Cantera PIG a) microfisura (línea verde) que atraviesa el agregado fino y continúa en la pasta de cemento (PC); b) detalle del mismo sector. Se observa que la microfisura está rellena con producto de neoformación. a) visto con nicols cruzados, b) con luz paralela. Af: agregado fino; PC: pasta de cemento; Fs: microfisura

5.2.4.2 Prismas de hormigón

Se realizó la petrografía de los prismas de hormigón luego de cumplido el tiempo de ensayo según cada variante de la norma IRAM 1700 (2013) (convencional y acelerado).

En la Figura 5.12 se muestra la microtextura y características del prisma de hormigón (curado a 60°) con microscopio óptico sobre secciones delgadas. En la Figura 5.12a se pueden observar (con nicols cruzados) microfisuras que atraviesan la cuarcita y el mortero. La Figura 5.12b corresponde a la misma imagen vista con nicols paralelos lo que permite observar con más nitidez la microfisura. Las Figuras 5.12c y 5.12d (con nicols cruzados y paralelos respectivamente) corresponden al prisma de hormigón curado a 38°. El agregado analizado muestra sectores con tamaño de grano menor a 100 µm. Además, se observan microfisuras (líneas verdes) sobre el agregado grueso cuarcítico y en el contacto agregado-mortero.

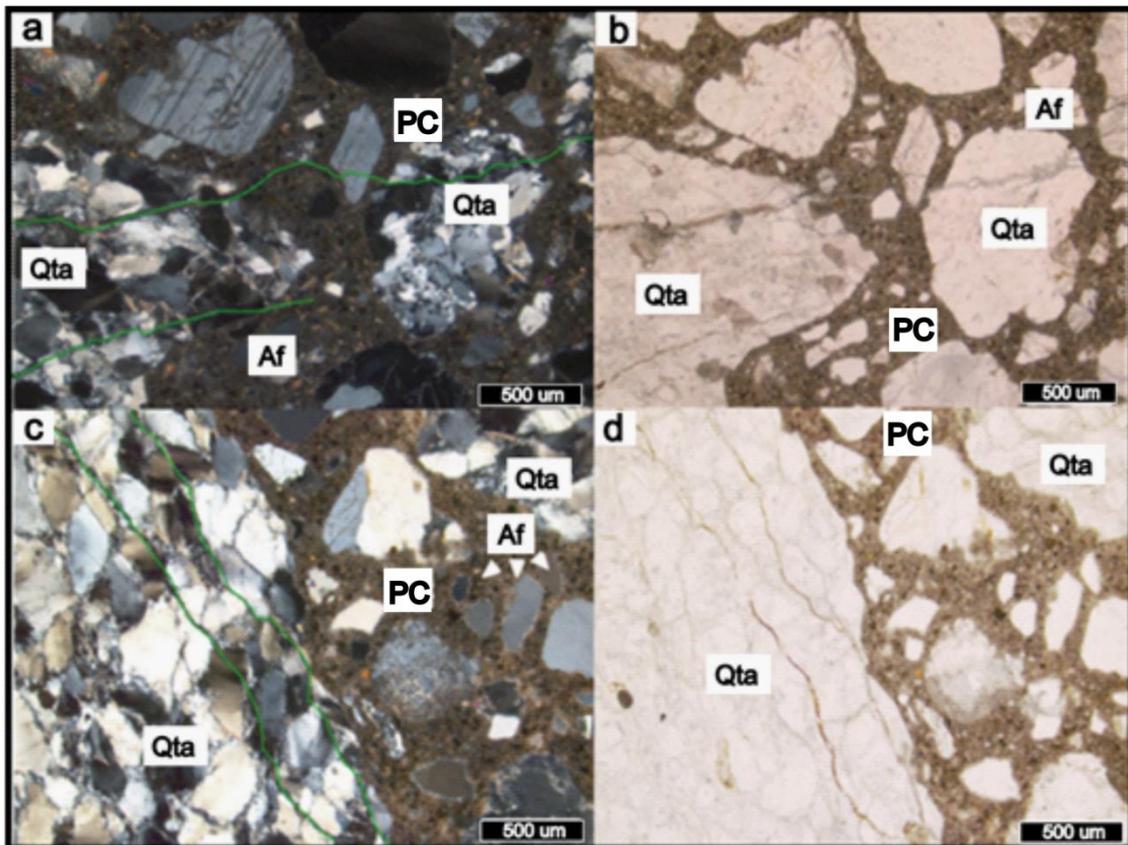


Figura 5.12 Fotomicrografía de los prismas de hormigón ensayados según la norma IRAM 1700 (2013) a) y b) prisma de hormigón curado a 60° C. Microfisuras (líneas verdes) que atraviesan a agregados cuarcíticos, agregados finos y la pasta de cemento; c) y d) prisma de hormigón curado a 38° C. Microfisuras (líneas verdes), en algunos casos rellenas con material birrefringente, en el interior de un agregado cuarcítico. a) y c) vista con nicoles cruzados; b) y d) vista con luz paralela. Qta: agregado grueso cuarcítico; Af: agregado fino; PC: pasta de cemento

5.2.5 Discusión de los resultados

Analizando los resultados obtenidos con los diferentes ensayos realizados con los agregados de trituración de las dos canteras estudiadas (PIG y PIR) se puede concluir que los agregados de la cantera PIG se califican como potencialmente reactivos frente a la RAS y los de la cantera PIR como inocuos.

La cuarcita de la cantera PIG contiene ~ 8% de cuarzo microcristalino y cuarzo fuertemente tensionado (AEO promedio 20°) como componentes potencialmente reactivos. La expansión medida en el ensayo acelerado de la barra de mortero y el método acelerado del prisma de hormigón, supera el límite máximo establecido en la norma IRAM 1531. Sin embargo, en el ensayo convencional del prisma de hormigón convencional se encuentra por debajo del valor límite establecido. Según la Tabla B.1 (IRAM 1531, 2022), que establece el grado de reactividad del agregado, considerando

los resultados del ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) y del prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700, 2013), la clase de reactividad para el agregado de la cantera PIG es R1 (moderadamente reactivo).

Según Batic y Falcone (2010), el método del prisma de hormigón puede calificar como no reactivos algunos agregados de reacción lenta a la edad de 1 año, por lo que han sugerido extender el ensayo hasta los 2 años o bajar el límite considerado para evaluar la expansión. Es importante mencionar que, en varios estudios, las cuarcitas de Pigüé arrojaron en el prisma de hormigón expansiones superiores a 0,04% a las 52 semanas, con una evolución creciente de la curva de expansión a mayores edades (Falcone, 2013; Batic et al., 2004 y 2005). Por otra parte, algunos autores consideran que el método acelerado del prisma de hormigón posee mayor eficiencia para la identificación de agregados marginales y con cuarzo tensionado y/o microcristalino (Shayan et al., 2008). En efecto, este ensayo ha demostrado buen desempeño en detectar este agregado de reacción lenta, dando valores consistentes en todos los estudios de la cuarcita de Pigüé. Además, en el Capítulo 6 de esta Tesis se presenta un caso de estudio de un pavimento de una rotonda con evidencias del desarrollo de la RAS en el acceso a la ciudad de Pigüé, donde la reactividad se atribuye a las cuarcitas de la región (Berezosky et al., 2022).

La roca granítica de la cantera PIR, si bien contiene escaso cuarzo microcristalino y tensionado como componentes potencialmente reactivos, al ser ensayada por los diferentes métodos físicos propuestos en la norma IRAM 1531 (2022) arrojó valores de expansión por debajo de los límites establecidos. Cabe destacar que el contenido de cuarzo microcristalino es muy bajo (<3%) y, si bien se identificó cuarzo con extinción ondulante, el AEO promedio es 13°, por lo que no se considera fuertemente tensionado. Por otra parte, no hay antecedentes de estructuras en servicio en las que se utilizó esta roca como agregado, que hayan manifestado evidencias del desarrollo de la RAS.

Según la Tabla B.1 de la norma IRAM 1531 (2022), el agregado de la cantera PIR ese califica como clase R0 (inocuo).

5.3 Canteras de arena y canto rodado

5.3.1 Petrografía

5.3.1.1 Cantera RCO

El material analizado está constituido principalmente por fragmentos de cuarzo (45%), rocas graníticas (12%), cuarcitas (5%), areniscas (4%) y rocas volcánicas (31%). Dentro de estas últimas predominan las andesíticas (21%) sobre las riolíticas (10%). Además, se identificaron trizas de vidrio volcánico (2%) presente en las fracciones más finas. El 1% restante lo constituyen feldespatos, areniscas y toscas, que se observaron en las fracciones más gruesas (Tabla 5.4).

Tabla 5.4 Análisis petrográfico de la arena de la cantera RCO (IRAM 1649, 2008)

Constituyentes	% en peso ponderado de los constituyentes en cada fracción retenida en los tamices Nº						Composición ponderada (%) de la muestra
	10	18	30	60	100	<100	
Rocas volcánicas ácidas	0,1	0,3	1,8	3,7	2,9	1,2	9,9
Rocas volcánicas básicas	0,1	0,2	1,8	9,9	6,4	2,6	21,1
Rocas graníticas	0,2	0,2	0,5	6,1	3,6	1,4	11,9
Cuarzo	0	0,2	3,1	29,4	8,4	4,3	45,3
Feldespatos	<0,1	<0,1	0,1	0	0	0	0,2
Cuarcitas	<0,1	0,1	0,9	2,2	1,8	0,3	5,2
Areniscas	<0,1	0,1	0,3	2,9	0,6	0,1	4,1
Tosca	<0,1	<0,1	0,2	0	0	0	0,3
Trizas de vidrio	0	<0,1	0,1	1,1	0,7	0,2	2,1
TOTAL	0,5	1,1	8,7	55,2	24,3	10,1	100,0

El material es litológicamente heterogéneo, constituido por rocas que en su mayoría mantienen sus texturas originales. Poseen relativa dureza, predominando el cuarzo y las rocas volcánicas. Los terrones blandos están comprendidos por areniscas (cementadas por material limoso y arcilloso) y tosca que solo se observan en las fracciones gruesas y son friables a partir de la aplicación de la presión con un punzón. Dicha proporción es despreciable como para ser expresado en la tabla.

Las rocas andesíticas presentan pastas afaníticas, vítreas, de coloración pardo a pardo oscuro, destacándose las fracturas concoideas. Además, se reconocieron rocas con

texturas porfíricas y microgranulares. En las rocas volcánicas ácidas se destacan texturas porfíricas en su gran mayoría con pastas de color gris y naranja. En menor proporción se observan bandas de fluidalidad. En las fracciones de mayor tamaño de grano, se destacan cristales de cuarzo (translúcido y blanquecino) y feldespatos. En la superficie de los agregados volcánicos se reconoció una leve argilización, como así también la presencia de óxidos de hierros que cubren parcialmente la superficie del agregado. Las trizas de vidrio son en su gran mayoría irregulares y subplanares, sin evidencias de alteración, con fracturas concoideas, en general incoloras o con leve coloración verdosa o parda. En una de las partículas se identificaron vesículas (propia del rápido enfriamiento y escape de gases). Las partículas están límpidas y no se observaron incrustaciones ni adherencias superficiales.

Las formas de los agregados son: 53% redondeadas, 45% irregulares equidimensionales y 2% irregulares planares.

Materiales potencialmente reactivos frente a la RAS: se identificó 2% de vidrio volcánico fresco en trizas y un 9,9% de rocas volcánicas ácidas que presentan vidrio en la pasta.

En la Figura 5.13 a-d se muestra la composición y morfología de la arena de la cantera RCO en el material retenido en los tamices #10, #18, #30 y #60 respectivamente. Se destacan las rocas volcánicas ácidas y básicas (Rv) y partículas monominerales de cuarzo (Qz).

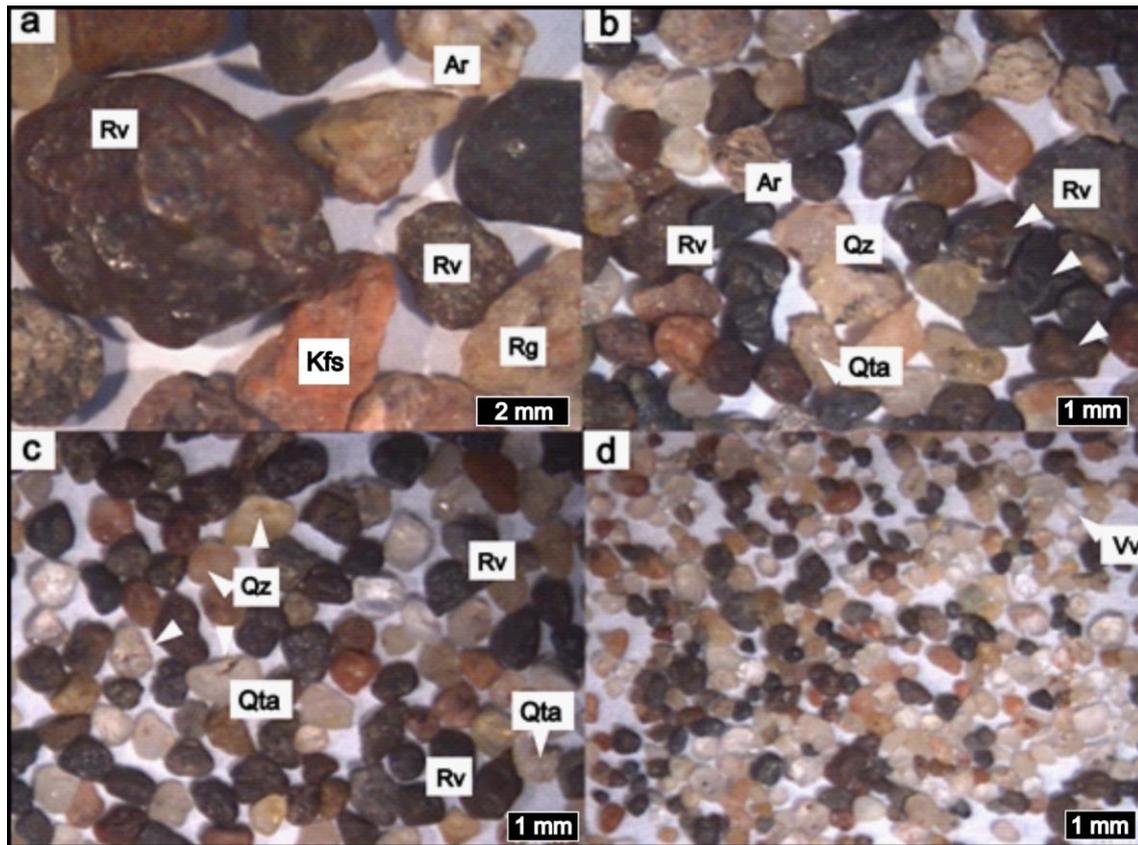


Figura 5.13 Arena de la cantera RCO vista con estereomicroscopio, retenido en los tamices a) #10; b) #18; c) #30.; d) #60. Rv: roca volcánica; Ar: arenisca; Rg: roca granítica; Kfs: feldespato potásico; Qz: cuarzo; Qta: cuarcita; Vv: triza de vidrio volcánico

5.3.1.2 Cantera VII

En esta cantera se explota canto rodado y arena, por lo tanto, el material tiene el mismo origen y se separa por tamaño. A continuación, se describe el canto rodado y la arena en base al muestreo efectuado en las pilas de acopio de cada material.

El agregado es polilitológico, está compuesto por rocas duras y compactas, levemente alteradas, sin modificar el comportamiento físico de las mismas. No presentan crustificaciones superficiales ni recubrimientos. Desde el punto de vista litológico, fueron agrupadas según sus características macroscópicas en: rocas volcánicas ácidas (R.V. ácidas) que incluyen riolitas, riodacitas, dacitas, etc.; rocas volcánicas intermedias a básicas (R.V. intermedias-básicas) que comprenden andesitas, basaltos, traquitas, etc.; rocas tobáceas o en general volcaniclásticas; rocas graníticas que corresponden a granitoides (granitos, sienitas, granodioritas, etc.) y fragmentos de valvas carbonáticas. Se reconocen partículas monominerales de cuarzo, feldespatos, anfíboles y piroxenos.

Además, se distinguen partículas de vidrio volcánico fresco. Su descripción petrográfica, sintetizada a continuación, se basa en la observación macro y microscópica sobre muestras representativas de cada grupo.

5.3.1.2.1 Canto rodado

Los constituyentes principales de los agregados analizados corresponden a rocas volcánicas (44% ácidas y 27% básicas a intermedias), y tobas (27%). El 2% restante lo constituyen partículas monominerales de cuarzo, rocas graníticas y valvas carbonáticas (conchillas) (Tabla 5.5).

Tabla 5.5 Análisis petrográfico del canto rodado de la cantera VIL (IRAM 1649, 2008)

Constituyentes	% en peso ponderado de los constituyentes en cada fracción retenida en los tamices						Composición ponderada (%) de la muestra
	25,4	19	12,5	9,5	4,75	<4,75	
Rocas volcánicas ácidas	2,6	3,4	20,8	8,4	8,2	0,4	43,7
Rocas volcánicas básicas	1,3	3,9	11,3	5,2	5,1	0,2	27,0
Rocas tobáceas	0,5	1,6	9,1	6,1	9,8	0,3	27,4
Rocas graníticas	0,3	0	0	0	0	0	0,3
Cuarzo	0	0,1	0,3	0,3	0,5	0	1,2
Valvas	0	0	0	0,2	0,2	0	0,4
TOTAL	4,7	9,0	41,5	20,1	23,8	0,9	100,0

Se seleccionaron rocas representativas de cada litología y se realizaron cortes delgados para su estudio con microscopio óptico.

Las vulcanitas ácidas comprenden rocas de composición entre dacitas y riolitas, constituidas por fenocristales de feldespatos (ortosa, sanidina, plagioclasa) y cuarzo, con cantidades variables de minerales máficos, principalmente biotita y hornblenda. En general presentan texturas porfíricas, con pastas en su mayoría vítreas, con fluidalidad, donde el vidrio volcánico puede estar parcial o totalmente desvitrificado, dando lugar a texturas felsíticas con esferulitas y sectores microcristalinos. En la Figura 5.14a y 5.14b se muestra una dacita, con fenocristales de feldespato, principalmente de plagioclasa, maclados y zonados, distribuidos (con frecuencia aglomerados) en una

pasta compuesta por tablillas y microlitos de plagioclasa suborientadas, donde se desarrollan texturas felsíticas asociadas con vesículas y venillas de sílice recrystalizada de tamaño microcristalino (Figura 5.14c). Se incluyen dentro de este grupo rocas genéticamente distintas pero textural y composicionalmente semejantes, como las ignimbritas de alto grado de soldamiento o reoignimbritas (Figura 5.14d y 5.14e), debido a su similitud con las lavas riolíticas. En éstas, también se observa vidrio volcánico alterado y sílice cripto-microcristalina (compatible con tridimita-cristobalita y calcedonia) como componentes potencialmente reactivos. En las fotomicrografías se pueden distinguir fragmentos de cristales (cristaloclastos) de feldespatos y de cuarzo, y vidrio volcánico (vitroclastos aplastados y deformados). El vidrio está desvitrificado dando texturas felsíticas y esferulíticas (señaladas por flechas en Figura 5.14e), compuestas por sílice criptocristalina y feldespato, asociadas a minerales arcillosos y cloritas (Figura 5.14f, las flechas señalan texturas fibrosas típicas de la calcedonia).

Las rocas volcánicas intermedias a básicas presentan diferentes texturas, en general porfíricas con pastas afaníticas. Las texturas observadas en estas rocas son pilotáxica y hialofítica a hialopilítica (parcialmente desvitrificadas). Por lo general, se observa el vidrio alterado generando cloritas y minerales arcillosos, acompañando la presencia de sílice de baja cristalinidad y microcristalina con texturas felsíticas a microgranulares, constituyendo componentes potencialmente reactivos.

La Figura 5.14g y 5.14h muestra una roca andesítica que presenta cristales subhedrales a euhedrales de plagioclasa, zonados y maclados, formando una textura glomeroporfírica asociada a piroxenos, y minerales opacos de hábito cristalino, con cierto grado de alteración tanto en el feldespato (illita) como en los minerales máficos y opacos (clorita y óxidos/hidróxidos de hierro). La fluidalidad de la pasta se evidencia en la variación textural (Figura 5.14h, señalada por flechas), transicional de felsítica a microgranular. Entre los productos de desvitrificación, se observa la formación de cloritas anhedrales y diseminadas en la pasta y siguiendo el flujo (Figura 5.14i).

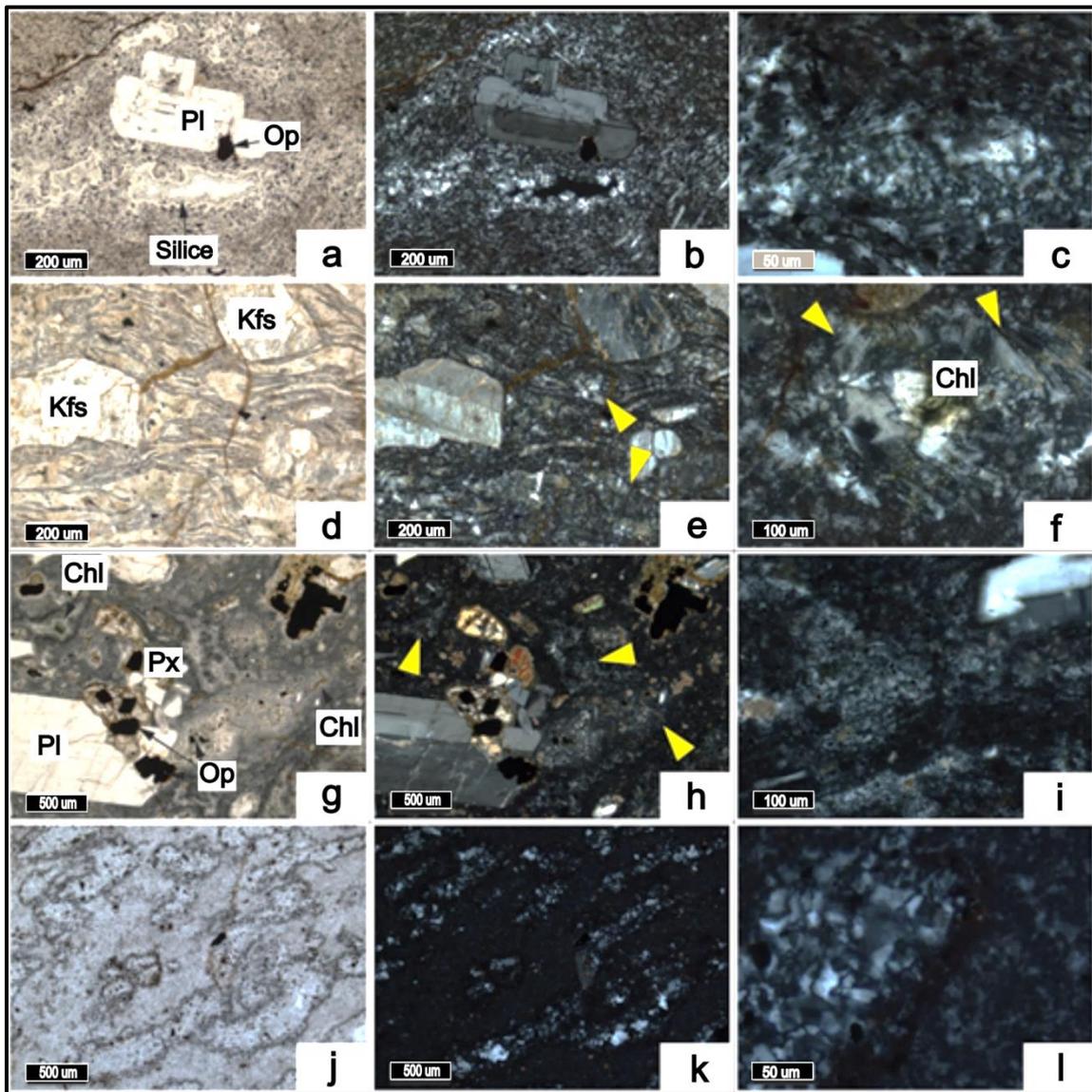


Figura 5.14 Fotomicrografías de las principales rocas identificadas en la cantera VIL, mostrando diferentes texturas y componentes potencialmente reactivos (izquierda: luz paralela, centro: nicoles cruzados y derecha: detalle de la pasta/matriz a nicoles cruzados) a-c) dacita; d-f) ignimbrita riolítica; g-i) andesita; j-l) toba. a) d) g) y j) visto con luz paralela; b), c), e), f), h), i), k) y l) con nicoles cruzados. Pl: plagioclasa; Op: minerales opacos; Kfs: feldespato; Px: piroxeno; Chl: clorita

Las rocas tobáceas corresponden a un conjunto que presenta fragmentos de otras rocas (litoclastos) y componentes volcánicos (cristaloclastos y/o vitroclastos), sin considerar el proceso de formación del depósito, a los efectos prácticos, que puede ser de origen piroclástico o volcano-sedimentario en sentido más amplio. Mayoritariamente, presentan una matriz muy fina de color pardo, gris o rojizo. Los vitroclastos (como trizas, pómez o fiammes) pueden ser visibles o no, según su tamaño y, en general, se encuentran parcial a totalmente desvitrificados, dando lugar a arcillas y zeolitas, y sílice micro a criptocristalina. La Figura 5.14j-l corresponde a una toba de

grano muy fino, con parches de mayor tamaño, constituida mayormente por texturas tipo felsítica a microgranular, con minerales de baja birrefringencia (zeolitas/arcillas) producto de la desvitrificación. Además, tiene alta proporción de minerales opacos de grano muy fino, y también de dimensiones mayores en vesículas, donde cristalizaron como óxidos/hidróxidos de hierro, asociados a minerales secundarios.

La forma de los agregados es mayormente redondeada o subredondeada. Como componentes reactivos se identificó vidrio volcánico (fresco y parcialmente alterado) en la pasta de las vulcanitas y tobas.

5.3.1.2.2 Arena

El material analizado es una arena natural polimíctica, constituida principalmente por fragmentos de cuarzo (36%), areniscas (18%), rocas graníticas (10%) y vulcanitas (17%), (10% básicas y 7% ácidas). En forma subordinada se identificaron cuarcitas (5%), valvas carbonáticas (3%), feldespatos (5%), piroxenos y anfíboles (3%) y trizas de vidrio volcánico fresco (3%) (Tabla 5.6).

Tabla 5.6 Análisis petrográfico de la arena de la cantera VIL (IRAM 1649, 2008)

Constituyentes	% en peso ponderado de los constituyentes en cada fracción retenida en los tamices N°						Composición ponderada (%) de la muestra
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas carbonáticas	1,1	0,8	0,8	0	0	0	2,71
Cuarzo	0	0,1	0,6	18,3	6,8	9,9	35,6
Rocas volcánicas básicas	2,7	0,5	0,2	4,3	1,5	0,4	9,6
Rocas volcánicas ácidas	4,8	0,4	0,2	1,4	0,5	0,1	7,3
Areniscas	3,2	1,2	1,0	7,5	5,1	0	18,0
Cuarcitas	1,1	0,2	0,1	2,7	0,8	0	4,9
Feldespatos	0,1	<0,1	0,0	3,0	1,3	0,1	4,5
Rocas graníticas	2,7	0,2	0,3	4,1	2,2	0,2	9,7
Trizas de vidrio	0	<0,1	0,1	1,5	1,0	0,1	2,7
Minerales opacos	0	0	0	0,9	0,4	0,7	2,0
Terrones blandos	0,2	0,1	0	0	0	0	0,3
Piroxenos y anfíboles	0	0	0	1,4	1,2	0,2	2,7
TOTAL	15,7	3,5	3,3	45,0	20,6	11,8	100,0

Las partículas en general presentan escaso polvo adherido a la superficie, constituido por los componentes del agregado y carbonato de calcio.

Rocas como las vulcanitas y algunas areniscas se presentan como agregados deleznales o poco consistentes con presencia de productos de alteración. Los terrones blandos están comprendidos por areniscas (en las fracciones más gruesas se observa matriz arenosa y limosa). Muchos de estos agregados son fácilmente desmenuzables al sumergirlos en agua. En la Tabla 5.6 se mencionan como terrones blandos.

Las rocas volcánicas básicas tienen pastas afaníticas, con colores pardo a pardo oscuro, con algunas variantes rojizas. En las especies más oscuras se pueden diferenciar tablillas de plagioclasas dispuestas en una pasta vítrea con fractura concoidea. Un porcentaje más pequeño se compone de especies con pasta de coloración rojiza y cristales de feldespatos bien diferenciados. En las rocas volcánicas ácidas se destacan texturas porfíricas en su gran mayoría con pastas de colores amarillentos y anaranjados. En menor proporción se observan bandas de fluidalidad.

Las areniscas se pueden dividir en tres grupos bien definidos: 1) las primeras son bien compactas, con cemento silíceo entre contactos de granos y bien angulosas. 2) Las segundas corresponden a areniscas calcáreas constituidas por clastos de cuarzo y líticos (rocas volcánicas) cementados por carbonato de calcio, de color blanquecino. La mayoría están bien consolidadas, pero en algunas ocasiones son medianamente deleznales. El último grupo, 3) es una arenisca lítica cuyos agregados varían entre partículas monominerales como cuarzo y feldespatos a fragmentos de rocas, cementados con material silíceo.

Las valvas carbonáticas, se encuentran en fragmentos, mayormente planares, presentando incrustaciones y evidencias de erosión. Difieren su coloración entre blanquecinas a grisáceas. Algunas conservan rasgos propios de su especie como tabiques o su estructura propiamente dicha. La tosca se presenta con una coloración amarillenta hasta rosada. En la mayoría de los fragmentos es porosa con

incrustaciones de arenas finas y limos. Su composición es carbonática de aspecto compacto.

Las trizas de vidrio son, en su gran mayoría, irregulares a subredondeadas. Son incoloras en un alto porcentaje o de un color pardo oscuro. En algunas partículas, se observa la fractura concoidea propia del material. Existen partículas de vulcanitas con evidencias de alteración (en especial argilización), como así también tinción superficial por óxidos de hierro en las cuarcitas.

Formas: redondeadas (45%), irregulares equidimensionales (45%), e irregulares planares (10%).

Componentes potencialmente reactivos frente a la RAS: se identificó 2,7% de vidrio volcánico fresco (trizas) y 7,3% de rocas volcánicas ácidas que presentan vidrio como parte de la pasta.

En la Figura 5.15 a-c se muestra la composición y morfología de la arena de la cantera VIL en el material retenido en los tamices #18, #30 y #60 respectivamente. Se observa elevado contenido de cuarzo (Qz) en los tamaños más finos y, rocas volcánicas (Rv) y areniscas (Ar). La Figura 5.15d muestra en detalle las partículas de rocas volcánicas y areniscas cementadas.

5.3.1.3 Cantera MED

La muestra analizada está constituida principalmente por rocas volcánicas (37%), con predominio de las ácidas (28%) sobre las básicas (8%) y cuarzo como partículas monominerales (30%). En forma subordinada, se identificaron anfíboles y piroxenos (6%), feldspatos (4%), rocas graníticas (6%), areniscas silíceas y calcáreas (8%) y trizas de vidrio volcánico (5%). Completan la litología, tosca, terrones blandos, minerales opacos y calcedonia, cuya participación en la muestra total de cada uno es menor al 1% (Tabla 5.7).

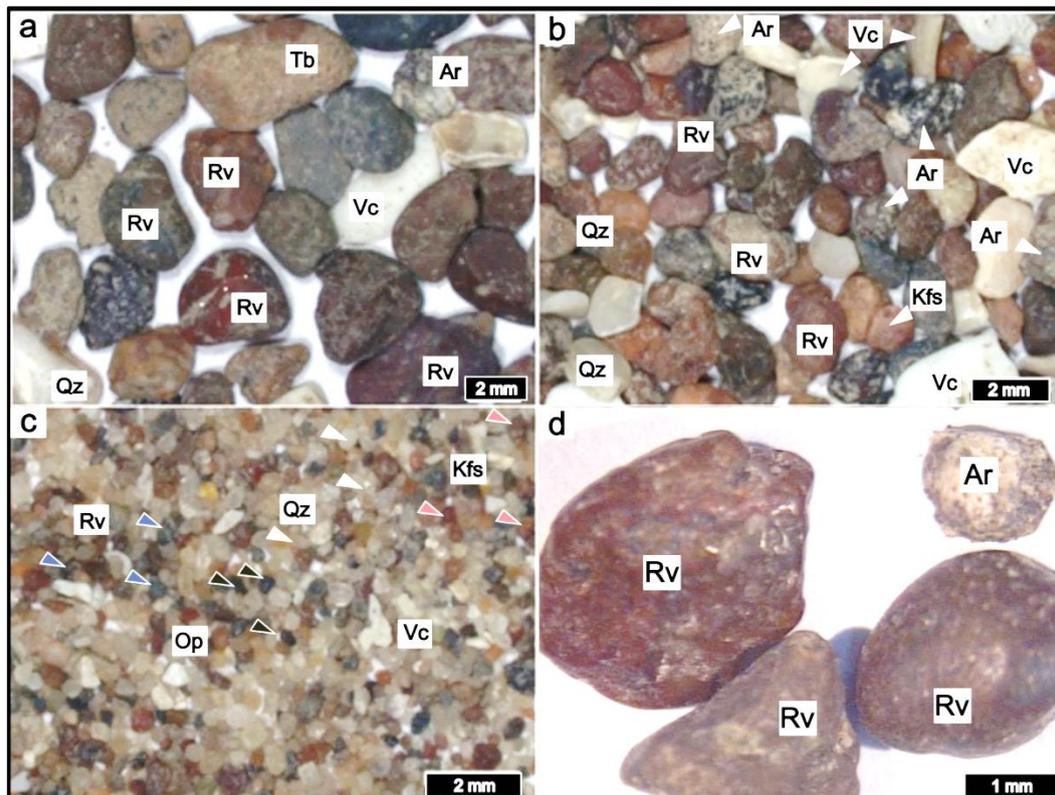


Figura 5.15 Arena de la cantera VII. Vista con estereomicroscopio, en el retenido en los tamices a) #18; b) #30; c) #60; d) Imagen de detalle de partículas de rocas volcánicas y areniscas. RV: roca volcánica (flechas azules), Tb: terrones blandos, Ar: areniscas, Qz: cuarzo, Kfs: feldespato potásico (flechas rojas), Vc: valvas carbonáticas, Vv: vidrio volcánico, Op: minerales opacos

Tabla 5.7 Análisis petrográfico de la arena de la cantera MED (IRAM 1649, 2008)

Constituyentes	% en peso ponderado de los constituyentes en cada fracción retenida en los tamices N ^o						Composición ponderada (%) de la muestra
	10	18	30	60	100	<100	
Rocas volcánicas ácidas	2,9	3,6	3,7	12,8	4,2	1,3	28,5
Rocas volcánicas básicas	0,5	1,2	0,8	4,0	1,1	0,6	8,3
Rocas graníticas	1,8	1,4	0,9	1,8	0,5	0,1	6,4
Cuarzo	0,9	3,2	3,6	12,1	7,0	3,6	30,4
Feldespatos	0,3	0,2	0,3	2,6	0,4	0,4	4,1
Areniscas	2,6	1,5	0,6	1,1	0,4	0,4	6,7
Trizas de vidrio	0	0,2	0,4	3,0	1,1	0,3	5,2
Tosca	0,4	0,1	0,0	0	0	0	0,4
Terrones blandos	0,3	0,1	<0,1	0	0	0	0,5
Anfíboles y piroxenos	0	0,5	0,5	3,7	1,2	0,6	6,5
Minerales opacos	0,4	0,4	0,3	0,3	0	0	1,4
Areniscas calcáreas	0,5	0,2	0,1	0	0	0	0,9
Calcedonia	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0,6
TOTAL	10,7	12,7	11,6	41,5	16,0	7,4	100,0

Las partículas presentan abundantes crustificaciones carbonáticas y adherencias superficiales clásticas finas, principalmente de cuarzo. Las partículas de cuarzo (bien redondeadas) están levemente teñidas por óxidos de hierro. Las vulcanitas son de grano fino, afaníticas con pastas intersertales. Están alteradas débilmente a minerales arcillosos. Las vulcanitas riolíticas son porfíricas con pastas microgranulares y felsíticas. Las areniscas silíceas se encuentran cementadas por el mismo material y, los granos que las componen son partículas monominerales de cuarzo y fragmentos líticos (oscuros). Las areniscas calcáreas están bien consolidadas y se caracterizan por presentar material clástico polimíctico cementado por carbonato de calcio. Los terrones blandos son areniscas poco consolidadas, cuyo cemento es arcilloso o limoso. Son deleznable cuando se las somete a esfuerzos. Los minerales opacos son óxidos/hidróxidos de hierro. El vidrio volcánico está muy fresco y libre de crustificaciones.

En el análisis de las formas de los agregados se reconocieron 25% redondeadas, 70% irregulares equidimensionales y 5% irregulares planares.

Se identificaron partículas con marcada argilización y carbonatación, sobre todo en las pastas de las rocas volcánicas, como así también óxidos de hierro como tinción superficial en algunas cuarcitas y areniscas silíceas. Los componentes potencialmente reactivos son: 5,2% de vidrio volcánico fresco en forma de trizas y 28,2% de rocas volcánicas ácidas que presentan vidrio como parte de la pasta.

En la Figura 5.16 a-d se muestra la composición y morfología de la arena de la cantera MED en el material retenido en los tamices #10, #18, #30 y #60, respectivamente. Las rocas volcánicas (ácidas y básicas) son abundantes en todos los tamaños analizados. El cuarzo se encuentra en las fracciones más finas, al igual que los anfíboles y piroxenos. Pueden observarse varias partículas de vidrio volcánico en el retenido #60.

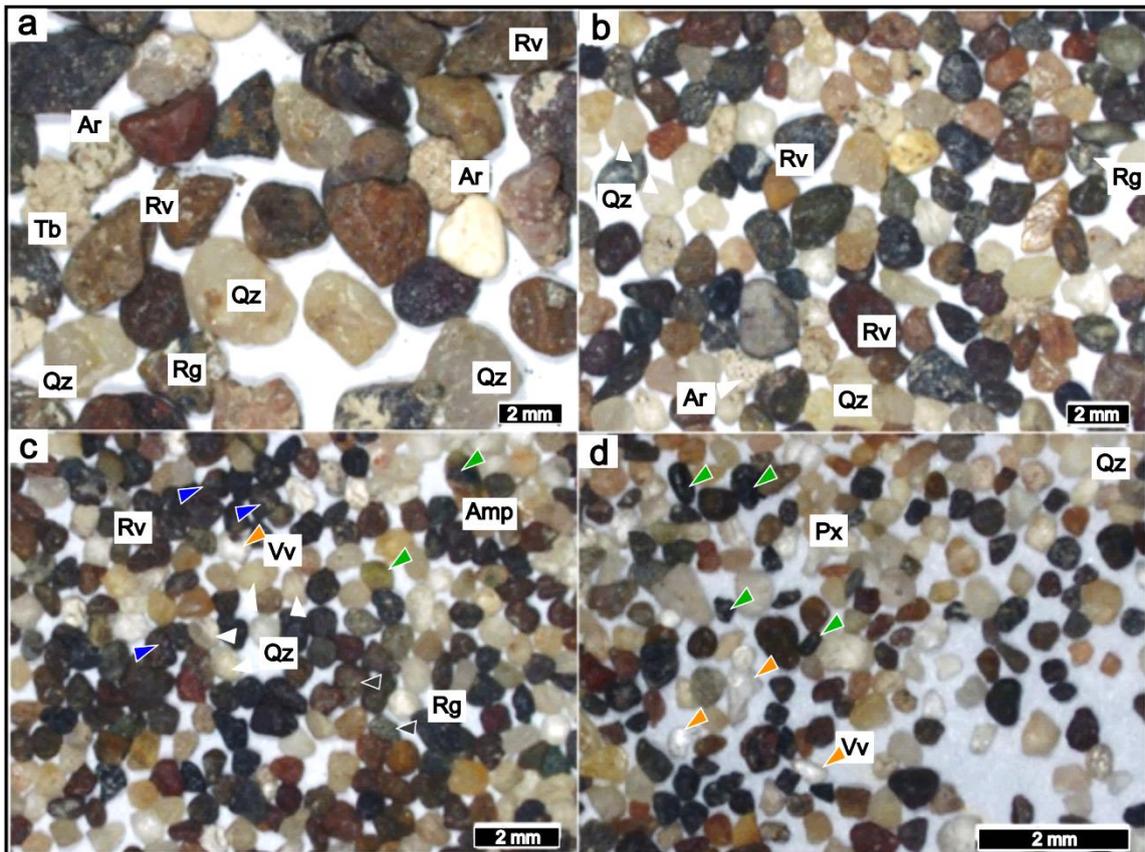


Figura 5.16 Arena de la cantera MED vista con estereomicroscopio en el retenido en los tamices a) #10; b) #18; c) #30; d) #60. Rv: roca volcánica (flechas azules); Tb: terrones blandos; Ar: areniscas; Qz: cuarzo; Amp: anfíboles; Px: piroxenos (flechas verdes); Vv: vidrio volcánico (flechas naranjas); Rg: roca granítica

5.3.1.4 Cantera CLA

El material analizado está constituido principalmente por partículas de cuarzo (65%), valvas carbonáticas (8%) y rocas volcánicas (16%). Entre estas últimas predominan las básicas (12%) sobre las ácidas (4%). En forma subordinada se identificaron areniscas (4%), cuarcitas (1%), piroxenos y anfíboles (3%) y trizas de vidrio volcánico (1,5%) (estos últimos, observados en las fracciones más finas) (Tabla 5.8).

Tabla 5.8 Análisis petrográfico de la arena de la cantera CLA (IRAM 1649, 2008)

Constituyentes	% en peso ponderado de los constituyentes en cada fracción retenida en los tamices N°						Composición ponderada (%) de la muestra
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	0,1	1,6	3,6	2,1	0,6	0	8,0
Cuarzo	0	0,3	2,1	39,6	20,8	2,5	65,1
Rocas volcánicas básicas	0	0,2	0,7	6,2	4,3	0,6	12,0
Rocas volcánicas ácidas	0	0,1	0,4	2,1	1,1	0,1	3,8
Areniscas	0	<0,1	0,1	1,8	2,1	0	4,0
Cuarcitas	0	<0,1	0,1	1,0	0,2	0	1,4
Piroxenos y anfíboles	0	0,0	0	0,5	1,4	1,4	3,3
Trizas de vidrio	0	<0,1	0,1	0,7	0,8	0,1	1,6
Feldspatos	0	<0,1	0	0,3	0,4	0	0,8
TOTAL	0,1	2,4	7,0	54,3	31,7	4,5	100,0

El material es litológicamente heterogéneo, aunque a diferencia de las canteras estudiadas previamente, predomina ampliamente el cuarzo (65%). Se observaron algunas partículas con características semiduras (areniscas con cemento calcáreo y en algunos casos silíceo), aunque solo se observan en las fracciones gruesas y no son fácilmente desmenuzables como para entrar en la categoría de terrones blandos.

Las rocas volcánicas básicas presentan pastas afaníticas, de coloración parda a parda oscura. Estas últimas, tienen mayormente fracturas concoideas debido a la presencia de vidrio volcánico en su composición. En las rocas volcánicas ácidas se destacan texturas porfíricas en su gran mayoría, con pastas de colores gris y naranja, rodeando a cristales translúcidos de cuarzo.

El cuarzo es en su mayoría translúcido, aunque algunas partículas presentan coloraciones naranjas a verdosas. Su forma es principalmente subredondeada, aunque algunas son irregulares por la presencia de fracturas concoideas. La mayoría de las partículas están teñidas con óxidos de hierro, en especial en las fracciones más gruesas.

Se identificó 8% de fragmentos de valvas carbonáticas en la muestra total, aunque este componente es mucho más abundante en las fracciones más gruesas. Se presentan de colores blanquecinos a amarillentos y hasta translúcidos. Tienen en su mayoría formas planares, aunque también existen irregulares. Pueden distinguirse incrustaciones de partículas de material limoso y, en algunos casos, se observan tabiques propios de muchas especies de bivalvos.

En las fracciones más finas se observan partículas monominerales de anfíboles y piroxenos de coloraciones verdosas a pardo oscuro que, en su gran mayoría, presentan formas subredondeadas. Las partículas en general se presentan límpidas, sin incrustaciones ni adherencias superficiales.

Formas: redondeadas (57%), irregulares equidimensionales (16%) e irregulares planares (27%). Estas últimas las constituyen fracciones de conchillas carbonáticas concentradas en las partículas de mayor tamaño.

Alteración: argilización en las pastas de las rocas volcánicas; óxidos de hierro como tinción superficial, en especial en las partículas de cuarzo.

El 8% de los fragmentos presenta formas irregulares planares, aunque no alcanza el límite máximo de 30%, establecido por la norma IRAM 1512 (2013) para su rechazo.

Los materiales potencialmente reactivos son: 1,6% de trizas de vidrio y 3,8% de rocas volcánicas ácidas que presentan vidrio como parte de la pasta.

En la Figura 5.17 a-d se muestra la composición y morfología de la arena de la cantera CLA en el material retenido en los tamices #18, #30, #60 y #100, respectivamente. Son abundantes las valvas carbonáticas en las fracciones de mayor tamaño y el cuarzo en las más finas.

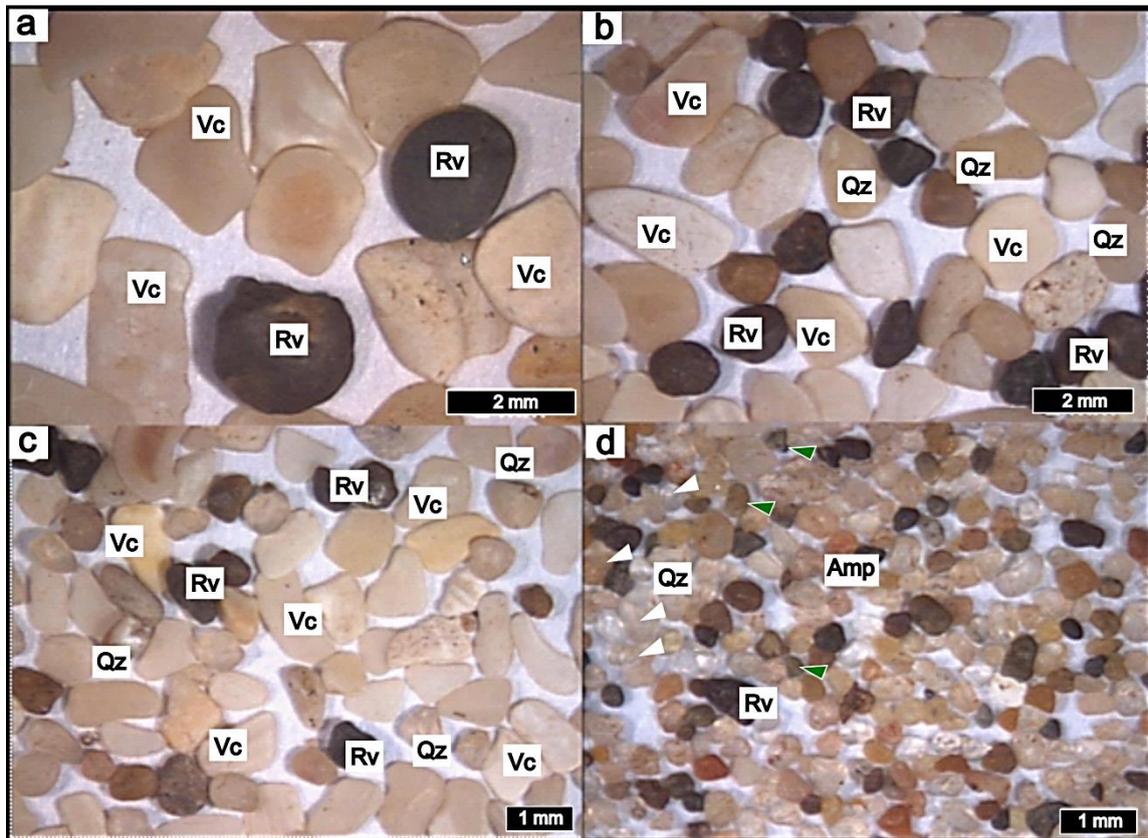


Figura 5.17 Arena de la cantera CLA vista con estereomicroscopio en el retenido en los tamices a) #18; b) #30; c) #60; d) #100. Vc: valva carbonática; Rv: roca volcánica; Qz: cuarzo; Amp: anfíboles (flechas verdes)

5.3.1.5 Cantera ORE

El material analizado está constituido principalmente por partículas de cuarzo (66%), valvas carbonáticas (13%) y rocas volcánicas (7%). Entre estas últimas predominan las básicas (6%) sobre las ácidas (menos del 1%). En forma subordinada se identificaron areniscas (5%), cuarcitas (6%), vidrio volcánico fresco (1%), anfíboles y piroxenos (2%), y rocas graníticas (< 1%) (Tabla 5.9).

En general, las partículas analizadas están limpias, sin adherencias superficiales. El cuarzo es mayormente translúcido, aunque algunas partículas presentan coloraciones naranjas y grisáceas. Su forma es principalmente subredondeada y muchos agregados presentan fractura concoidea. Las areniscas (algunas con cemento calcáreo), solo se observan en las fracciones más gruesas. Se componen de cuarzo, con una matriz silíceo aglomerante.

Las rocas volcánicas básicas tienen pastas afaníticas de coloración parda a rojiza oscura. Estas últimas, presentan en general fracturas concoideas debido al contenido de vidrio en las pastas. Además, se reconocieron rocas con texturas porfíricas y escasas microgranulares. En las rocas volcánicas ácidas se destacan texturas porfíricas con coloraciones naranjas a rojizas (riolitas).

Tabla 5.9 Análisis petrográfico de la arena de la cantera ORE (IRAM 1649, 2008)

Constituyentes	% en peso ponderado de los constituyentes en cada fracción retenida en los tamices N°						Composición ponderada (%) de la muestra
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	0,5	2,9	5,5	3,4	0,1	0,1	12,5
Cuarzo	0	0,3	3,1	32,9	25,9	3,7	65,9
Rocas volcánicas básicas	0	0,3	0,6	2,9	1,9	0,4	6,1
Rocas volcánicas ácidas	0	0,2	0,3	0,4	0	0	1,0
Areniscas	0	<0,1	0,1	1,5	3,2	0,3	5,2
Cuarcitas	0	0	0,5	2,9	2,1	0	5,6
Piroxenos y anfíboles	0	0	0	0	0,9	1,3	2,2
Trizas de vidrio	0	<0,1	0	0,4	0,9	0,1	1,1
Rocas graníticas	0	0	0	0	0,4	0	0,4
TOTAL	0,5	3,8	10,1	44,4	35,4	5,7	100,0

Las valvas carbonáticas son abundantes en las fracciones de mayor tamaño. Se presentan de color blanquecino a amarillento. Se observan, en su mayoría, formas planares con menor proporción de irregulares. Pueden distinguirse incrustaciones de cuarzo y en algunos casos se observan tabiques y estructuras propias del esqueleto que le da origen. Además, se reconocieron escasas trizas de vidrio translúcidas (en las fracciones más finas), en su gran mayoría irregulares.

Formas: 37% redondeadas, 44% irregulares equidimensionales y 19% irregulares planares. Estas últimas predominan en las conchillas carbonáticas concentradas en las partículas de mayor tamaño. Su contenido es inferior al límite máximo establecido por la norma IRAM 1512 (2013).

Materiales potencialmente reactivos: vidrio volcánico en estado fresco (trizas) y como parte de la pasta en rocas volcánicas, aunque sus porcentajes son muy bajos.

En la Figura 5.18 a-d se muestra la composición y morfología de la arena de la cantera ORE en el material retenido en los tamices #10, #18, #30 y #60, respectivamente. Las fracciones de mayor tamaño están compuestas por trozos de valvas carbonáticas y cuarzo. En las fracciones más pequeñas, se distinguen rocas volcánicas y partículas monominerales de cuarzo, anfíboles y piroxenos.

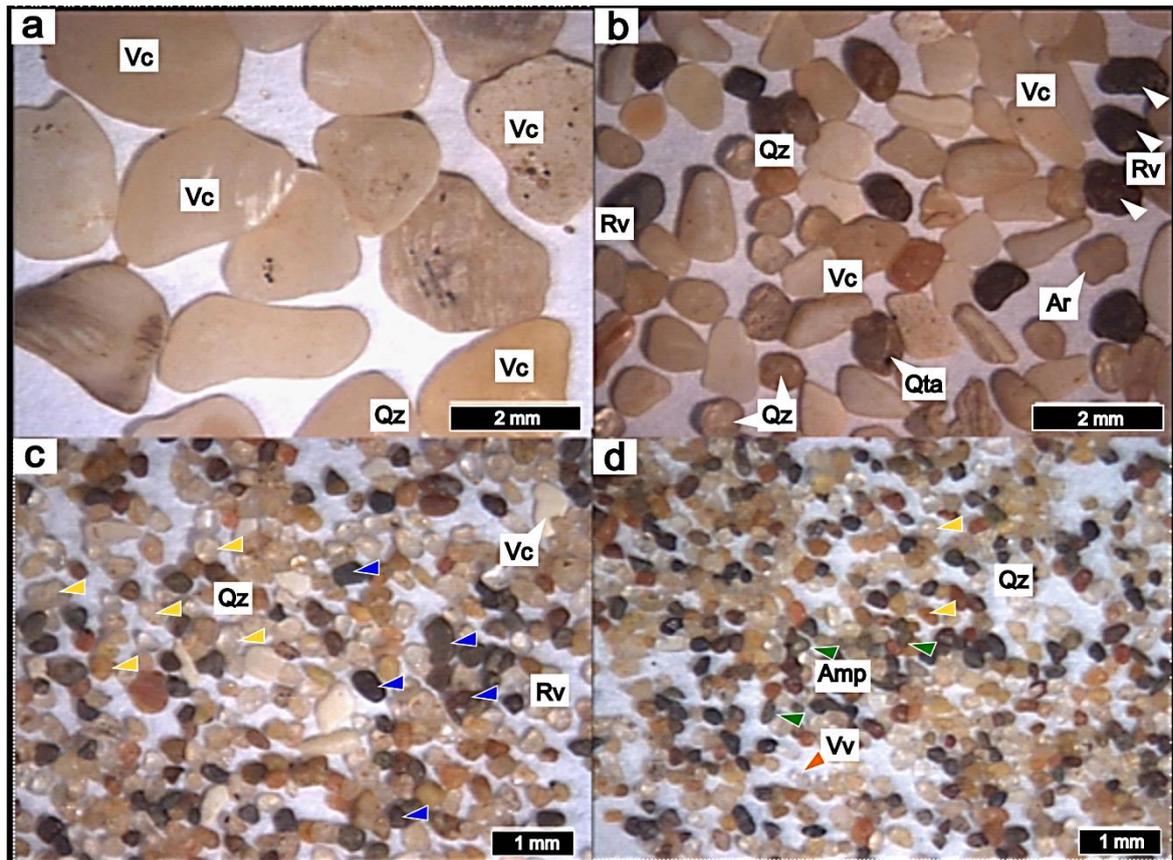


Figura 5.18 Arena de la cantera ORE vista con estereomicroscopio en los retenidos en los tamices a) #10; b) #18; c) #30; d) #60. Vc: valva carbonática; Rv: roca volcánica (flechas azules); Qz: cuarzo (flechas amarillas); Amp: anfíboles (flechas verdes); Vv: vidrio volcánico (flechas naranjas)

5.3.1.6 Cantera NEC

El material analizado está constituido principalmente por cuarzo (58%), con cantidades subordinadas de fragmentos de valvas carbonáticas (10%), rocas volcánicas (16%) entre las que predominan ampliamente las básicas o andesíticas (15%), sobre las riolíticas o ácidas (1%). En forma subordinada se identificaron anfíboles y piroxenos (6%), areniscas silíceas (3%) (en las fracciones más finas), rocas graníticas (2%), cuarcitas (4%), vidrio volcánico (1%) y calcedonia (0,1%). (Tabla 5.10).

Tabla 5.10 Análisis petrográfico de la arena de la cantera NEC (IRAM 1649, 2008)

Constituyentes	% en peso de los constituyentes en cada fracción de los tamices (mm)						Composición ponderada (%) de la muestra
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	<0,1	1,3	3,7	4,5	0,2	0,0	9,7
Cuarzo	0	0,3	5,9	30,7	17,7	3,6	58,2
Rocas volcánicas básicas	0	0,3	1,6	7,1	4,6	0,9	14,5
Rocas volcánicas ácidas	0	0,1	0,5	0,3	0,2	0	1,2
Areniscas	0	0,1	0,8	1,3	0,9	0	3,0
Cuarcitas	0	0,1	0,1	0,8	3,1	0	4,2
Piroxenos y anfíboles	0	0	0	0,8	3,0	2,0	5,9
Trizas de vidrio	0	0	0	0,5	0,2	0	0,8
Calcedonia	0	0	0,1	0	0	0	0,1
Rocas graníticas	0	0,1	0,1	0,5	1,7	0	2,4
TOTAL	0,05	2,3	12,8	46,7	31,7	6,5	100,0

Las partículas se encuentran límpidas, sin adherencias ni crustificaciones superficiales. No se identificaron terrones blandos. El cuarzo es traslucido a blanquecino y en la mayoría de los casos presenta forma redondeada, aunque existen partículas irregulares. Las areniscas (con cemento silíceo y escasamente calcáreo), solo se observan en las fracciones gruesas. Las rocas volcánicas representan el 16% del total, donde el mayor porcentaje está constituido por agregados de color negro y verde oscuro. La textura predominante es afaníticas, se observaron en menor proporción porfíricas (en las fracciones de mayor tamaño). Las vulcanitas riolíticas son porfíricas. Las cuarcitas se presentan con colores blanquecinos, constituidas por granos de cuarzo soldados por el mismo material silíceo y en parte por sedimento arcilloso. Se observan óxidos de hierro como recubrimiento de algunos granos. Las rocas graníticas son de color rojizo a rosado. Su textura es granular y se distinguen granos de feldespatos, cuarzo y en menor proporción muscovita.

Formas: 49% redondeadas, 34% irregulares equidimensionales y 17% irregulares planares.

Materiales potencialmente reactivos: vidrio volcánico fresco (0,8%) y parcialmente alterado como trizas (1%) y en la pasta en las rocas volcánicas y 0,1% de calcedonia en las fracciones más gruesas.

En la Figura 5.19 a-d se muestra la composición y morfología de la arena de la cantera NEC en el material retenido en los tamices #10, #18, #30 y #60, respectivamente. Se reconoce abundante cuarzo, con cantidades muy subordinadas de rocas volcánicas y valvas carbonáticas. Además, se observan partículas de anfíboles y piroxenos.

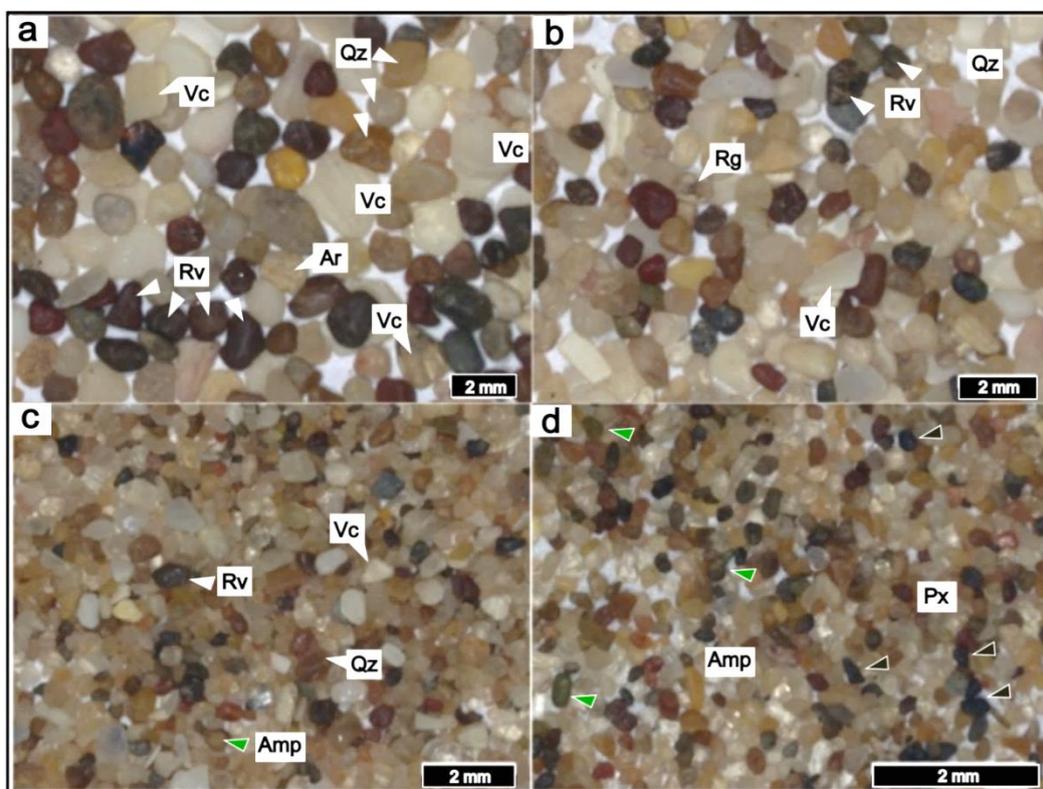


Figura 5.19 Arena de la cantera NEC vista con estereomicroscopio en las fracciones retenidas en los tamices a) #10; b) #18; c) #30; d) #60. Vc: valva carbonática; Rv: roca volcánica; Qz: cuarzo; Ar: arenisca; Rg: roca granítica; Amp: anfíboles (flechas verdes); Px: piroxenos (flechas negras).

5.3.2 Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674)

La expansión medida en el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) supera, en todas las canteras estudiadas, el límite máximo establecido por la norma IRAM 1512 (2013) (Tabla 5.11) a los 16 días (0,10%). Se continuó el ensayo hasta los 28 días para evaluar la evolución de las curvas de expansión (Figura 5.20).

Tabla 5.11 Expansión medida en el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) en las canteras de arena y canto rodado estudiadas CR: canto rodado. Ar: arena

Cantera	Expansión (%) a la edad (en días)						
	4	7	9	11	16	21	28
RCO	0,015	0,048	0,109	0,155	0,271	0,334	0,426
VIL CR	0,029	0,144	0,169	0,221	0,283	0,336	0,374
VIL Ar	0,000	0,260	0,285	0,285	0,382	0,404	0,460
MED	0,102	0,379	0,474	0,555	0,677	0,761	0,834
CLA	0,037	0,126	0,159	0,176	0,211	0,257	0,303
ORE	0,000	0,097	0,111	0,111	0,168	0,173	0,221
NEC	0,021	0,188	0,228	0,228	0,288	0,329	0,381

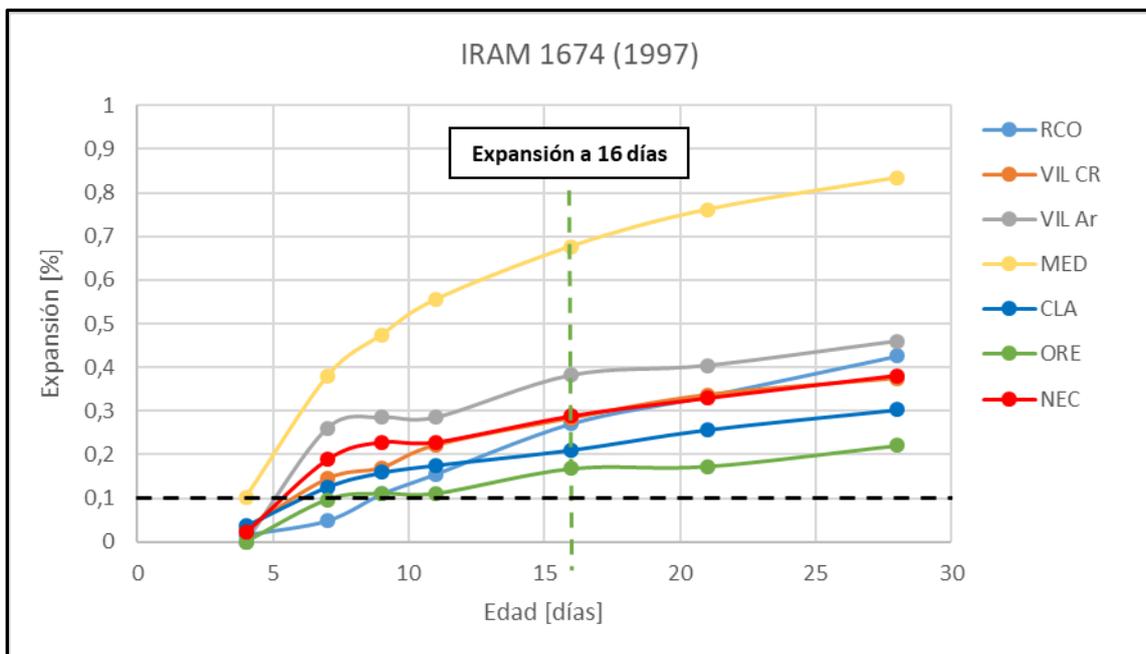


Figura 5.20 Resultados del ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997). La línea negra punteada indica el límite máximo de expansión de 0,10% para considerar al agregado no reactivo

5.3.3 Método del prisma de hormigón (IRAM 1700)

A partir de la evaluación de los resultados arrojados por el ensayo acelerado de la barra de mortero y el examen petrográfico, se realizó el ensayo del prisma de hormigón de acuerdo a los lineamientos de las normas vigentes. No se incluyó en este ensayo la cantera NEC debido al escaso porcentaje de componentes potencialmente reactivos que presenta, a que tiene el mismo origen que las canteras CLA y ORE y se encuentra a mayor distancia de la zona de influencia de Bahía Blanca.

5.3.3.1 Acelerado a 60°

En la Tabla 5.12 se muestra la expansión (%) medida a las diferentes edades de ensayo para cada una de las muestras analizadas. Se puede observar que solo los agregados de las canteras VIL (tanto el canto rodado como la arena) y MED presentan valores de expansión superiores al límite máximo establecido en las normas IRAM 1512 (2013) y 1531 (2022) para agregados finos y gruesos respectivamente (0,04% a las 13 semanas).

A pesar que la norma IRAM 1512 (2013), menciona que el método IRAM 1700 (acelerado) no es adecuado para distinguir entre agregados de moderada y elevada reactividad, se puede establecer que los resultados arrojados por la cantera MED la clasifican como altamente reactiva (0,391%), si se compara con los de la cantera VIL (Ar) (0,082%).

El canto rodado de la cantera VIL (CR), se califica como R1 (moderadamente reactivo), de acuerdo a los criterios de la norma IRAM 1531 (2022), ya que el valor obtenido (0,051%) se encuentra entre 0,04% y 0,12% (para este tipo de agregado).

Las arenas de las canteras RCO, CLA y ORE presentan valores de expansión semejantes entre sí (0,03%). En la Figura 5.21 se grafican los resultados hasta la edad de 20 semanas y se comparan con el límite máximo establecido en la norma.

Tabla 5.12 Expansión de los prismas de hormigón (ensayo acelerado) (IRAM 1700, 2013). CR: canto rodado. Ar: arena

Cantera	Expansión (%) a la edad (en semanas)					
	5	8	10	13	15	20
RCO	0,025	0,030	0,030	0,030	0,031	0,032
VIL CR	0,021	0,033	0,039	0,051	0,053	0,060
VIL Ar	0,050	0,066	0,074	0,082	0,082	0,090
MED	0,332	0,352	0,359	0,391	0,395	0,395
CLA	0,026	0,029	0,030	0,034	0,034	0,034
ORE	0,019	0,025	0,026	0,034	0,034	0,034

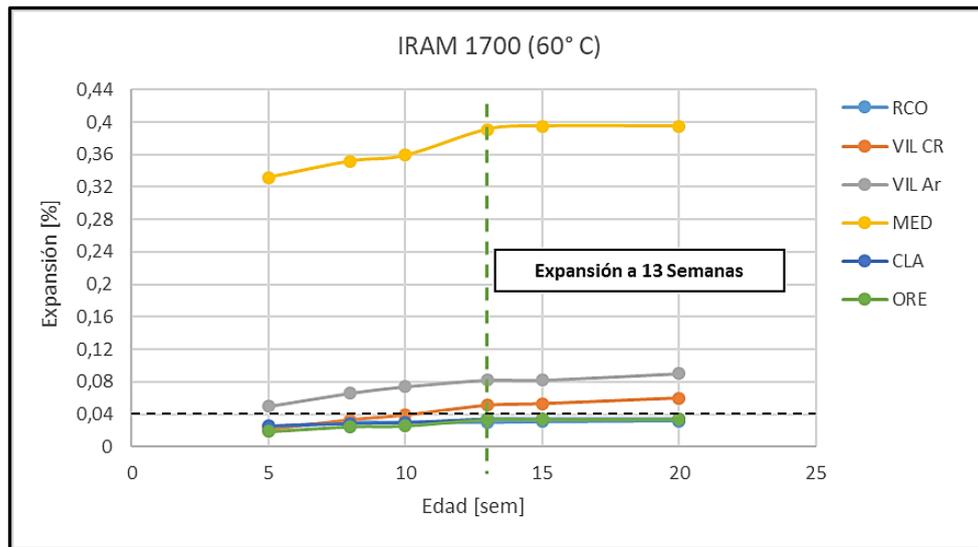


Figura 5.21 Resultados del ensayo acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013). La línea negra punteada indica el límite máximo de expansión de 0,04% para considerar al agregado no reactivo

5.3.3.2 Convencional a 38°

En la Tabla 5.13 se muestra la expansión (%) obtenida a las diferentes edades de ensayo (hasta un año) para cada una de las muestras analizadas. Se observa que la cantera MED presenta valores muy superiores al máximo establecido en la norma IRAM 1512 (2013) (0,04% a las 52 semanas). La expansión del canto rodado de la cantera VIL supera levemente el límite mientras que la arena de esta cantera, así como las de RCO, ORE y CLA se califican como inocuas. En la Figura 5.22 se grafican las curvas de expansión hasta las 52 semanas y se comparan con el límite máximo establecido en la norma.

Tabla 5.13 Expansión de prismas de hormigón, ensayo convencional (IRAM 1700, 2013) de las canteras estudiadas. CR: canto rodado. Ar: arena

Cantera	Porcentaje de Expansión en semanas									
	1	2	4	8	13	18	26	39	45	52
RCO	0,005	0,011	0,008	0,012	0,017	0,017	0,020	0,022	0,024	0,030
VIL CR	0,012	0,010	0,012	0,009	0,018	0,022	0,034	0,040	0,045	0,049
VIL Ar	0,004	0,004	0,009	0,013	0,016	0,014	0,014	0,015	0,016	0,021
MED	0,012	0,012	0,020	0,091	0,220	0,295	0,351	0,389	0,392	0,392
CLA	0,006	0,009	0,013	0,012	0,015	0,016	0,016	0,018	0,019	0,022
ORE	0,005	0,007	0,009	0,013	0,016	0,016	0,018	0,018	0,019	0,020

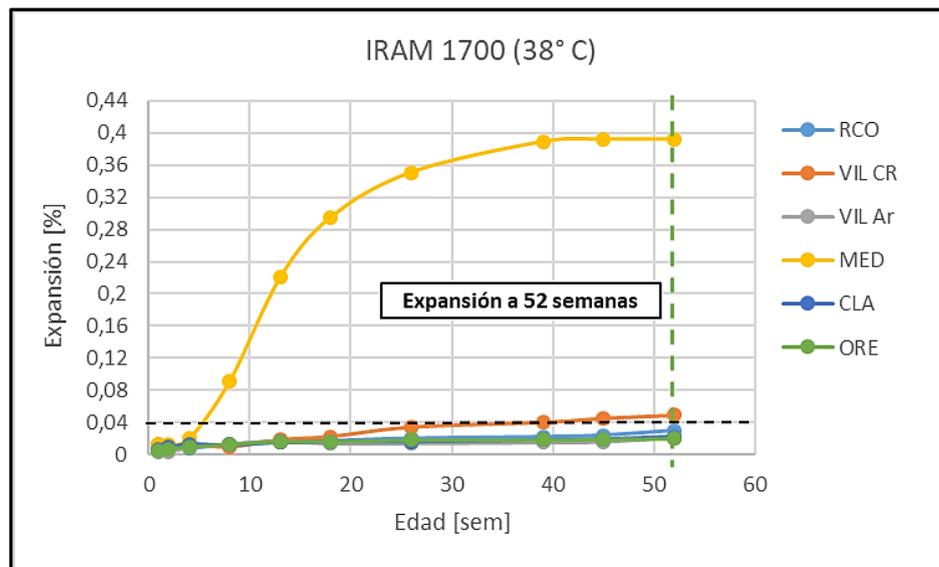


Figura 5.22 Resultados del ensayo del prisma de hormigón convencional (IRAM 1700, 2013). La línea negra punteada indica el límite máximo de expansión de 0,04% para considerar al agregado inocuo

5.3.4 Petrografía de las barras de mortero y prismas de hormigón

5.3.4.1 Introducción

A partir de los resultados obtenidos en el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) y el método del prisma de hormigón IRAM 1700 (2013) (convencional y acelerado) sobre los agregados estudiados, se seleccionaron las canteras con diferente comportamiento frente a la RAS para evaluar la microestructura luego de cumplido los tiempos de ensayo para su estudio con microscopio petrográfico sobre secciones delgadas. Se seleccionaron las canteras MED (altamente reactiva), la VIL (no reactiva, pero con expansiones cercanas al límite máximo establecido en los ensayos físicos) y dos no reactivas: RCO (de origen continental) y CLA (de origen marino).

5.3.4.2 Cantera MED

5.3.4.2.1 Barras de mortero

En la Figura 5.23a se observa una microfisura que se bifurca, que rodea una partícula de una roca volcánica y atraviesa la pasta de cemento y otra vulcanita. En la Figura 5.23b se muestra una microfisura “tipo mapa” en el interior de una vulcanita, que se desarrolla hacia la pasta de cemento. En ambas imágenes puede observarse que las microfisuras están rellenas con productos de reacción.

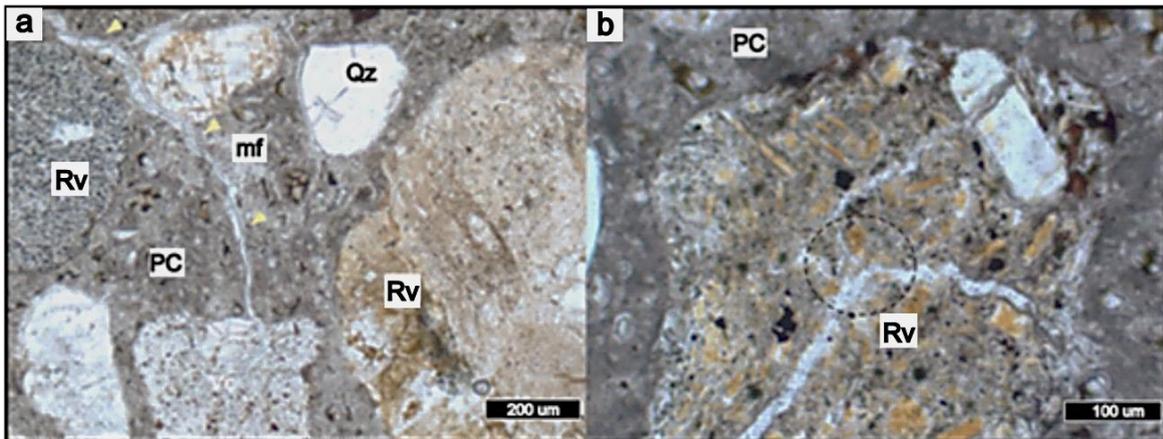


Figura 5.23 Fotomicrografías de la barra de mortero de la cantera MED a) microfisura rellena de producto de reacción que atraviesa la pasta de cemento y una roca volcánica; b) microfisura tipo mapa que parte del centro de un agregado volcánico y continúa hacia el mortero. Vistas con luz paralela. Qz: cuarzo; Rv: roca volcánica; mf: microfisura; PC: pasta de cemento

5.3.4.2.2 Prisma de hormigón acelerado

En las fotomicrografías se pueden observar microfisuras que atraviesan agregados, pasta y el contacto entre ambos. Algunas microfisuras están rellenas con un material translúcido o transparente, atribuible a productos desarrollados con la reacción, aunque por lo general se encuentran vacías. La Figura 5.24a muestra partículas de rocas volcánicas (con pasta vítrea en su composición), atravesadas por una microfisura que continúa hacia la pasta.

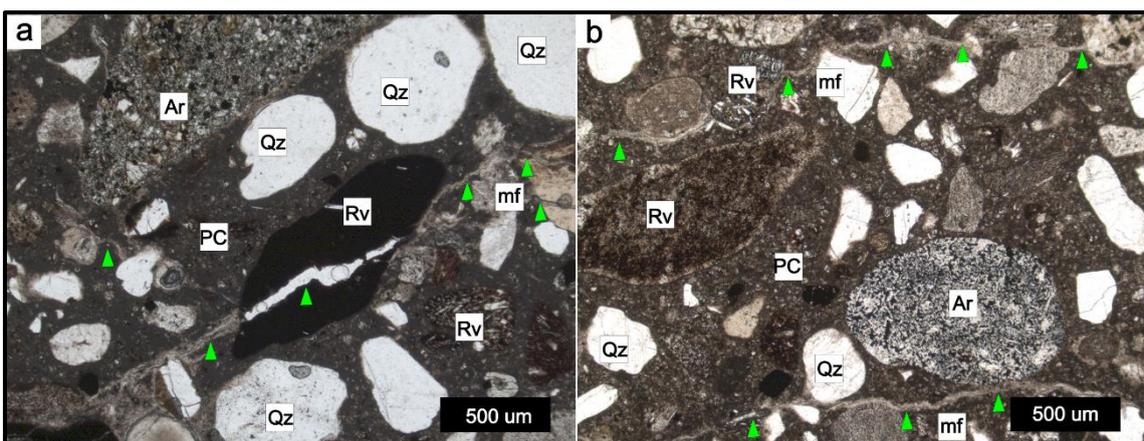


Figura 5.24 Fotomicrografías de prisma de hormigón (acelerado) de la Cantera MED a) y b) microfisuras rellenas con producto de reacción, que atraviesan la pasta de cemento y agregados de rocas volcánicas. Vistas con luz paralela. Ar: arenisca; Qz: cuarzo; Rv: rocas volcánicas; mf: microfisuras; PC: pasta de cemento

En la Figura 5.24b se observa que el mortero tiene abundante microfisuramiento que afecta tanto a la pasta como a las partículas del agregado. Los componentes de la arena analizada son diversos, aunque se destaca una importante cantidad de rocas volcánicas con pastas vítreas.

5.3.4.2.3 Prisma de hormigón convencional

La Figura 5.25 muestra la gran variedad de componentes del agregado analizado, aunque existe un predominio de las rocas volcánicas. En la Figura 5.25a se observa como una microfisura (rellena en la interfaz de producto de reacción), atraviesa una roca volcánica con pasta vítrea. La Figura 5.25b muestra una microfisura que se bifurca afectando partículas de rocas volcánicas, la pasta de cemento y el contacto agregado-pasta.

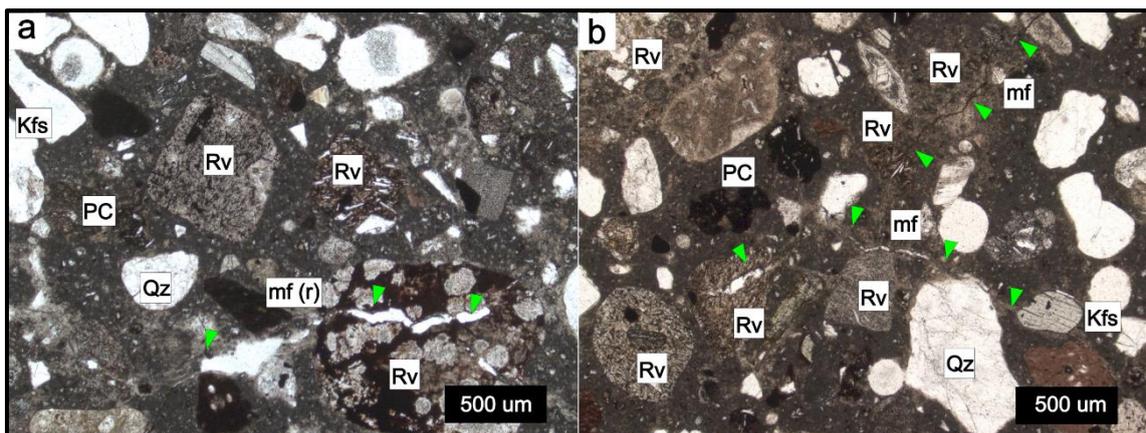


Figura 5.25 Fotomicrografías del prisma de hormigón (convencional) a 52 semanas de ensayo. Cantera MED a) microfisura rellena atravesando un agregado volcánico; b) microfisuras en la pasta de cemento y agregados volcánicos. Vistas con luz paralela. Qz: cuarzo; Kfs: feldespato potásico; mf(r): microfisura rellena; mf: microfisura; PC: pasta de cemento; Rv: rocas volcánicas

5.3.4.3 Cantera VIL (arena)

Como los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre los agregados finos (arena) y gruesos (canto rodado) en esta cantera son similares tanto en las barras de mortero como en los prismas de hormigón (convencional y acelerado), y, considerando que desde el punto de vista petrográfico existen coincidencias sobre los componentes potencialmente reactivos (tanto en cantidad como proporciones), solo se realizó el análisis petrográfico de los prismas y barras post ensayo realizados con los agregados finos debido a que son mucho más utilizados para la elaboración de hormigón en la

zona. Como agregados gruesos se utilizan en general los de trituración, porque las canteras están más próximas a los centros de consumo y porque dan mejores resultados estructurales.

5.3.4.3.1 Barras de mortero

La Figura 5.26 muestra la composición de los agregados analizados. Se observan rocas volcánicas con texturas afaníticas, fragmentos de valvas carbonáticas y partículas monominerales de cuarzo y feldespato. La Figura 5.26a muestra una microfisura que atraviesa la pasta de cemento, agregados de rocas volcánicas y el contacto entre un agregado (fragmento de valva) y la pasta. En la Figura 5.26b se distinguen microfisuras que atraviesan la pasta y bordean partículas de los agregados.

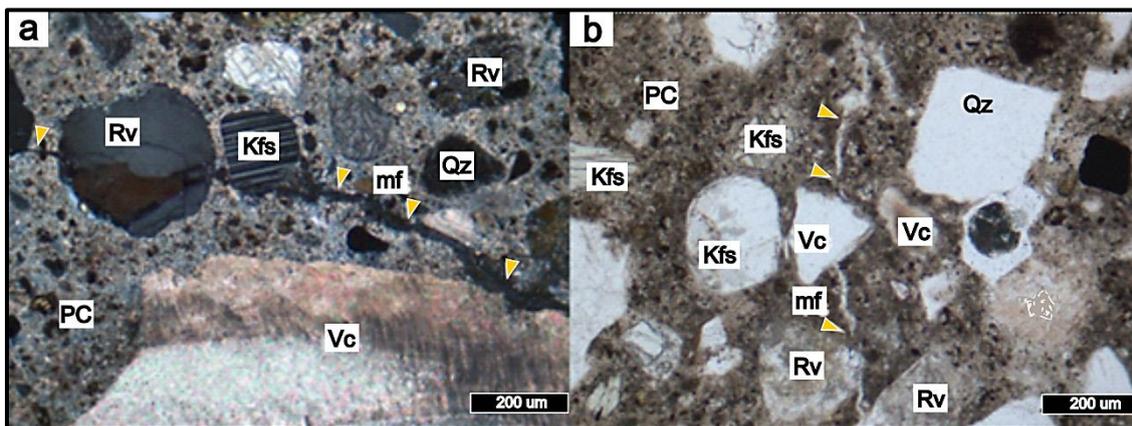


Figura 5.26 Fotomicrografías de la barra de mortero luego de 28 días de ensayo. Cantera VIL (arena) a) microfisura que atraviesa rocas volcánicas y la pasta de cemento; b) microfisura en la pasta de cemento que bordea partículas de agregados volcánicos. Vistas con nicols cruzados (a) y luz paralela (b). Qz: cuarzo; Kfs: feldespato; Vc: Valva carbonática; mf: microfisura; PC: pasta de cemento; Rv: roca volcánica

5.3.4.3.2 Prisma de hormigón acelerado

En la Figura 5.27 se puede observar la composición de los agregados. Se destacan rocas volcánicas, partículas monominerales de cuarzo y feldespatos, y areniscas cuarzosas. En la Figura 5.27a se observa una microfisura en la pasta que se continúa en zonas débiles del hormigón como es la interfaz agregado-pasta. En la Figura 5.27b se muestra con detalle la textura de un agregado volcánico y una triza de vidrio volcánico, como componentes potencialmente reactivos.

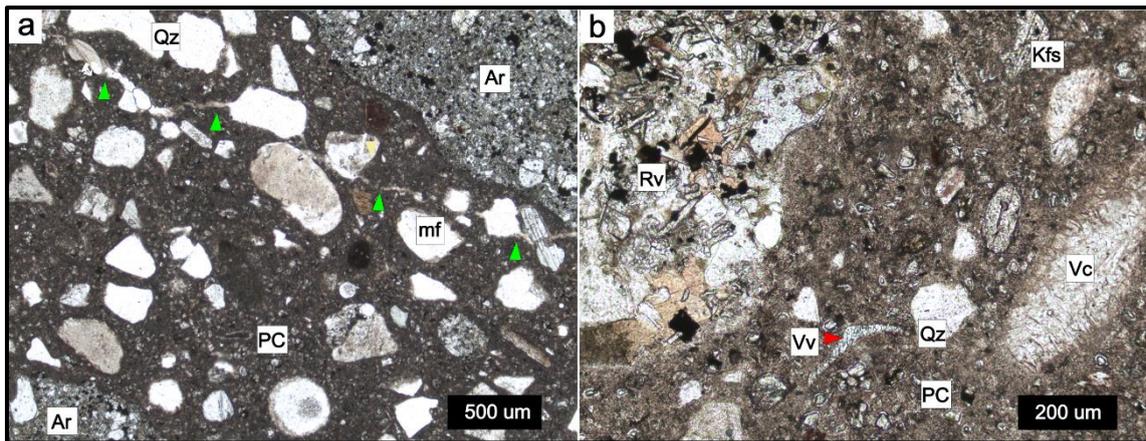


Figura 5.27 Fotomicrografías del prisma de hormigón (acelerado) de la cantera VII a 60° C a) microfisura que atraviesa rocas volcánicas y la pasta de cemento; b) textura de una roca volcánica y triza de vidrio volcánico (componentes potencialmente reactivos). Vistas con luz paralela (a) y nicoles cruzados (b). Qz: cuarzo, Kfs: feldespato potásico; Ar: arena; Vc: Valva carbonática; mc: microfisura; PC: pasta de cemento; Rv: roca volcánica; triza de vidrio volcánico (Vv)

5.3.4.3.3 Prisma de hormigón convencional

La Figura 5.28 muestra la composición de los agregados ensayados. Los mismos presentan abundantes rocas volcánicas con vidrio como componente de la pasta (Figura 5.28a) y signos de fluidalidad (Figura 5.28b). No se reconocieron microfisuras ni productos de neoformación.

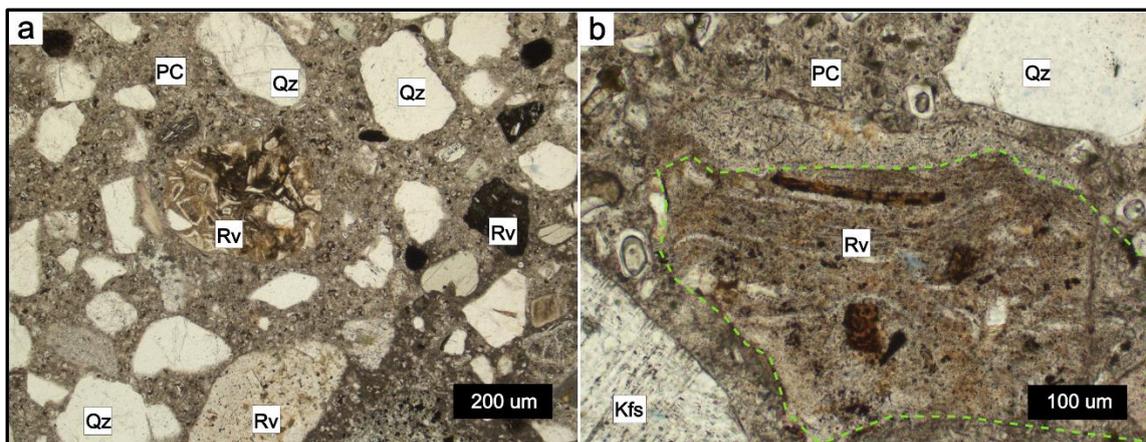


Figura 5.28 Fotomicrografías del prisma de hormigón (convencional) a 52 semanas de ensayo. Cantera VII (arena) a) Partícula de roca volcánica con pasta vítrea; b) agregado de roca volcánica con fluidalidad. Vistas con luz paralela. PC: pasta de cemento. Qz: cuarzo; Kfs: feldespato potásico; PC: pasta de cemento; Rv: roca volcánica

5.3.4.4 Cantera RCO

5.3.4.4.1 Barras de mortero

En la Figura 5.29a se pueden distinguir microfisuras que atraviesan la pasta y el contacto agregado-pasta. Estas convergen en una cavidad de aire accidental la cual, se encuentra colmatada de ettringita. La Figura 5.29b muestra una cavidad de aire accidental conectada a microfisuras rellenas con productos de reacción.

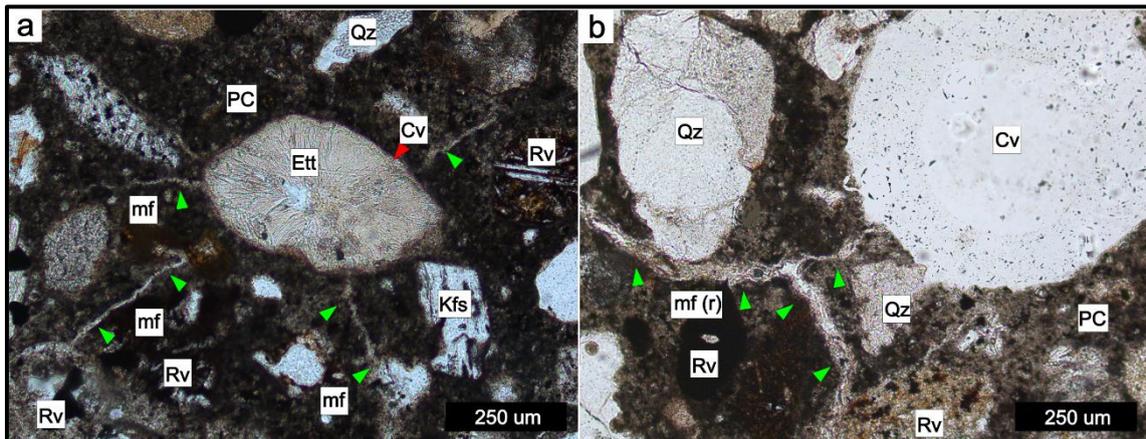


Figura 5.29 Fotomicrografías (con luz paralela) de la barra de mortero luego de 28 días de ensayo. Cantera RCO a) cavidad de aire accidental rellena con ettringita de donde parten microfisuras; b) microfisuras rellenas con productos de reacción. Qz: cuarzo; PC: pasta de cemento; Rv: roca volcánica; Kfs: feldespato potásico; Ett: ettringita; mf: microfisura; Cv: cavidad de aire accidental; mf(r): microfisuras rellenas

5.3.4.4.2 Prisma de hormigón acelerado

En la Figura 5.30a y b se observan los agregados finos de la cantera RCO, algunos presentan coronas de reacción. La Figura 5.30c muestra la composición de la arena, donde predomina cuarzo, areniscas y rocas volcánicas, aunque estas últimas no son muy abundantes. La Figura 5.30d muestra una microfisura que atraviesa pasta y la zona de contacto agregado-pasta.

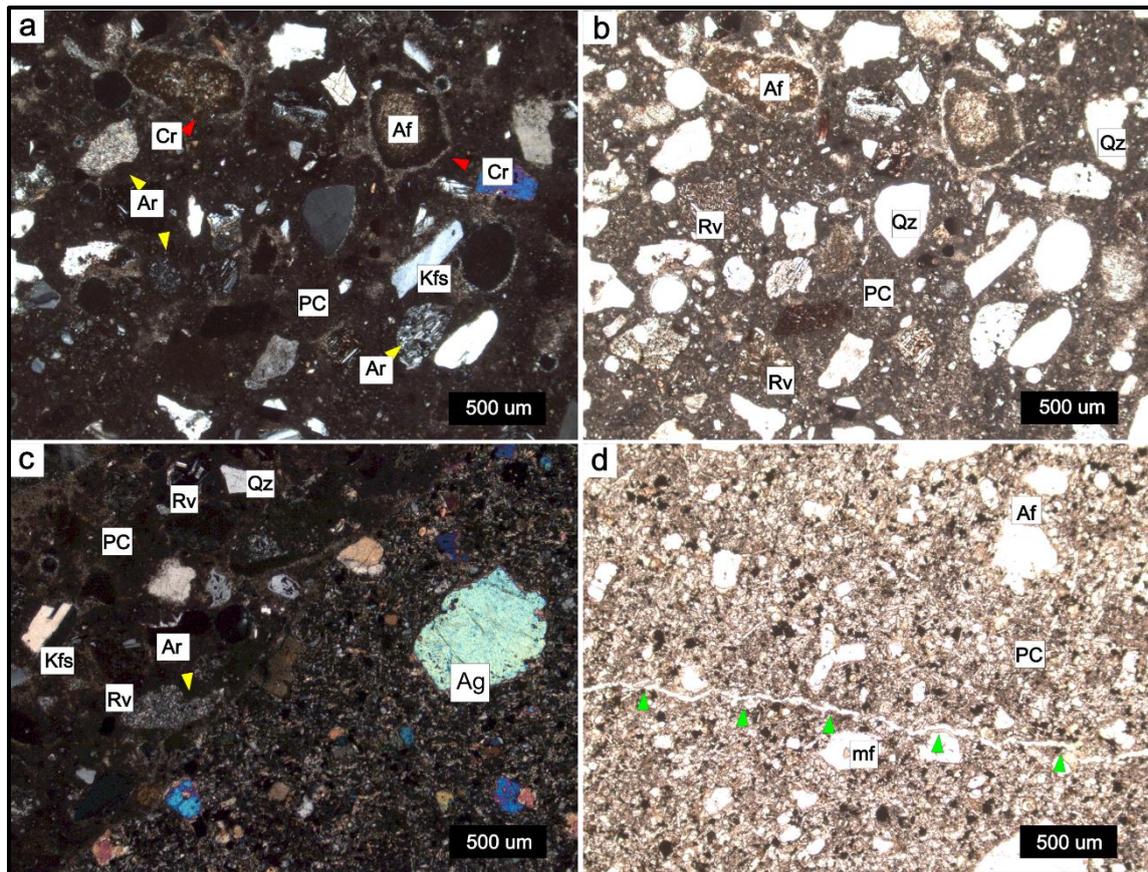


Figura 5.30 Fotomicrografías de prisma de hormigón (acelerado) a 13 semanas de ensayo. Cantera RCO a) y b) coronas de reacción sobre los agregados finos; c) componentes de la arena; d) microfisura (flechas verdes) que atraviesa la pasta de cemento y el contacto pasta-agregado. b) y d) visto con luz paralela; a) y c) visto con nicols cruzados Ar: arenisca; Kfs: feldespato potásico; Rv: roca volcánica; Qz: cuarzo; Ag: agregado grueso; Cr: coronas de reacción; agregados finos (Af); mf: microfisura; PC: pasta de cemento

5.3.4.4.3 Prisma de hormigón convencional

No se observaron evidencias de reacción. En la Figura 5.31a se puede distinguir una microfisura que atraviesa la pasta de cemento, pero sin afectar los agregados. No se observan coronas de reacción y las cavidades de aire accidental se encuentran vacías (Figura 5.31b).

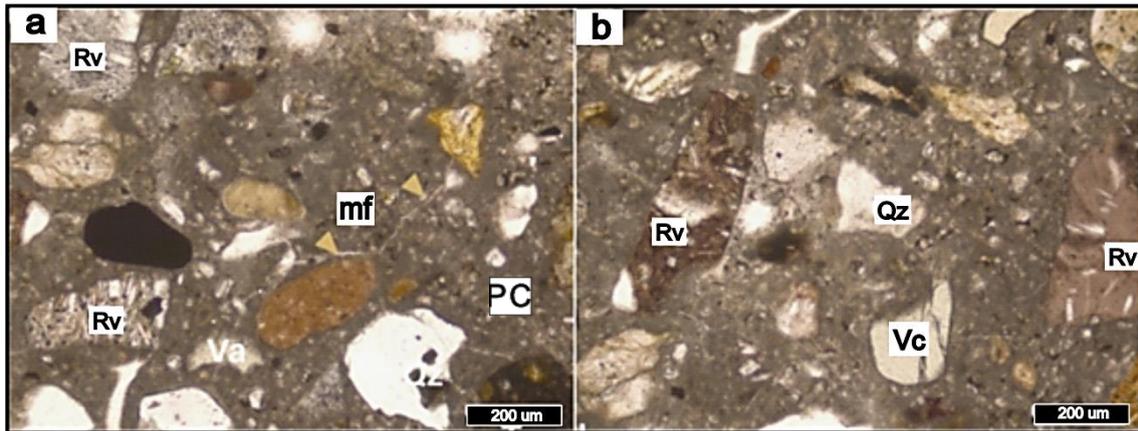


Figura 5.31 Fotomicrografías del prisma de hormigón (convencional) a 52 semanas de ensayo. Cantera RCO a) microfisura muy fina en la pasta de cemento; b) agregados volcánicos sin evidencias de reacción. Vistas con luz paralela. mf: microfisura; Rv: roca volcánica; PC: pasta de cemento; Vc: valva carbonática, Qz: cuarzo.

5.3.4.5 Cantera CLA

5.3.4.5.1 Barra de mortero

Las cavidades de aire accidental se encuentran vacías. No se identificaron productos de neoformación. En la Figura 5.32a se muestra la composición del agregado y el estado del mortero. En la Figura 5.32b se muestra una microfisura muy fina que afecta un agregado volcánico con pasta vítrea.

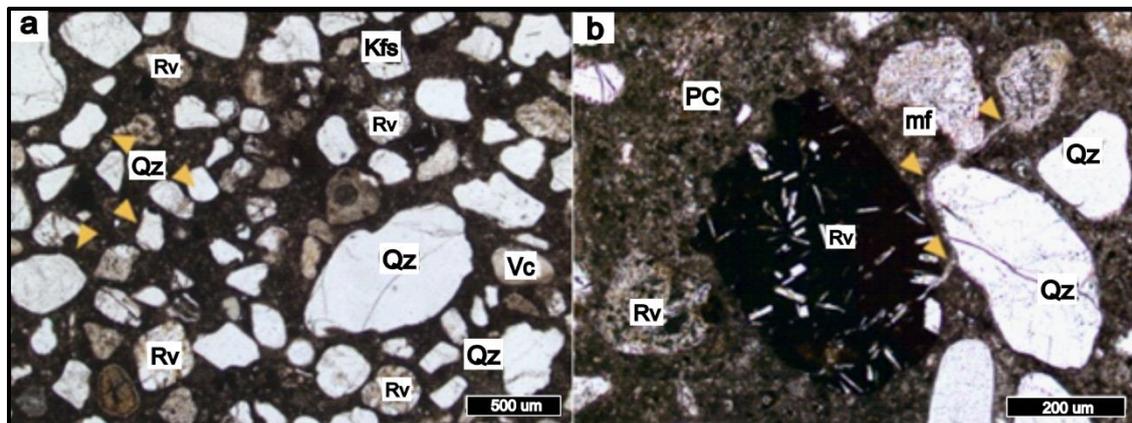


Figura 5.32 Fotomicrografías de la barra de mortero luego de 28 días de ensayo. Cantera CLA a) mortero sano; b) microfisura que afecta una vulcanita con pasta vítrea. Visto con luz paralela. Qz: cuarzo; Kfs: feldespato; PC: pasta de cemento; Vc: valva; Rv: roca volcánica

5.3.4.5.2 Prisma de hormigón acelerado

No se observaron evidencias del desarrollo de la RAS. La Figura 5.33a muestra el estado del mortero. La Figura 5.33b corresponde al detalle indicado en el recuadro de

las Figura 5.33a donde se observa una microfisura muy fina en la pasta de cemento sin afectar a los agregados.

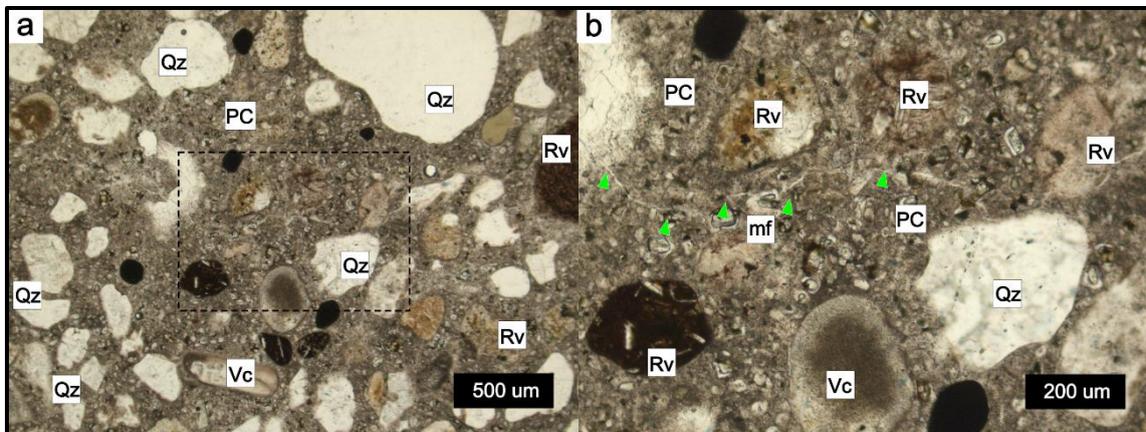


Figura 5.33 Fotomicrografías del prisma de hormigón (acelerado) a 13 semanas de ensayo. Cantera CLA a) Vista general del hormigón sin evidencias de reacción; b) detalle de la imagen a) en la que se observa una microfisura en la pasta de cemento. Visto con luz paralela. Rv: roca volcánica, Vc: valva carbonática, Qz: cuarzo; mf: microfisura; PC: pasta de cemento

5.3.4.5.3 Prisma de hormigón convencional

No se observan microfisuras ni bordes de reacción en los agregados. En la Figura 5.34a se observa el mortero sano y los componentes del agregado fino: rocas volcánicas (algunas levemente desvitrificadas), feldespatos, cuarzo y valvas carbonáticas. En la Figura 5.34b se muestra además la composición del agregado grueso.

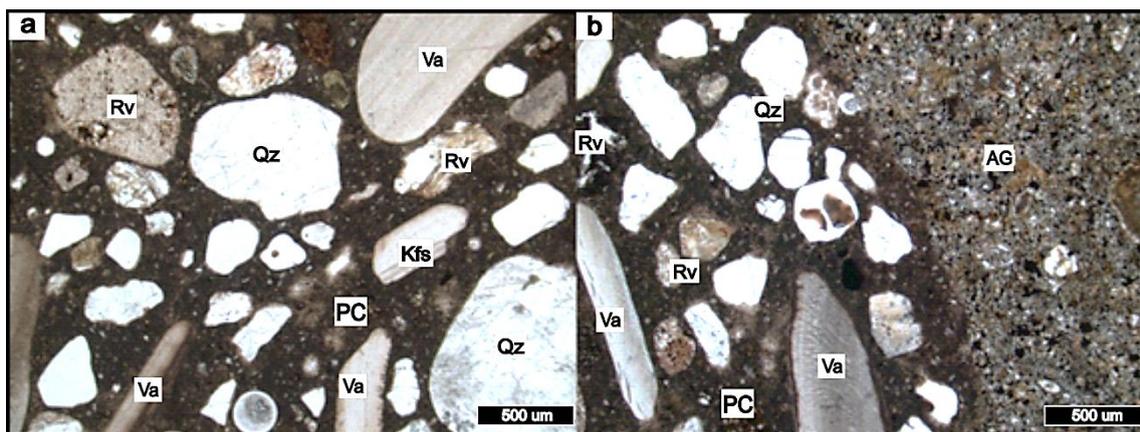


Figura 5.34 Fotomicrografías de prisma de hormigón (convencional) a 52 semanas de ensayo. Cantera CLA a) y b) Hormigón sin evidencias del desarrollo de la RAS. Vistas con luz paralela. Rv: roca volcánica. Qz: cuarzo; Vc: valva carbonática; Kfs: feldespato; Ag: agregado grueso; PC: pasta de cemento

5.3.5 Discusión de los resultados

5.3.5.1 Arenas

Todos los agregados finos de las canteras estudiadas en esta Tesis se califican, desde el punto de vista petrográfico y según los criterios de la norma IRAM 1512 (más de un componente reactivo), como potencialmente reactivos. Además, la expansión medida mediante el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) en todos los casos supera el máximo establecido (0,10% a los 16 días). Sin embargo, en el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) (convencional y acelerado) solo la arena de la cantera MED superó el límite máximo de expansión (0,04%) y casi en un orden de magnitud. Las expansiones medidas en las muestras de la cantera VIL solo mostraron valores elevados en el ensayo acelerado (0,08% a las 13 semanas). El resto de las canteras se califican como no reactivas según este método.

Todos los componentes reactivos identificados, corresponden a agregados de “reacción rápida”: trizas de vidrio volcánico y calcedonia como partículas individuales, sílice criptocristalina y amorfa en el cemento de las areniscas y vidrio volcánico en las pastas de las vulcanitas riolíticas. En la Figura 5.35 se muestra el porcentaje y distribución de los componentes mencionados en las seis canteras estudiadas. Si bien no hay una correlación directa entre el contenido de componentes reactivos y la expansión, se puede observar que la arena de la cantera MED tiene un contenido de vidrio muy superior al resto (tanto en trizas como en las pastas de las vulcanitas). Como es sabido este tipo de componentes deletéreos suele arrojar falsos positivos en el ensayo acelerado de la barra de mortero (Falcone, 2013), sumado a que pueden tener un efecto *pessimum*, por lo que su contenido en la muestra total no necesariamente queda reflejado en su potencial reactividad.

Es importante destacar que en el caso de las trizas de vidrio y la calcedonia toda la partícula es reactiva, en cambio en las vulcanitas el vidrio está en la mesostasis y es muy difícil cuantificar su porcentaje, así como el grado de alteración y, en las areniscas, el componente reactivo se presenta como material cementante de los granos de arena. No obstante, hay que considerar que el vidrio parcialmente alterado o desvitrificado es particularmente deletéreo, no solo por la superficie específica de los

granos, sino que además aumenta la permeabilidad y por lo tanto es más propenso a reaccionar con los álcalis de la solución de poro.

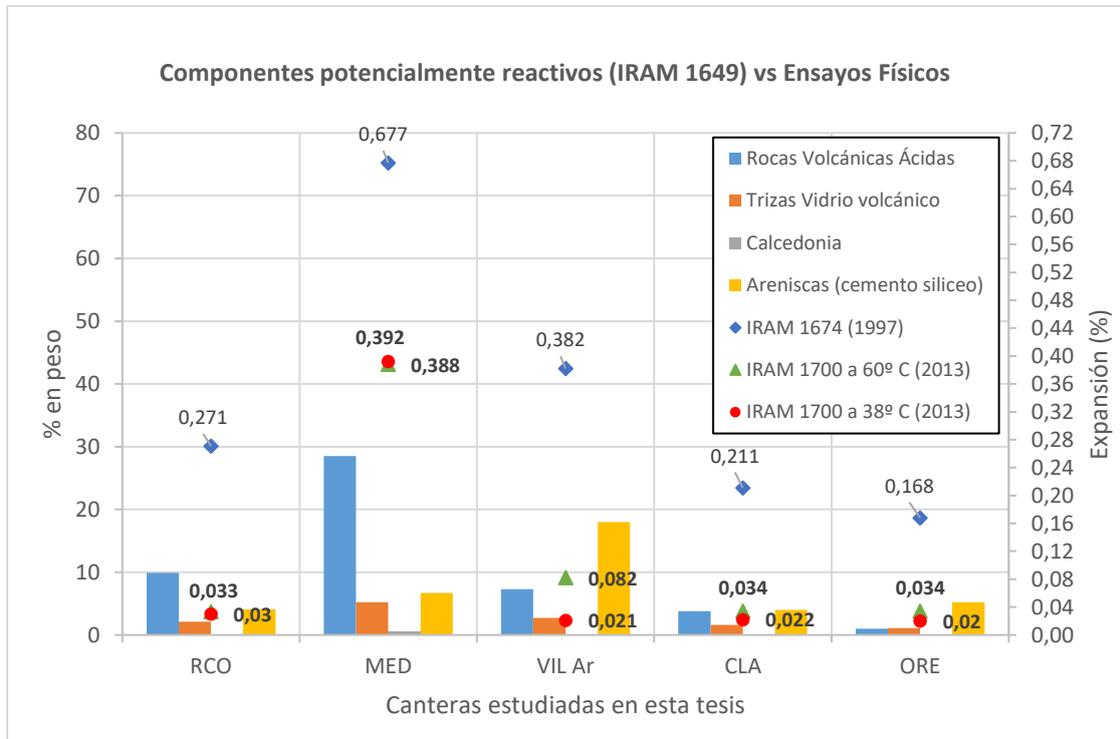


Figura 5.35 Componentes potencialmente reactivos de las canteras estudiadas vs resultados de los ensayos físicos (IRAM 1512, 2013)

La norma IRAM 1512 (2013) establece un máximo para cada componente (Tabla 4.2 del Capítulo 4 de esta Tesis) y además enuncia que el solo hecho de hallar dos de estos componentes, el agregado debe calificarse como potencialmente reactivo, independientemente de su proporción. Sin dudas esta norma es por demás conservadora al momento de dar conformidad en el uso de los agregados finos en estructuras de hormigón, como queda demostrado en los resultados obtenidos en este trabajo. Dicha norma (actualmente en revisión) debería estar en concordancia con la norma IRAM 1531 (2022) que califica al agregado considerando los ensayos físicos, siendo la petrografía el primer paso para decidir qué ensayos realizar teniendo en cuenta los componentes reactivos presentes en la muestra.

No obstante, se considera que el examen petrográfico es una excelente herramienta al momento de analizar tipos y cantidad de componentes reactivos. En la Figura 5.35 se observa claramente, que en la cantera MED, el contenido de rocas volcánicas ácidas es

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

La cantera VIL Ar muestra un comportamiento diferencial en el ensayo del prisma de hormigón, ya que dichos agregados son considerados reactivos por el ensayo acelerado de la barra de mortero y el ensayo de prisma de hormigón acelerado, pero no por el ensayo de prisma de hormigón convencional (el mismo tiene prelación sobre los demás). Esto podría explicarse por la agresividad de los métodos, que hace reaccionar la sílice criptocristalina que se encuentra cementando las areniscas que componen estos agregados. En el prisma convencional, esto no ocurre ya que necesitaría más tiempo para que la reacción se desarrolle.

En resumen, de los estudios realizados se puede concluir que solo las arenas de la cantera MED superaron ampliamente (0,392%) el límite máximo de expansión al año en el prisma convencional, mientras que en el prisma acelerado lo hicieron los agregados de las canteras MED y VIL Ar (0,391% y 0,082% respectivamente a las 13 semanas). Esta última, arrojó en el método del prisma de hormigón convencional, valores por debajo del límite establecido en la norma IRAM 1512 (2013), calificando al agregado como no reactivo (0,021% a las 52 semanas).

De acuerdo con la Tabla B.1 (IRAM 1512, 2013) la Clase de Reactividad para los agregados de la Cantera MED es **Altamente reactivo**. De la misma manera, si tenemos en cuenta los resultados del ensayo convencional del prisma de hormigón según IRAM 1700, el cual tiene prelación sobre los demás ensayos, la clasificación para los agregados de la Cantera VIL Ar es **No Reactivo**. No obstante, según los resultados del método acelerado de barra de mortero y del prisma de hormigón, los agregados de dicha cantera podrían clasificarse como altamente reactivos (la norma es conservadora

cuando se determina la reactividad con este tipo de ensayo). De esta manera, sería conveniente y necesario confirmar dichos resultados a partir de la búsqueda de estructuras donde se hayan utilizado estos agregados.

5.3.5.2 Canto rodado

El agregado grueso de la Cantera VIL CR presenta componentes potencialmente reactivos de reacción rápida, similares a los observados en la arena ya que el material tiene el mismo origen. Si bien no se observó vidrio volcánico fresco, sus productos de desvitrificación contienen variedades de sílice cripto a microcristalina (calcedonia, tridimita, cristobalita) y menor proporción de cuarzo microcristalino. La expansión medida en el ensayo acelerado de la barra de mortero es de 0,283%, superior al límite de 0,1%. Además, la muestra arrojó valores en el prisma de hormigón convencional y acelerado, expansiones de 0,049% y 0,051% a las 52 y 13 semanas, respectivamente, confirmando la reactividad del agregado ya que supera el límite máximo establecido en la norma IRAM 1531 (2022) para estos ensayos (0,04%).

De acuerdo con la Tabla B.1 (IRAM 1531, 2022) la Clase de Reactividad para la Cantera VIL CR es R1 (moderadamente reactivo).

Como se trata de componentes de reacción rápida, y con el objeto de evaluar un posible efecto *pessimum* para este agregado, se realizaron ensayos mediante el método acelerado de la barra de mortero, reemplazando 15%, 30% 40%, 50%, 60%, 70% y 85% en peso del agregado en estudio por una arena de uso comercial (arena oriental (AO)) y de conocido comportamiento inocuo. Los resultados se muestran en la Figura 5.36.

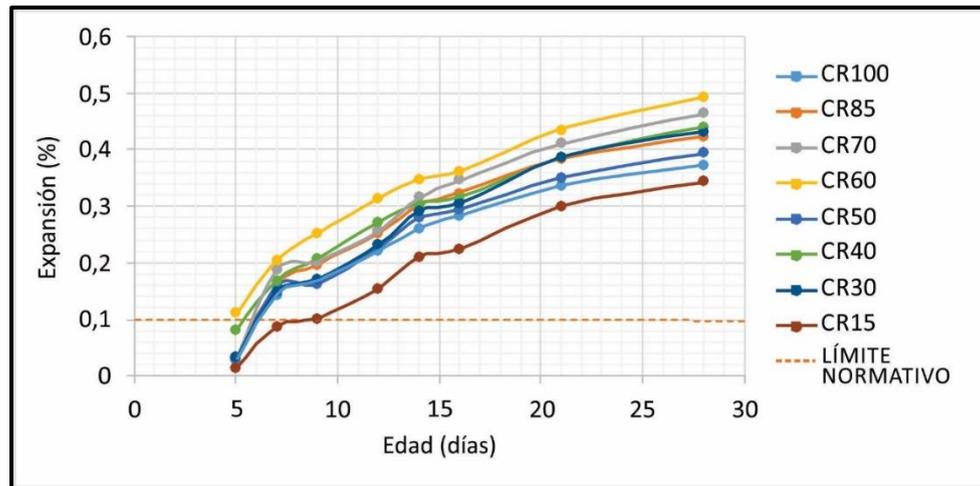


Figura 5.36 Evaluación del efecto pessimum para el agregado de la cantera VIL CR. (IRAM 1531, 2022)

Se puede observar, por un lado, que con todos los porcentajes de reemplazo se supera el límite máximo establecido por norma ($> 0,1\%$). Además, se observa efecto *pessimum* con reemplazos de 60%-70% por una arena no reactiva (40%-30% del agregado VIL CR), por lo que es importante tener en cuenta este comportamiento en el caso de efectuar mezclas con otros agregados.

CAPÍTULO VI. CASOS DE ESTUDIO

6.1 Introducción y ubicación de las obras estudiadas

Desde hace algunas décadas, se puede observar que muchos de los pavimentos de hormigón construidos en la zona de estudio han perdido la condición de servicio para la que fueron creados. Dichas estructuras fueron diseñadas para soportar cargas dinámicas ininterrumpidas durante al menos 50 años, sin la necesidad (o al menos eso se espera) de una intervención importante en dicho periodo (ASTHO, 2001; FWHA, 2001). Es sabido que para proyectar una estructura de hormigón no solo se consideran los valores estructurales (dimensiones, cargas a soportar, etc.), sino que además es necesario conocer el comportamiento de los materiales intervinientes en los diferentes estadios en el proceso de elaboración del hormigón. Este proceso, de análisis de las variables que podrán influir a lo largo del tiempo, se lo conoce con el término de durabilidad. Dentro de dichas variables, se pueden considerar algunas que son significativas como la exposición a las inclemencias climáticas (precipitaciones, variaciones de temperatura) así como también el comportamiento de los materiales expuestos a condiciones agresivas (pH del hormigón) dentro del proceso de elaboración y fragüe del hormigón, hasta su estado endurecido.

Este capítulo abarca los estudios realizados sobre aquellos pavimentos de hormigón ubicados en la zona de estudio de esta Tesis que, luego de un análisis visual in situ, se detectaron evidencias de deterioro vinculadas a la RAS (Figura 6.1). Dentro de estas manifestaciones superficiales, se pueden mencionar: fisuración tipo mapa, fisuras con rellenos blanquecinos con aspecto de gel, desprendimientos superficiales generalizados, levantamiento de placas y rotura parcial o total de las losas.

Como es sabido, por una cuestión de costos, para la elaboración del hormigón, se utilizan agregados de canteras próximas a la ejecución de la estructura. En tal sentido, en este capítulo se vinculará los agregados identificados en los pavimentos analizados, con los estudiados en el Capítulo 5, y calificados desde el punto de vista de la RAS a partir de los ensayos normalizados.

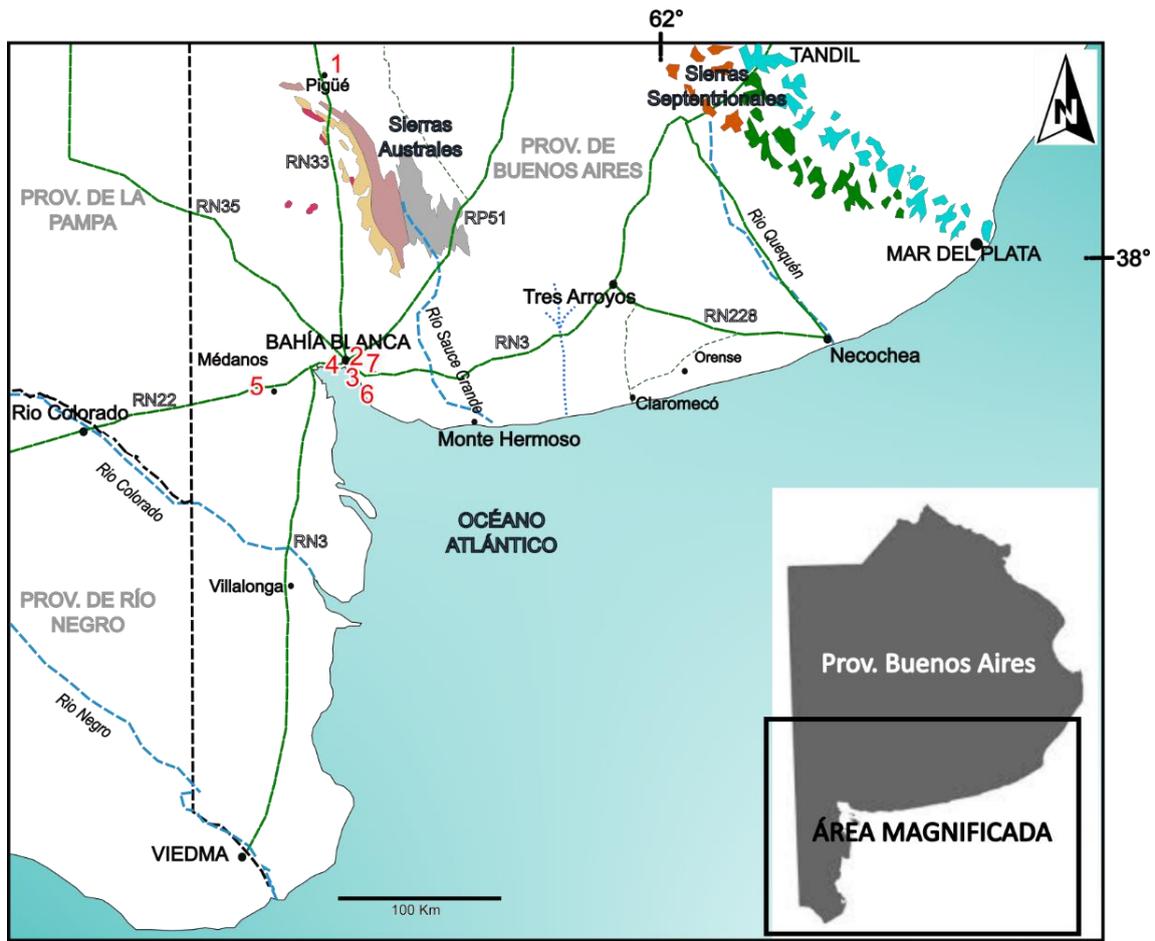


Figura 6.1 Ubicación de las estructuras estudiadas. 1) Rotonda de acceso a Pigüé. 2) Autovía Juan Pablo II. 3) Playón de estacionamiento en Bahía Blanca. 4) Rotonda de acceso a Bahía Blanca. 5) Rotonda de acceso a Médanos. 6) Pavimento de un acceso al Puerto de Ing. White. 7) Autovía de acceso a Bahía Blanca.

En todas las estructuras evaluadas se realizó el análisis petrográfico macro y microscópico del hormigón, caracterizando los agregados gruesos y finos, y el estado general del mortero. El resto de los ensayos realizados varían según las características de cada estructura, dimensiones, accesibilidad y posibilidad de extracción de testigos para realizar ensayos físico-mecánicos y valoración del daño microestructural (DRI). Los estudios con MEB y microsonda electrónica, se realizaron en aquellos hormigones en los que se identificaron abundantes productos de neoformación.

6.2 Rotonda de acceso a Pigüé

6.2.1 Ubicación y características de la estructura

Se estudió el pavimento de hormigón de una rotonda en la intersección de la Ruta Nacional N° 33 y la Ruta Provincial N° 67 en el acceso a la localidad de Pigüé, al

sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Figura 6.1). Dicha estructura, de 18.000 m², fue construida en el año 1984 (Figura 6.2) y, desde entonces, se han realizado varias reparaciones reemplazando, en espesor total el hormigón deteriorado, siendo la más importante la del año 2009. Tanto en el pavimento del hormigón original (O₁, O₂ y O₃) como en el de la reparación (R₁ y R₂), se observan fisuras longitudinales y tipo mapa, despostillamientos (algunos con desplazamientos) y pérdida de material de base por bombeo (Figura 6.3a).



Figura 6.2 Ubicación de la rotonda de acceso a la localidad de Pigüé (Ruta Nacional N° 33 – Km 134). Imagen tomada de Google Earth ®

Se extrajeron 5 testigos, 3 para el hormigón O y 2 para el hormigón R (Figura 6.3b y c). Se realizaron ensayos físicos, mecánicos, petrografía macroscópica y por microscópica óptica. Bajo lupa se extrajeron productos de neoformación. Los mismos fueron analizados mediante MEB. Además, se determinó el Damage Rating Index (DRI) a partir del conteo de diferentes tipos de fisuras en secciones pulidas de los testigos extraídos.

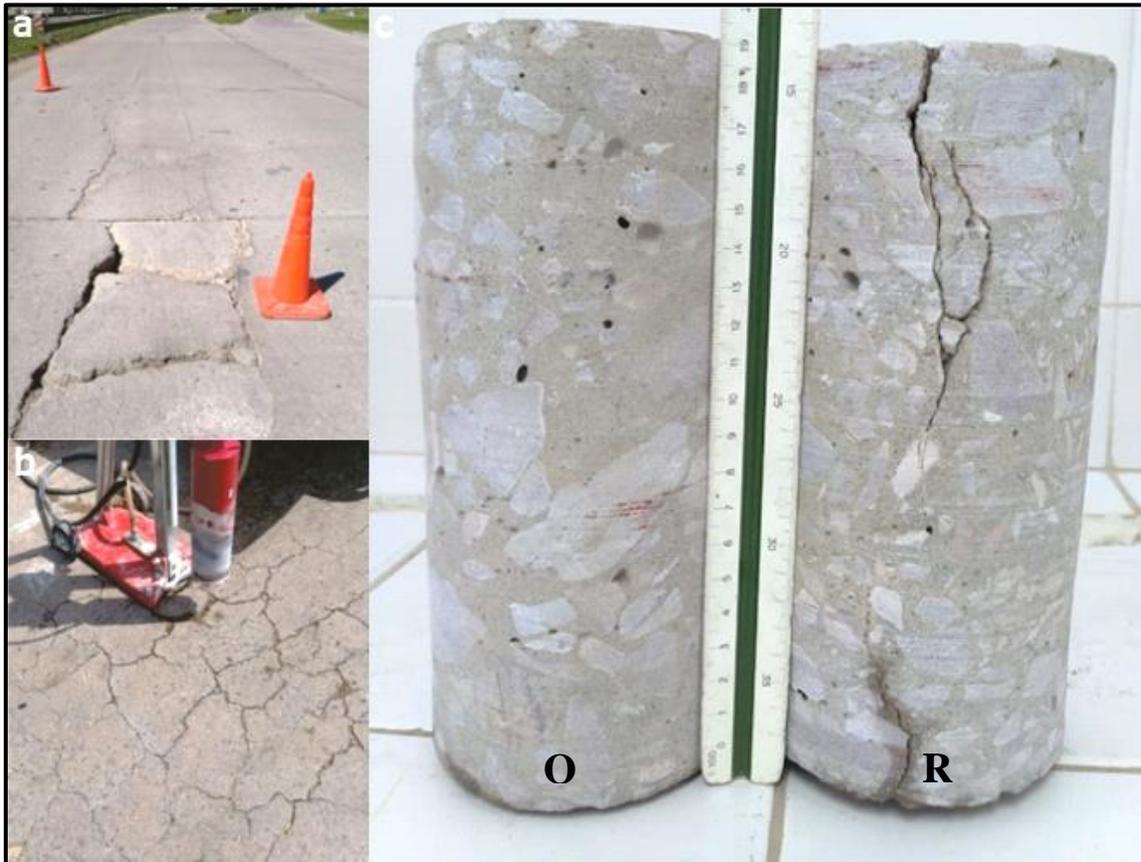


Figura 6.3 Rotonda de acceso a Pigüé a) estado del pavimento original en la rotonda; b) calado de testigos en losa de reparación; c) testigos del hormigón (O y R) extraídos para su análisis

6.2.2 Ensayos físicos y mecánicos

En la Tabla 6.1 se detallan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados sobre los testigos del hormigón original (O) y de la reparación (R). Este ensayo consiste en colocar el testigo (con las caras paralelas entre si y perpendiculares al eje axial), en una prensa de compresión y someterlo a la una carga axial hasta alcanzar la rotura de la misma. El valor obtenido será la Resistencia ofrecida (en MPa), entre el valor de la carga última dividida la superficie de carga (IRAM 1546, 2017).

Si bien se observa un valor más elevado de resistencia a compresión en el hormigón R respecto al O (~ 53 MPa vs. ~ 37 MPa, respectivamente), éstos son valores habituales para este tipo de estructura. Cabe mencionar que todos los testigos tenían una relación de esbeltez de 2.

Por otro lado, se realizaron ensayos físicos sobre 20 trozos de los testigos ensayados. La norma ASTM C642-21 permite determinar la densidad, absorción y porosidad del hormigón endurecido, a partir de muestras de cualquier forma y tamaño, siempre y cuando el volumen de cada porción (sin fisuras) no sea menor que 350 cm^3 (aproximadamente 800 gramos).

Cada muestra se secó en horno a una temperatura entre $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), por no menos de 24 horas, obteniéndose la masa seca (M_s). Luego se sumergió en agua a temperatura ambiente por no menos de 48 horas. Al retirarse, se secó superficialmente la muestra con un paño absorbente. Se pesó y se determinó la masa saturada a superficie seca (M_{sss}). La muestra es colocada nuevamente en un recipiente con agua y se hierve por un período de 5 horas. Se lo deja enfriar hasta temperatura ambiente en el mismo recipiente y luego se seca superficialmente la muestra con un paño absorbente (mismo procedimiento que el realizado para la M_{sss}). Se pesó la masa saturada a superficie seca luego del hervor (M_{sssh})

Luego de la inmersión y hervor de la muestra, se calculó la masa aparente o masa desplazada (M_a), a partir de la utilización de una balanza (hidrostática) que puede medir la masa del material inmerso en agua a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$).

La densidad aparente es obtenida a partir del cociente entre la M_s dividido la diferencia entre M_s y M_{sssh} (expresado en porcentaje). La absorción es el resultado de comparar la diferencia de la M_{sss} y la M_s sobre la M_s , expresada en porcentaje. Por último, se obtuvo la porosidad que relaciona la diferencia de la M_{sssh} y la M_s , sobre la diferencia de la M_{sssh} y la M_a (expresado en porcentaje).

Estos valores no reflejan diferencias apreciables entre los hormigones R y O. En todos los casos, los valores de porosidad se mantienen por debajo del 10% (valores aceptables para hormigones estructurales).

Tabla 6.1 Ensayos físicos y mecánicos. Resistencia a la compresión (IRAM 1546, 2017). Medición de densidad, absorción y porosidad del hormigón O y R (ASTM C642-21)

Hormigón	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)	Porosidad (%)
O ₁	37,1	2,34	3,8	8,6
O ₂	36,8			
O ₃				
R ₁	52,6	2,40	3,3	7,5
R ₂				

La capacidad y el coeficiente de succión capilar (particularmente del hormigón del sector superior) son parámetros asociados a la durabilidad de las estructuras de hormigón. Se define capacidad de succión capilar (C) a la capacidad máxima nominal que tiene una muestra de ensayo para incorporar agua a través de la base de succión. El coeficiente de succión capilar (S) se refiere a la rapidez de absorción de agua por capilaridad y se lo denomina también velocidad de succión capilar (IRAM 1871, 2021)

El método de ensayo para determinar los valores de C y S, consiste en registrar el incremento de masa de una muestra, en contacto con agua en una de sus bases. Para obtener un espécimen de 5 cm de espesor, fue necesario realizar un aserrado (en la superficie de exposición al tránsito) de los testigos R1 y O2.

El valor de C representa la ordenada de una recta horizontal a la cual tiende asintóticamente la gráfica, para las mediciones posteriores. El coeficiente S, para cada una de las muestras, se calculó como la pendiente de la recta obtenida mediante ajuste por cuadrados mínimos de la serie de puntos correspondientes al intervalo de tiempo comprendido entre 0,1 C y 0,9 C (Figura 6.4).

En la Tabla 6.2 se muestran los valores de capacidad de succión capilar (C) y el coeficiente de succión capilar en función de la raíz cuarta del tiempo (S), como especifica la norma IRAM 1871 (2021). Debido a que en el Reglamento CIRSOC 201 (2005), siguen vigentes los requisitos establecidos para el ensayo según la anterior edición de la norma, se contempló en el Anexo A de la nueva versión, una estimación de la velocidad de succión capilar o coeficiente de succión capilar en función de la raíz

cuadrada del tiempo ($S^{0,5}$) a partir del valor del coeficiente de succión capilar en función de la raíz cuarta del tiempo (S). Dicha fórmula ha sido planteada para el caso de muestras provenientes de probetas moldeadas y si bien no hay información experimental disponible, no habría razones para suponer que los testigos mostraran una diferencia sustancial. Es por ello que también se incorporó en la Tabla 6.2 los valores de $S^{0,5}$ obtenidos a partir de la estimación del S del ensayo, con la fórmula establecida en la norma vigente.

Tabla 6.2 Capacidad (C) y coeficiente de succión capilar (S) (IRAM 1871, 2021)

Testigo	C (g/m ²)	S (g/m ² s ^{0,25})	S _{0,5} (g/m ² s ^{1/2})
Original (O ₂)	5075	294,6	10,7
Reparación (R ₁)	3924	229,8	8,4

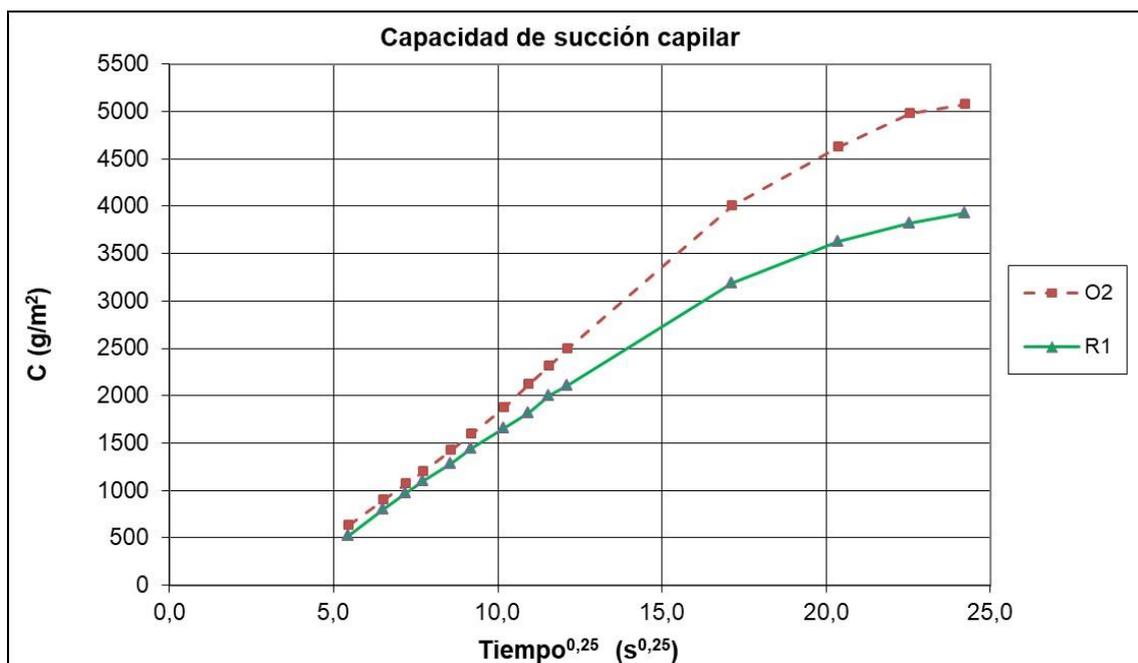


Figura 6.4 Capacidad de succión capilar de los hormigones R y O.

Si bien el hormigón R1 presentó los menores valores de capacidad y coeficiente de succión capilar, la velocidad de succión capilar ($S_{0,5}$) estimada a partir de la fórmula establecida en la nueva versión de la norma IRAM 1871 (2021), presenta valores elevados tanto para el hormigón O₂ como el de R₁, y en ambos casos supera el valor límite establecido por el reglamento CIRSOC 201 (2005), para estructuras expuestas a ambientes agresivos ($4 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{1/2}$).

6.2.3 Caracterización petrográfica de los testigos

6.2.3.1 Observaciones con estereomicroscopio

Las Figuras 6.5 a y b corresponden al hormigón O y las c y d al R. En la primera se observa que el agregado grueso utilizado es cuarcítico. Las cavidades de aire accidental están parcialmente rellenas con ettringita y un material blanquecino que podría corresponder a calcita o portlandita. En la Figura 6.5b se muestra, con mayor magnificación, un sector con abundante material blanquecino a translúcido, sin hábito definido, que podría atribuirse a productos de neoformación asociados a la RAS. En la Figura 6.5c se observa una cavidad tapizada con productos de neoformación blanquecinos a transparentes y sin hábito definido, y el agregado grueso cuarcítico. La Figura 6.5d muestra un detalle de una zona con abundantes productos de reacción (ettringita y productos de color transparente a blanquecino) y microfisuras.

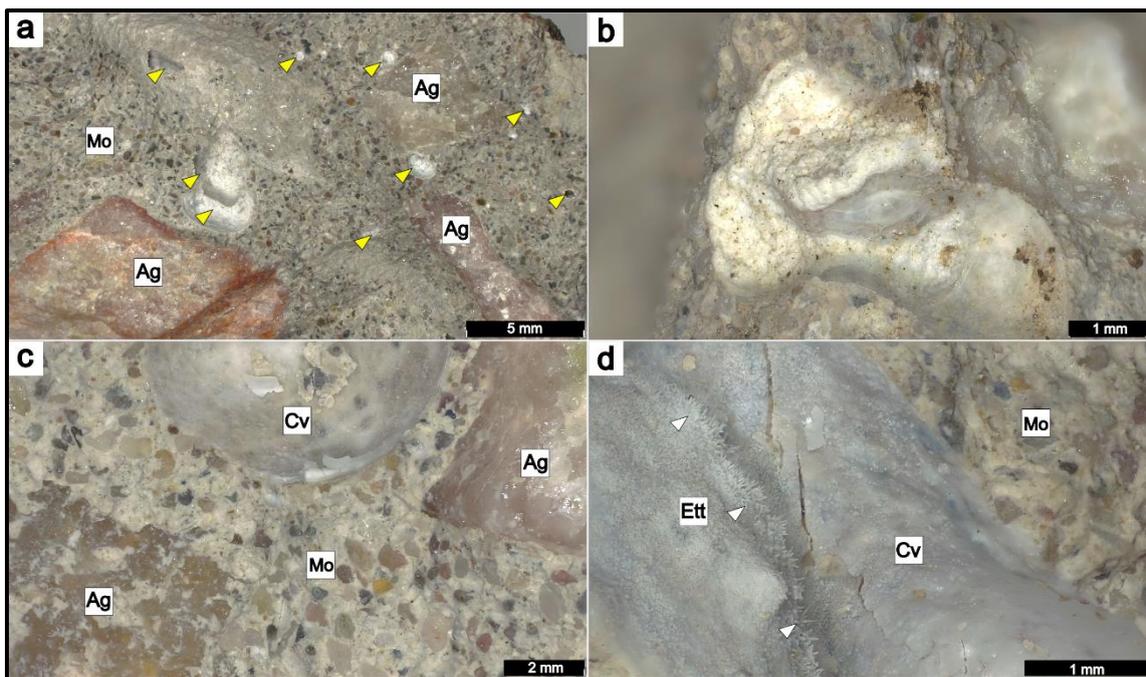


Figura 6.5 Fotomicrografías del hormigón O (a y b) y R (c y d) vistas con estereomicroscopio a) agregados gruesos cuarcíticos y cavidades de aire accidental rellenas parcialmente por productos de reacción (flechas amarillas); b) detalle del mortero con abundante desarrollo de material de neoformación; c) agregado grueso cuarcítico y cavidad de aire accidental parcialmente rellena con productos de reacción; d) detalle del interior de una cavidad con productos de reacción blanquecinos a transparentes y ettringita (flechas blancas). Mo: mortero; Ag: agregado grueso; Cv: cavidad de aire accidental; Ett: ettringita

6.2.3.2 Observaciones con microscopio petrográfico

Los estudios con microscopio petrográfico sobre secciones delgadas de los hormigones O y R, permitieron determinar que la composición de los agregados es la misma en ambos hormigones. El agregado grueso cuarcítico utilizado contiene abundante cuarzo microcristalino (~6%) y cuarzo con extinción ondulante (AEO promedio 23°). El agregado fino es una arena natural constituida en forma predominante por cuarzo, feldespatos y valvas carbonáticas, con menor proporción de rocas graníticas y volcánicas. En la Figura 6.6 se observan las características del hormigón O y R visto con microscopio óptico sobre secciones delgadas. Las Figuras 6.6a, b y c corresponden al hormigón O y las Figuras 6.6d, e y f al R. En la Figura 6.6a se observa (con luz paralela) una partícula de cuarcita con una microfisura en la zona de interfase con el mortero. Las cavidades de aire accidental están parcialmente rellenas con materiales de baja birrefringencia, algunos de ellos con hábito fibroso adjudicados a ettringita. La Figura 6.6c muestra un sector del mortero con fuerte carbonatación. En la Figura 6.6d se observa una microfisura que afecta la pasta de cemento y bordea a los agregados finos. Las Figuras 6.6e y 6.6f (con luz paralela y nicoles cruzados respectivamente) muestran una partícula de cuarcita con abundante cuarzo microcristalino y una microfisura rellena con productos de neoformación, en el contacto con el mortero.

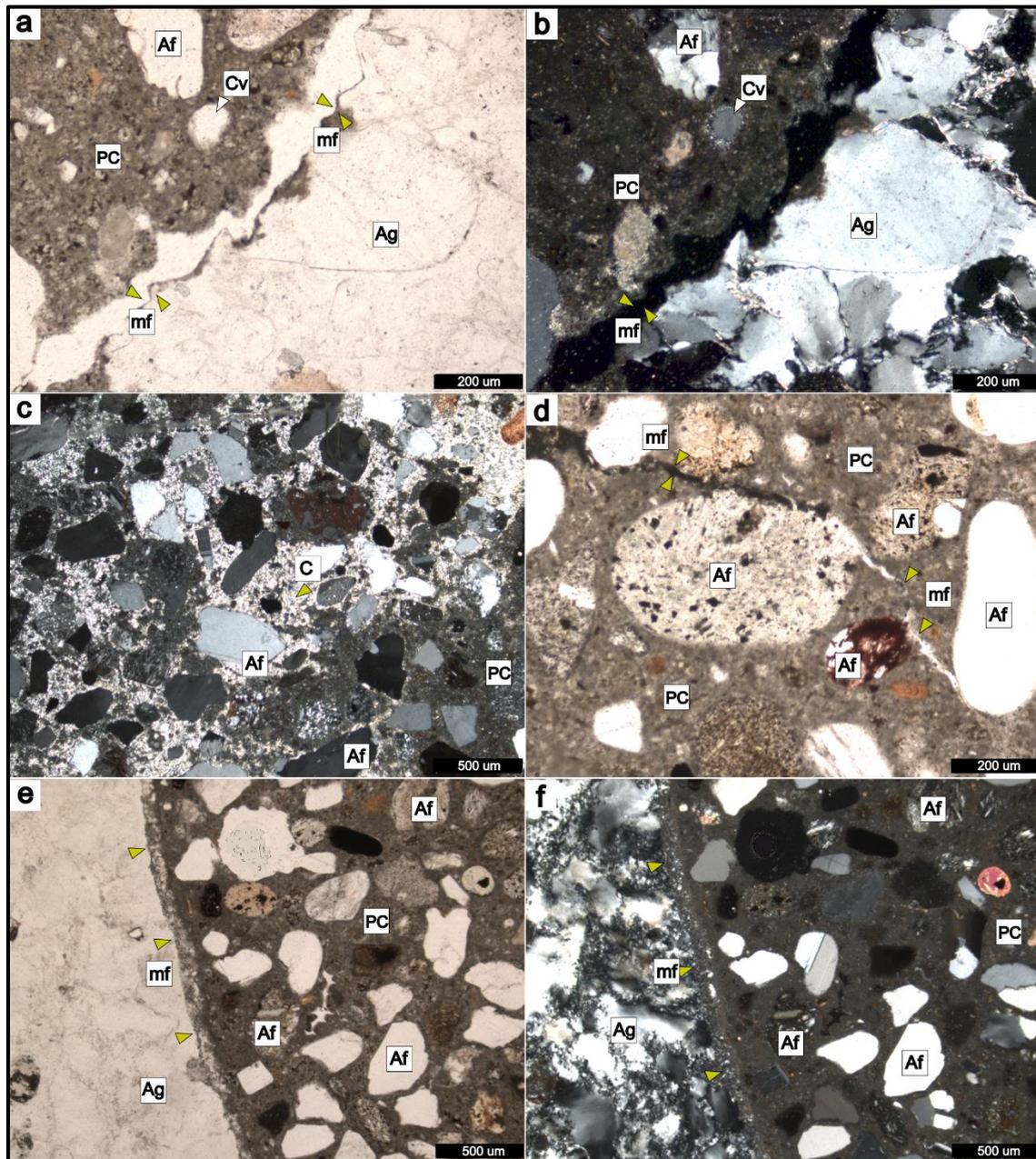


Figura 6.6 Fotomicrografías del hormigón O a), b) y c) y R d), e) y f) vistas con microscopio óptico con luz paralela (a, d, e) y nicols cruzados (b, c, f); a) agregado grueso cuarcítico con una microfisura vacía en contacto con el mortero (flechas amarillas); b) misma imagen con nicols cruzados; c) carbonatación en el mortero (flecha amarilla); d) microfisura en la pasta de cemento bordeando los agregados finos (flecha amarilla); e) agregado grueso cuarcítico con una microfisura rellena con productos de reacción en la interfase con el mortero (flecha amarilla); f) misma imagen con nicols cruzados donde se observa cuarzo microcristalino en el agregado grueso. Af: agregado fino; Ag: agregado grueso; Cv: cavidad de aire accidental; PC: pasta de cemento; mf: microfisura; C: pasta carbonatada

En base a las características texturales y mineralógicas descriptas, se puede establecer que los agregados gruesos provendrían de formaciones geológicas asociables con los materiales que se explotan en la cantera PIG. En el caso de los agregados finos no es

tan claro, aunque son agregados de origen continental que podrían corresponder a materiales de antiguos valles fluviales cercanos a la obra de la referencia.

6.2.4 Análisis de los productos de reacción

6.2.4.1 Microscopía electrónica de barrido

Los productos de neoformación observados con estereomicroscopio fueron separados para su análisis por MEB-EDS. En el hormigón O se identificó principalmente ettringita como relleno de las cavidades en el mortero (Figuras 6.7a y 6.7b).

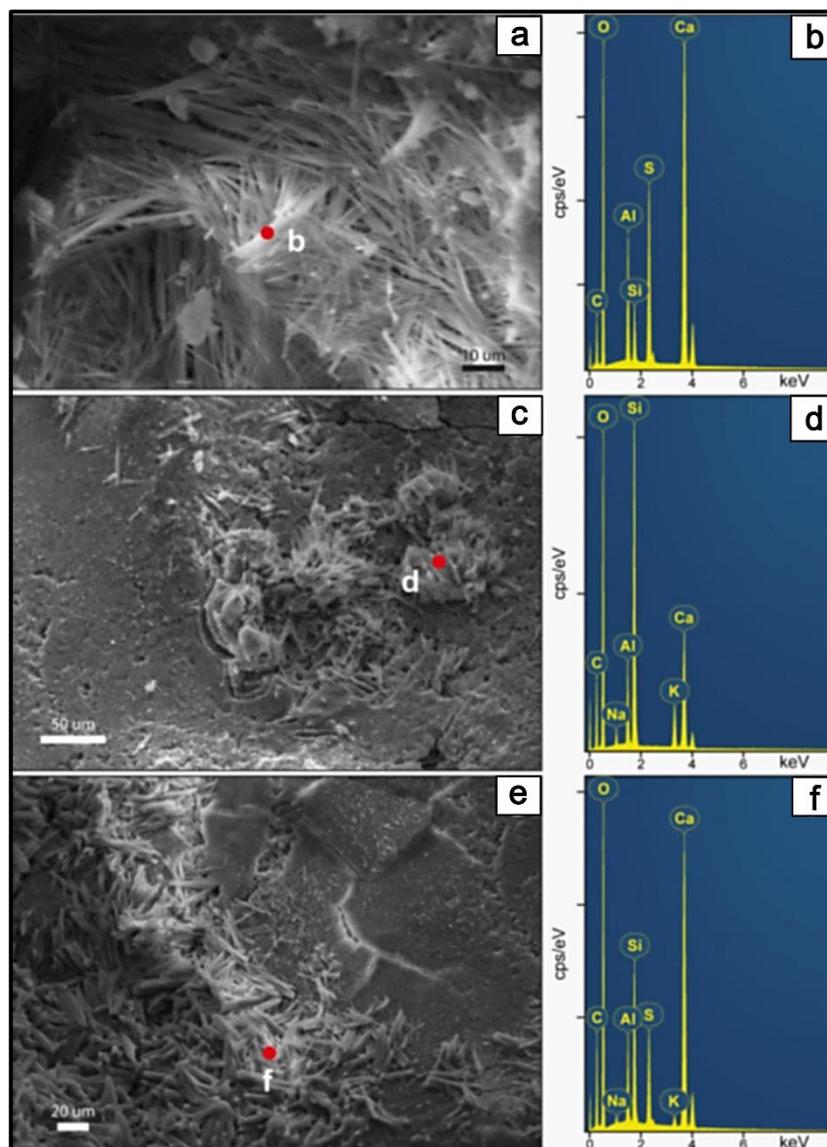


Figura 6.7 MEB-EDS. a) y b) (O); c-f) (R) a) Desarrollo de ettringita en una cavidad asociada a silicatos de calcio; b) espectro EDS del material observado en el punto b; c) producto de reacción fibroso en el interior de una cavidad de aire accidental; d) espectro EDS del material observado en el punto d; e) cristales de ettringita sobre productos de reacción en el interior de una cavidad; f) espectro EDS del sector f

Se observa además un pico de silicio y una contribución al pico del calcio que podría corresponder a los productos de hidratación de la pasta de cemento por debajo de la ettringita o a los productos de la RAS reconocidos por estereomicroscopía en otros sectores de la muestra. En el hormigón R se reconoce mayor cantidad de productos de reacción, amorfos o de hábito fibroso, que corresponden a aluminosilicatos de calcio, potasio y sodio, probablemente hidratados (Figuras 6.7c y 6.7d) característicos de la RAS, por sectores, asociados a ettringita (Figuras 6.7e y 6.7f).

6.2.5 Índice de Daño (DRI)

En las Figuras 6.8a-d se muestran diferentes sectores de los testigos de hormigón R y O, pulidos para determinar el DRI, y en la Fig. 6.8e los resultados de este estudio.

Se puede observar una leve diferencia entre los valores absolutos de DRI de ambos hormigones, indicando un mayor deterioro del hormigón del testigo R2 sobre el del testigo O3. Sin embargo, es interesante destacar que la mayor diferencia se da en que el hormigón O3 posee más fisuras en la pasta de cemento sin relleno (Figuras 6.8a, 6.8b y 6.8e), mientras que el hormigón R2 posee más fisuras en la pasta de cemento con relleno (Figuras 6.8c, 6.8d y 6.8e). Esto indudablemente podría explicar que el proceso expansivo en el hormigón R sea más avanzado. Además, es importante remarcar que muchos de los agregados cuarcíticos presentan un avanzado grado de reacción en el hormigón R2 (sectores del agregado disuelto), que en ocasiones genera interfaces transicionales con el mortero (Figura 6.8d).

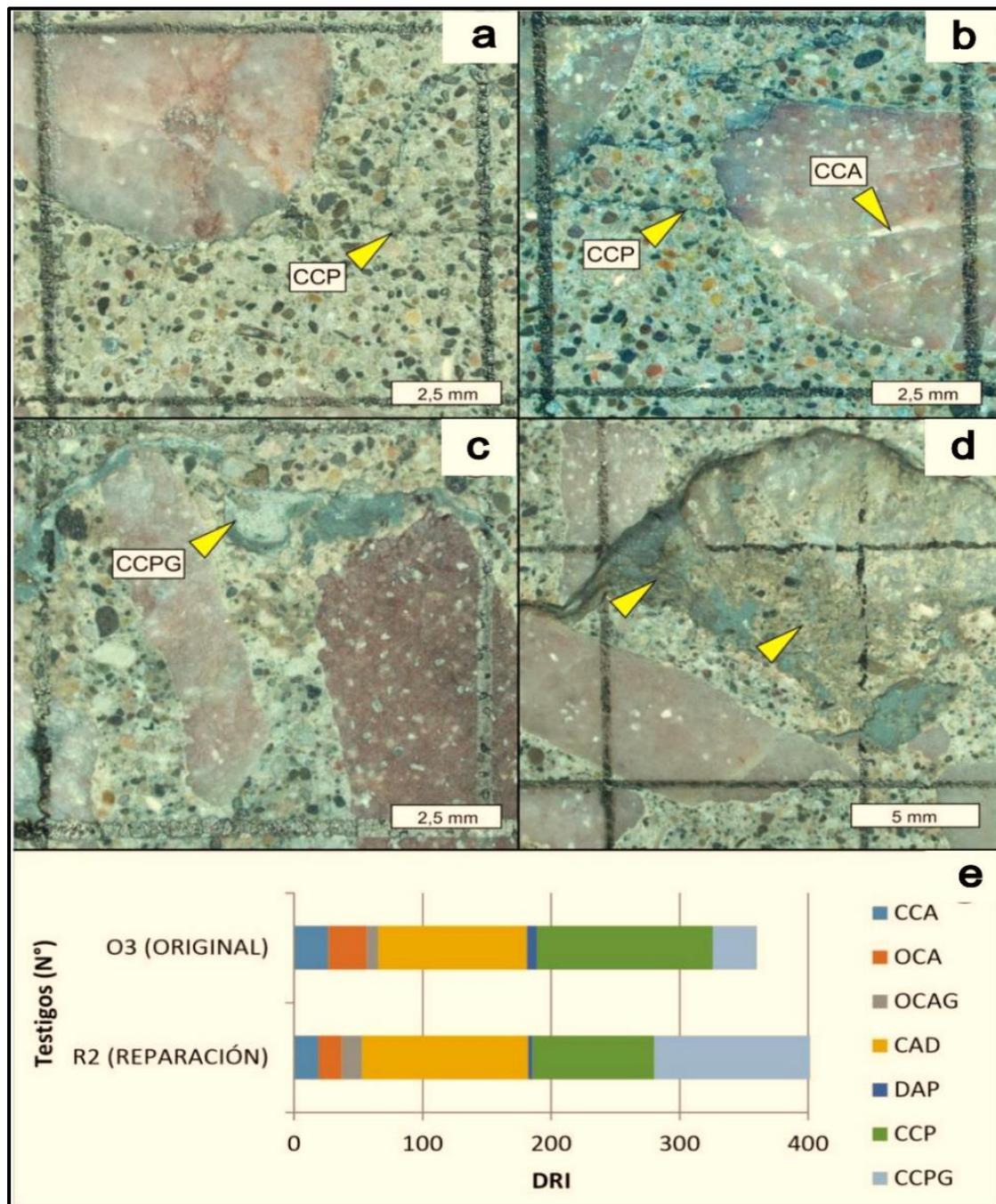


Figura 6.8 Fotografías tomadas con estereomicroscopio sobre la superficie pulida de los testigos del hormigón O3 (a y b) y R2 (c y d) para determinar el DRI. Se observa la interfase transicional del agregado cuarcítico con el mortero en la Fig. 6d; e) resultados del DRI sobre el hormigón O3 y R2. CCA: fisura cerrada en el agregado grueso. OCA: fisura abierta en el agregado grueso. OCAG: fisura con producto de reacción en el agregado grueso. CAD: agregado grueso desprendido. DAP: partícula de agregado corroída o desagregada. CCP: fisura en pasta de cemento. CCPG: fisura con producto de reacción en pasta de cemento

6.2.6 Discusión

Tanto el hormigón O como el R presentan valores aceptables (> a 30 MPa) de resistencia a compresión para estructuras de pavimentos en carreteras troncales, las

cuales soportan cargas dinámicas de hasta 45 Toneladas (AASHTO-93, 1993; FHWA, 2001 y CIRSOC 201, 2005). Además, los parámetros medidos (densidad, absorción y porosidad) se corresponden a la categoría de hormigón mencionada (Rincón et al., 1998 y ASTM, 2013). No obstante, los valores de succión capilar, arrojaron valores elevados con respecto a las demás variables.

Según información proporcionada por Vialidad Nacional (VN), el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) se incrementó de 1780 vehículos en el año 2000 a 3774 en el año 2019. Además, según información de VN, la estructura se encuentra apoyada sobre un suelo calcáreo fino, sin capacidad de soportar cargas significativas (suelo tipo A-4 según clasificación de suelos para subrasantes del Highway Research Board). El aumento del TMDA y la baja capacidad soporte del suelo subyacente, sumados a la baja calidad del sector superior de las losas de hormigón, habrían sido factores determinantes en el inicio de la fisuración y el ingreso de humedad a la estructura.

Si bien no se pudo conocer la dosificación de los hormigones O y R, es probable que el mejor comportamiento del hormigón R (mejor desempeño en los ensayos físico-mecánicos) se deba a la realización de un hormigón de mejor calidad, en relación al O. A pesar de esto, en ambos hormigones se observan evidencias de la RAS. El ingreso de humedad a la estructura, la presencia de agregados gruesos potencialmente reactivos y la disponibilidad de álcalis provenientes del cemento (probablemente se utilizó un cemento de moderado a alto contenido alcalino), habrían favorecido al desarrollo de esta patología.

El desarrollo de la RAS en el hormigón R podría haberse evitado reemplazando el agregado grueso por uno no reactivo como se realizó en la última reparación. Sin embargo, si bien esto resolvería el problema asociado a la RAS, no resuelve los problemas asociados a la fisuración generada por falta de la capacidad soporte de la base de apoyo del hormigón y el consecuente ingreso de humedad a la estructura.

Los resultados del DRI indican un deterioro moderado de ambos hormigones (Sanchez et al., 2017), concentrándose la fisuración en la zona de interfase entre el agregado

(grueso y fino) y la pasta de cemento, y en la pasta de cemento (fisuras tipo CAD, CCP y CCPG). La fisuración dentro de los agregados con productos de reacción es reducida. Esto estaría en consonancia con un deterioro y fisuración previos, no asociados a la RAS. Una vez que se produce el ingreso de humedad en el hormigón, se desarrolla la reacción, en especial en las zonas de interfase, con disolución del agregado grueso en sectores localizados. Esto, además, habría favorecido el ingreso de CO₂ y la consecuente carbonatación parcial de la pasta de cemento, así como la movilización de sulfatos para el desarrollo de ettringita secundaria en poros y fisuras.

Este pavimento constituye el primer caso registrado de una estructura de hormigón con evidencias de la RAS vinculada con las cuarcitas del sur de la provincia de Buenos Aires.

6.3 Autovía Juan Pablo II

6.3.1 Ubicación y características de la estructura

El tramo estudiado de 2,8 Km, une la RP N° 51 y RN N° 3, con calles de acceso a la ciudad de Bahía Blanca (Figura 6.9). Fue construido en el año 2012 y consta de dos vías de hormigón de 7,50 m de ancho, con un separador de 5,00 m de ancho con banquetas exteriores de suelo compacto de 2,90 m de ancho. El pavimento tiene un espesor de 0,22 m (en promedio) y se ejecutó sobre una base de suelo-cemento de 0,15 m de espesor apoyada sobre una sub-base granular de 0,20 m de espesor. Se observan grietas longitudinales y fisuras “tipo mapa” en el pavimento (Figura 6.10). Para evaluar el estado interno del hormigón se extrajeron 14 testigos (10 cm de diámetro x 20 cm de alto) en los carriles lentos (Testigos N° 5, 7, 9 y 13), rápidos (Testigos N° 6, 8, 10, 11 y 12) y en los anillos de las rotondas (Testigos N° 1, 2, 3, 4 y 14).



Figura 6.9 Ubicación del tramo estudiado en la Autovía Juan Pablo II en la ciudad de Bahía Blanca. Imagen tomada de Google Earth ®

6.3.2 Ensayos físicos

6.3.2.1 Absorción, densidad, porosidad y carbonatación

En la Tabla 6.3 se detallan los resultados de la densidad (saturada a superficie seca) absorción y porosidad (ASTM C672, 2013), determinados sobre fragmentos de hormigón. Además, se tomaron medidas de la profundidad de carbonatación (ASTM C876, 2022).

Tabla 6.3 Densidad (g/cm^3), absorción (%), porosidad (%) (ASTM C642, 2021) y profundidad de carbonatación (mm) (ASTM C876, 2022) determinados en trozos de hormigón.

Testigo	Densidad (g/cm^3)	Absorción (%)	Porosidad (%)	Carbonatación (mm)
#1	2,35	4,9	11,1	1
#2	2,35	4,8	10,8	1
#3	2,39	4,8	11,1	1
#5	2,31	5,5	12,1	5
#6	2,39	4,2	9,7	1
#8	2,37	4,0	9,3	2

Los Testigos 1 a 5 no presentan diferencias apreciables entre sí en los valores de porosidad. Todos los valores superan el 10%, mientras que los Testigos 6 y 8 presentan

valores inferiores al 10% indicando buena calidad del hormigón (Rincón et al., 1998). A pesar de la edad de la estructura (12 años), los valores de profundidad de carbonatación son bajos. El progreso de la carbonatación y la cantidad de CO₂ absorbido depende más del contenido de humedad del hormigón y del tipo de cemento. Edades mayores no siempre significan un mayor grado de carbonatación en la zona carbonatada (Andrade, 2020). Por lo tanto, se podría inferir que una humedad relativa superior al 80% y el tipo de cemento utilizado (desconocido) podrían ser los causantes del limitado avance de la profundidad de carbonatación.

6.3.3 Ensayos mecánicos

6.3.1.1 Resistencia a compresión, módulo elástico y ensayo SDT

Mediante el ensayo Stiffness Damage Test (SDT) se pudo cuantificar el grado de daño que posee el hormigón por efecto de la RAS. Dicho método fue desarrollado por Walsh et al. (1965) al observar una buena correlación entre la densidad de fisuras y los ciclos de carga/descarga (tensión/deformación) aplicados en el ensayo de carga a cilindros de roca. Crouch et al. (1987), siguiendo aquellos resultados, propusieron el ensayo SDT para muestras de testigos de hormigón y más tarde Smaoui et al. (2004) lo trasladaron para verificar la variación de los parámetros medidos para diferentes hormigones con rocas reactivas y su vinculación con la RAS.

El método consiste en la aplicación de ciclos de carga y descarga (5 ciclos) a ~40% de la resistencia buscada en el diseño de la estructura, para luego analizar los parámetros que arroja el gráfico. Siguiendo la metodología empleada por Sanchez et al. (2016 y 2017) y Zahedi et al. (2022), estos parámetros son: el índice de daño de la rigidez (SDI), el índice de deformación plástica (PDI) y el índice de no linealidad (NLI). La Figura 6.10 muestra los componentes de las variables SDI (relación entre las áreas debajo de las curvas de tensión-deformación) y PDI (relación de la deformación causada por un ciclo de carga y la suma de este y el siguiente). El valor de NLI se obtiene de la relación entre módulo elástico promedio de los últimos 4 ciclos (E_c) y del módulo de elasticidad tomado en la mitad de la pendiente de la tensión aplicada. Este parámetro proporciona información sobre los patrones de fisuración de las muestras.

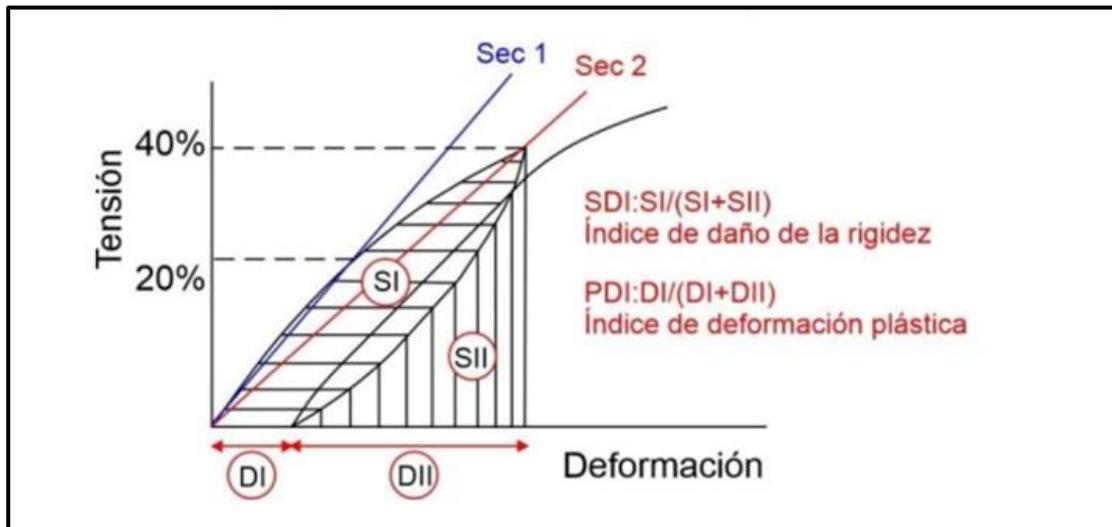


Tabla 6.10 Método de cuantificación para medir el grado de daño que sufre la estructura por la RAS. Gráfico de Tensión vs. Deformación del método SDT (tomado de Zahedi et al., 2022)

En la Tabla 6.4 se presentan los resultados para 5 (cinco) testigos extraídos en la Autovía. Los Testigos N° 7 y 9 corresponden al carril lento y los Testigos 10, 11 y 12 al carril rápido. Allí puede observarse la resistencia a la compresión y los índices calculados (SDI, PDI y NLI), correspondientes al primer ciclo de carga en el método SDT (Sanchez et al., 2016). Además, se incluyen valores promedio de los índices obtenidos entre los ciclos 2 al 5 (SDI₂₋₅ y PDI₂₋₅) y valores de módulo de elasticidad en el primero y segundo ciclo (E₁ y E₂).

Tabla 6.4 Resistencia a la compresión (MPa), índices SDI, PDI y NLI calculados en el primer ciclo, valores promedio de los índices SDI y PDI entre dos y cinco ciclos (SDI₂₋₅ y PDI₂₋₅), y módulo de elasticidad determinado en el primer y segundo ciclo (E₁ y E₂)

Testigo N°	Resistencia a la compresión (Mpa)	Ciclo #1			Ciclo #2 a #5		E ₁	E ₂
		SDI	PDI	NLI	SDI ₂₋₅	PDI ₂₋₅		
7	45,3	0,518	0,272	1,069	0,199	0,289	11,0	14,18
9	47,9	0,506	0,241	1,092	0,170	0,247	14,7	17,23
10	47,2	0,456	0,232	1,001	0,162	0,249	13,2	16,07
11	52,3	0,464	0,228	1,022	0,178	0,249	12,1	14,72
12	45,6	0,211	0,107	1,002	0,083	0,120	22,4	24,31

Los valores de resistencia a la compresión son altos. Si bien se observan algunas diferencias entre testigos, no existen distinciones claras en los sectores estudiados. El pavimento presenta una resistencia promedio de 47,7 MPa con una desviación

estándar de 2,8 MPa y un coeficiente de variación del 6%. Se observa que la relación más baja (E_1/E_2) corresponde al testigo 7 (0,77) y la más alta al 12 (0,92). En la tercera carga el valor coincide con la segunda. Se sabe que el hormigón dañado muestra un comportamiento menos lineal y los módulos de elasticidad y deformabilidad se ven más afectados que la resistencia a la compresión (Sánchez et al., 2017).

En el ensayo SDT (Figura 6.11) los testigos evaluados presentan diferencias importantes en las respuestas a los ciclos de carga. Cabe mencionar que, en un hormigón poco deteriorado, las diferencias entre el primero y segundo ciclo de carga son pequeñas y prácticamente no se miden diferencias en las deformaciones a partir del segundo ciclo. En el hormigón estudiado se constata una deformación creciente. En la Figura 6.11 se muestran las curvas correspondientes a los 5 ciclos de carga y descarga, y carga final. La Figura 6.11a y b muestra que el Testigo 7 tiene valores de SDI y PDI (tanto para el ciclo de carga 1 como para los ciclos 2 a 5) superiores a los otros testigos, infiriendo un mayor deterioro. Los Testigos 9, 10 y 11 se comportaron prácticamente de la misma manera (Figuras 6.11c-h), aunque la resistencia en la rotura final evidenció más resistencia en el Testigo 11.

La Figura 6.11i y j, muestra que el Testigo 12 se comporta en forma diferencial con respecto al resto. Los valores de SDI y PDI marcan valores mucho menores al conjunto, indicando poco deterioro del hormigón en ese sector.

6.3.4 Caracterización de los testigos

El 90% del pavimento analizado, presenta signos de deterioro atribuibles a la RAS (Figura 6.12a). De los 14 testigos extraídos, se seleccionaron 5 cuyo fisuramiento notorio (Figura 6.12b) permitió no solo la caracterización mediante el análisis petrográfico, sino que además se separaron productos de reacción para posterior análisis con microscopía de detalle.

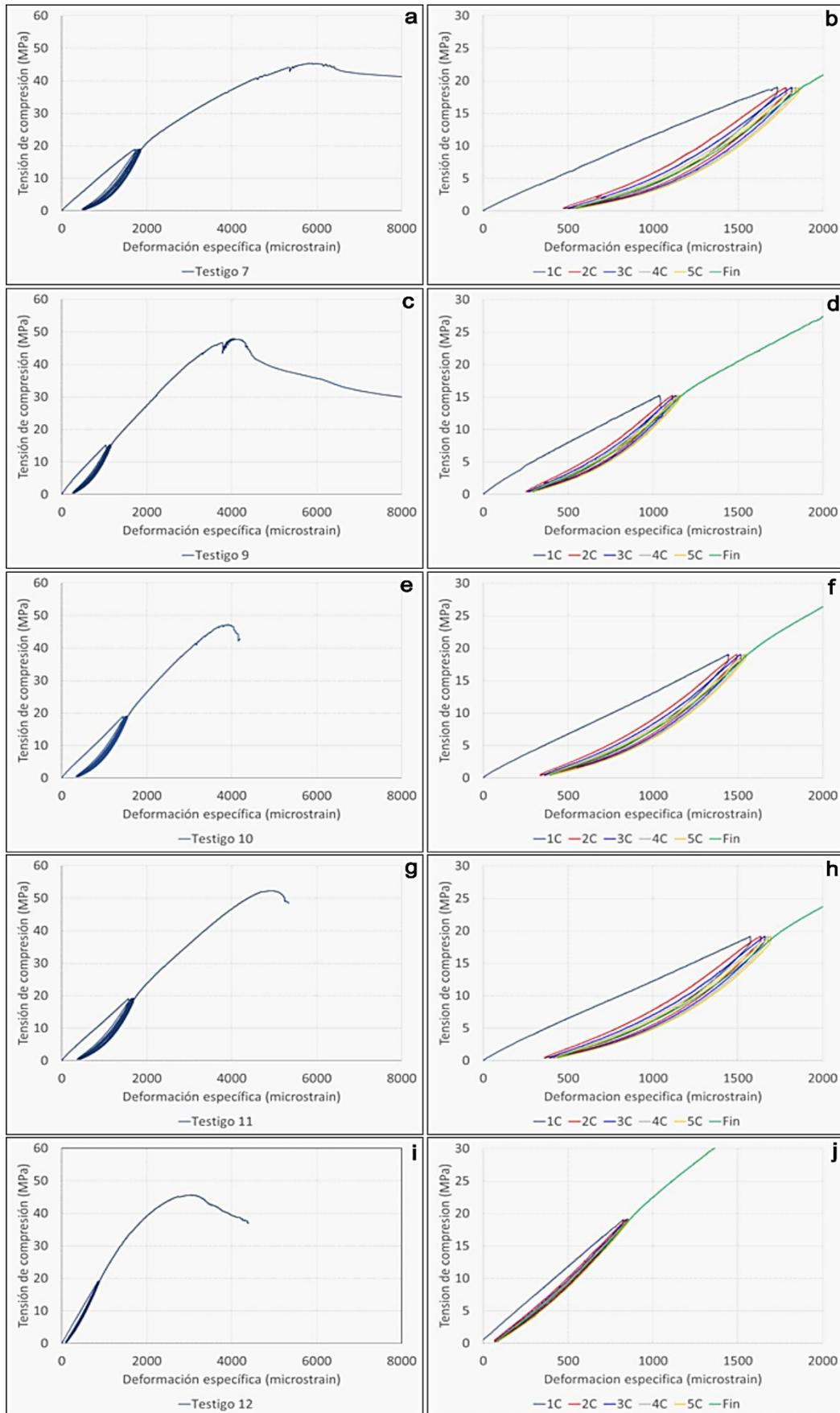


Figura 6.11 Resultados del SDT. A la izquierda se muestran las curvas de carga y descarga (tensión a compresión vs. deformación específica) resultantes para los testigos 7, 8, 10, 11 y 12 y a la derecha se muestra un detalle con los 5 ciclos de carga-descarga y carga final

6.3.4.1 Análisis petrográfico

6.3.4.1.1 Observaciones con estereomicroscopio y microscopio petrográfico

Con estereomicroscopio se observaron productos de reacción de color blanco a azul claro (generalmente masivos) distribuidos en la pasta de cemento y el mortero (Figura 6.13a). También se observan productos blanquecinos a translúcidos, relleno de microfisuras y cavidades de aire accidental. Se distinguen coronas de reacción en la zona de interfase con los agregados gruesos y, principalmente con los finos (Figura 6.13b).



Figura 6.12 Autovía Juan Pablo II a) superficie del carril descendente; b) hueco originado por la extracción de un testigo (nótese que la fisura atraviesa el espesor del mismo)

En las Figuras 6.13c y d se muestra el microfisuramiento que afecta los agregados finos y la IF entre agregado y mortero. Se puede observar que los componentes reactivos son partículas ricas en vidrio volcánico que componen la arena. Las microfisuras asociadas con estas partículas generalmente están rellenas con productos de reacción.

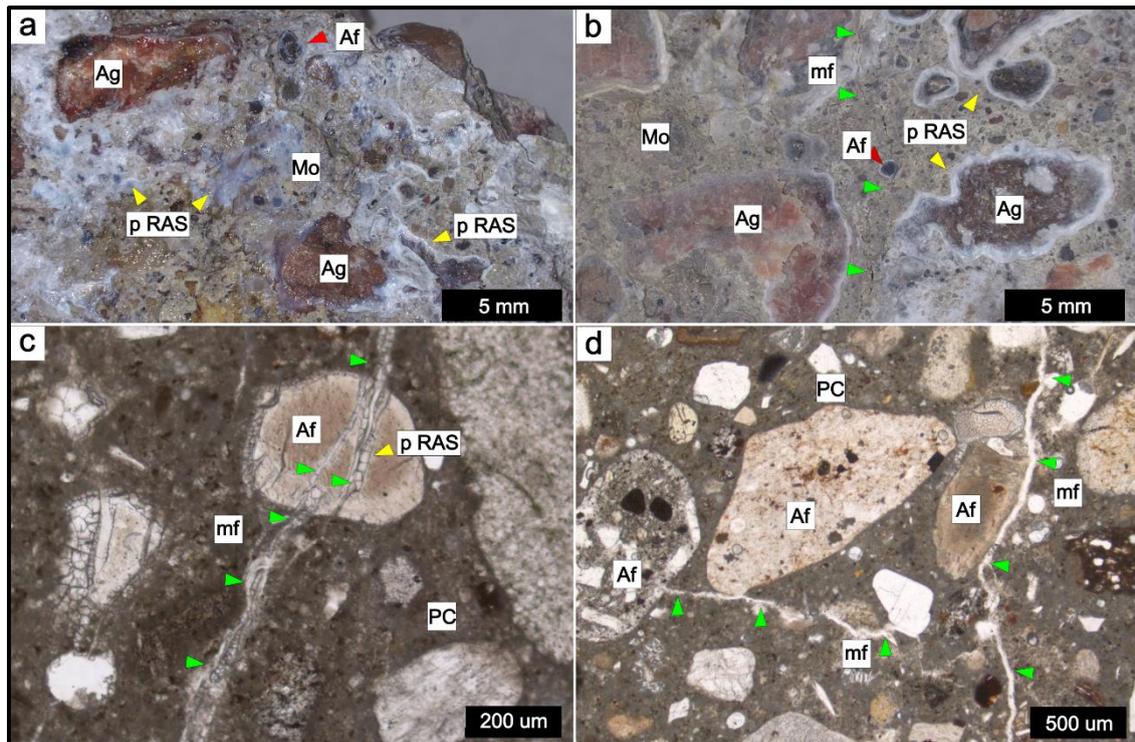


Figura 6.13 Caracterización petrográfica de los testigos a) superficie de fractura; b) coronas de reacción en la IF agregado-mortero; c) y d) microfisuras en el mortero rellenas con productos la RAS. a) y b) visto con estereomicroscopio; c) y d) visto con microscopio petrográfico con nicoles paralelos. Ag: agregado grueso; Af: agregado fino (flecha roja); Mo: mortero; PC: pasta de cemento; p RAS: producto de la RAS (flechas amarillas); mf: microfisuras (flechas verdes)

En base a las características texturales y mineralógicas descriptas, se puede establecer que los agregados gruesos provendrían de formaciones geológicas asociables con los materiales que se explotan en la cantera PIR. En el caso de los agregados finos, se corresponden con la composición de la cantera MED.

6.3.4.2 Análisis de los productos de reacción

6.3.4.2.1 Microscopía electrónica de barrido

Los estudios por MEB-EDS confirmaron la presencia de silicatos masivos, ricos en calcio (con menor proporción de Na, K y Al) en la pasta de cemento y en la zona IF con los agregados finos (Figuras 6.14a y b). La composición resulta típica de los productos de la RAS que han interactuado con la pasta de cemento (Leemann et al., 2016). Además, el proceso de deterioro (desarrollo de microfisuras) habría permitido la movilización de sulfatos internos (procedentes de la hidratación del cemento) y del CO₂ del aire, con cristalización de ettringita secundaria y carbonato de calcio en poros y microfisuras (Figura 6.14a), generalmente asociados a los productos de la RAS.

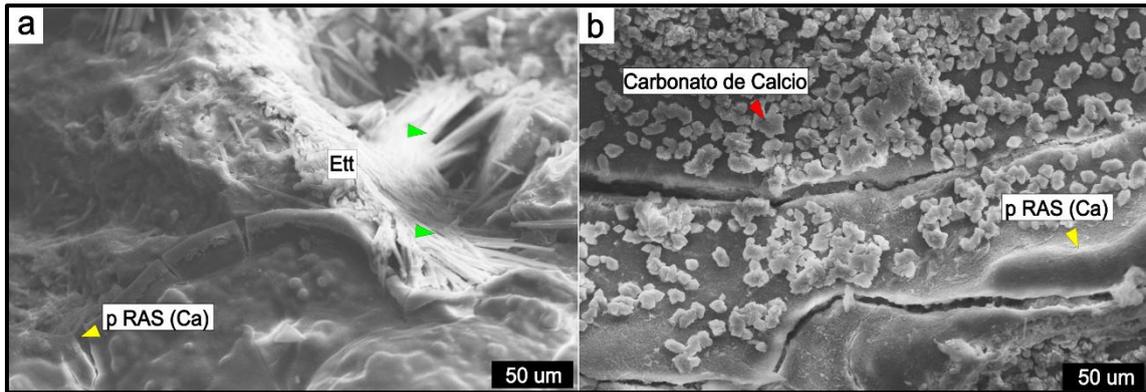


Figura 6.14 MEB-EDS a) y b) imágenes de electrones secundarios de superficies fisuradas del hormigón con productos de la RAS ricos en calcio, ettringita y carbonato de calcio. p RAS (Ca): productos de la RAS (ricos en calcio); Ett: ettringita secundaria

6.3.5 Índice de daño (DRI)

Los Testigos 1 y 2 son los que presentan mayor deterioro, alcanzando valores de DRI de 3470 y 3208, respectivamente (Figura 6.15a). Los Testigos 5, 6 y 8 presentan valores de DRI relativamente más bajos, aunque también con valores absolutos altos (2327, 1858 y 1476, respectivamente) (Figura 6.15a).

Es importante resaltar que el porcentaje relativo de CCA en los Testigos 1 y 2 es menor que el registrado en los otros testigos, mientras que el porcentaje de fisuras OCA+OCAG+DAP y CCP+CCPG+CAD es mayor (Figura 6.15b). Esto podría indicar una tendencia evolutiva del daño donde, a mayor deterioro, progresivamente se abrirían las fisuras cerradas en el interior de los agregados gruesos y el deterioro de la pasta de cemento sería progresivamente mayor. Sin embargo, el mayor porcentaje de daño se localiza en la pasta de cemento, lo cual es consistente ya que los componentes reactivos provienen del agregado fino, lo cual es especialmente evidente en los Testigos 1, 2 y 5.

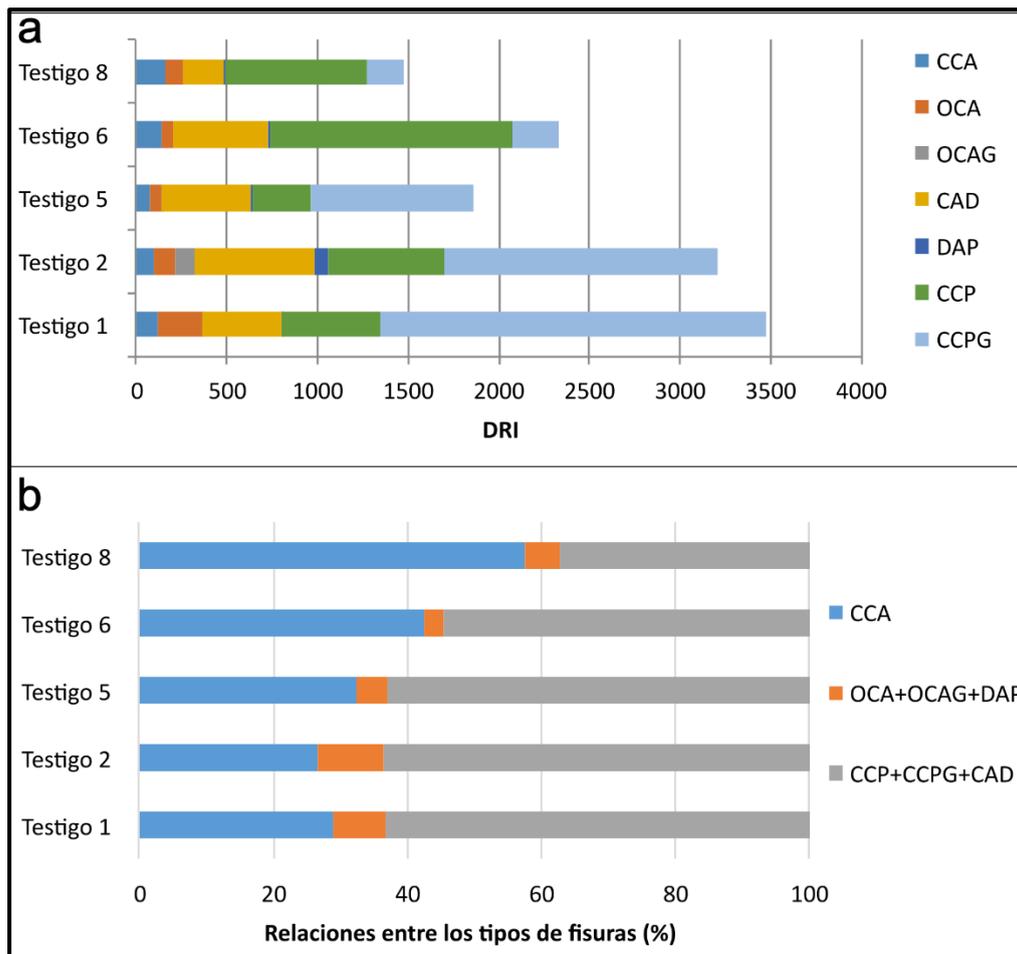


Figura 6.15 a) resultados del DRI según Sánchez et al., 2017; b) relaciones (%) entre los tipos de fisuras determinadas en el DRI

6.3.6 Discusión

El pavimento de hormigón estudiado muestra claros signos de deterioro debido a la RAS. Los componentes reactivos provienen de los agregados finos debido a la presencia de partículas con vidrio volcánico. El hormigón presenta buenas características físicas y la profundidad de carbonatación es baja. Aunque su resistencia a la compresión es alta, el módulo de elasticidad, así como los diferentes parámetros obtenidos en el ensayo SDT y la evaluación microscópica del DRI, muestra un claro proceso de deterioro interno.

El tipo de componentes reactivos (agregados finos), así como los resultados del DRI, coinciden con un proceso de deterioro que afecta principalmente al mortero.

6.4 Playón de estacionamiento en Bahía Blanca

6.4.1 Ubicación y características de la estructura

Se estudió el pavimento de hormigón de un playón de estacionamiento en la ciudad de Bahía Blanca (Figura 6.16). El complejo tiene unos 2000 m², pavimentado con hormigón estructural (> H20), el cual está expuesto a las condiciones meteorológicas y recibe cargas dinámicas de vehículos livianos. Fue construido entre 2005 y 2006. En el lugar se observan fisuras en forma de mapa, en ocasiones con material de relleno (Figura 6.17). Se extrajeron 4 testigos de diferentes sectores para ser evaluados mediante diferentes métodos de estudio.

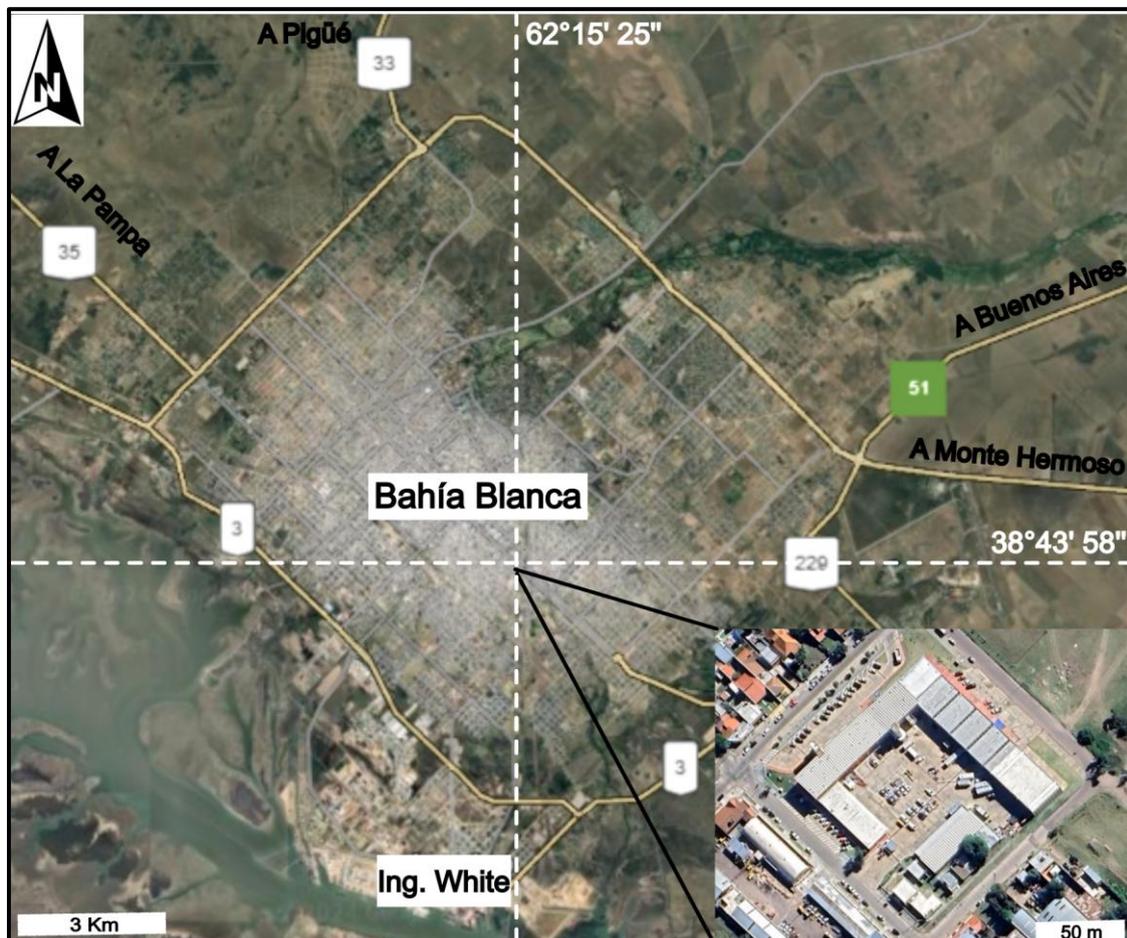


Figura 6.16 Ubicación del playón de estacionamiento en la ciudad de Bahía Blanca. Imagen tomada de Google Earth®

6.4.2 Ensayos físicos y mecánicos

En la Tabla 6.5 se muestran los resultados de las mediciones de densidad, absorción, porosidad y resistencia a compresión.

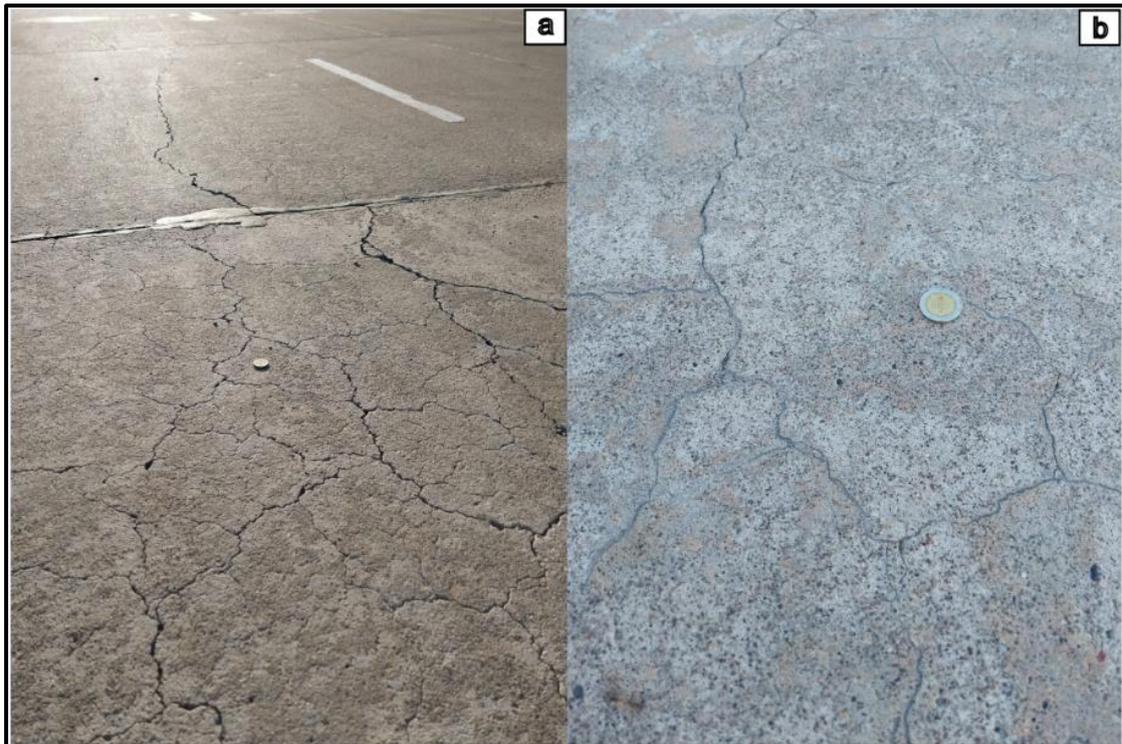


Figura 6.17 Estacionamiento en la ciudad de Bahía Blanca a) pavimento afectado por fisuras tipo mapa; b) fisuras rellenas de material blanquecino

No se observan diferencias apreciables entre los parámetros medidos en los testigos extraídos. Si bien el Testigo 2 presenta un valor más elevado de resistencia a compresión respecto al Testigo 1, son valores habituales para este tipo de estructura (FHWA, 2001). La elevada porosidad medida (del orden de 12%) resultó coherente con la presencia de fisuras internas en la matriz (RAS) y con la baja evolución resistente del hormigón en la estructura (26 MPa-35 MPa), a pesar de su edad y del tipo de estructura.

Tabla 6.5 Ensayos físicos y mecánicos sobre 2 testigos. Resistencia a compresión (IRAM 1546, 2017), densidad, absorción y porosidad (ASTM C846, 2013)

Testigo	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)	Porosidad (%)
#1	26,0	2,47	4,8	11,4
#2	35,1	2,46	5,4	12,6

6.4.3 Caracterización de los testigos

6.4.3.1 Análisis petrográfico

6.4.3.1.1 Observaciones con estereomicroscopio

Todas las losas muestreadas presentan similares características macroscópicas, haciéndose notorias las fisuras desarrolladas desde la superficie hasta la base de la estructura. Se observaron productos de neoformación como relleno de fisuras en el mortero y en las interfases con el agregado. El agregado grueso presenta una buena distribución y está constituido por una piedra partida granítica. El agregado fino es una arena natural polimíctica, constituida en forma predominante por granos subredondeados de cuarzo, feldespatos y una alta proporción de rocas volcánicas (Figura 6.18a). Algunas partículas de la arena, principalmente tobas de grano fino, andesitas afánicas y riolitas, suelen presentar coronas de reacción y microfisuras que las atraviesan y se continúan en la pasta (Figura 6.18b y d).

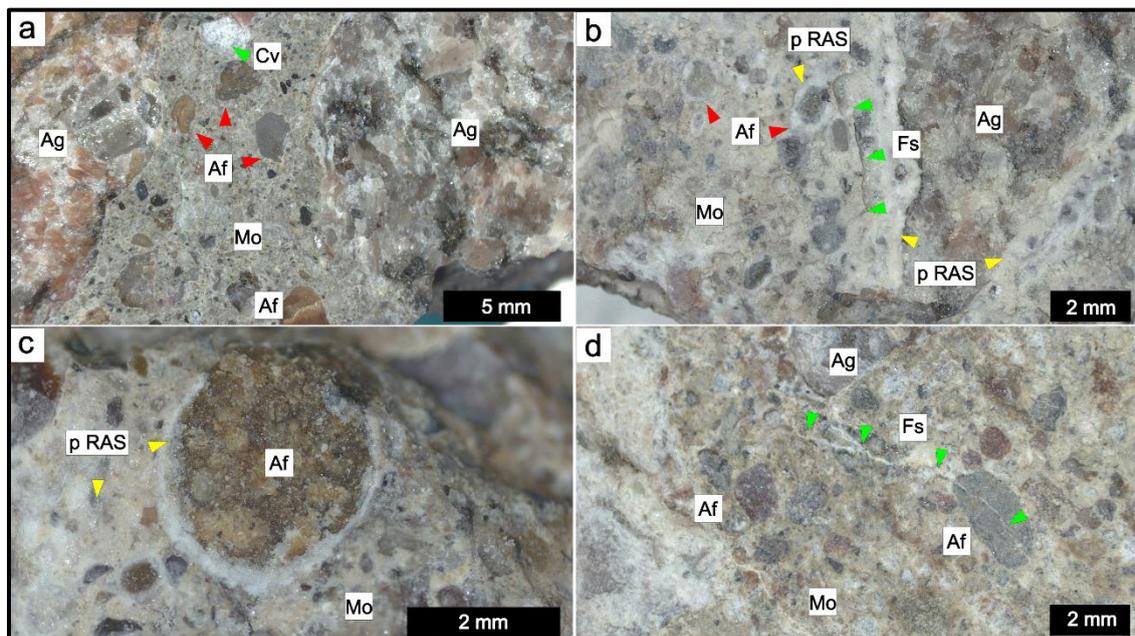


Figura 6.18 Fotografías tomadas con estereomicroscopio a) agregado grueso granítico y agregado fino polimíctico (flechas rojas); b) fisuración del mortero (flechas verdes) y coronas de reacción en los agregados finos (flechas amarillas); c) detalle de los productos de reacción tanto en el mortero como rodeando un agregado fino volcánico; d) fisura atravesando el mortero y una partícula del agregado fino (flechas verdes. Ag: agregado grueso; Af: agregado fino; Cv: cavidad de aire accidental; Mo: mortero; p RAS: productos de la RAS; Fs: fisura

En la Figura 6.18c se pueden observar productos blanquecinos tanto en el contacto agregado-mortero como obliterando este último. Las cavidades de aire accidental,

están rellenas de productos blanquecinos a traslúcidos con aspecto de gel (Figura 6.18a). Este material fue separado para análisis posteriores.

6.4.3.1.2 Observaciones con microscopio petrográfico

El agregado grueso es una piedra partida granítica (Figura 6.19a). En su composición participan feldespato potásico y plagioclasas (parcialmente alterados a illita y caolinita), cuarzo (localmente con marcada extinción ondulante y desarrollo de bandas de deformación), con cantidades subordinadas de biotita y escasa muscovita y minerales opacos. Se observan microfisuras internas, generalmente cerradas, aunque en ocasiones están abiertas y presentan relleno (Figura 6.19b y c). Los materiales de relleno son cristalinos en el interior de los agregados, laminares, de tamaño de grano muy fino, levemente birrefringentes con nicoles cruzados (Figura 6.19d) y de color pardo con nicoles paralelos. Hacia la interfase con la pasta de cemento (IF) son masivos, craquelados y transparentes con nicoles paralelos, e isótropos con nicoles cruzados.

El agregado fino es una arena natural polimíctica, constituida en forma predominante por rocas volcánicas (andesitas y riolitas), tobas y partículas monominerales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa (Figura 6.19a-d). Como material potencialmente reactivo, se identificó vidrio volcánico en la mesostasis de las vulcanitas (Figura 6.19a). Se observan microfisuras que afectan el interior de las partículas de las vulcanitas (Figura 6.19b y 6.19c) y, en algunos, se reconocen productos de reacción blanquecinos o traslúcidos. Algunas partículas de rocas volcánicas, también presentan coronas o bordes de reacción (coloración diferente a la del interior del agregado) (Figura 6.19c). En los sectores de mayor microfisuración, la pasta de cemento se encuentra fuertemente carbonatada (Figura 6.19b). En esos sectores, los productos de reacción que rellenan las microfisuras se encuentran también carbonatados, adquiriendo mayor birrefringencia, incluso en el interior de los agregados finos (Figura 6.19b). Las cavidades de aire accidental están vacías o parcial a totalmente rellenas de productos amorfos y ettringita (Figura 6.19d).

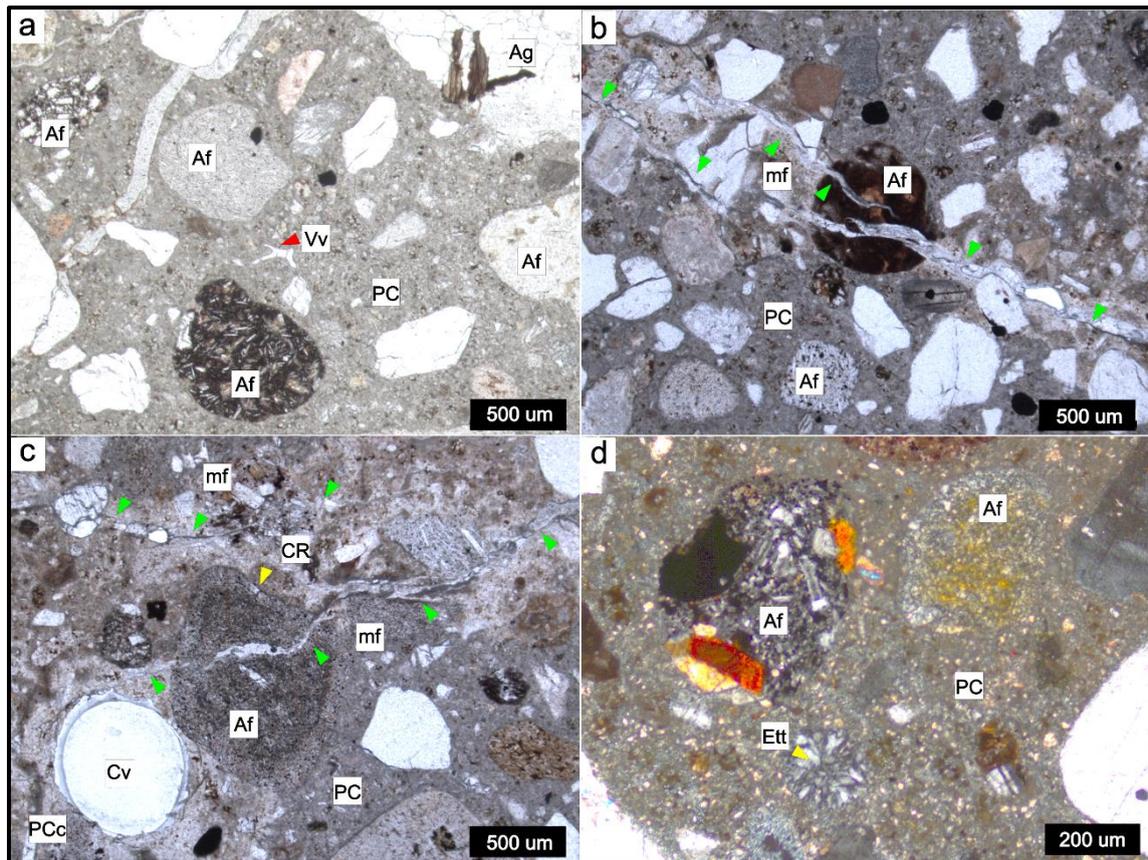


Figura 6.19 Fotomicrografías a) componentes del hormigón; b) microfisura en la pasta de cemento que afecta una partícula de agregado fino con pasta vítrea; c) microfisura que afecta a un agregado con corona de reacción y se asocia con sectores fuertemente carbonatados de la pasta de cemento; d) cavidad de aire accidental rellena de ettringita. a) b) y c) visto con luz paralela; d) con nicolas cruzados. Af: agregado fino; Ag: agregado grueso; PC: pasta de cemento; Vv: vidrio volcánico; mf: microfisura; Cv: cavidad de aire accidental; CR: corona de reacción; Ett: ettringita.

En base a las características texturales y mineralógicas descritas, se puede establecer que los agregados gruesos provendrían de formaciones geológicas asociables con los materiales que se explotan en la cantera PIR. En el caso de los agregados finos se corresponden con el análisis realizado en la cantera MED.

6.4.4 Análisis de los productos de reacción

6.4.4.1 Microscopía electrónica de barrido

En la Figura 6.20a se muestra una cavidad de aire accidental vista con estereomicroscopio. Se observa una capa externa incolora, translúcida, con brillo vítreo, seguida por un material blanquecino opalescente, de aspecto terroso. En la Figura 6.20b se muestra la morfología vista en el MEB con electrones secundarios y el análisis

por EDS. En algunos casos se pudieron diferenciar materiales cristalinos (calcita, portlandita y ettringita) asociados con sustancias amorfas de aspecto craquelado.

En los productos de neoformación analizados por MEB-EDS se identificaron silicio, aluminio, calcio, sodio y potasio, en las interfases del agregado fino, asociados con carbonato de calcio (Figura 6.20c). Éstos constituyen productos de reacción típicos relacionados a la RAS. Por su parte, en la interfase con el agregado grueso se reconocieron calcita y portlandita, con su morfología característica (romboédrica y en placas hexagonales respectivamente).

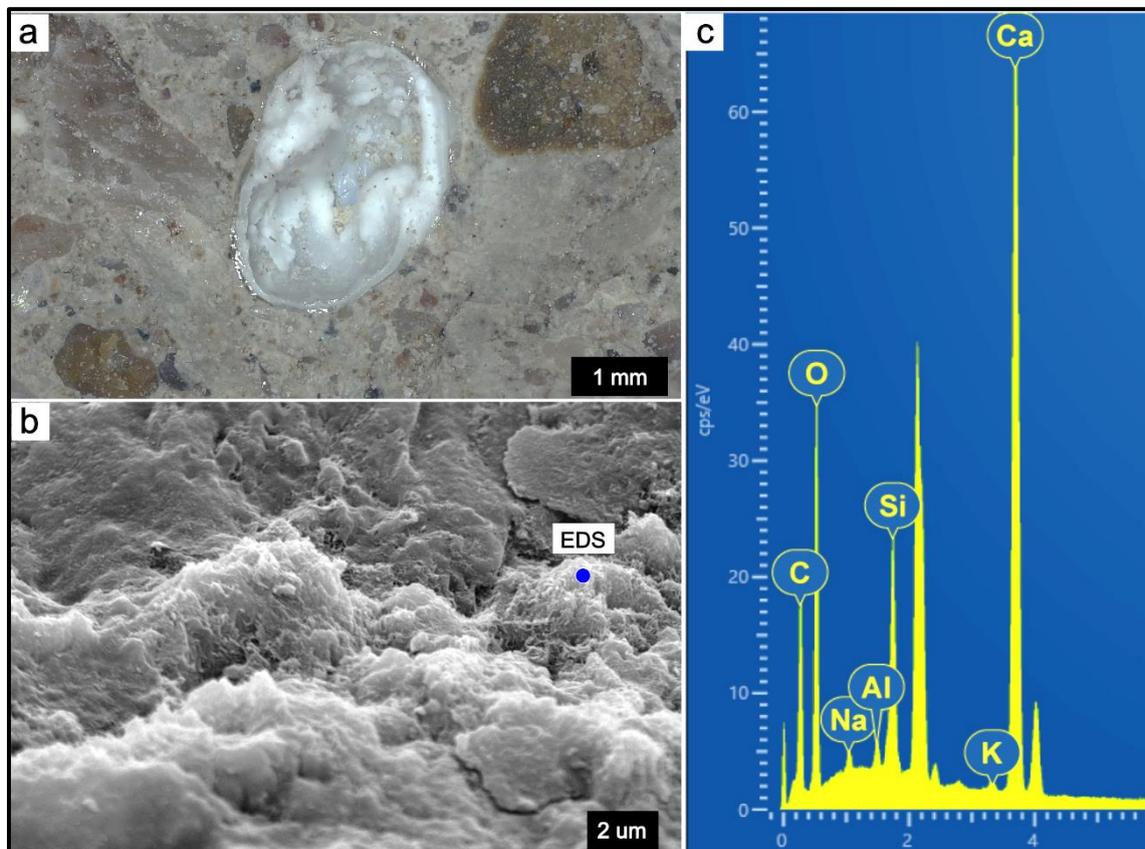


Figura 6.20 Cavidad de aire accidental con productos de neoformación; a) vista con estereomicroscopio; b) visto con MEB con electrones secundarios. Materiales amorfos en la interfase del agregado fino (MEB); c) espectro EDS del punto señalado en b). Se identificaron C, O, Na, Al y K. El pico central corresponde a Au de la metalización de la muestra y los restantes a los $K\alpha$ de los elementos mencionados.

En la Figura 6.21a y b se muestra el hormigón visto con microscopio petrográfico sobre secciones delgadas pulidas a espejo para su posterior análisis con MEB con electrones retrodifundidos. En la Figura 6.21a se observa el agregado grueso con microfisuras

internas cerradas que no se continúan hacia la pasta de cemento y microfisuras abiertas, rellenas de materiales de neoformación, que se continúan hacia la pasta de cemento. En la Figura 6.21b se delimita un sector de la zona de interfase en el mismo agregado, donde se realizaron estudios texturales y composicionales por MEB-EDS (Figura 6.21c-h).

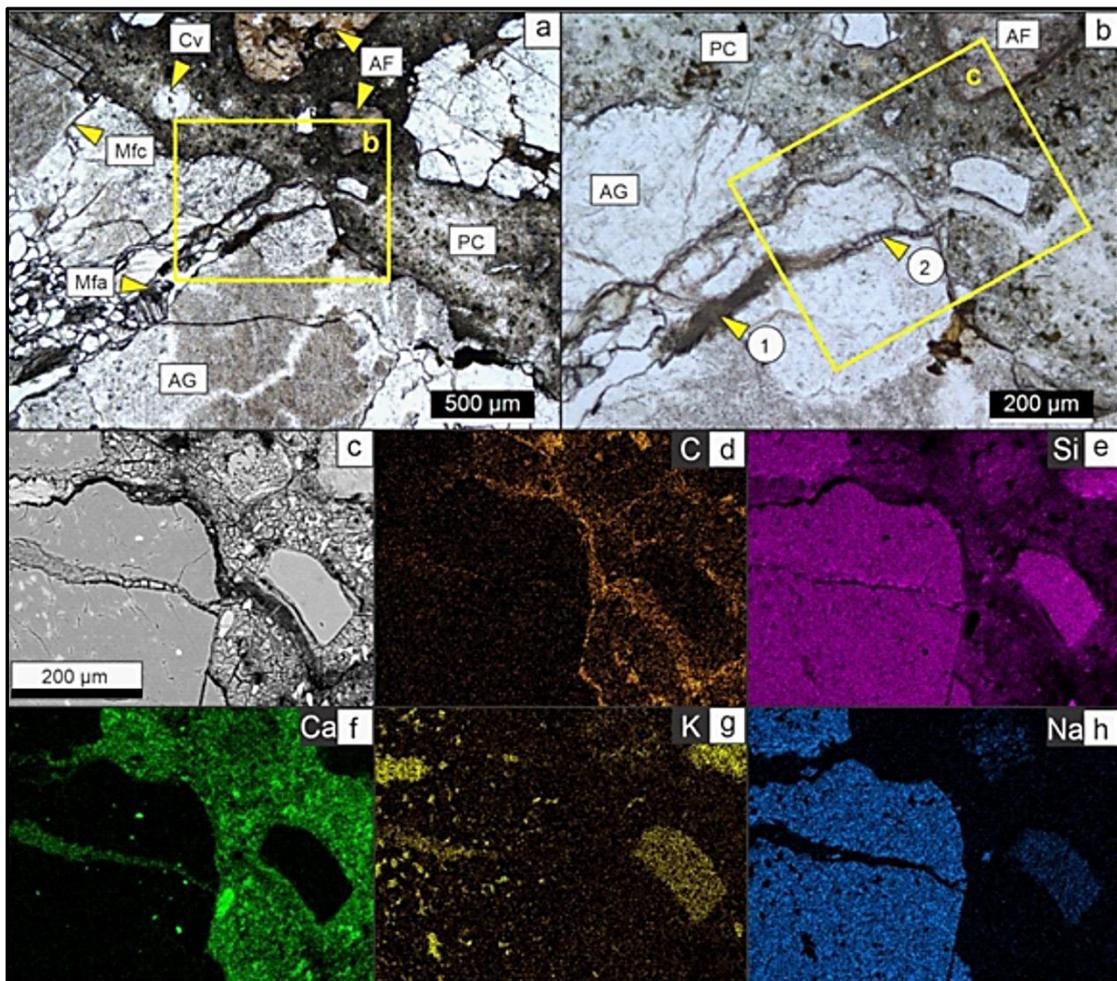


Figura 6.21 a) zona de interfase entre el agregado grueso y la pasta de cemento. Se reconocen microfisuras cerradas y abiertas rellenas con productos de reacción; b) detalle del sector “b” donde se reconocen materiales pardos, cristalinos (sector 1) y materiales transparentes, craquelados y masivos (sector 2) como relleno de microfisuras en el interior del AG; c) imagen de electrones retrodispersados del sector “c” adquirida con MEB; d-h) mapas composicionales determinados por MEB-EDS de: carbono (d), silicio (e), calcio (f), potasio (g) y sodio (h). Cv: cavidad. AF: agregado fino. AG: agregado grueso; PC: pasta de cemento; Mfc: microfisuras cerradas; Mfa: microfisuras abiertas

Se puede observar que los productos pardos en el interior del agregado corresponden a silicatos cristalinos ricos en calcio y potasio, principalmente y que, hacia la IF con la pasta de cemento, los productos son amorfos y craquelados y se empobrecen en potasio. Si bien la muestra fue metalizada con carbono para su análisis, se incluyó el

mapa de este elemento para mostrar que la microfisura en el interior del agregado muestra muy bajos contenidos de carbono (propio del metalizado), mientras que la pasta de cemento muestra valores muy elevados (Figura 6.21d).

Esto se atribuye a la carbonatación de los productos de reacción. Los componentes reactivos del agregado fino, muestran microfisuras que los atraviesan completamente, rellenas de productos de reacción masivos (hacia los contactos con la pasta de cemento) y cristalinos laminares (en el interior de los agregados) con texturas típicas de los productos de la RAS (Figura 6.21a y 6.21b).

6.4.5 Índice de daño (DRI)

En la Figura 6.22a se muestra la superficie pulida de uno de los testigos. Se observan fisuras rellenas en la pasta de cemento (CCPG) y en el interior de los agregados finos (sector 1) y el desarrollo de coronas de reacción (sector 2).

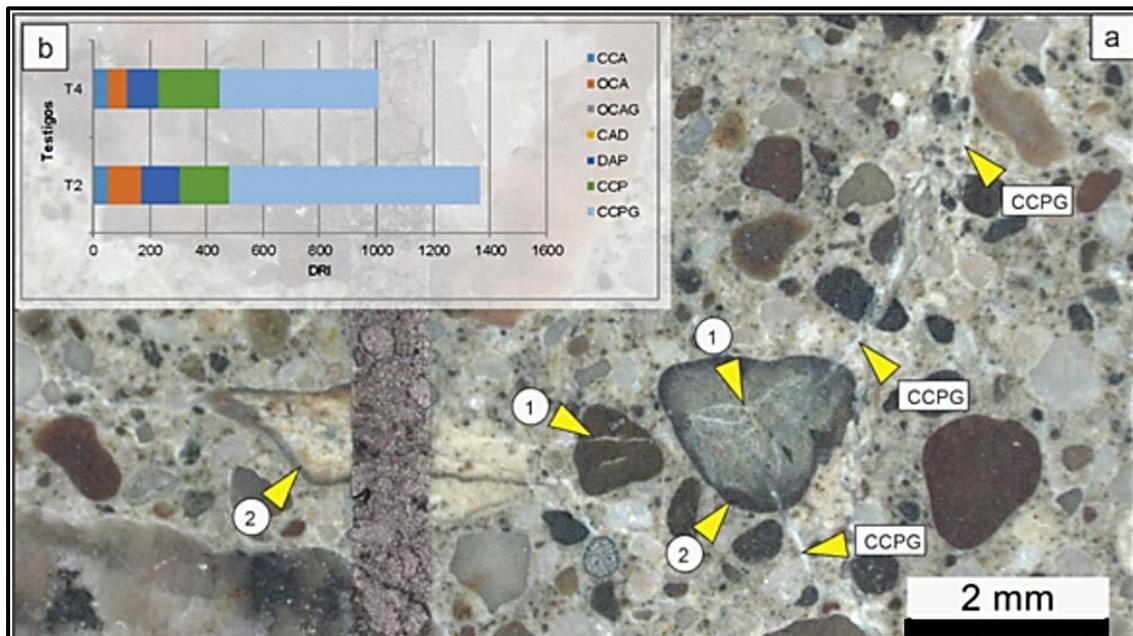


Figura 6.22 DRI a) superficie pulida de uno de los testigos. Fisuras rellenas en la pasta de cemento (CCPG). Fisuras rellenas en el interior de los agregados finos (sector 1) y el desarrollo de coronas de reacción (sector 2); b) resultados del DRI en los testigos 2 y 4.

La Figura 6.22b muestra los resultados del DRI sobre los dos testigos estudiados. Si bien se observa diferente grado de deterioro en función de los valores de DRI

obtenidos (1008 y 1363), ambos presentan un daño muy elevado (Sánchez et al., 2017).

Es importante mencionar que, si se consideran las características microestructurales (fisuras) sin afectarlas por los factores de ponderación, las fisuras cerradas en el agregado grueso representan un promedio de 35%, las abiertas (con y sin gel) en el agregado grueso 17% y las fisuras en la pasta de cemento (con y sin gel) 48%. Esto permite hacer algunas inferencias. Las fisuras cerradas en el agregado grueso probablemente sean propias de la roca o generadas durante el proceso de trituración del agregado, ya que por lo general no muestran continuidad en la pasta de cemento. Las fisuras abiertas en el agregado grueso podrían, o bien producirse también durante la preparación del material, o bien generarse por el progreso de la deformación interna debido a las expansiones por la RAS (apertura progresiva de las fisuras), en especial aquellas que tienen continuidad con la pasta, sin embargo, éstas solo representan el 17%. Excluyendo las fisuras cerradas en el interior de los agregados gruesos, se puede decir que el mayor deterioro se observa en la pasta de cemento (48%), donde se reconocen mayormente fisuras con relleno y, en muchos casos, afectan el interior de los agregados finos (o se inician en el interior de los mismos).

6.4.6 Discusión

Según experiencias de diferentes autores, los productos de reacción siguen una tendencia composicional que evoluciona desde cristalinos, ricos en calcio y potasio en el interior de los agregados, a masivos (generalmente amorfos) hacia la IF, enriqueciéndose en calcio y empobreciéndose en potasio (Katayama, 2008 y 2012a; Leemann et al., 2013 y 2016; Locati et al., 2020a). Cuando los productos no están afectados por procesos posteriores que modifiquen su composición química, siguen una tendencia denominada "Tipo 1" (Katayama, 2008), con convergencia hacia la composición de los productos de hidratación de la pasta de cemento (Figura 6.23c). Los productos estudiados se alejan de dicha tendencia. Los análisis muestran un corrimiento hacia valores de relación atómica Ca/Si más bajos y Ca/(Na+K) más altos, siendo esta tendencia más marcada para los productos vinculados con los agregados finos.

Según Katayama (2008) esto puede explicarse por el ingreso de CO_2 al sistema, generando un consumo de calcio de los productos de reacción para formar carbonato de calcio. Además, los procesos de lixiviación por el ingreso de agua en el sistema producen la movilización del Na y K, cambiando la composición original de los productos de la RAS. Como la concentración de Ca es mucho más elevada que la de Na y K y estos últimos son más móviles que el primero, el proceso de lixiviación tiene un mayor impacto en el incremento de la relación $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ respecto al proceso de carbonatación. Estos procesos también producen la desestabilización de fases ricas en azufre de la pasta de cemento y la precipitación de ettringita secundaria en las cavidades (Figura 6.23d).

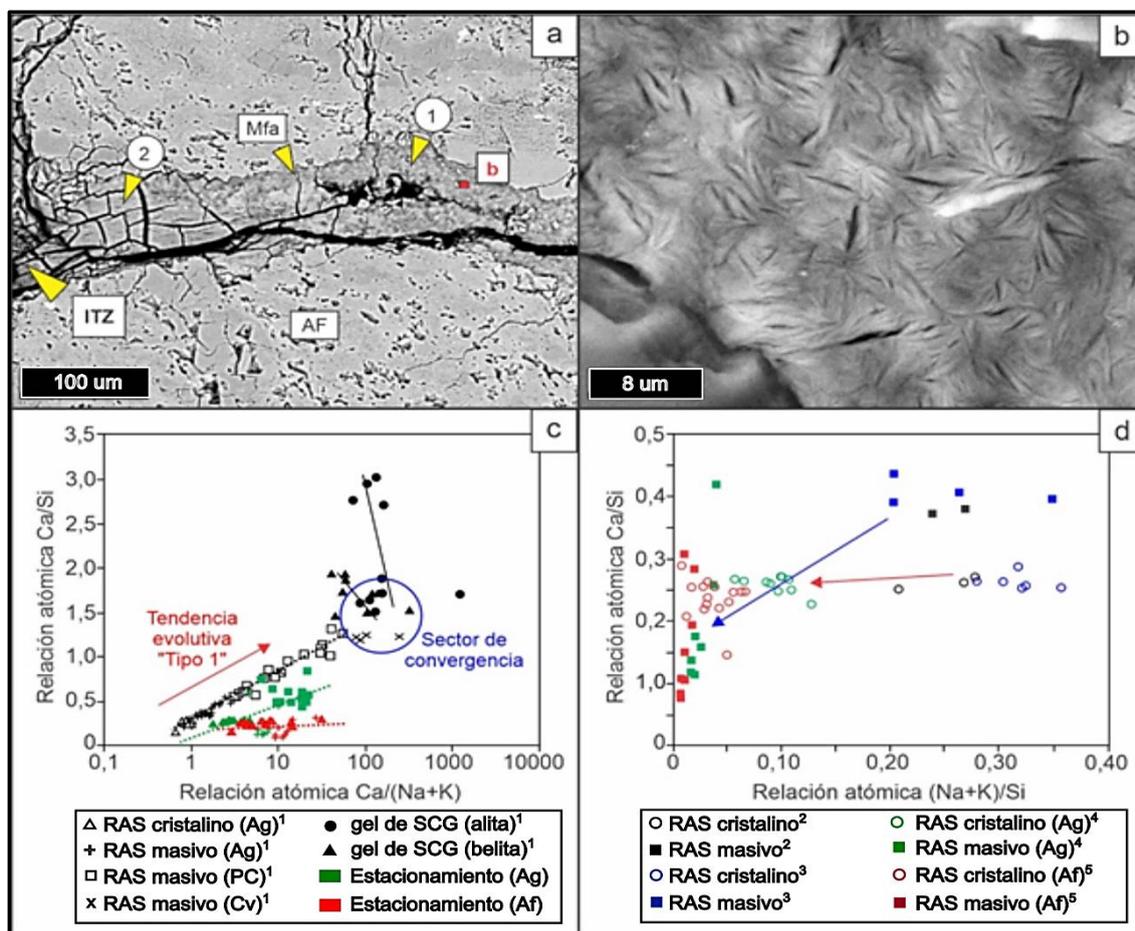


Figura 6.23 a) imagen de electrones retrodispersados adquirida por MEB de la zona de interfase de un agregado fino con la pasta de cemento, donde se observa una microfisura abierta rellena por productos de reacción cristalinos (sector 1) y masivos (sector 2); b) detalle de la morfología de los productos cristalinos en el sector "b"; c) diagrama de relación atómica Ca/Si vs. $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ adaptado de Leemann et al. (2016) comparando resultados de Katayama (2012 b y c)¹ con los obtenidos en este trabajo en agregados finos y gruesos; d) diagrama de relación atómica Ca/Si vs. $(\text{Na}+\text{K})/\text{Si}$ comparando resultados de Leemann y Lura (2013)² y Locati et al. (2020a)³ con los obtenidos en este trabajo en Ag ⁴ y Af ⁵. IF: interfase; AF: agregado fino; Mfa: microfisura abierta

Estos cambios composicionales se pueden visualizar mejor en un diagrama de relaciones atómicas Ca/Si vs. (Na+K)/Si. En la Figura 6.23d se comparan los resultados obtenidos en este trabajo sobre los productos cristalinos y los masivos adyacentes en el interior de los agregados, con los obtenidos por Leemann y Lura (2013) y Locati et al. (2020a) para productos de reacción que poseen baja modificación composicional debido a procesos de alteración posteriores a su formación. Se puede observar que tanto los productos cristalinos como los masivos estudiados muestran una disminución de ambas relaciones atómicas (flecha roja y azul, Figura 6.23d). También se observa un mayor impacto de los procesos de carbonatación y lixiviación sobre los productos masivos respecto de los cristalinos, lo que podría vincularse con su cristalinidad (mayor facilidad de reacciones con los productos amorfos o de baja cristalinidad) y por la mayor cercanía de éstos con la pasta de cemento. Finalmente, se observa que estos cambios composicionales son más acentuados en los productos analizados dentro de los agregados finos que en los gruesos. Esto probablemente se deba a que las microfisuras en los agregados finos generalmente atraviesan completamente a las partículas, posibilitando una mayor interacción con la pasta de cemento en ambos extremos de las microfisuras con el CO₂ que ingresa al sistema y con el agua que ingresa a través de las microfisuras, y que posibilita los procesos de lixiviación de álcalis.

La reactividad de los agregados utilizados en el hormigón se vincula a rocas volcánicas con presencia de vidrio volcánico en los agregados finos. Sin embargo, no se descarta la participación de los agregados gruesos en el desarrollo de la patología, al reconocerse microfisuras internas rellenas de productos de reacción. El deterioro interno del hormigón es muy elevado desde el punto de vista microestructural, con una mayor afectación del mortero, lo que coincide con la elevada reactividad del agregado fino utilizado. Los estudios texturales-composicionales permiten establecer que, con posterioridad al desarrollo de la RAS o de forma simultánea y favorecido por el cuadro de fisuración interna, se produjeron procesos de carbonatación de la pasta de cemento y de los productos asociados a la RAS, así como de lixiviación de álcalis. Este último proceso podría estar vinculado con el ingreso de agua en la estructura a

través de la porosidad secundaria generada por las fisuras, desencadenando también la movilización de sulfatos y la precipitación de ettringita secundaria en cavidades.

6.5 Rotonda de acceso a Bahía Blanca

6.5.1 Ubicación y características de la estructura

El hormigón de la ruta de circunvalación a la ciudad de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires) presenta intenso deterioro a pesar de las permanentes reparaciones a las que ha sido sometido. El mismo se ubica en el extremo norte de la ciudad, sobre el kilómetro 8 de la Ruta Nacional N° 33 (Figura 6.24). Dicho pavimento fue construido en el año 1994 y, desde entonces, ha sufrido vastos reemplazos de losas y reparaciones, siendo la última (de importante magnitud) entre los años 2009 y 2010. Actualmente, tanto el hormigón original como las reparaciones, presentan un avanzado estado de deterioro (fisuración tipo mapa, fragmentaciones superficiales, desprendimientos de fragmentos, etc.). A fin de evaluar el estado del hormigón original y el de la última reparación, y determinar las causas del deterioro observado, se extrajeron 4 testigos (2 en el hormigón original y 2 en hormigón de reparación).



Figura 6.24 Ubicación de la rotonda de acceso a la ciudad de Bahía Blanca (intersección entre la circunvalación y la Ruta Nacional N° 33). Imagen tomada de Google Earth®

6.5.2 Caracterización de los testigos

El hormigón original (realizado en el año 1994) presenta un importante fisuramiento que se distingue notablemente en la superficie (Figura 6.25a), con fisuras que se intensifican hacia la base (Figura 6.25b). En la superficie, las fisuras tienen menor desarrollo y se presentan colmatadas por sedimentos limo-arcillosos, con muy escasa cementación. A partir de los ~7cm/10cm aumentan en tamaño (tanto en longitud como en apertura) y se presentan parcialmente selladas por minerales secundarios, principalmente carbonato de calcio. Las fracturas mayores afectan al agregado grueso. Los componentes del agregado fino presentan coronas de reacción, mientras que el agregado grueso está cubierto en casi toda la superficie por estos productos.

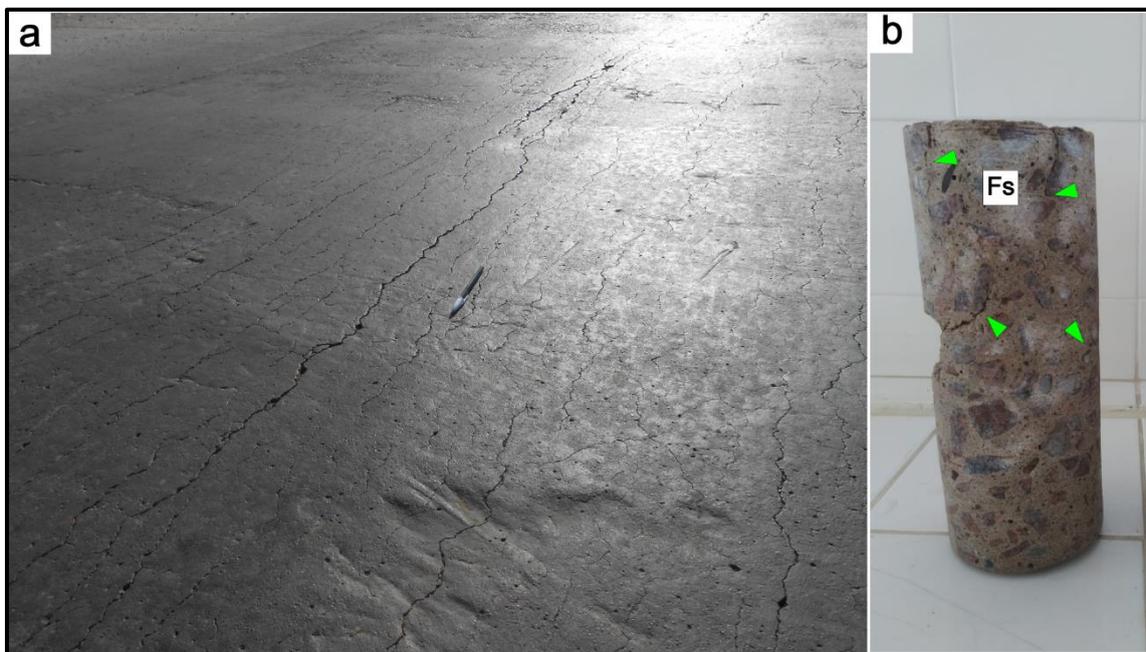


Figura 6.25 Superficie del pavimento estudiado. Fisuramiento tipo mapa en ~80% de la estructura. a) vista general de la estructura; b) detalle de las fisuras observadas en los testigos extraídos

El pavimento de la reparación, también se encuentra fisurado (Figura 6.26a y b), aunque las fisuras tienen menor desarrollo que en el hormigón original. Los testigos del sector de la reparación presentan fisuras con desarrollo vertical (paralelas al eje del testigo) con ramificaciones laterales de menor envergadura. Están rellenas parcialmente por un material particulado fino, constituido por un limo arcilloso con abundante vidrio volcánico. Esta característica se mantiene hasta ~5 cm/10 cm desde la superficie expuesta.

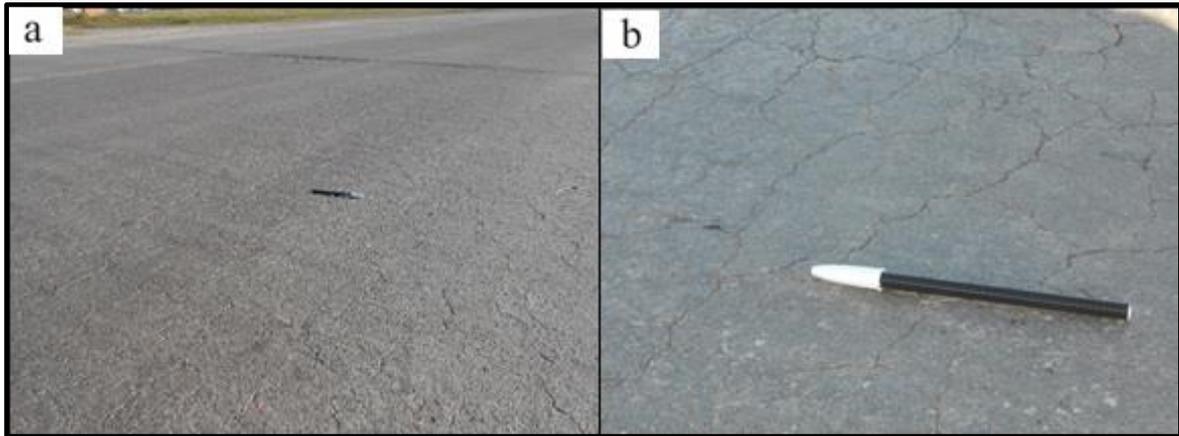


Figura 6.26 Superficie del pavimento estudiado. Fisuramiento tipo mapa en ~75% de la estructura. a) vista general de la estructura; b) detalle de las fisuras observadas en la superficie

Hacia los niveles más profundos de la misma fractura cristalizó abundante calcita y ettringita. Al igual que en el hormigón original, los agregados finos muestran signos de reacción más notorios.

6.5.2.1 Análisis petrográfico hormigón original

6.2.2.1.1 Observaciones con estereomicroscopio

El agregado grueso es una roca granítica, muy rica en feldespato potásico, con plagioclasa y cuarzo subordinados. Los minerales máficos son escasos (< 10%) y están constituidos por micas y anfíboles. El agregado fino es una arena natural con abundante cantidad de rocas volcánicas, entre las que predominan las andesitas. En forma subordinada se identificó cuarzo, partículas monominerales de feldespatos, piroxenos, micas y vidrio volcánico fresco. Son escasas, las partículas de un material limo-calcáreo con signos de alteración. El hormigón se presenta parcialmente carbonatado, especialmente en las zonas de fisuras y en la interfase agregado-mortero. Las escasas cavidades de aire accidental están, en su mayoría, colmatadas por productos de neoformación (Figura 6.27a).

En la Figura 6.27a se muestra una microfisura que afecta a dos partículas de vulcanitas que componen el agregado fino. Una de ellas, está parcialmente rellena por productos de neoformación. El mortero se encuentra fuertemente carbonatado y con productos de neoformación, por lo que la identificación de sus componentes es dificultosa. La

Figura 6.27b muestra una partícula de andesita con evidencias de reacción. Los sectores periféricos fueron reemplazados por minerales secundarios depositados en zonas de debilidad, especialmente en la interfase con la pasta de cemento. El mortero está tapizado por productos de neoformación. En el ángulo superior izquierdo de la imagen, se observa una roca granítica del agregado grueso sin evidencias de alteración.

6.5.2.1.2 Observaciones con microscopio petrográfico

El agregado grueso está constituido por aproximadamente 90% de piedra partida y el 10% restante es una grava natural en cuya composición predominan las areniscas cuarzosas. La piedra partida es un granito, compuesto por cristales subhedrales de ortosa, con cantidades subordinadas de oligoclasa y microclino. Constituyen aproximadamente el 70% de la roca. Están maclados, parcialmente alterados (principalmente argilizados). La textura es granular hipidiomórfica. En los espacios intercristalinos y con hábito anhedral, se dispone el cuarzo, con extinción ondulante (AEO promedio 19°) a veces fracturado, con contactos irregulares, llegando a presentar texturas de mortero.

El agregado fino es una arena natural polimíctica compuesta por rocas volcánicas, principalmente andesitas, con abundantes individuos con pastas vítreas. Le siguen en abundancia las rocas graníticas que, en los tamaños más finos, constituyen partículas monominerales (cuarzo, feldespato, piroxenos y anfíboles). En menor proporción se observaron cuarcitas y vidrio volcánico fresco (aproximadamente en un 10 %).

La pasta de cemento tiene la textura obliterada, principalmente debido a una intensa carbonatación. Es frecuente observar fenómenos de borde y el desarrollo de coronas de reacción. Las cavidades de aire accidental están parcialmente rellenas por ettringita y calcita. El microfisuramiento es intenso, y afecta principalmente al mortero y a los diferentes componentes líticos del agregado fino. Las partículas del agregado grueso están levemente argilizadas.

Las microfisuras se desarrollan principalmente en el mortero. Algunas tienen escaso espesor y longitud (1 mm-2 mm) y por lo general están selladas. Otras tienen mayor dimensión, tanto en longitud como espesor, son discontinuas, a veces ramificadas y están parcialmente rellenas ya sea por productos de neoformación o por calcita. Afectan principalmente a las rocas volcánicas con pastas vítreas (Figura 6.27c). En la Figura 6.27d se observa una partícula de una roca volcánica fisurada y una partícula de una roca granítica del agregado grueso sin evidencias de reacción.

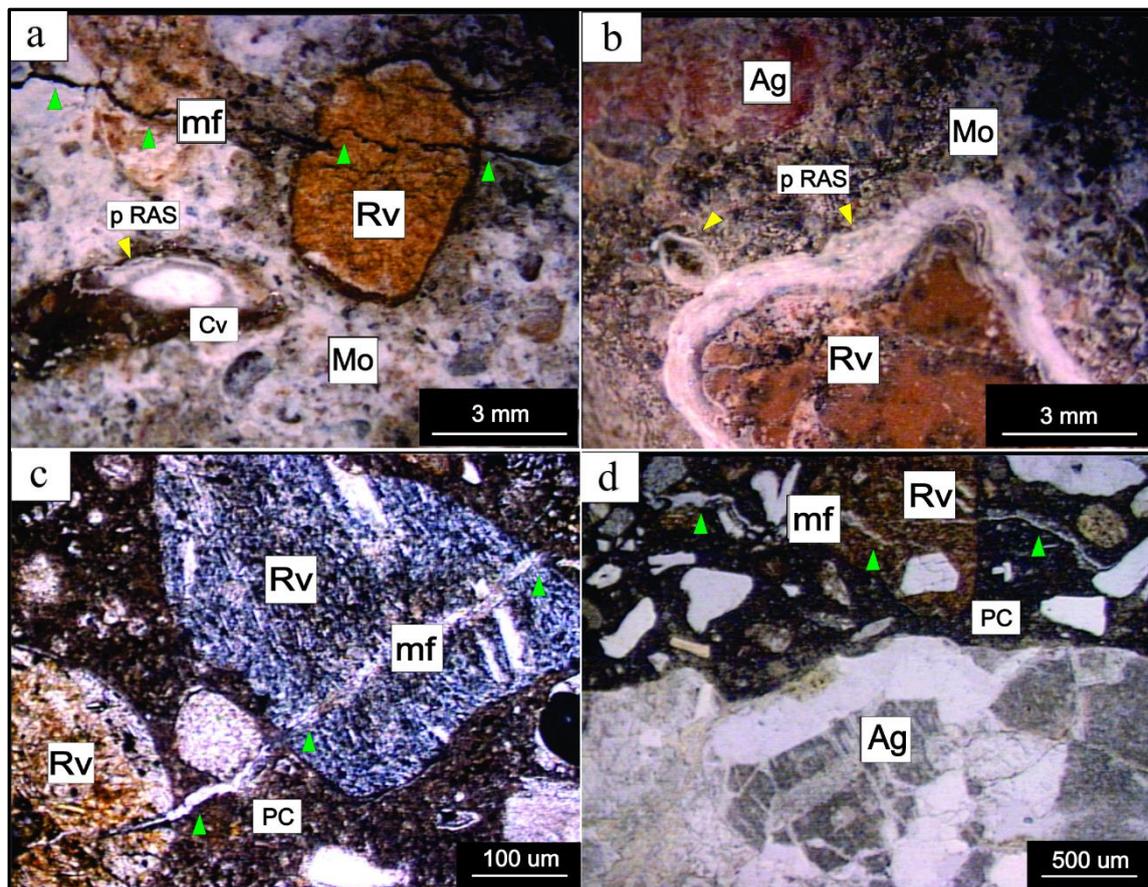


Figura 6.27 Hormigón original. a) y b) visto con estereomicroscopio. c) y d) visto con microscopio petrográfico con luz paralela. a) microfisura que afecta dos partículas de rocas volcánicas del agregado fino. Mortero obliterado y cavidad de aire accidental colmatada de productos de reacción; b) roca volcánica andesítica con evidencias de reacción. El mortero está tapizado por minerales de neoformación, mientras que el agregado granítico no tiene evidencias de reacción; c) microfisura que afecta a la pasta de cemento y a dos partículas del agregado fino; d) vulcanita microfisurada y agregado grueso sin signos de reacción. Rv: roca volcánica; Ag: agregado grueso; Mo: mortero; mf: microfisura; p RAS: productos de RAS; Cv: cavidad de aire accidental; PC: pasta de cemento

6.5.2.2 Análisis petrográfico del hormigón de reparación

6.2.2.2.1 Observaciones con estereomicroscopio

Los agregados finos y gruesos son los mismos que se utilizaron en el hormigón original. El agregado grueso es una roca granítica, rica en feldespato potásico, con plagioclasa y cuarzo subordinados. El mafito predominante es biotita, con menor cantidad de anfíboles. El agregado fino es una arena natural constituida por abundante material de origen volcánico (rocas volcánicas y vidrio), con menor proporción de cuarzo y feldespato.

El aspecto superficial de los testigos es homogéneo. Posee una aceptable distribución de sus componentes (agregados y pasta) y su textura es compacta. Las cavidades de aire accidental están rellenas parcialmente, principalmente por carbonato de calcio. Se observaron claras evidencias del desarrollo de fenómenos de reacción, especialmente afectando a los componentes del agregado fino. Algunas partículas del agregado grueso, presentan coronas de reacción, aunque en menor proporción. Como productos de neoformación se reconoce sílice criptocristalina, materiales masivos de fractura concoidal y finas agujas de ettringita.

En la Figura 6.28a y b se muestra el testigo con un proceso de reacción intenso, desarrollado principalmente sobre los componentes del agregado fino. Los productos de reacción se extienden hacia la pasta de cemento a partir de los componentes reactivos, principalmente desde las rocas volcánicas con pastas vítreas.

6.5.2.2.2 Observaciones con microscopio petrográfico

El agregado grueso es una roca granítica compuesta por ortosa y oligoclasa, débilmente argilizados, con texturas de desmezcla, de hábito subhedral. Constituyen entre el 65% y 70% del total de la roca. El cuarzo, de forma anhedral, se ubica en los espacios intercristalinos con deformación moderada. Se presenta fracturado y localmente se observan texturas de mortero. El ángulo de extinción ondulante promedio es de 17°. El mafito más abundante es biotita, con anfíboles subordinados. Éstos se presentan alterados, principalmente cloritizados. El porcentaje de los mafitos se estima entre 12% y 15%. En general las partículas de agregado grueso están

fracturadas con precipitación de óxidos de hierro y carbonato de calcio, lo que le otorga una textura particular a la roca, aunque no se observaron modificaciones en las características físicas de la misma.

El agregado fino es una arena natural polimíctica con buen redondeamiento. Está constituida principalmente por rocas volcánicas, con cantidades subordinadas de areniscas cuarzosas cementadas por sílice de aspecto amorfo y partículas monominerales (cuarzo, feldespato, anfíboles y piroxenos) y vidrio volcánico fresco. En las vulcanitas predominan las andesitas sobre las riolitas. Su textura varía desde felsítica a holohialina. Este material conserva la fluidalidad y vesicularidad original. También se observaron clastos vítreos masivos de varios colores, los más comunes son pardos y verdosos. Son frecuentes las formas irregulares características de las trizas de vidrio volcánico.

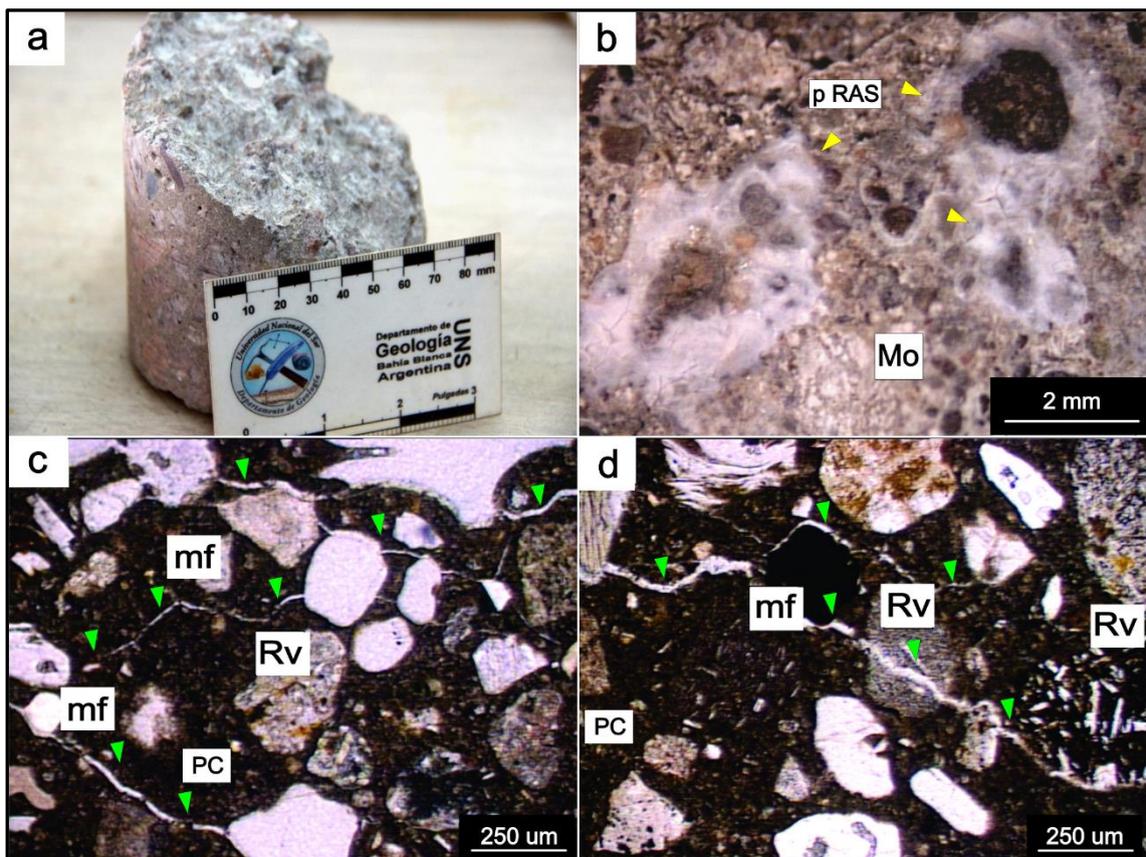


Figura 6.28 Hormigón de reparación. a) muestra extraída del anillo central de la rotonda; b) fotografía tomada con estereomicroscopio. Se puede observar coronas y productos de reacción en el mortero; c) y d) fotomicrografías (visto con luz paralela) donde se observan microfisuras (vacías o rellenas con productos de reacción) que atraviesan la pasta de cemento y agregados de rocas volcánicas. Rv: roca volcánica; Mo: mortero; p RAS: productos de la RAS; mf: microfisura; PC: pasta de cemento

La textura del mortero no es homogénea. Hay sectores bien conservados y otros muy carbonatados. Estos últimos siempre están asociados a zonas de microfisuras. Son frecuentes las coronas de reacción y los fenómenos de borde, tanto relacionados con fisuras periféricas como atravesando las partículas del agregado fino. También se reconocen bordes difusos en los contactos agregado fino-mortero. Las cavidades de aire accidental están rellenas de calcita, portlandita y ettringita, aunque no siempre están colmatadas.

En la Figura 6.28c se muestra el mortero muy microfisurado (en varios sectores de la imagen) y la composición de la arena donde predominan las rocas volcánicas, destacándose aquellas con pasta vítrea. En la Figura 6.28d se muestra otro sector con abundante contenido de rocas volcánicas, que aparecen también atravesadas por una microfisura que se encuentra rellena por material de neoformación.

En base a las características texturales y mineralógicas descritas, se puede establecer que los agregados gruesos de ambos hormigones analizados, provendrían de formaciones geológicas asociables con los materiales que se explotan en la cantera PIR. En el caso de los agregados finos la composición se corresponde con el análisis realizado en la cantera MED.

6.5.3 Análisis los de productos de reacción

6.5.3.1 Microscopía electrónica de barrido

Se extrajo material de neoformación que se encontraba rodeando partículas de agregados finos de composición volcánica y, relleno fisuras que involucraban pasta y agregados con pasta vítrea. Se separó la cantidad necesaria y se lo observó bajo estereomicroscopio para su posterior análisis con MEB. Se observaron diferentes morfologías y composiciones.

En la Figura 6.29a se muestra el material de relleno de las microfisuras. Por su composición química se adjudica a portlandita, calcita y silicatos de calcio (Figura 6.29b).

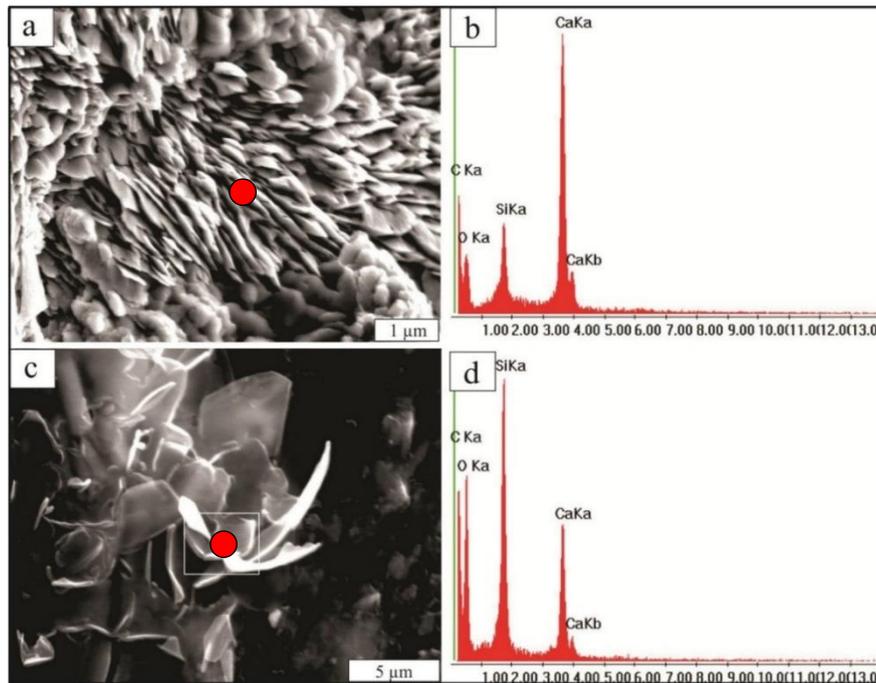


Figura 6.29 MEB-EDS a) morfología del material desarrollado en la superficie del hormigón; b) EDS del material observado en a); c) productos de la RAS con morfologías tipo rosetas; d) EDS del material observado en c)

En la Figura 6.29c se observa la morfología del producto, extraído de la zona de interfase agregado fino-pasta (IF), que por su composición y estructura podría corresponder a productos cristalinos asociados a la RAS ricos en calcio (probablemente recristalizados) (Figura 6.29d).

6.5.4 Discusión

Los agregados que constituyen el hormigón original y los utilizados en la reparación, son los mismos. El agregado grueso es una piedra partida granítica y el fino una arena natural en cuya composición predominan las rocas volcánicas con pastas vítreas. También es abundante el vidrio volcánico fresco.

El hormigón original, construido en el año 1994, presenta marcados signos de deterioro debido al desarrollo de procesos expansivos vinculados con la RAS. El hormigón de la reparación realizada en el año 2009 también está deteriorado por el desarrollo de la RAS, aunque el avance del proceso no es tan avanzado.

Los procesos de reacción se asocian principalmente con los materiales potencialmente reactivos del agregado fino (rocas volcánicas con pastas vítreas y vidrio volcánico). El fisuramiento del hormigón original se desarrolló en varias etapas. Las primeras microfisuras están selladas, aunque algunas de ellas han sido reactivadas. Afectan principalmente al mortero, pero tienen estrecha relación con la desvitrificación de las pastas de las rocas volcánicas y perturbaciones de las superficies externas de los componentes litológicos lábiles. Tanto en el mortero como en el interior de las cavidades de aire accidental, se identificaron productos de reacción que, por sus características morfológicas y quimismo, pueden asociarse a la RAS. Según el análisis MEB-EDS, hay abundante carbonato de calcio y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

6.6 Rotonda de acceso a Médanos

6.6.1 Ubicación y características de la estructura

Se evaluó el hormigón del pavimento de la rotonda de acceso a la localidad de Médanos (provincia de Buenos Aires). La misma se encuentra sobre el km 733 de la Ruta Nacional N° 22, 40 km al oeste de la ciudad de Bahía Blanca (Figura 6.30).

Como ya se mencionó, los hormigones para este tipo de estructuras son diseñados (estructuralmente) para alcanzar una vida útil de 50 años de servicio (teniendo en cuenta varios factores determinantes como cargas, el clima, espesores, etc.). A los 4 años de habilitado al tránsito, se observó que presentaba un avanzado estado de deterioro, evidenciado por el fisuramiento en forma de mapa, levantamiento de losas y desarrollo de productos de neoformación.



Figura 6.30 Ubicación de la rotonda de acceso a la localidad de Médanos (Ruta Nacional N°22 – Km 733). Tomado de Google Earth®

6.6.2 Caracterización de los testigos

El relevamiento en superficie indicó un fisuramiento generalizado en todo el ancho de la calzada (7 metros) que afecta al 90% del total de la superficie (Figura 6.31a). Una imagen de detalle da cuenta de un fisuración “tipo mapa” (con un ángulo aproximado de 120° desde un punto) y que se propaga en todo el espesor del pavimento (Figura 6.31b y c). La obra fue demolida en un 85% de su volumen luego de 4 años de servicio por el deterioro evidente de la estructura (Figura 6.31d). A partir de la recolección del hormigón demolido se realizó un análisis petrográfico de los componentes, así como de los productos de reacción hallados.

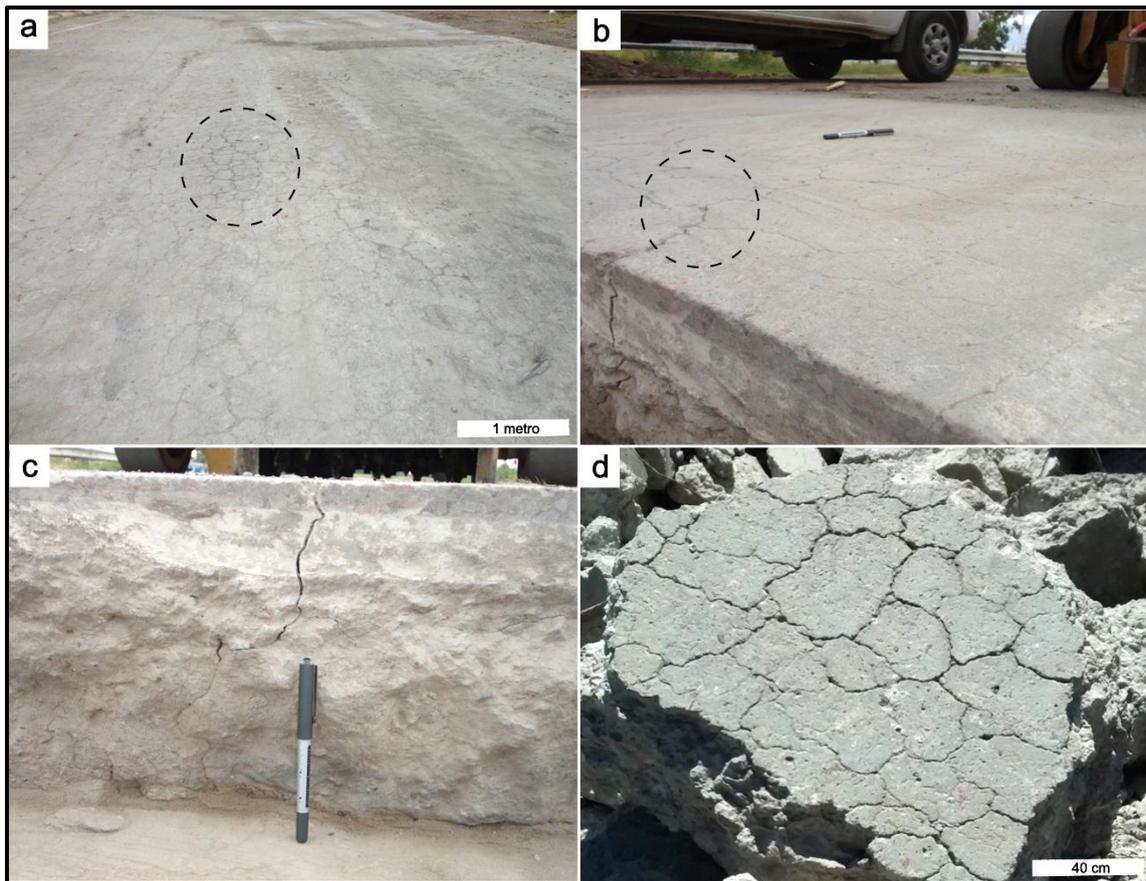


Figura 6.31 Pavimento de la rotonda de Médanos. a) fisuras tipo mapa rellenas con material blanquecino; b) detalle de otro sector del pavimento con fisuras “tipo mapa”; c) fisuras que atraviesan toda la losa; d) trozo demolido de la estructura donde se puede ver el intenso fisuramiento en forma de mapa

El hormigón presenta claras evidencias de deterioro. Son abundantes las cavidades de aire accidental, las que en general se encuentran colmatadas por productos de neoformación (calcita, portlandita). Los agregados finos presentan coronas de reacción, con evidencias de procesos de lixiviación notorias evidenciadas en la textura del mortero.

6.6.2.1 Análisis petrográfico

6.6.2.1.1 Observaciones con estereomicroscopio

En la Figura 6.32a se observa el típico fisuramiento en forma de mapa (círculo amarillo), con grietas dispuestas a 120° que parten de un mismo punto, y diferentes niveles de apertura (círculo amarillo). En la Figura 6.32b pueden distinguirse productos de reacción en casi la totalidad de la imagen. Los mismos se ubican en cavidades de aire accidental y obliterando el mortero.

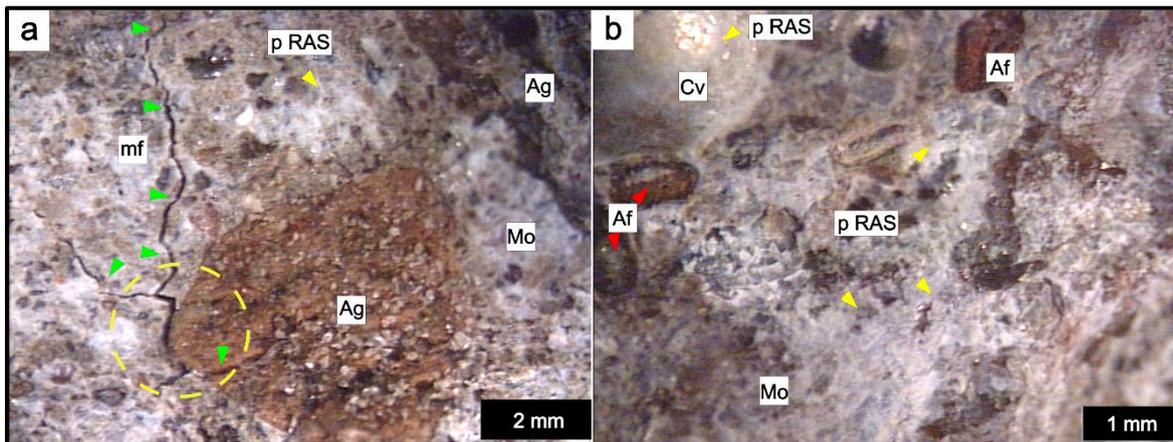


Figura 6.32 Observaciones con estereomicroscopio del pavimento de la rotonda de Médanos. a) fisura desarrollada sobre mortero y en el contacto agregado-mortero; b) productos de neoformación en mortero y relleno de cavidades de aire accidental. mf: microfisura; P RAS: productos de reacción; Ag: agregado grueso; Mo: mortero; Cv: cavidad de aire accidental; Af: agregado fino

6.6.2.1.2 Observaciones con microscopio petrográfico

El agregado grueso está constituido principalmente por una piedra partida granítica de color rosado, en cuya composición predomina el feldespato potásico, con plagioclasa y cuarzo subordinados. Los mafitos son biotita y anfíbol (hornblenda). La textura de la roca es granular hipidiomórfica. El resto (aproximadamente 5%) está constituido por un canto rodado polimíctico natural, en cuya composición predominan las rocas volcánicas (andesitas y riolitas, la mayoría con pastas vítreas). El agregado fino es una arena natural polimíctica, constituida principalmente por rocas volcánicas, tobas, cuarzo y areniscas silíceas y, en menor proporción, feldespatos, piroxenos, micas, areniscas carbonáticas (tosca) y minerales opacos.

Se observan microfisuras que parten de los agregados de rocas volcánicas y atraviesan la pasta de cemento en varias direcciones (Figura 6.33a). La mayoría de las vulcanitas tienen pastas con vidrio fresco, aunque además se diferencian trizas de vidrio fresco. En la Figura 6.33b se pueden observar microfisuras de mayor apertura, las cuales están rellenas de un material birrefringente que se condice con productos de la RAS. Estas microfisuras, afectan agregados finos, pasta de cemento y contactos agregado-pasta.

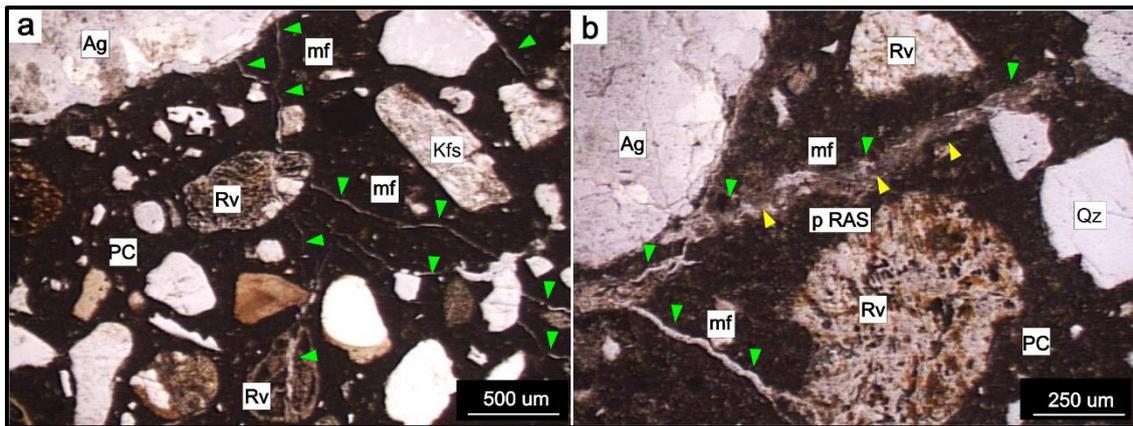


Figura 6.33 Fotomicrografías del pavimento de la rotonda de Médanos (luz paralela). a) microfisuras que afectan la pasta de cemento, la interfase entre los agregados finos y gruesos con la pasta y rocas volcánicas; b) microfisura rellena con producto de neoformación. Ag: agregado grueso; PC: pasta de cemento; Kfs: feldespato potásico; Rv: Roca volcánica; mf: microfisura; Qz: cuarzo

En base a las características texturales y mineralógicas descritas, se puede establecer que los agregados gruesos de ambos hormigones analizados, provendrían de formaciones geológicas asociables con los materiales que se explotan en la cantera PIR. En el caso del agregado fino, existen 2 aspectos a destacar que permiten reconocer su proveniencia de la cantera MED: el primero (quizá el más importante) la cercanía (menos de 2 kilómetros) a la obra y el segundo, la diferenciación de fracciones de rocas volcánicas con pastas vítreas, tosca y partículas monominerales destacables de este yacimiento.

6.6.3 Análisis de los productos de reacción

6.6.3.1 Microsonda electrónica

Se confeccionaron secciones delgadas pulidas a espejo (Figura 6.34) y se realizaron estudios texturales con microscopio petrográfico para seleccionar las áreas a analizar con microsonda electrónica. En la Figura 6.34a se observa una microfisura que atraviesa un agregado fino reactivo y el contacto agregado-pasta de cemento. La Figura 6.34b muestra microfisuras y una cavidad de aire accidental, rellenas con productos de neoformación.

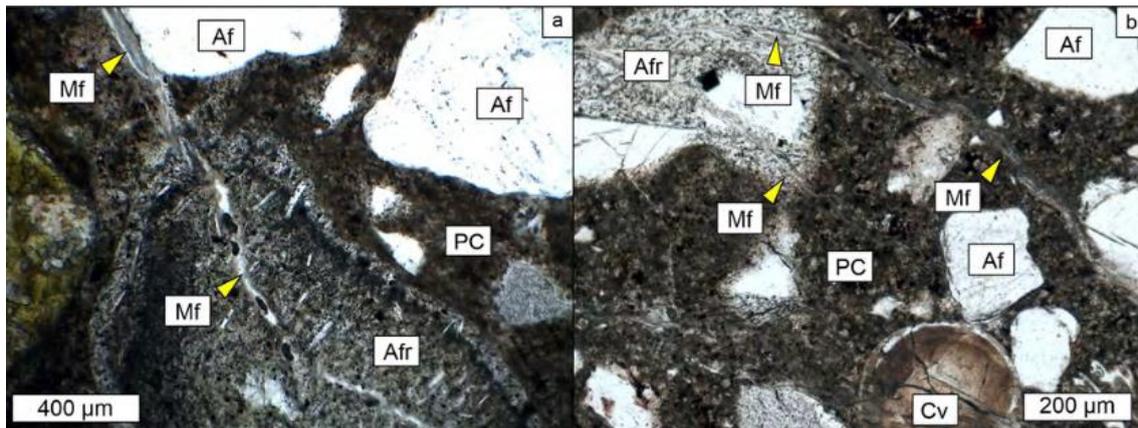


Figura 6.34 Fotomicrografías. Visto con microscopio petrográfico con luz paralela. a) agregado volcánico reactivo con microfisuras internas parcialmente rellenas de productos de neoformación que progresan hacia la pasta de cemento; b) microfisuras que afectan la pasta de cemento y los agregados finos. En el sector inferior derecho observa una cavidad de aire accidental rellena de productos de neoformación de color pardo. Af: agregado fino; Afr: agregado fino reactivo; Cv: cavidad de aire accidental; Mf: microfisura; PC: pasta de cemento

Se realizó un análisis detallado de los productos de neoformación desde el interior de un agregado volcánico reactivo hacia la pasta (Figura 6.35a). En la Figura 6.35b se muestra un detalle del sector “b” marcado en el recuadro de la Figura 6.35a. Se observan formas laminares rellenas una microfisura en el interior del agregado reactivo volcánico (1) y hacia la zona de interfase con la pasta de cemento, un material masivo craquelado (2). La composición química promedio del material laminar es: SiO₂: 54,1%, Al₂O₃: 0,32%, FeO_T: 0,05%, MgO: 0,17%, CaO: 14,63%, Na₂O: 1,54%, K₂O: 7,38%, SO₃: 0,06%, Cl: 0,12% y H₂O: 21,6%. Esta última calculada por diferencia al 100%.

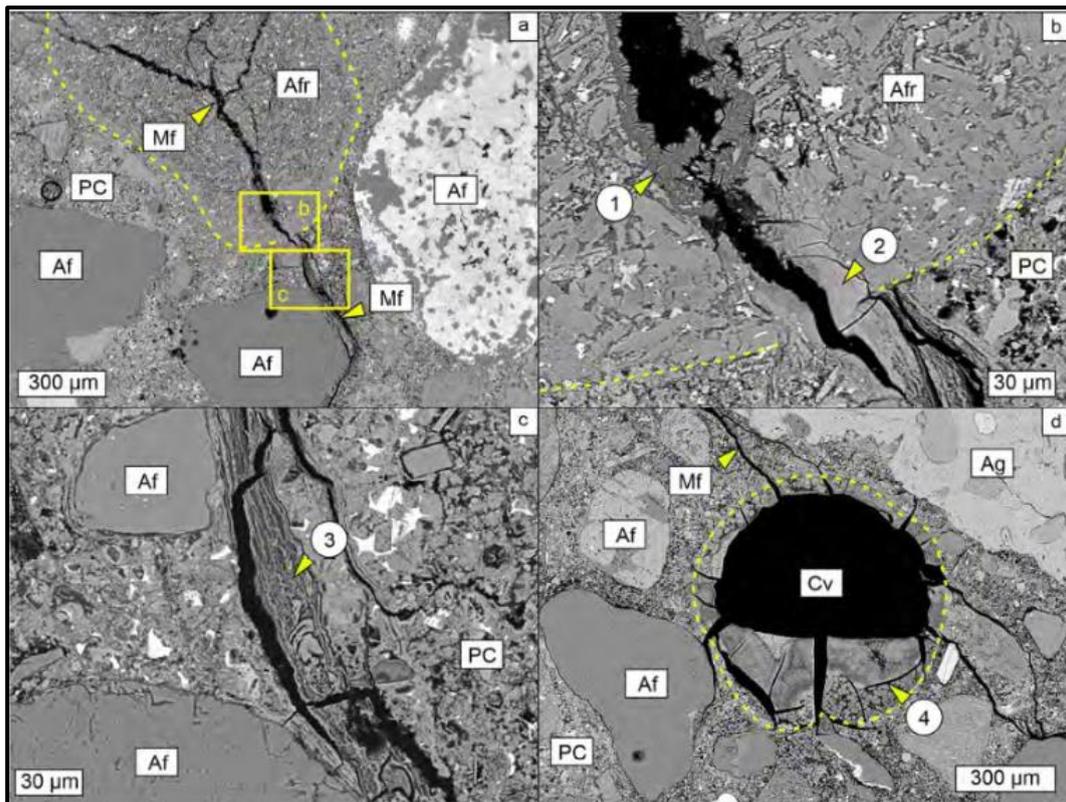


Figura 6.35 Imágenes de electrones retrodispersados tomadas con microsonda de electrones. a) agregado volcánico reactivo (línea punteada) con microfisuras internas que progresan hacia la pasta de cemento; b) detalle del sector “b” en la Figura 6.35a. Se observan materiales cristalinos laminares “1” relleno de una microfisura en el interior del agregado volcánico reactivo y hacia la interfase con la pasta de cemento un material masivo craquelado “2”; c) detalle del sector “c” en la Figura 6.35a. Se observan materiales masivos y bandeados “3” relleno de una microfisura en la pasta de cemento; d) cavidad de aire accidental (línea punteada) rellena parcialmente por productos de neoformación masivos y microcristalinos craquelados “4”, asociada a microfisuras en la pasta de cemento. Ag: agregado grueso. Afr: agregado fino reactivo. Cv: cavidad de aire accidental. Mf: microfisura. PC: pasta de cemento

Estos componentes evidencian esencialmente, la presencia de un silicato hidratado de calcio, potasio y sodio. Hacia el contacto con la pasta de cemento (Figura 6.35b, “2”) los productos son masivos y craquelados con propiedades ópticas asignables a materiales amorfos. Se enriquecen en CaO (19,31%) y se empobrecen en Na₂O (1,44%) y K₂O (1,87%). En la Figura 6.35c se muestra un detalle del sector “c” marcado en el recuadro en la Figura 6.35a. Cuando los productos rellenan microfisuras en la pasta de cemento, son masivos y eventualmente bandeados (Figura 6.35c “3”). En su composición predomina CaO (37,65%) y están empobrecidos en Na₂O (0,88%) y K₂O (0,71%). También se analizaron las cavidades de aire accidental parcial o totalmente rellenas de materiales masivos craquelados y microcristalinos transparentes y pardos (sector 4 de la Figura 6.35d). Estos, son ricos en CaO (39,33%) y pobres en Na₂O

(0,23%) y K_2O (0,32%). Además, se observan cavidades rellenas de ettringita y carbonatación en la pasta de cemento.

6.6.4 Discusión

El desarrollo de ettringita secundaria en microfisuras y/o cavidades de aire accidental en el hormigón comúnmente se relaciona a procesos de desestabilización de compuestos con azufre de la pasta de cemento que se movilizan y precipitan en espacios abiertos. Estos compuestos comúnmente son identificados en hormigones deteriorados asociados a los productos de la RAS (p.ej. Locati et al., 2020a). Los silicatos hidratados (reconocidos como materiales de neoformación), dependiendo de su localización en el hormigón, siguen una tendencia composicional ya observada por otros autores (Locati et al., 2020a; Katayama et al., 2012a, 2012b, 2012c; Leemann et al., 2016).

En este caso, los productos identificados en el pavimento de la rotonda estudiada siguen una tendencia que se asemeja a la “Tipo 1” definida por Katayama (2008) para una evolución normal de los productos de reacción, con convergencia hacia los productos de hidratación de la pasta de cemento (Figura 6.36a). En el interior de los agregados reactivos se reconocen productos cristalinos, en forma de láminas de disposición radial (o forma de roseta) y son ricos en Ca, Na y K. Hacia la interfase con la pasta de cemento son masivos, pierden Na y K y se enriquecen en Ca. Esta tendencia se acentúa en la pasta de cemento y en el interior de cavidades de aire accidental, donde los productos poseen mayor interacción con la pasta y se enriquecen en Ca, alcanzando composiciones similares a la de los productos de hidratación del cemento. Sin embargo, se observa dispersión en los resultados, en especial de los productos masivos y/o microcristalinos que rellenan microfisuras en la pasta de cemento y cavidades de aire accidental, lo que podría deberse a procesos de carbonatación y/o lixiviación de álcalis de los productos de reacción (Katayama, 2008). La elevada fisuración del pavimento habría favorecido el ingreso de CO_2 produciendo la carbonatación parcial de la pasta de cemento y de los productos de reacción, así como el ingreso de agua meteórica, posibilitando la movilización de sulfatos, la generación de ettringita secundaria y la lixiviación de álcalis, cambiando la composición original de

los productos de la RAS. Los productos cristalinos reconocidos en el interior de los agregados son similares a los reportados por otros autores (p.ej. Katayama, 2012a, 2012b; Locati et al., 2020a) y se podrían correlacionar composicionalmente, con las fases naturales mountainita, shlykovita y fedorita (Figura 6.36b), en coincidencia con lo sugerido por Katayama (2012b). Sin embargo, es necesario avanzar sobre estudios de caracterización adicionales a fin de verificar si hay una mayor correspondencia con la fase shlykovita como sugieren estudios recientes (Leemann et al., 2021).

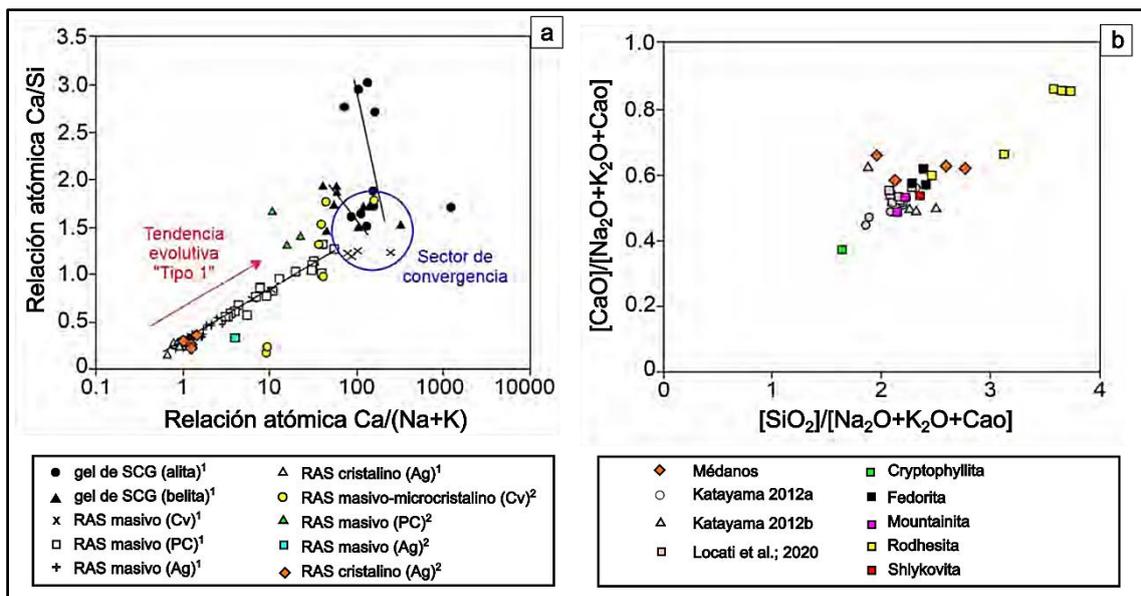


Figura 6.36 Gráfico de tendencia composicional de productos de reacción. a) tendencia que se asemeja a la "Tipo 1" definida por Katayama (2008) para una evolución normal de los productos de reacción, con convergencia hacia los productos de hidratación de la pasta de cemento; b) productos de reacción de la obra analizada concordante con las fases naturales mountainita, shlykovita y fedorita

Según Katayama (2012a) la fase cristalina no precipitaría directamente luego del ataque a la sílice reactiva del agregado, sino que cristalizaría a partir de un producto amorfo precursor. Además, según este autor, los productos cristalinos no tendrían capacidad para producir expansión por hinchamiento en contacto con agua, ni por cristalización directa, y serían los productos masivos (posiblemente amorfos) los que generarían la expansión por adsorción de agua. Sin embargo, Leemann et al. (2021) indican que, tanto los productos cristalinos como los amorfos, tendrían baja capacidad de expandir en contacto con humedad.

6.7 Pavimento de un acceso al puerto de Ing. White

6.7.1 Ubicación y características de la estructura

Se estudió un pavimento de hormigón de acceso al Sector 6 de Puerto Galván. Dicho complejo se emplaza en la localidad de Ingeniero White, ubicada a 15 km al sudeste de la ciudad de Bahía Blanca (Figura 6.37). La estructura abarca 1040 m² de superficie y corresponde a un camino de acceso a un sector de descarga de materiales para ser transportados por vía marítima. Dicha pavimentación fue ejecutada en el año 2009, como reemplazo de una estructura de adoquines.

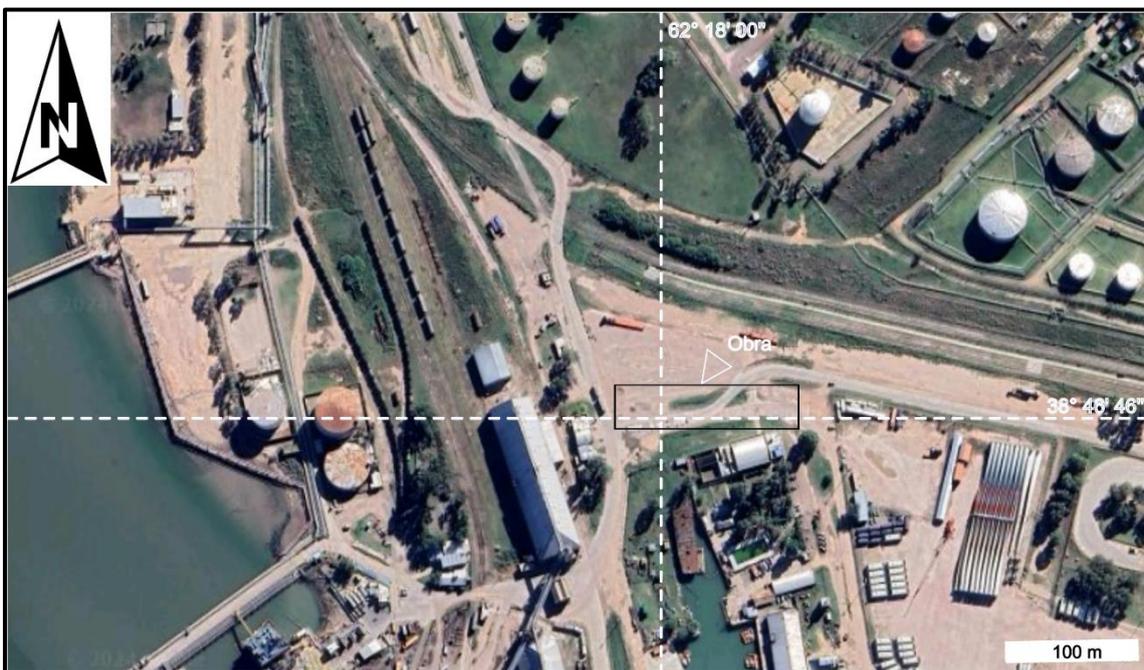


Figura 6.37 Ubicación de la obra. Pavimento de acceso al puerto de Ingeniero White. Imagen tomada de Google Earth®

6.7.2 Ensayos físicos y mecánicos

En la Tabla 6.6 se resume los resultados promedio de 2 testigos extraídos del pavimento analizado (1 cada 250 m²). Aunque no se tengan antecedentes de la ejecución de dicha estructura, es de esperar que el pavimento analizado haya sido diseñado para soportar cargas considerables (camiones de grandes dimensiones) y estar expuesto a condiciones ambientales severas (precipitaciones, marejadas, etc.). Los ensayos realizados fueron los de Densidad conforme a la norma ASTM C642-21 y Resistencia a la compresión a partir de la norma IRAM 1564 (2017).

Con respecto a la densidad, se puede observar que los valores obtenidos se corresponden con aquellos esperados para un tipo de hormigón denso y coherente con las condiciones mencionadas. No obstante, los valores de resistencia a la compresión parecieran estar por debajo de aquellas exigencias esperables (por la serviciabilidad que debería brindar la estructura y el tiempo transcurrido desde su ejecución) ya que no alcanzan los 30 Mpa.

Tabla 6.6 Ensayos físicos y mecánicos promedio (densidad ASTM C642 y resistencia a compresión IRAM 1546)

Densidad [g/cm ³]	Resistencia a la compresión [MPa]
2,26 +/- 0,02	28,9 +/- 2,7

6.7.3 Caracterización de testigos

Se realizó el examen visual sobre el pavimento y se comprobó la existencia de fisuras generalizadas (Figura 6.38a) en toda la estructura. En la Figura 6.38b se puede observar con detalle la disposición tipo “mapa” de dichas fisuras, las cuales son características de la RAS.

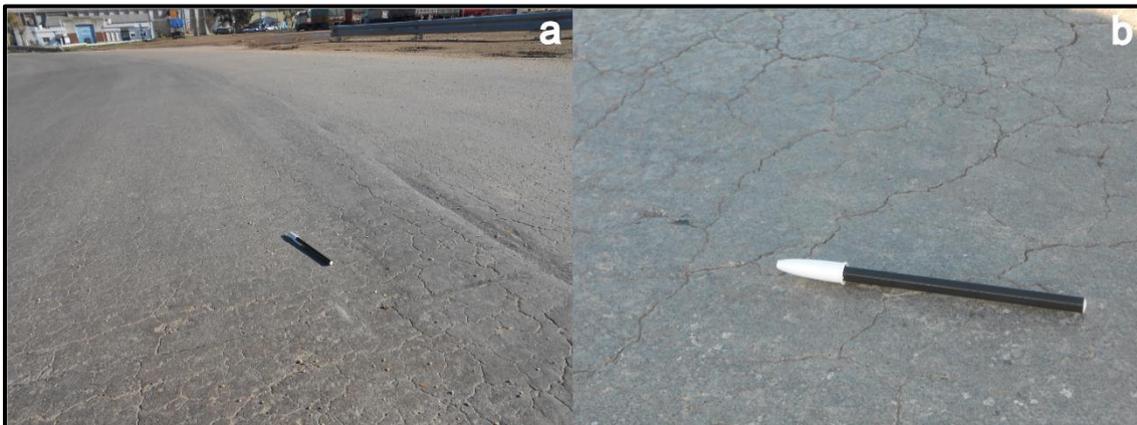


Figura 6.38 Pavimento de acceso a Puerto de Ing. White. a) fisuración generalizada en el hormigón; b) detalle de la fisuración tipo mapa

6.7.3.1 Análisis petrográfico

El agregado grueso es una roca de textura granular hipidiomórfica, compuesta por cristales de feldespato (ortosa en su mayoría) con hábito subhedral a anhedral y plagioclasa subordinada, con procesos de argilización puntuales (Figura 6.39a). Abundan en ellos texturas de desmezcla. El cuarzo es anhedral, se encuentra dispuesto entre los fenocristales y su tamaño supera los 120 μm . El AEO promedio es de 14°. Los mafitos corresponden a biotita y anfíboles subhedrales, estos últimos alterados parcialmente a clorita y dispuestos entre los feldespatos o como partículas monominerales.

El agregado fino es una arena natural polimíctica con formas principalmente subredondeadas. En su composición se identificaron rocas volcánicas porfíricas (andesitas y riolitas), la mayoría con pastas vítreas, cuarcitas, tobas, cuarzo, feldespato, areniscas carbonáticas (tosca), minerales opacos, micas, piroxenos y trizas de vidrio (Figura 6.39a). Las vulcanitas están parcialmente alteradas (desvitrificadas y argilizadas). Se evidenciaron pequeñas microfisuras que atraviesan los agregados volcánicos que componen la fracción fina (Figura 6.39b).

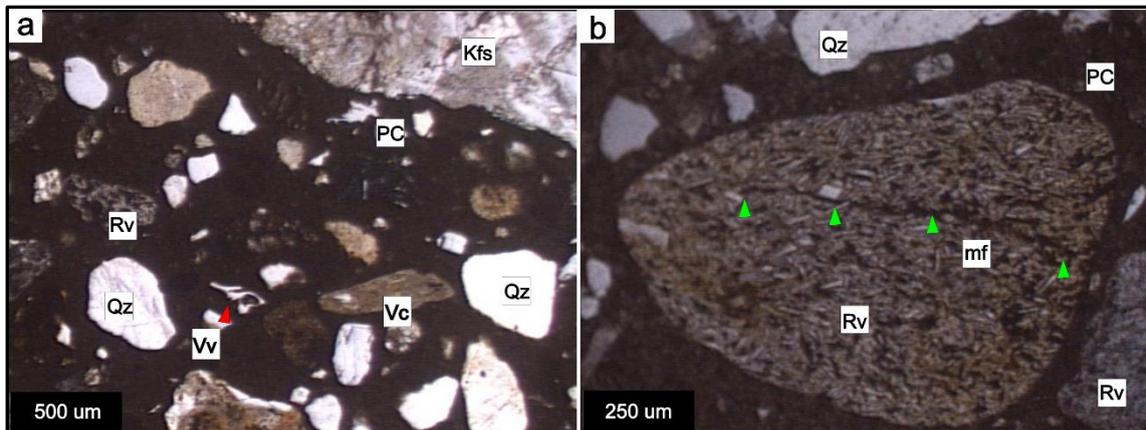


Figura 6.39 Fotomicrografías de los testigos (nicoles cruzados) a) imagen de los componentes intervinientes en el hormigón. Se observan rocas volcánicas con pasta vítrea y vidrio volcánico como componentes potencialmente reactivos; b) microfisura que atraviesa un agregado volcánico. Kfs: feldespato potásico; Vc: valva carbonática; PC: pasta de cemento; mf: microfisura; Rv: roca volcánica; Vv: vidrio volcánico

En base a las características texturales y mineralógicas descriptas, se puede establecer que el agregado grueso provendría de formaciones geológicas asociables con los

materiales que se explotan en la cantera PIR. En el caso del agregado fino, se puede mencionar la existencia de rocas volcánicas, partículas monominerales de cuarzo y feldespatos potásicos, así como la presencia de vidrio fresco que podrían ser atribuibles a la cantera VII.

6.7.4 Discusión

Superficialmente, el pavimento presenta indicios de la RAS (fisuramiento tipo mapa generalizado en alrededor de 10 años de construido). Los testigos extraídos, arrojaron en promedio bajos valores de densidad ($2,26 \text{ g/cm}^3$) y bajas resistencias a compresión por tratarse de un pavimento en un acceso a un puerto donde las cargas que debe soportar son elevadas.

El agregado fino es una arena natural, cuyos componentes principales son rocas volcánicas (en su mayoría con pastas vítreas), vidrio volcánico en forma de trizas y partículas monominerales como cuarzo y feldespatos potásicos. Se observaron microfisuras que atraviesan partículas de rocas volcánicas. No se identificaron productos de reacción en las fisuras, ni asociados a las rocas potencialmente reactivas.

6.8 Autovía de acceso a Bahía Blanca

6.8.1 Ubicación y características de la estructura

Se evaluó el pavimento de hormigón de una autovía en el acceso este a la ciudad de Bahía Blanca (Figura 6.40). La obra consta de 6 km de pavimento de hormigón de doble carril cuya ejecución data del año 1983. El sector analizado, pertenece a una reparación realizada en el año 2009 en varios sectores cercanos a la ciudad. Se extrajeron cuatro testigos.

Los sitios analizados son reparaciones tipo fajas de unos 7,5 metros de ancho (total de la calzada) que no sobrepasan los 3 metros de longitud (Figura 6.41a). En algunos sectores, se observan despostillamientos y desprendimientos de pequeños bloques. En el total de la superficie, se observan fisuras tipo mapa que, en algunos sectores, poseen anchos de hasta 3 mm (Figura 6.41b).

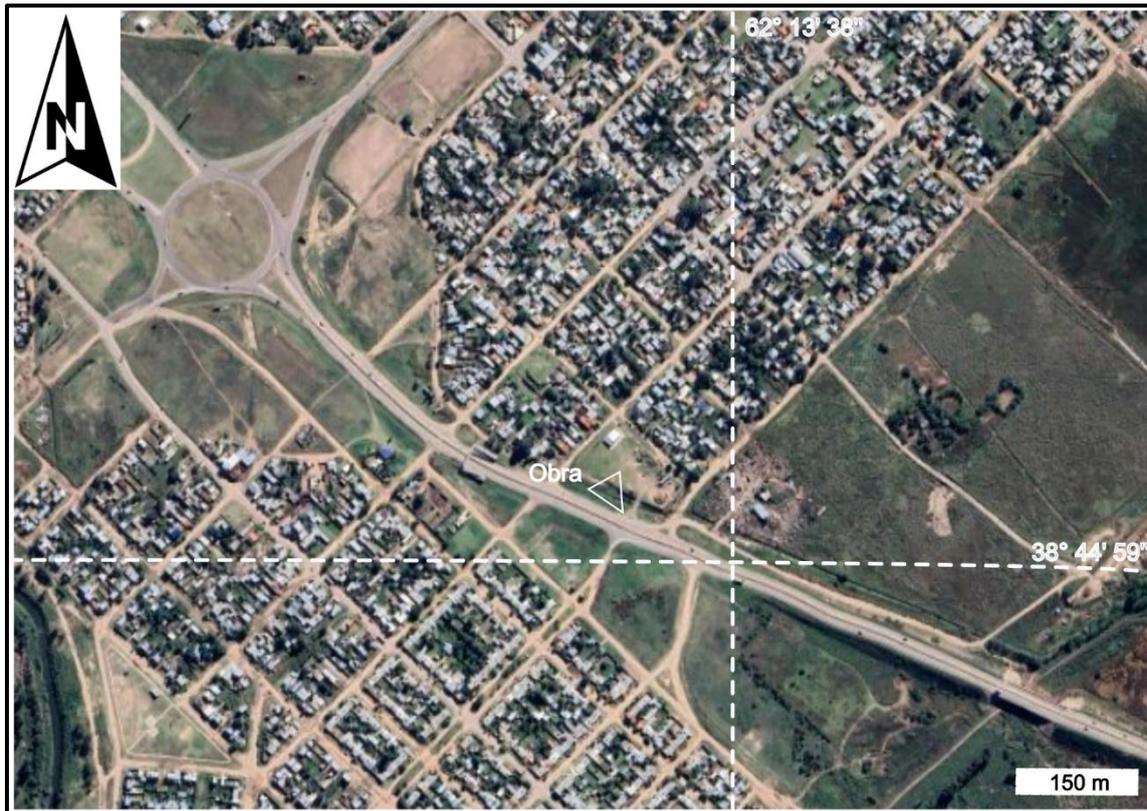


Figura 6.40 Ubicación de la obra. Pavimento de acceso a la ciudad de Bahía Blanca. Imagen tomada de Google Earth®

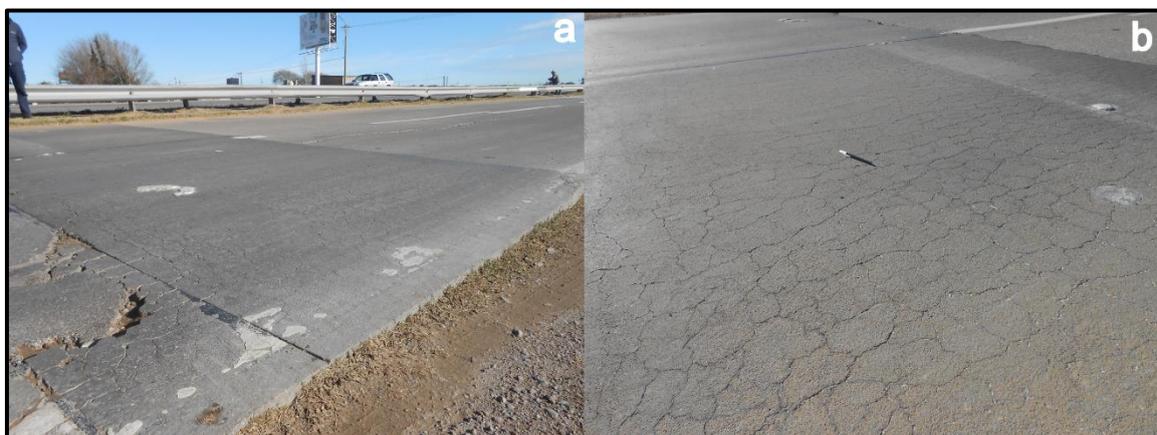


Figura 6.41 Autovía del acceso Este a Bahía Blanca. a) reparación de hormigón realizada en el año 2009. Se observan despostillamientos; b) fisuración tipo mapa

6.8.2 Ensayos físicos y mecánicos

En la Tabla 6.7 se resumen los resultados promedio (con sus respectivos desvíos estándar) de densidad (ASTM C642-21) y resistencia a compresión (IRAM 1546, 2017), realizados sobre los cuatro testigos extraídos. Con respecto a la densidad, se puede observar que los valores obtenidos son bajos para aquellos esperados en este tipo de estructura (masiva, expuesta a la intemperie y creada para soportar grandes cargas)

según las recomendaciones de la FWHA (2001), la que indica valores por encima de los 2,4 g/cm³.

La resistencia a la compresión medida, muestra valores bajos y no compatibles con aquellos hormigones que deberían utilizarse (> a 30 Mpa), para este tipo de estructuras (FWHA, 2001; CIRSOC, 2005).

Tabla 6.7 Densidad y resistencia a compresión. Valores promedio y desvío standard.

Densidad [g/cm ³]	Resistencia a la compresión [MPa]
2,23 +/- 0,03	22,1 +/- 2,6

6.8.3 Caracterización de los testigos

6.8.3.1 Análisis petrográfico

El testigo que se muestra en la Figura 6.42 está fuertemente fisurado (fisuras perpendiculares a la superficie) aunque el material no es deleznable. Al ser fracturado por impacto se reconoce que, en las zonas de debilidad, existe carbonatación (Figura 6.42a) propia del contacto con la base de suelo donde estaba apoyada la losa. Parte de la base granular se encuentra adherida al hormigón y denota un suelo con retención de humedad en la zona de contacto. En algunos sectores, las oquedades presentes se encuentran rellenas mayoritariamente por carbonato de calcio, aunque en otros de iguales condiciones no existe alteración alguna. Además, se observa desarrollo de productos masivos (probablemente amorfos), blancos a celestes con morfologías típicas de los productos de la RAS, asociados a la carbonatación (Figura 6.42a y b).

La Figura 6.43a muestra los componentes del hormigón analizado. El agregado grueso es una roca de textura granular compuesta por fenocristales de feldespato (ortosa en su mayoría) con hábito subhedral y plagioclasa escasa (Figura 6.42a). El cuarzo es anhedral, se encuentra dispuesto entre los fenocristales y su tamaño supera los 150 µm. La textura es granular hipidiomórfica.

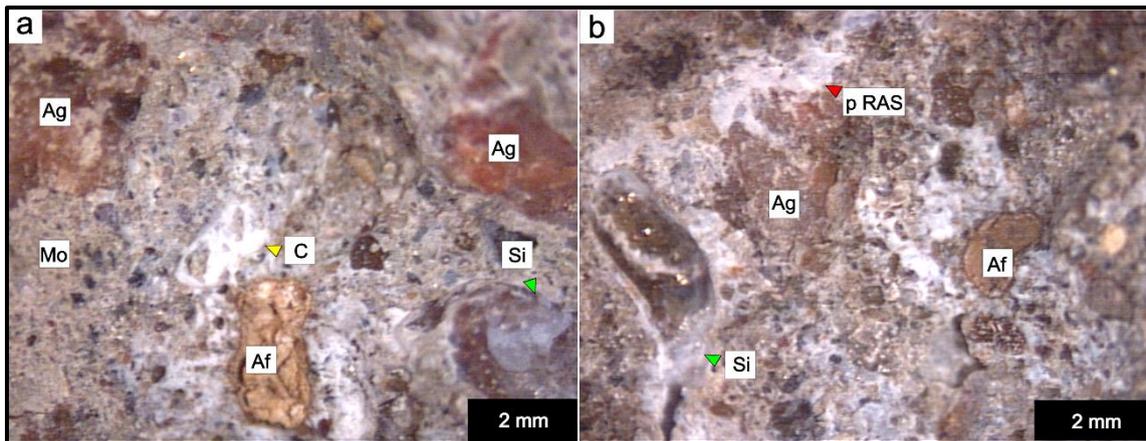


Figura 6.42 Imágenes de estereomicroscopio de testigos de la Autovía de acceso a Bahía Blanca. a) mortero carbonatado y sílice criptocristalina (flechas verdes); b) partícula del agregado rodeada de gel de sílice (flecha verde) y productos de reacción. Ag: agregado grueso; Mo: mortero; Af: agregado fino; C: carbonatación; Si: sílice en gel o criptocristalina; p RAS: productos de la RAS.

En el agregado fino, se distinguen rocas volcánicas con pastas vítreas y trizas de vidrio volcánico como componentes potencialmente reactivos en el agregado fino. Además, puede observarse una microfisura que atraviesa la pasta y el contacto agregado fino-pasta. En la Figura 6.43b se observan microfisuras que atraviesan agregados y la pasta de cemento. Se observan productos de reacción que rellenan las microfisuras.

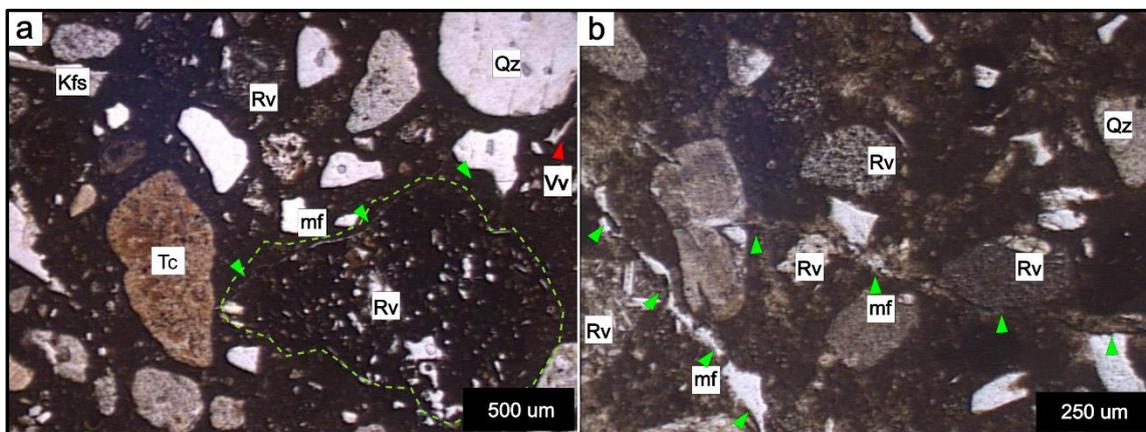


Figura 6.43 Fotomicrografías de los testigos analizados. a) imagen con nicols cruzados. Se observan rocas volcánicas con pastas vítreas y vidrio volcánico en trizas. Microfisuras en la pasta y en el contacto agregado-pasta (flechas verdes); b) Imagen con luz paralela. Microfisuras en el mortero que afectan los agregados finos de origen volcánico. Qz: cuarzo, Kfs: feldespato potásico; Tc: tosca calcárea; Rv: roca volcánica; Vv: vidrio volcánico; mf: microfisura

En base a las características texturales y mineralógicas descriptas, se puede establecer que el agregado grueso del hormigón analizado, provendría de formaciones geológicas asociables con los materiales que se explotan en la cantera PIR. En el caso del

agregado fino se destacan rocas volcánicas con pastas vítreas, tosca calcárea y partículas monominerales de cuarzo y feldespato potásico relacionados a los evaluados para la cantera MED.

6.8.4 Discusión

El pavimento estudiado presenta deterioro significativo a nivel general en toda su superficie. Se puede observar que las fisuras presentan un patrón tipo “mapa”, distintivo de estructuras afectadas por la RAS. La extracción de testigos mostró que las fisuras se continuaban en profundidad alcanzando anchos significativos (3 mm). Aunque no se cuenta con información sobre los valores requeridos en el diseño, los resultados de los ensayos de resistencia a compresión son bajos (22 MPa en promedio), no alcanzando lo requerido en pliegos de referencia (CIRSOC 201, 2005; PETG VN, 2017) para pavimentos de hormigón.

Petrográficamente, se identificaron productos asociados a la RAS como geles de coloración blanca a transparentes y celestes. Además, se observó carbonatación en el mortero. Al microscopio se identificaron microfisuras rellenas con un material birrefringente que afecta a la pasta y parte de los agregados finos. No se observan evidencias de reacción vinculadas al agregado grueso. Los materiales potencialmente reactivos presentes en los agregados finos corresponden a vidrio volcánico en la pasta de las rocas volcánicas y como trizas.

CAPÍTULO VII. MEDIDAS PARA INHIBIR LA RAS

7.1 Introducción

En el Anexo A de las normas IRAM 1512 (2013) e IRAM 1531 (2022), se proponen medidas de prevención frente a la reacción álcali-agregado. El inciso b) del apartado **A.2.2 “Medidas prestacionales”** menciona la posibilidad de utilización de adiciones minerales activas (AMAs) como una de las medidas para inhibir la reacción. También indica cómo se puede evaluar su efectividad utilizando métodos normalizados.

A los fines de poder utilizar los agregados del área de estudio, calificados como potencialmente reactivos frente a la RAS (Capítulo V), se propone el uso de una AMA como medida prestacional. Para ello, se seleccionaron las canteras PIG (agregado grueso de reacción lenta) y MED (agregado fino de reacción rápida), en las que su reactividad fue confirmada en estructuras en servicio (Capítulo VI).

7.2 Medidas prestacionales

Dentro de las AMAs existen diversas alternativas como se mencionó en el Capítulo IV. Por un lado, están las puzolanas industriales como la escoria de alto horno, las cenizas volantes y los humos de sílice (IRAM 1531, 2022), obtenidas mediante el residuo de procesos industriales. Además, existen puzolanas de origen natural, cuyas características mineralógicas, texturales y químicas son propias de su naturaleza de origen. Estos materiales silíceos o silicoaluminosos (o la combinación de ambos) se obtienen naturalmente o mediante un tratamiento térmico o mecánico de: cenizas volcánicas, arcillas, esquistos, tobas y diatomeas, entre otros. La unión química de estos compuestos con el hidróxido de calcio, proveniente de la hidratación del cemento formarán silicatos de calcio hidratados (Calo, 2014).

Cualquiera sea su origen, la función fundamental de estas AMAs (en relación con la RAS) es disminuir la concentración de iones alcalinos en la solución de poro, inhibiendo la reacción.

7.2.1 Uso de adiciones minerales activas (AMAs)

En los últimos años se han realizado varios estudios con materiales naturales con potencial como AMA para inhibir la RAS. En particular, las zeolitas como puzolana natural poseen la capacidad de poder disminuir la concentración de iones alcalinos en la solución de poro mediante intercambio iónico, adsorción y reacción puzolánica (Feng y Hao, 1998; Ahmadi y Shekarchi, 2010). Su reactividad parece estar relacionada con la gran superficie específica externa y la metaestabilidad, que favorecen su disolución en la solución saturada de cal y la sucesiva precipitación de fases de silicato de calcio hidratado (\pm Al) (Držaj et al., 1978; Mertens et al., 2009; Snellings et al., 2010). Además, este tipo de puzolanas poseen un interés particular ya que para su utilización solo se necesita de su molienda.

Bonavetti et al. (2016) estudiaron una brecha vítrea zeolitizada del sur de la provincia de Mendoza (BVZ). La misma, manifestó actividad puzolánica alcanzando, a edades avanzadas, un índice de actividad puzolánica muy superior a los valores requeridos por la norma EN-450 (2008). Este material está compuesto por mordenita (zeolita) y vidrio volcánico, con menor proporción de feldespato potásico y plagioclasa. También se identificaron fases accesorias adicionales (<5%) como clinoptilolita, esmectitas, ópalo C-T, óxidos de Fe-Ti y sílice colofome (Locati et al., 2020b). El contenido de vidrio volcánico varía entre 70% y 75%, mientras que el de mordenita es de ~25% (Bonavetti et al., 2020). El contenido de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es ~ 80%, el de $\text{SO}_3 < 0,01\%$ y la pérdida por ignición < 10%. Según estos valores, la puzolana se clasifica como clase N (ASTM C618, 2017; UNE-EN, 2008; Bonavetti et al., 2016; Locati et al., 2020b).

7.3 Evaluación de la efectividad de una AMA para inhibir la reactividad del agregado de la cantera PIG

En base a los resultados obtenidos mediante los ensayos descritos en el Capítulo V, el agregado de la cantera PIG se califica como potencialmente reactivo. Si bien en el ensayo del prisma de hormigón (método convencional), se midió una expansión menor al límite estipulado por la norma (0,08% para agregados de reacción lenta) la tendencia de la curva presenta una marcada pendiente positiva. Además, el estudio del

pavimento de hormigón de la rotonda de acceso a la localidad de Pigüé (Capítulo VI) confirmó su reactividad en servicio.

Para evaluar la efectividad inhibidora de la AMA, se utilizó el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997). Cabe mencionar, que la norma IRAM 1531 (2022), en su Anexo C menciona que para poder utilizar dicho método es necesario que la convergencia de los resultados del método acelerado de la barra de mortero y del prisma de hormigón convencional, para el agregado en estudio, estén dentro de la Zona 1 o 2 de la Figura 7.1. Si bien los resultados obtenidos se ubican en la Zona 1 (la norma dice que esto puede conducir a una solución conservadora), la reactividad de este agregado fue confirmada por su comportamiento en servicio. Además de acuerdo a las experiencias realizadas por otros autores (Batic, 2004 y 2005; Falcone, 2013; Falcone et al., 2022), el agregado de la cantera PIG tiene un comportamiento variable en lo que se refiere a la expansión en el ensayo del prisma de hormigón convencional. Estos resultados también se proyectaron en la Figura 7.1 donde se observa que algunos valores quedan dentro de la Zona 2 y otros de la Zona 1 al igual que el resultado obtenido en este estudio (solución “excesivamente conservadora”) (Figura 7.1). Por lo tanto, se adoptó la metodología de la norma IRAM 1674 (1997), para evaluar la efectividad de la adición BVZ.

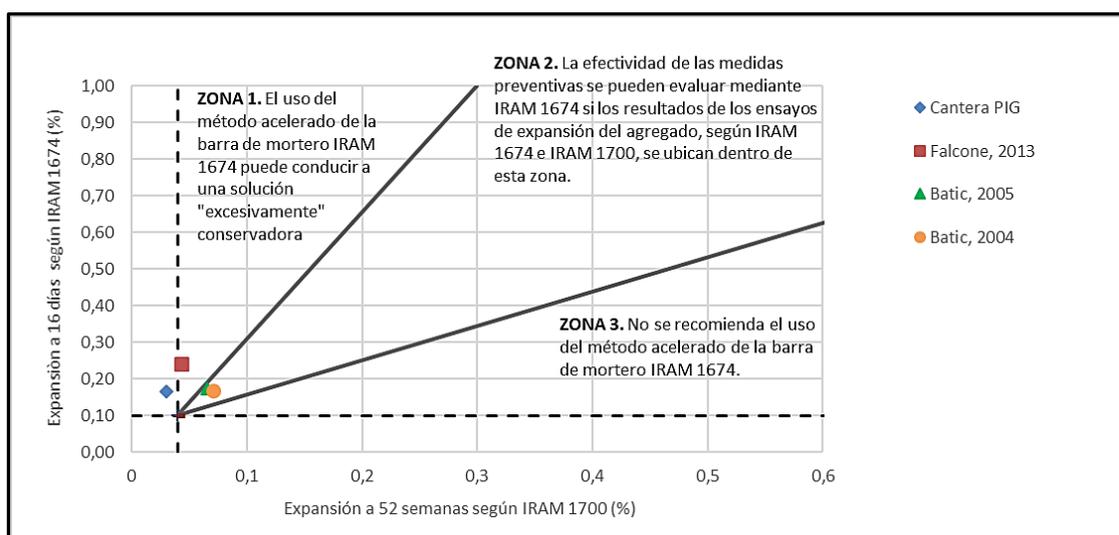


Figura 7.1 Resultados de la relación entre IRAM 1674 vs. IRAM 1700 (ensayo convencional) de los agregados de la cantera PIG, determinados por diferentes autores y mencionados en esta Tesis (tomado de la Figura Anexo C de la norma IRAM 1531, 2022, y del Anexo D de la norma IRAM 1512, 2013) (Adaptado de Milanesi et al., 2021)

Se moldearon barras de mortero con las siguientes mezclas: sin adición (muestra patrón R) y con reemplazos del 10% (Puz10), 20% (Puz20) y 30% (Puz30) en peso de cemento, por la BVZ (con la granulometría mencionada en el punto 4.11 del Capítulo 4).

Para considerar que una AMA es efectiva para inhibir la RAS, la expansión a los 16 días debe ser menor a 0,10%. No obstante, se continuó el ensayo después de esa edad para evaluar la evolución de las curvas de expansión.

En la Figura 7.2 se presentan los resultados de expansión obtenidos en el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997). Allí, se puede observar que con 10% de reemplazo la expansión aún supera el límite de 0,10% a los 16 días (0,150%). Con 20% de adición el valor obtenido está por debajo del límite máximo (0,076% a los 16 días), sin embargo, la curva tiene marcada pendiente positiva, superando el 0,10% a los 22 días (0,104%). Con 30% de reemplazo se observa una clara inhibición de la reacción (0,023% a 16 días). La curva se horizontaliza desde edades tempranas, alcanzándose una expansión de 0,034% a los 25 días.

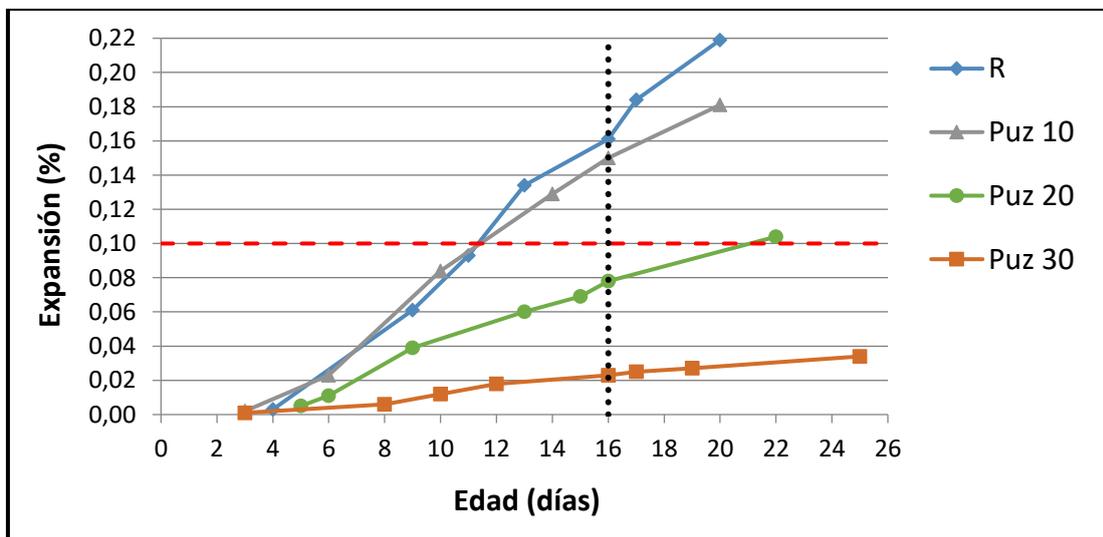


Figura 7.2 Barras de mortero según la norma IRAM 1674 (1997). R: sin adición (muestra patrón); Puz10, Puz20 y Puz30: con 10%, 20% y 30% de reemplazo de cemento por la puzolana BVZ, respectivamente

7.3.1 Petrografía de las barras de mortero post ensayo

Mediante análisis con estereomicroscopio, se pudo observar fisuramiento en la barra de mortero patrón (R) tanto en la superficie como en el interior. Las fisuras son cortas con uniones triples a 120°. Las cavidades de aire accidental se encuentran parcialmente rellenas con productos de neoformación. En la barra Puz20 luego del ensayo a 22 días, se observaron fisuras en superficie con desarrollo del típico patrón en mapa. Las cavidades de aire accidental de mayor tamaño se presentan vacías, mientras que las más pequeñas están colmatadas y/o tapizadas por productos blanquecinos. Por el contrario, en la barra de mortero Puz30 no se observaron fisuras ni productos de neoformación. El mortero se encuentra en buen estado, las cavidades de aire accidental son irregulares y están mayormente vacías. En la Figura 7.3a se presenta el corte transversal al eje mayor de la barra de la muestra sin adición (R, izquierda) y con 30% de puzolana (Puz30, derecha), donde se pueden observar las características de ambos morteros. La Figura 7.3b muestra en detalle una fisura en la muestra patrón que atraviesa el mortero y los agregados, rellena con productos de reacción.

Con microscopio petrográfico sobre secciones delgadas se analizó la microestructura de los morteros R, Puz20 y Puz30. En la barra patrón se observaron microfisuras en la pasta que afectan a las partículas de la cuarcita (Figura 7.3c) y desarrollo de productos de neoformación asociados a la RAS en la interfase con la pasta de cemento (color pardo claro). La microfisura está rellena con un material anisótropo (Figura 7.3d). El mortero presenta localmente escasa carbonatación y desarrollo de microfisuras en unión triple. Se observaron cavidades esféricas (150 μm) colmatadas por material de tamaño de grano muy fino, pardo y de muy baja birrefringencia.

La barra Puz20 presenta escaso microfisuramiento en la pasta, en general con un relleno anisótropo, y afecta en menor medida al agregado. En la muestra Puz30 no se observaron microfisuras ni productos de neoformación. El mortero presenta características similares con diferencias de textura asociada a la presencia de la puzolana. En la Figura 7.3e y 7.3f se muestra la barra de mortero con 30% de reemplazo donde se observan partículas de la BVZ y del agregado con cuarzo microcristalino y tensionado.

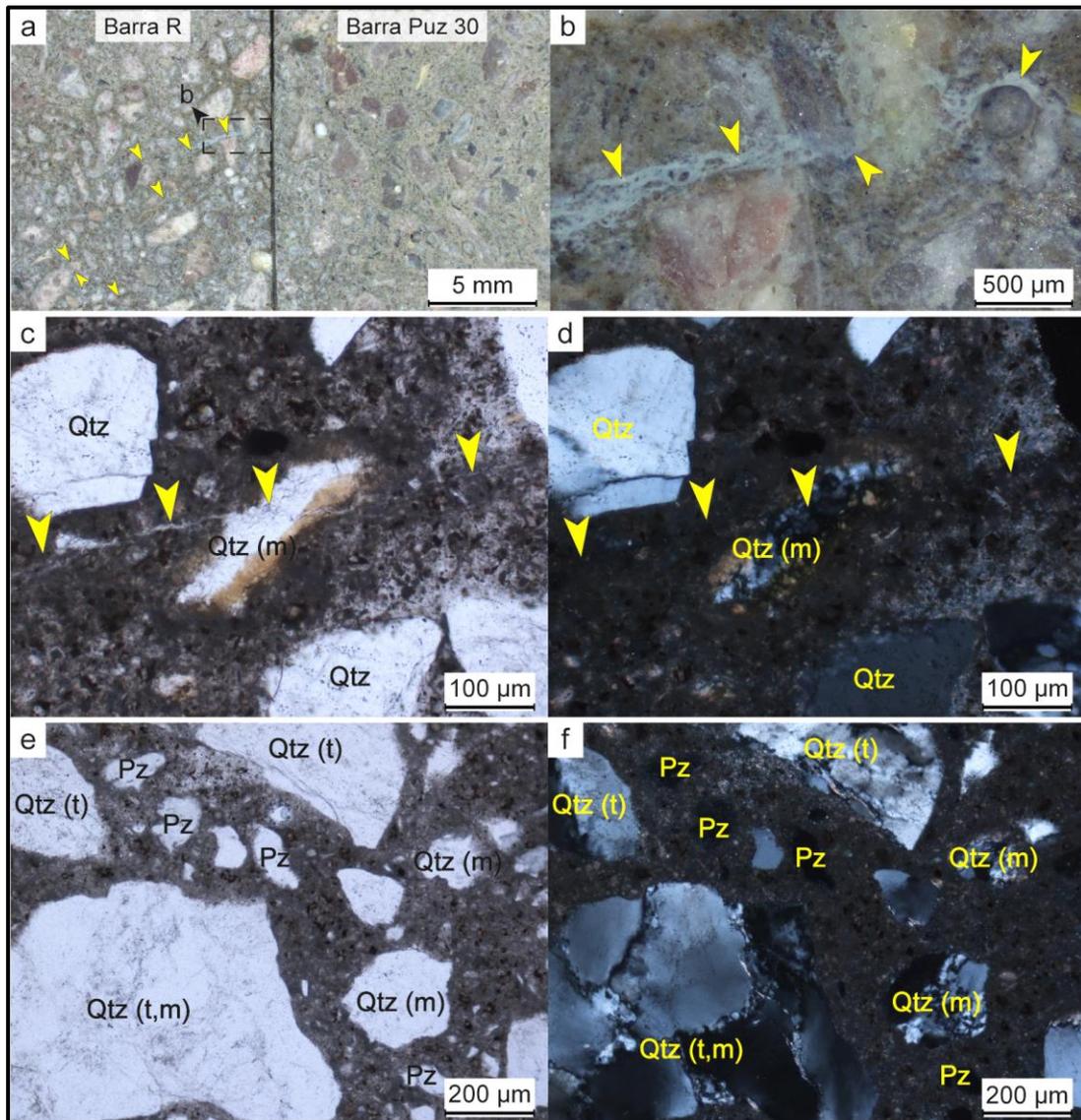


Figura 7.3 a) Barra de mortero de la muestra patrón (R) (las flechas señalan microfisuras) y con 30% de reemplazo de cemento por BVZ (Puz 30), observadas con estereomicroscopio; b) detalle del sector señalado en la Figura 4a; c) y d) fotomicrografías de la muestra R. Microfisura que atraviesa la pasta de cemento y una partícula con cuarzo microcristalino; e) y f) barra de mortero Puz 30. Se observan partículas del vidrio volcánico zeolitizado de la puzolana y cuarcitas con cuarzo tensionado y microcristalino. c) y e) visto con luz paralela; d) y f) visto con nicoles cruzados. Qtz: cuarcita; Qtz(t): cuarcita con cuarzo tensionado; Qtz(m): cuarcita con cuarzo microcristalino; Pz: puzolana

7.4 Evaluación de la efectividad de una AMA para inhibir la reactividad del agregado de la cantera MED

Al igual que con el agregado cuarcítico, se evaluó la efectividad de la puzolana BVZ para inhibir la RAS del agregado fino de la cantera MED. Para ello, se utilizó el método acelerado de la barra de mortero, ya que cumple con lo establecido en el Anexo D de la norma IRAM 1512 (2013). En la Figura 7.4, se puede observar que la convergencia de los resultados del ensayo acelerado de barra de mortero y el prisma de hormigón

convencional permiten evaluar la efectividad de la medida preventiva con el ensayo descrito en la norma IRAM 1674 (1997) (Zona 2).

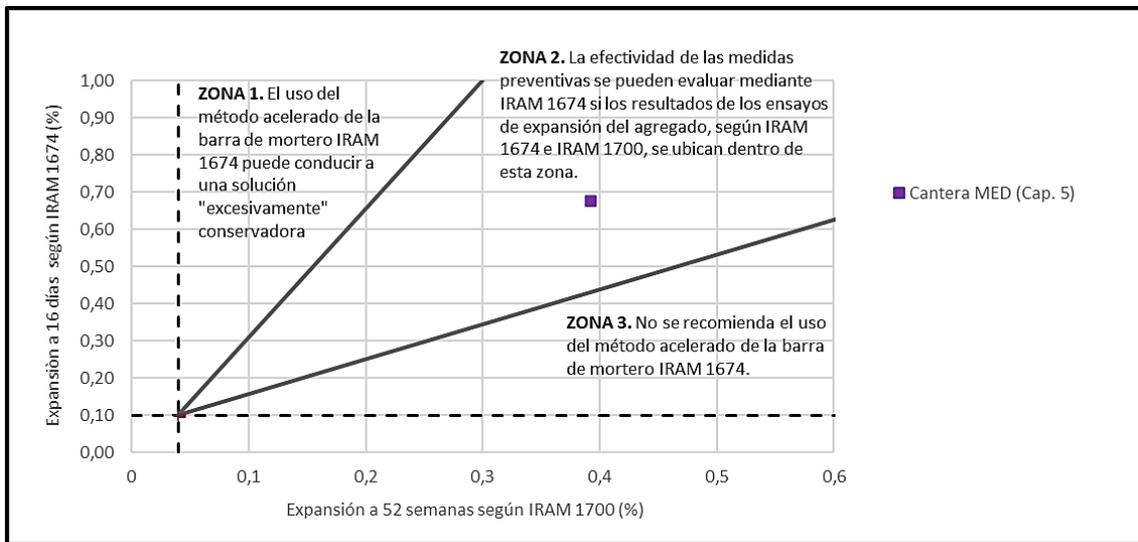


Figura 7.4 Resultados de la relación entre IRAM 1674 vs. IRAM 1700 (ensayo convencional) de los agregados de la cantera MED, realizados en el Capítulo V (tomado de la Figura Anexo C de la norma IRAM 1531, 2022, y Anexo D de la norma IRAM 1512, 2013), adaptado de Milanesi et al. (2021).

La Figura 7.5 muestra las curvas de expansión de las barras de mortero de la arena de la cantera MED con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por la puzolana (BVZ) (10%, 20% y 30%). A los 16 días las expansiones registradas fueron de 0,475%, 0,162% y 0,030%, respectivamente. Si bien se logra inhibir la expansión a los 16 días con el 30% de reemplazo, a los 28 días la expansión supera levemente el 0,1%.

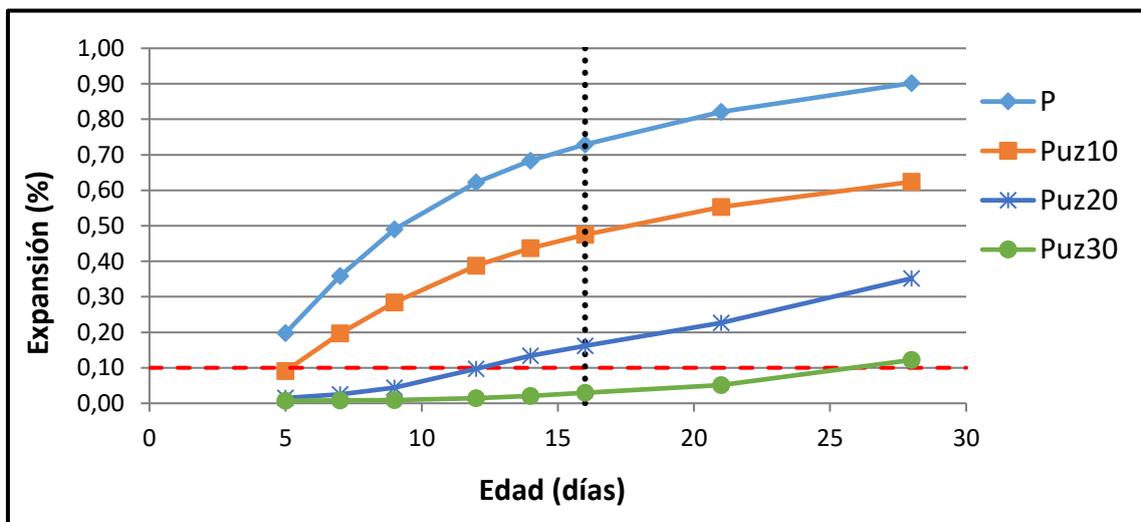


Figura 7.5 Barras de mortero según IRAM 1674 (1997). P: BM sin adición; Puz10, Puz20 y Puz30: con 10%, 20% y 30% de reemplazo de cemento por la puzolana BVZ, respectivamente

7.4.1 Caracterización post ensayo

7.4.1.1 Análisis petrográfico

En la Figura 7.6 se presentan fotomicrografías de las barras de mortero patrón (P) y con 10%, 20% y 30% de reemplazo de cemento por BVZ (Puz10, Puz20 y Puz30). Se observan abundantes microfisuras de hasta $\sim 20 \mu\text{m}$ de espesor asociadas principalmente a los agregados volcánicos. Esas microfisuras afectan las partículas de la arena, la pasta de cemento y la interfase cemento-agregado, o cortan transversalmente los agregados. Están parcialmente rellenas con productos de neoformación (Figura 7.6a-c). La barra de mortero Puz30 no evidencia signos de deterioro (Figura 7.6d). La pasta de cemento no se ve afectada (no se observaron microfisuras).

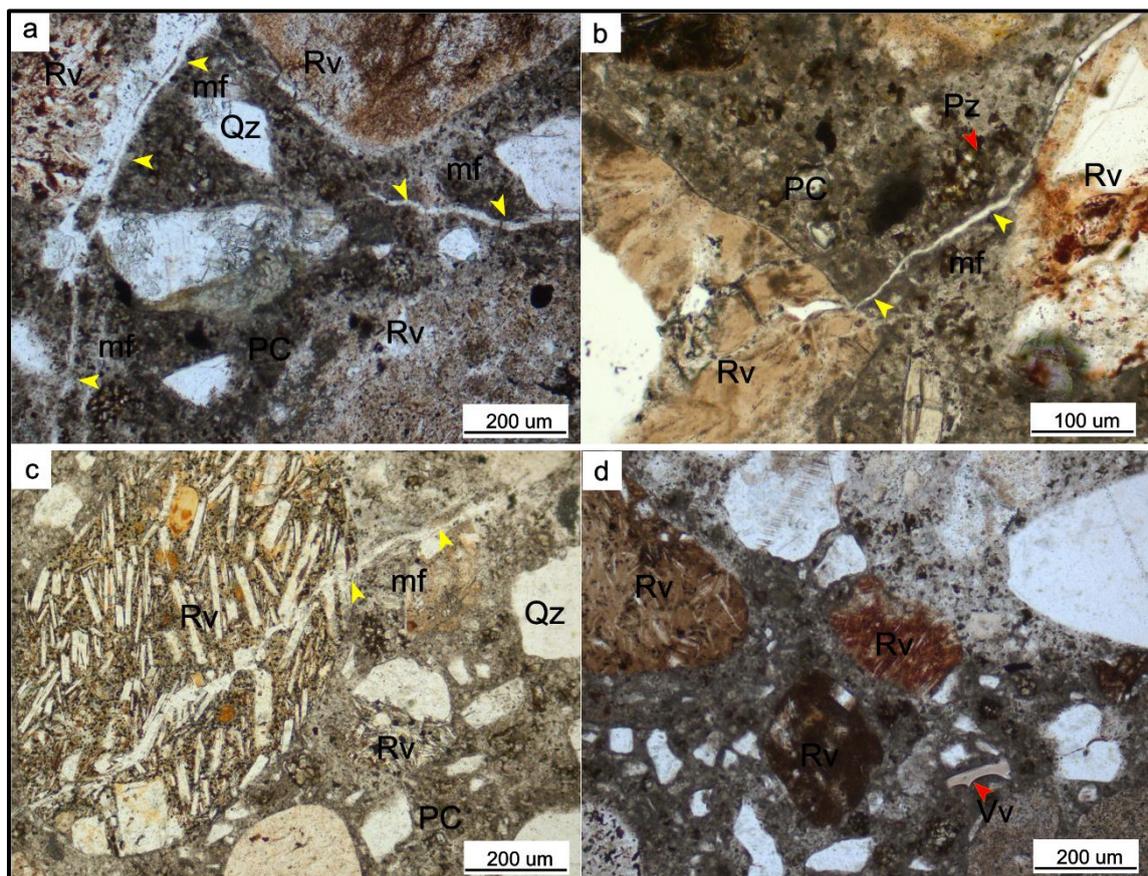


Figura 7.6 Fotomicrografías de secciones delgadas de las barras de mortero con diferente porcentaje de BVZ. a) Barra P. Se observa microfisuras (mf) que atraviesan pasta y agregados de rocas volcánicas; b) Puz10; c) Puz20; d) Puz30. No se observan signos de reacción. Qz: cuarzo; PC: pasta de cemento; Pz: puzolana; Vv: vidrio volcánico; rocas volcánicas (Rv); mf: microfisura

7.4.1.2 Análisis de la reacción puzolánica con MEB-EDS

La Figura 7.7a muestra una partícula de BVZ en la barra de mortero Puz30 y la Figura 7.7b, los perfiles elementales obtenidos mediante EDS cortando transversalmente la partícula de BVZ. Se puede observar un sector central casi sin cambios químicos. Hacia los bordes de la partícula hay una disminución progresiva de Si y Al y un aumento de Ca (procedente de la pasta de cemento). En la pasta de cemento (muy próxima a la puzolana), se observa una ligera disminución de Ca y un aumento de Si y Al. Este cambio transicional en la concentración de los elementos en la interfase ha sido descrito previamente (Bonavetti et al., 2020), revelando interacción química entre la pasta de cemento y la puzolana (reacción puzolánica).

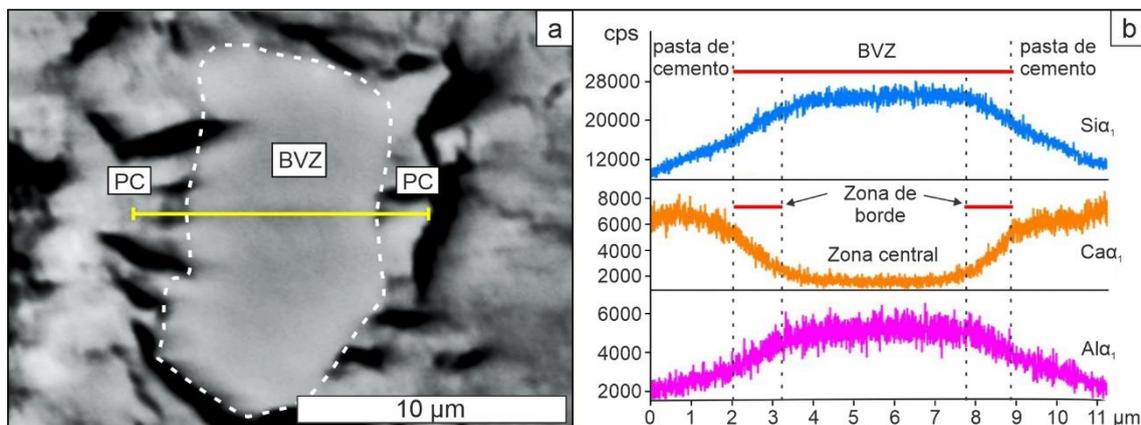


Figura 7.7 Análisis de la reacción de puzolaneidad mediante MEB-EDS. a) imagen de electrones retrodispersados de una partícula de puzolana natural en el mortero Puz30. La línea amarilla indica el sector donde se obtuvieron los perfiles elementales; b) perfiles elementales de Si, Ca y Al obtenidos por EDS del sector indicado en la Figura 7.7a. cps: cuentas por segundo; PC: pasta de cemento; BVZ: brecha vítrea zeolitizada

7.4.2 Verificación de la capacidad inhibidora de la BVZ con el método del prisma de hormigón

Si bien se verifica que con 30% de reemplazo de cemento por la BVZ se logra inhibir la RAS en el ensayo acelerado de la barra de mortero, también se observa que la expansión sigue progresando luego de los 16 días de ensayo, superando el 0,1% de expansión a los 28 días. Teniendo en cuenta este comportamiento y que el agregado es muy utilizado en la región, se verificó la efectividad inhibidora de la BVZ mediante el ensayo del prisma de hormigón, utilizando 30% de reemplazo en peso de cemento por la BVZ, siguiendo las especificaciones del apartado C.1 (IRAM 1512, 2013). Según esta

norma, para verificar la capacidad inhibidora de la puzolana mediante el ensayo del prisma de hormigón convencional (IRAM 1700, 2013), la expansión debe ser igual o menor a 0,040% a la edad de 104 semanas (2 años). De forma adicional, también se evaluó este comportamiento mediante el ensayo acelerado del prisma de hormigón. En las Figuras 7.8 y 7.9 se muestran los resultados de ambos ensayos.

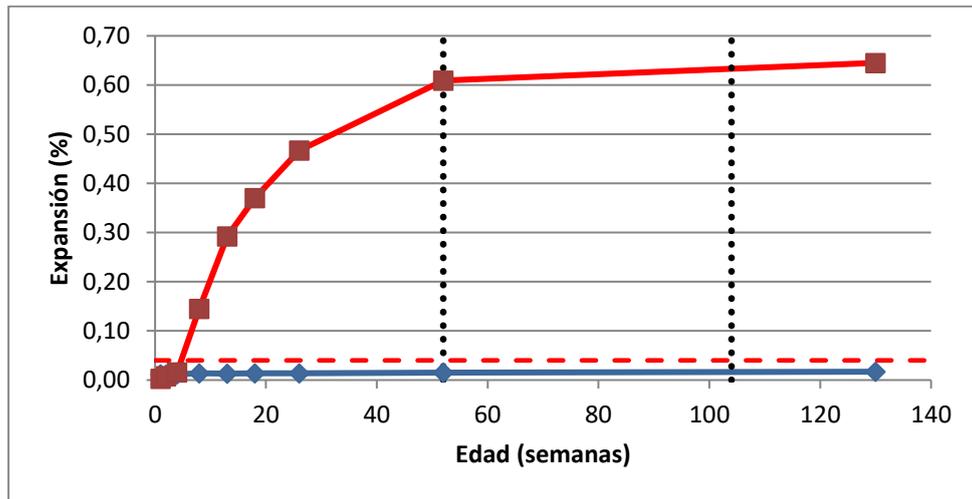


Figura 7.8 Resultados de expansión del agregado de la cantera MED en el ensayo del prisma de hormigón convencional según IRAM 1700 (2013). Línea roja: sin adición de la puzolana. Línea azul: con reemplazo de 30% en peso de cemento por la BVZ. La línea roja entrecortada indica el límite de 0,04% y las líneas negras punteadas las edades de 52 y 104 semanas de ensayo.

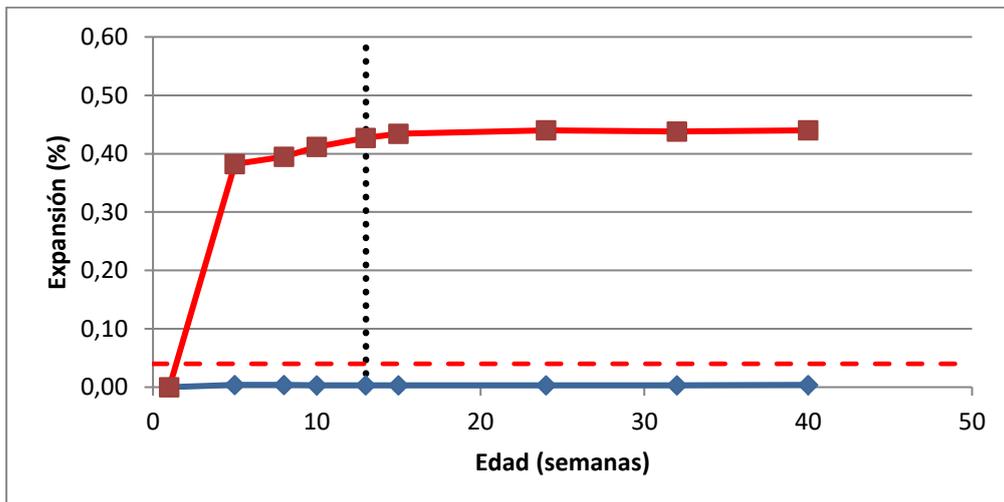


Figura 7.9 Resultados de expansión del agregado de la cantera MED en el ensayo del prisma de hormigón acelerado según IRAM 1700 (2013). Línea roja: sin adición de la puzolana. Línea azul: con reemplazo de 30% en peso de cemento por la BVZ. La línea roja entrecortada indica el límite de 0,04% y la línea negra punteada la edad de 13 semanas de ensayo.

Como se puede observar en los gráficos, la BVZ logra inhibir la reactividad de los agregados de la cantera MED, sin observarse cambios significativos en la evolución de las curvas de expansión de ambos ensayos (prisma de hormigón convencional y acelerado) en los períodos de tiempo estudiados.

7.5 Discusión

El gráfico propuesto en las normas IRAM 1531 e IRAM 1512 para la selección del ensayo a utilizar para evaluar la capacidad inhibidora de la AMA sobre la RAS, pone en evidencia una problemática particular en el caso de los agregados de reacción lenta.

Los resultados de expansión obtenidos en este estudio sobre los agregados de la cantera PIG, así como los valores de otros autores sobre agregados del mismo sector (Batic, 2004 y 2005; Falcone, 2013; Falcone et al., 2022), se ubican muy cerca de la intersección entre las líneas que definen las Zonas 1 y 2. Esto evidencia el comportamiento diferencial de este agregado en los ensayos físicos. Por un lado, la trituración del material que requiere la elaboración de la barra de mortero, aumenta la superficie específica del agregado y puede generar partículas en las que el componente reactivo constituya la mayor parte de su volumen, por ejemplo, el cuarzo microcristalino (Figura 7.3). Esto podría acentuar las diferencias entre este método (IRAM 1674, 1997) y el del prisma de hormigón convencional (IRAM 1700, 2013). Es importante remarcar que en el método del prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700 a 60°C) también se obtuvieron expansiones por encima del límite establecido para los agregados de reacción lenta. Por otro lado, la variabilidad observada entre diferentes autores con el método del prisma de hormigón convencional se puede atribuir a la variabilidad inherente a la litología y al yacimiento. Las cuarcitas de la cantera PIG son rocas derivadas del metamorfismo de antiguas capas de areniscas cuarzosas, que sufrieron procesos de recristalización y han sufrido procesos de deformación asociados al levantamiento de las Sierras Australes. La variabilidad tanto lateral como vertical de la sucesión metasedimentaria y, por otra parte, los procesos (y esfuerzos) actuantes, pueden dar lugar a diferencias composicionales y texturales de la roca dentro de la propia cantera.

Los resultados del ensayo acelerado de la barra de mortero con la BVZ indicaron que el reemplazo de cemento por 20% de la adición propuesta es suficiente para inhibir la reacción a los 16 días de ensayo. Sin embargo, la expansión de las barras continuó de manera muy marcada, superando ligeramente el límite a los 22 días, experimentando microfisuramiento y desarrollo de productos de neoformación. En cambio, con 30% de reemplazo la inhibición de la reacción es muy marcada, con valores de expansión muy bajos a los 16 y aún a los 25 días de ensayo. El mortero en estas barras se observa en buen estado, sin microfisuras ni desarrollo de productos de neoformación asociados con la RAS.

En el caso de los agregados de la cantera MED, a partir de la incorporación del 30% de reemplazo de cemento por puzolana, se logra inhibir la reacción, probablemente por la elevada reactividad que presenta esta muestra. Sin embargo, a los 28 días la curva de expansión empieza a aumentar, sobrepasando el 0,1% a los 28 días. Teniendo en cuenta este comportamiento y que el agregado es muy utilizado en la región, se verificó la efectividad inhibidora de la BVZ mediante el ensayo del prisma de hormigón convencional y acelerado. Los resultados indican que un reemplazo de 30% en peso de cemento por la puzolana, logra inhibir la reactividad del agregado estudiado, confirmando lo observado en el ensayo acelerado de la barra de mortero.

Aunque el método acelerado del prisma de hormigón no está incluido en la norma IRAM 1512 (2013) como procedimiento para verificar el efecto inhibidor de las adiciones de minerales activas, los resultados ayudarán a recopilar datos y definir límites en un futuro próximo.

CAPÍTULO VIII. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

8.1 Consideraciones Finales

8.1.1 Agregados estudiados

A partir de los resultados obtenidos respecto a la reactividad alcalina potencial de las principales canteras proveedoras de agregados en la zona de Bahía Blanca, se realizan las siguientes consideraciones:

8.1.1.1 Agregados gruesos

La cuarcita de la cantera PIG contiene como componentes potencialmente reactivos cuarzo microcristalino y cuarzo fuertemente tensionado (AEO promedio 20°). La expansión medida en el ensayo acelerado de la barra de mortero y el método acelerado del prisma de hormigón, supera el máximo establecido en la norma IRAM 1531 (0,172% y 0,086% respectivamente). Sin embargo, en el ensayo del prisma de hormigón convencional se encuentra por debajo del valor límite establecido (0,029%). La clase de reactividad asignada para este agregado es R1 (moderadamente reactivo).

La roca granítica de la cantera PIR, contiene escaso cuarzo microcristalino (< 3%) como componente potencialmente reactivo. También se identificó cuarzo con extinción ondulante (AEO promedio es 13°), aunque no se lo considera fuertemente tensionado. Los valores de expansión medidos en los ensayos físicos indicados en la norma IRAM 1531 (2022) arrojaron valores por debajo de los límites establecidos (0,082% en el ensayo acelerado de la barra de mortero, 0,060% en el prisma de hormigón acelerado y 0,015% en el prisma de hormigón convencional). La clase de reactividad asignada para este agregado es R0 (inocuo).

El agregado grueso de la Cantera VIL (Cr) presenta componentes potencialmente reactivos de reacción rápida. Si bien no se observó vidrio volcánico fresco, sus productos de desvitrificación contienen variedades de sílice cripto a microcristalina (calcedonia, tridimita, cristobalita) y, en menor proporción, cuarzo microcristalino. La expansión medida en el ensayo acelerado de la barra de mortero es 0,283%. El prisma de hormigón convencional y acelerado, arrojaron valores de expansión de 0,049% y

0,051% a las 52 y 13 semanas, respectivamente, confirmando la reactividad del agregado. La clase de reactividad para este agregado es R1 (moderadamente reactivo).

Si bien en este estudio no se identificó canto rodado como agregado grueso en ninguna de las estructuras evaluadas, Priano et al. (2012) estudiaron un viaducto de hormigón armado (realizado en el año 1986) en el puerto de Ingeniero White, con claras evidencias de la RAS en el que se utilizó el canto rodado de la cantera VIL (CR), lo que confirma la reactividad de este material en estructuras en servicio.

8.1.1.2 Agregados finos

De los criterios adoptados por la norma IRAM 1512 (2013) se concluye que todos los agregados finos abordados en este estudio son potencialmente reactivos a partir de los resultados obtenidos en el examen petrográfico y en el ensayo acelerado de la barra de mortero. No obstante, solo la arena de la cantera MED supera los límites establecidos para los ensayos del prisma de hormigón (convencional y acelerado), y en el caso de la cantera VIL solo arrojó valores elevados en el ensayo acelerado (0,08% a las 13 semanas). El resto de las canteras se califican como no reactivas según este método.

Los componentes reactivos identificados corresponden a agregados de “reacción rápida”: trizas de vidrio volcánico y calcedonia como partículas individuales, sílice criptocristalina y amorfa en el cemento de las areniscas, y vidrio volcánico en las pastas de las vulcanitas riolíticas.

La arena de la cantera MED tiene un contenido de vidrio volcánico muy superior al resto de las muestras de agregado fino (tanto en trizas como en las pastas de las vulcanitas) que se refleja en los resultados de todos los ensayos físicos realizados. Por su parte, los agregados de la cantera VIL Ar se califican como reactivos por el método del prisma acelerado, aunque el porcentaje de componentes reactivos no difiere mucho de otras canteras calificadas como no reactivas.

Los resultados obtenidos ponen en evidencia que es necesario modificar la norma IRAM 1512 (2013) ya que, como quedó demostrado en este trabajo, desde el punto de vista petrográfico ninguno de los agregados estudiados podría utilizarse en hormigón. Sin embargo, de acuerdo al criterio del método del prisma de hormigón (considerado como el más confiable) **solo las arenas de las canteras MED y VIL (esta última solo en el ensayo del prisma acelerado) son calificadas como reactivas.**

Esta norma actualmente se encuentra en revisión y debería estar en concordancia con la norma IRAM 1531 (2022) (agregado grueso para hormigón) que determina la potencial reactividad de los agregados considerando los ensayos físicos, siendo la petrografía el primer paso para decidir qué ensayos realizar teniendo en cuenta los componentes reactivos presentes.

8.1.2 Casos de estudio

Se realizaron estudios sobre aquellos pavimentos de hormigón ubicados en la zona de estudio de esta Tesis, en los que luego de un análisis macroscópico visual in situ, se detectaron evidencias de deterioro vinculadas a la RAS (fisuración tipo mapa, fisuras con rellenos blanquecinos con aspecto de gel, desprendimientos superficiales generalizados, levantamiento de placas, etc.).

Como es sabido, por una cuestión de costos (principalmente de flete), para la elaboración del hormigón, se suelen utilizar agregados de canteras próximas a la ejecución de las estructuras. En este trabajo se confirmó que los pavimentos estudiados afectados por la RAS fueron realizados con los agregados estudiados y calificados como potencialmente reactivos a partir de los ensayos normalizados.

8.1.2.1 Rotonda de acceso a Pigüé

Tanto el hormigón del pavimento original (realizado en el año 1994) como el de la última reparación (en el año 2009) presentan evidencias de la RAS.

El agregado grueso en ambos hormigones es una piedra partida cuarcítica (cantera PIG) con cristales bien definidos de cuarzo y, abundante cuarzo microcristalino (~6%) y

cuarzo con extinción ondulante (AEO promedio 23°). El agregado fino es una arena natural constituida en forma predominante por cuarzo, feldespatos y valvas carbonáticas, con menor proporción de rocas graníticas y volcánicas.

En ambos hormigones (aunque en mayor proporción en el original) se identificaron productos de reacción, amorfos o de hábito fibroso, que corresponden a aluminosilicatos de calcio, potasio y sodio, probablemente hidratados característicos de la RAS y ettringita secundaria.

Los resultados del DRI indican un deterioro moderado de ambos hormigones a nivel microestructural, concentrándose la fisuración en la zona de interfase entre el agregado (grueso y fino) y la pasta de cemento, y en la pasta de cemento. La fisuración dentro de los agregados con productos de reacción es reducida. Según los datos de incremento de tránsito, así como la baja capacidad soporte del suelo de la base, habrían iniciado el deterioro y la fisuración de la estructura. El deterioro por RAS aparecería entonces con posterioridad, facilitado por el ingreso de humedad en el hormigón, con procesos de reacción principalmente en las zonas de interfase de los agregados reactivos, y disolución del agregado grueso en sectores localizados. El cuadro de fisuración habría favorecido el ingreso de CO₂ y la consecuente carbonatación parcial de la pasta de cemento, así como la movilización de sulfatos para el desarrollo de ettringita secundaria en poros y fisuras.

Este estudio constituye la primera referencia de una estructura de hormigón con evidencias de la RAS vinculada con las cuarcitas del sur de la provincia de Buenos Aires.

8.1.2.2 Autovía Juan Pablo II

El pavimento, construido entre los años 2011 y 2012, presenta grietas longitudinales y fisuras “tipo mapa” en la totalidad de la superficie, mostrando claros signos de deterioro debido a la RAS.

El hormigón presenta elevada resistencia a la compresión, aunque el módulo de elasticidad, así como los diferentes parámetros obtenidos en el ensayo SDT y la

evaluación microestructural mediante la determinación del DRI, muestran un claro proceso de deterioro interno. En general, a mayor valor de DRI (mayor daño microestructural) se observa un deterioro en los índices obtenidos mediante el SDT, de forma coincidente con lo informado en la bibliografía (Sánchez et al. 2017). Además, la resistencia a la compresión recién comienza a decrecer cuando se alcanzan altos niveles de expansión en el hormigón como han registrado otros autores (Sanchez et al., 2016 y bibliografía allí citada).

Existe un evidente microfisuramiento que se localiza en el mortero y se vincula con la reactividad del agregado fino, el cual presenta en su composición vidrio volcánico en forma de trizas o como parte de la pasta en rocas volcánicas (cantera MED). Las microfisuras asociadas con estas partículas generalmente están rellenas con productos de reacción.

Los estudios por MEB-EDS confirmaron la presencia de silicatos masivos, ricos en calcio (con menor proporción de Na, K y Al) en la pasta de cemento y en la zona de interfase con los agregados finos. La composición resulta típica de los productos de la RAS que han interactuado con la pasta de cemento (Leemann et al. 2016). Además, el proceso de deterioro (desarrollo de microfisuras) habría permitido la movilización de sulfatos internos (procedentes de la hidratación del cemento) y el ingreso de CO₂, con cristalización de ettringita secundaria y la carbonatación de la pasta de cemento.

8.1.2.3 Playón de un estacionamiento en Bahía Blanca

El pavimento fue construido entre 2005 y 2006 y presenta rasgos superficiales indicativos de RAS (fisuras, con y sin material de relleno, en forma de mapa y ocasionales desprendimientos).

Los ensayos físicos arrojaron valores esperables para estructuras fisuradas (alta porosidad), y la evolución resistente del hormigón es baja, a pesar de su edad y del tipo de estructura. Esto se encuentra en consonancia con el elevado daño a nivel microestructural registrado mediante el DRI. La afectación principal es del mortero, lo

que se explica por la elevada reactividad del agregado fino utilizado, con una alta proporción de rocas volcánicas con mesostasis con vidrio volcánico.

Sin embargo, no se descarta la participación de los agregados gruesos en el desarrollo de la patología (piedra partida granítica), al reconocerse microfisuras internas rellenas de productos de reacción.

Los estudios texturales-composicionales permiten establecer que, con posterioridad al desarrollo de la RAS o de forma simultánea y favorecido por el cuadro de fisuración interna, se produjeron procesos de carbonatación de la pasta de cemento y de los productos asociados a la RAS, así como de lixiviación de álcalis. Este último proceso podría estar vinculado con el ingreso de agua en la estructura a través de la porosidad secundaria generada por las fisuras, desencadenando también la movilización de sulfatos y la precipitación de ettringita secundaria en cavidades.

8.1.2.4 Rotonda de acceso a Bahía Blanca

El pavimento original tiene 30 años y su reparación 13 años aproximadamente. Actualmente, tanto el hormigón original como el de reparación, presentan un avanzado estado de deterioro (fisuración tipo mapa, fragmentaciones superficiales y desprendimientos de fragmentos, etc.).

El agregado grueso de ambos hormigones es una roca granítica, muy rica en feldespato potásico, con plagioclasa y cuarzo subordinados (cantera PIR). El agregado fino es una arena natural polimíctica con abundante cantidad de rocas volcánicas. El mortero se presenta parcialmente carbonatado, especialmente en las zonas fisuradas y en la interfase agregado-mortero. Las escasas cavidades de aire accidental están, en su mayoría, colmatadas por productos de neoformación masivos y ettringita.

Los procesos de reacción se asocian principalmente con los materiales potencialmente reactivos del agregado fino (rocas volcánicas con pastas vítreas y vidrio volcánico). El fisuramiento del hormigón original se desarrolló en varias etapas. Las primeras microfisuras están selladas, aunque algunas de ellas han sido reactivadas. Afectan

principalmente al mortero, pero tienen estrecha relación con la desvitrificación de las pastas de las rocas volcánicas y perturbaciones de las superficies externas de los componentes litológicos lábiles. Tanto en el mortero como en el interior de las cavidades de aire accidental, se identificaron productos de reacción que, por sus características morfológicas y quimismo, pueden asociarse a la RAS.

8.1.2.5 Rotonda de acceso a Médanos

Esta estructura (construida en el año 2015), a los 4 años de habilitada al tránsito, ya presentaba un avanzado estado de deterioro, evidenciado por el fisuramiento en forma de mapa, levantamiento de losas y desarrollo de productos de neoformación.

El agregado grueso está constituido principalmente por piedra partida granítica (cantera PIR). El agregado fino es una arena natural polimíctica, con una elevada proporción de rocas volcánicas (cantera MED).

Se observa una fuerte fisuración del mortero, vinculado con la reactividad del agregado fino. Se identificaron productos asociados a la RAS que evolucionan químicamente, desde productos laminares ricos en Ca, Na y K en el interior de los agregados, a masivos y ricos en Ca hacia la pasta de cemento. Esto es coincidente con lo observado por otros autores. Sin embargo, se observa dispersión en los resultados, en especial de los productos masivos y/o microcristalinos que rellenan microfisuras en la pasta de cemento y cavidades de aire accidental, lo que podría deberse a procesos de carbonatación y/o lixiviación de álcalis de los productos de reacción (Katayama, 2008). La elevada fisuración del pavimento habría favorecido el ingreso de CO₂ produciendo la carbonatación parcial de la pasta de cemento y de los productos de reacción, así como el ingreso de agua meteórica, posibilitando la movilización de sulfatos, la generación de ettringita secundaria y la lixiviación de álcalis, cambiando la composición original de los productos de la RAS.

8.1.2.6 Pavimento de acceso al puerto de Ing. White

La estructura corresponde a un camino de acceso a un sector de descarga de materiales y fue ejecutada en el año 2009, como reemplazo de una estructura de adoquines.

El agregado grueso es una roca granítica (Cantera PIR), mientras que el agregado fino es una arena natural polimíctica con elevados contenidos de rocas volcánicas con pastas vítreas y vidrio volcánico en forma de trizas (Cantera MED).

Superficialmente, el pavimento presenta indicios de la RAS (fisuramiento tipo mapa generalizado en alrededor de 10 años de construido). Además, se registraron bajos valores de densidad ($2,26 \text{ g/cm}^3$) y de resistencia a la compresión.

La baja calidad del hormigón podría ser la causa del fisuramiento observado, en función de las cargas elevadas que deben soportar estos pavimentos de acceso al puerto (aunque no se descartan otras causas como la fisuración por contracción). A nivel microscópico el deterioro es bajo y no se identificaron productos de reacción. Por lo tanto, y considerando la presencia de agregados finos potencialmente reactivos, es probable que algunas de las otras dos variables necesarias para el desarrollo de la RAS no estuvieran presentes (humedad relativa elevada y contenido alcalino elevado).

8.1.2.7 Autovía de acceso a la ciudad de Bahía Blanca

El pavimento estudiado corresponde a un sector de reparación efectuado en 2009. Presenta deterioro significativo a nivel general en toda su superficie. Se puede observar que las fisuras desarrollan un patrón tipo “mapa”, distintivo de estructuras afectadas por la RAS. Se determinaron bajos valores de densidad y de resistencia a compresión que podrían deberse al grado de fisuración interna, aunque no se cuenta con información sobre las resistencias de diseño. Sin embargo, los valores de resistencia son inferiores a los requeridos en pliegos de referencia (CIRSOC 201, 2005; PETG VN; 2017) para pavimentos de hormigón.

A nivel microscópico se identificaron productos de reacción asociados a la RAS y vinculados principalmente con los agregados finos ricos en rocas volcánicas con elevado contenido de vidrio, mientras que no se observaron evidencias de reacción vinculadas al agregado grueso granítico (Cantera PIR). En función de estas observaciones se puede concluir que la baja calidad del hormigón sumado posiblemente a problemas de carga, habrían facilitado el desarrollo de la RAS por ingreso de humedad a la estructura (asumiendo un elevado contenido alcalino del hormigón).

8.1.3 Medidas de mitigación para los agregados reactivos estudiados

8.1.3.1 Agregado grueso

En este estudio se propuso el uso de una AMA (BVZ) como medida preventiva para inhibir la reactividad de las cuarcitas de la cantera PIR cuando son utilizadas como agregados gruesos en hormigón.

La verificación de la eficiencia de la AMA para inhibir la RAS se realizó mediante el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997). Esta determinación se basó en los siguientes puntos. Por un lado, los agregados de reacción lenta suelen mostrar bajas expansiones en los ensayos físicos, por lo que al proyectar los resultados en el gráfico de la Figura 7.1 (Capítulo VII) los valores caen muy cerca del vértice definido por las dos rectas propuestas. Además, el agregado de la cantera PIG tiene un comportamiento variable en lo que se refiere a la expansión en el ensayo del prisma de hormigón convencional (Batic, 2004 y 2005; Falcone, 2013; Falcone et al., 2022). Por lo tanto, siendo la Zona 2 del gráfico (zona que me permite utilizar el ensayo acelerado de la barra de mortero para evaluar la capacidad inhibidora de una AMA) muy restringida, difícilmente estos agregados se ubiquen dentro, incluyendo aquellos que han evidenciado RAS en estructuras en servicio (como en este caso). Es por ello que la aplicación del criterio propuesto en la norma IRAM 1531 (2022) para el uso de la barra de mortero como alternativa en la evaluación de la efectividad de la AMA genera en el caso de los agregados de reacción lenta, algunas dudas.

A pesar de ello, se cuenta con evidencias que sustentan el comportamiento reactivo del agregado (expansiones por encima del límite en ensayos del prisma de hormigón convencional y acelerado, y evidencia de RAS en estructuras en servicio).

Si bien se determinó que un reemplazo de cemento Pórtland por 30% de la AMA (BVZ), resulta efectivo para inhibir la RAS, teniendo en cuenta las consideraciones antes vertidas, estos resultados deben considerarse orientativos.

8.1.3.2 Agregado fino

También se propuso en este estudio para las arenas polimícticas provenientes de la cantera MED, el uso de una AMA (BVZ) como medida preventiva para inhibir su reactividad cuando son utilizadas como agregados finos en hormigón.

De la misma manera que el agregado cuarcítico, se evaluó la inhibición de la RAS a partir de la utilización del método acelerado de la barra de mortero ya que cumple con lo establecido en el Anexo D de la norma IRAM 1512 (2013).

Se ensayaron los agregados de dicha cantera con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por la puzolana natural (10%, 20% y 30%). Se concluyó que la reacción es inhibida utilizando el 30% de reemplazo del cemento por dicha AMA, con claras evidencias de reacción de las partículas de puzolana a partir de determinaciones con MEB-EDS. Sin embargo, a los 28 días de ensayo la expansión supera levemente el límite de 0,1% estipulado por norma. Teniendo en cuenta este comportamiento y que el agregado es muy utilizado en la región, se verificó la efectividad inhibidora de la BVZ mediante el ensayo del prisma de hormigón convencional y acelerado, utilizando de igual forma, un porcentaje de reemplazo de cemento por 30% de la BVZ.

La BVZ logró inhibir la reactividad de los agregados de la cantera MED en ambos ensayos. Es importante aclarar que si bien el método acelerado del prisma de hormigón no está incluido en la norma IRAM 1512 (2013) como procedimiento para verificar el efecto inhibidor de las adiciones de minerales activas, los resultados ayudarán a recopilar datos y definir límites en un futuro próximo.

En base a estos resultados, se abren nuevas líneas de investigación en búsqueda de otras fuentes de puzolanas naturales que sean efectivas en inhibir la reactividad de los agregados del sector.

8.2 Conclusiones

- Los agregados cuarcíticos de la cantera PIG se califican como reactivos, clase de reactividad R1 (moderadamente reactivo). Su reactividad fue corroborada a partir del caso de estudio de la Rotonda de Acceso a Pigüé.
- Los agregados graníticos de la cantera PIR se califican como inocuos, clase de reactividad R0. No hay antecedentes de estructuras en servicio, con evidencias del desarrollo de la RAS por el uso de este agregado.
- El canto rodado de la cantera VIL (CR) se califica como moderadamente reactivo, clase de reactividad R1. Se conocen antecedentes de estructuras con evidencias de la RAS por el uso de este agregado.
- Las arenas de la cantera MED se califican como potencialmente reactivas desde el punto de vista petrográfico, así como en los ensayos físicos normalizados. Si bien la norma IRAM 1512 no contempla una clase de reactividad en particular, considerando los resultados de expansión obtenidos en los ensayos físicos, se podría calificar como altamente reactiva. La reactividad de este agregado fue corroborada en los pavimentos de la autovía Juan Pablo II, el playón de estacionamiento en Bahía Blanca, la rotonda de acceso a Bahía Blanca y la rotonda de acceso a Médanos.
- Las arenas de la cantera VIL (Ar) son consideradas reactivas desde el punto de vista petrográfico (más de un componente reactivo), y por la expansión medida en los ensayos acelerados de la barra de mortero (IRAM 1674) y prisma de hormigón (IRAM 1700). En cambio, en el ensayo convencional del prisma de hormigón, la expansión fue muy baja (0,021%). Como este último tiene prelación sobre el resto, las arenas de esta cantera se deben calificar como no reactivas. Sin embargo, se recomienda prestar

atención sobre este material, mediante la búsqueda de estructuras en las que se haya utilizado este agregado para confirmar o discernir sobre su real reactividad, en especial considerando que su composición es similar a la del agregado grueso (mismo origen, separado solo por granulometría).

- Las arenas de las canteras RCO, CLA y ORE a pesar de calificarse como potencialmente reactivas desde el punto de vista petrográfico (más de un componente reactivo) y mediante el método acelerado de la barra de mortero, no evidenciaron expansión en el ensayo del prisma de hormigón (acelerado o convencional), por lo que deben calificarse como no reactivas. Se considera que la elevada expansión en el ensayo acelerado de la barra de mortero corresponde a un falso positivo, ya que los componentes potencialmente reactivos son de reacción rápida.
- El reemplazo de 30% en peso de cemento Pórtland por una AMA (BVZ) resultó efectivo para inhibir la expansión de los agregados de las canteras PIG y MED.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. Standard practice for determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing - Provisional Standards. (30th edition). Washington (USA): 20 p. **2010**

ACI 221. State of the art report on alkali-aggregate reactivity. ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, (USA): 19 p. **2008**

Ahmadi B y Shekarchi M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites (32): 132-141. **2010**

Alaejos P y Lanza V. Influence of equivalent reactive quartz content on expansion due to alkali silica reaction. Cement and Concrete Research (42): 99-104. **2012**

Andrade C. Evaluation of the degree of carbonation of concretes in three environments. Construction and Building Materials: 230, 116804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116804>. **2020**

Andreis R, Amos J, Archangelsky S y González C. Cuenca del Sauce Grande. En Archangelsky S. El Sistema Carbonífero de la República Argentina. Academia de Ciencias de Córdoba. (Córdoba): 213-223. **1987**

Arrieta Martínez G. Experimental studies of the behavior of "pessimum" aggregates in different test procedures used to evaluate the alkali reactivity of aggregates in concrete. Phd. Thesis. University of Texas. Austin (USA): 116 p. **2012**

ASTM C 125. Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. American Society for Testing and Materials (ASTM): 9 p. **2011**

ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American Society for Testing and Materials (ASTM): 23 p. **2017**

ASTM C 642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. American Society for Testing and Materials (ASTM): 3 p. **2021**

Ballidiano Justiniano C, Stipp Basei M, Sato A, Gonzalez P, Benítez M y Lanfranchini M. The neoproterozoic basement of the Sauce Chico Inlier (Ventania System): geochemistry and U-Pb geochronology of igneous rocks with African lineage in central-eastern Argentina. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Journal of South American Earth Sciences (98): 1 - 25. **2020**

Batic O, Sota J y Serrani H. Estudio de las posibles causas de deterioro del hormigón de la pista de aterrizaje y zona de servicio del aeropuerto de Camba Punta, Corrientes. 6^a Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH). Bahía Blanca (Argentina): 249-270. **1984**

Batic O, Mangin N, Marfil S, Maiza P y Sota J. Utilización de agregados blancos en la elaboración de hormigón arquitectónico. VIII Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Medio Ambiente. V Reunión sobre Preparación y Uso de Mapas Temáticos (SINERGIA 2004). ASAGAI. Córdoba (Argentina): 10 pp. **2004**

Batic O, Sota J y Falcone D. RAS: Contribución para identificar agregados reactivos, en particular los de reacción lenta. Revista Ciencia y Tecnología (12): 13-24. **2005**

Batic O y Falcone D. RAS. Antecedentes para normalizar un método acelerado de prismas de hormigón a 60° C. VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. Córdoba (Argentina): 10 p. **2010**

Berezosky J, Falcone D, Locati F, Madsen L y Marfil S. Evaluación de la potencial reactividad de arenas utilizadas como agregado fino en la zona de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. VII Congreso Internacional y XXI Reunión Técnica AATH. Salta (Argentina): 4-7. **2016a**

Berezosky J, Falcone D, Lescano L, Madsen L, Marfil S y Maiza P. Comportamiento frente a la RAS de los materiales utilizados como agregado grueso en la zona de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. VII Congreso Internacional y XXI Reunión Técnica AATH. Salta (Argentina): 373-380. **2016b**

Berezosky J, Priano C, Bournod C, Locati F y Marfil S. Evaluación del pavimento de hormigón de la rotonda de acceso a la ciudad de Pigüé, Buenos Aires, Argentina. Revista Hormigón (62): 5-16. **2022**

Bértola G y Cortizo L. Transporte de arena en médanos litorales activos y colgados del sudeste de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina 60 (1): 174-184. **2005**

Bérubé M, Duchesne, J y Rivest M. Alkali contribution by aggregates to concrete. Ed: Shayan A. 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. CSIRO Division of Building Construction and Engineering. Melbourne (Australia): 899-906. **1996.**

Bérubé MA, Duchesne J, Dorion J y Rivest M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. Cement Concrete Research 32 (8): 1215 - 1227. **2002**

Bonavetti V, Rahhal V, Locati F, Irassar F, Marfil S y Maiza P. Utilización de zeolitas naturales como puzolanas. 21º Reunión Técnica y VII Congreso Internacional de la AATH. Salta (Argentina): 481-487. **2016**

Bonavetti V, Rahhal V, Locati F, Irassar E, Marfil S y Maiza P. Pozzolanic activity of argentine vitreous breccia containing mordenite. Materiales de Construcción. Ed.: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (70): 15 p. **2020**

Bonowitz R. Rocas y Minerales: Guías de la Naturaleza. Ed.: OMEGA (USA): 352 p. **2013**

Borchers I y Müller C. Seven years of field site tests to assess reliability of different laboratory test methods for evaluating the alkali-reactivity potential of aggregates. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Eds.: Drimalas T, Ideker J y Fournier B. Austin (USA): 10 p. **2012**

Bournod C, Berezosky J, Falcone D, Marfil S, Madsen L, Locati F, Zega C y Maiza P. Reactividad alcalina potencial de cantos rodados provenientes del sur de la provincia de Buenos Aires. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente (ASAGAI) (51): 11 p. **2024**

Bouso Aragonés J. Los áridos y los minerales industriales. Revista VIAL. Edición 102. **2015**

Buggisch W. Stratigraphy and very low grade metamorphism of the Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires (Argentina) and implications in Gondwana correlation. Zentralblatt fur Geologie und Palaontologie I: 819-837. **1987**

Caballé M, Ganuza D, Coriale N, Bravo Almonacid M. Recursos areneros en el delta del Paraná y litoral Atlántico. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires (Argentina): 435-440. **2005**

Cabrera A, Ortega N y Traversa L. Una fuente alternativa de agregados finos para el hormigón. Ciencia y Tecnología N° 10. Congreso de Ingeniería Sustentable y Ecología Urbana. Buenos Aires (Argentina): 17-38. **2010**

Calo D. Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón. Instituto del Cemento Portland Argentino. Eds.: Calo D, Souza E y Marcolini E. CABA (Argentina): 344 p. **2014**

CAMARCO. Indicadores de actividad. Producción y consumo (largo plazo). Serie anual de indicadores de producción y consumo de distintos insumos utilizados por la industria de la construcción (septiembre de 2023). Cámara Argentina de la Construcción. **2023**

CeNAM-17. Censo Nacional a la Actividad Minera. Resultados estadísticos 2016. Ed.: Todesca J. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). Buenos Aires (Argentina): 197 p. **2018**

Choquette M, Bérubé M y Locat J. Behavior of common rock-forming minerals in a strongly basic NaOH solution. The Canadian Mineralogist (29): 163-173. **1991**

Cingolani C y Varela R. Investigaciones geológicas y geocronológicas en el extremo sur de la isla Gran Malvina, sector de Cabo Belgrano (Cabo Meredith), Islas Malvinas. VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca (Argentina) (3): 457-473. **1976**

Crouch R. Specification for the determination of stiffness damage parameters from the low cyclic uniaxial compression of plain concrete cores. Revision A, Mott, Hay & Anderson, Special Services Division, Internal Technical Note. **1987**

CSA A23.2-14A. Potential expansivity of aggregates. Procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms. Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23.2-14). Mississauga, Ontario (Canadá): 439-451. **2014**

CSA A23.2-25A. Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23.2-14). Mississauga, Ontario (Canadá): 425-433. **2014**

CSA A23.2-15A. Petrographic examination of aggregates. Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23.2-14). Mississauga, Ontario (Canadá): 363-393. **2019**

Cyr M y Pouhet R. Resistance to alkali–aggregate reaction (AAR) of alkali activated cement–based binders. Handbook of Alkali–Activated Cements Mortars and Concretes. Universidad de Toulouse (Francia): 397 - 422. **2015**

De Francesco F. Sedimentología y geomorfología del Cenozoico en el flanco sudoccidental de las Sierras de Curamalal. CONICET (Inédito). Buenos Aires (Argentina): 10 p. **1970**

Deschamps C y Tonni E. Los vertebrados del Pleistoceno tardío-Holoceno del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. Aspectos paleoambientales. Ameghiniana 29: 201-210. **1992**

Diamond S, Barneyback R Jr y Struble L. Physics and chemistry of alkali-silica reactions. 5th Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. National Building Research Institute. Pretoria (Sudáfrica): 1-11. **1981**

Diamond S. Alkali reactions in concrete. Pore solution effects. 6th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction in Concrete. Eds.: Idorn G y Rostam S. Copenhagen (Denmark): 155-166. **1983**

Diamond S. ASR. Another look at mechanisms. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Eds.: Okada K, Nishibayashi S y Kawamura M. Elsevier Applied Science. Kyoto (Japón), London (RU) y New York (USA): 83-94. **1989**

Dimieri L y Japas S. Trazas fósiles distorsionadas como indicadoras de la deformación en la Formación Napostá, abras de la Ventana y del Hinojo, Sierras Australes de Buenos Aires. III Reunión de Microtectónica. La Plata (Argentina): 32-39. **1986**

Dimieri L, Delpino S y Turienzo M. Estructura de las Sierras Australes de Buenos Aires. Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. Eds.: de Barrio R, Etcheverry R, Caballé M y Llambías E. La Plata (Argentina): 101-118. **2005**

Dolar Mantuani L. Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali–reactive rocks. 5th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction in Concrete. Cape Town (Sudáfrica): 1-6. **1981a**

Dolar Mantuani L. Further studies on the measurement of undulatory extinction angles in quartz. 5th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction in Concrete. Cape Town (Sudáfrica): 7-10. **1981b**

Drolet C, Duchesne J y Fournier B. Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete pore solution. *Cement and Concrete Research* (98): 10-23. **2017a**

Drolet C, Duchesne J y Fournier B. Effect of alkali release by aggregates on alkali-silica reaction. *Construction and Building Materials* (157): 263-276. **2017b**

Držaj B, Hočevár S, Slokan M y Zajc A. Kinetics and mechanism of reaction in the zeolitic tuff–CaO–H₂O system at increased temperature. *Cement and Concrete Research* 8 (6): 711-720. **1978**

Eby G. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. Geological Society of America. *Open Journal of Geology* (20): 641-644. **1992**

Etcheverría M, Folguera A, Dal Molín C, Dalponte M y Ferro G. Hoja 4163-II/IV y I/III, Viedma y General Conesa. Escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 366. Buenos Aires: 67p. **2006**

Etcheverría M y Folguera A. Hojas Geológicas 3963-III y IV Colonia Juliá y Echarren y Pedro Luro. Provincias de Río Negro, Buenos Aires y La Pampa. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales (328). Buenos Aires (Argentina): 61 p. **2009**

Etcheverría M y Folguera A. Los calcretes del sudoeste de la provincia de La Pampa: Caracterización y origen. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Buenos Aires (Argentina) 71 (1): 92-99. **2014**

Etcheverría M, Anselmi G, Candiani J, Chavez S, Folguera A, Marengo H, Negro C, Rodríguez M, Seggiaro R, Tedesco A, Wilson C, Yamin M, Oyola M, Olmos M, Celedón M, Gozalvez M, Villagrán C y Wright E. Mapa geológico bicontinental de la República Argentina. Escala 1:5.000.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Argentina. **2018**

Falcone D. Antecedentes y metodología de ensayo para evaluar la reacción álcali-sílice. Tesis de Magister en Ingeniería-UNICEN. Olavarría (Argentina): 128 p. **2013**

Falcone D y Milanesi C. Medidas de prevención frente a la reacción álcali-agregado. Enfoques prescriptivo y prestacional. Seminario Iberoamericano sobre Diseño Prestacional para Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado. La Plata (Argentina): 28 p. **2013**

Falcone D, Pérez Marfil P, Locati F y Marfil S. Utilización de una puzolana natural para inhibir la reactividad de una milonita de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos

Aires. X Congreso Internacional y 24^º Reunión Técnica de la AATH. Buenos Aires (Argentina): 234-241. **2022**

Farny J y Kerkhoff B. Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete. Portland Cement Association. (USA): 26 p. **2007**

Fava A, Manuele R, Colina J y Cortelezzi C. Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados, en el hormigón de cemento Portland. Revista LEMIT 85 (II). La Plata (Argentina): 43 p. **1961**

Fava A. Las condiciones de elaboración y el control de calidad del hormigón de obra. Su relación con los recientes colapsos de estructuras. Anales LEMIT 170 (II): 95-103. **1970**

Feng N, Hao T. Mechanism of natural zeolite powder in preventing alkali-silica reaction in concrete. Advances in Cement Research 10 (3): 101-108. **1998**

FWHA. Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation. The effects of higher strength and associated concrete properties on pavement performance, Publication N^º FHWA-RD-00-16. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/00161>: 256 p. **2001**

Folguera A y Zárate M. La sedimentación neógena continental en el sector extrandino de Argentina central. Revista de la Asociación Geológica Argentina (64): 692-712. **2009**

Folguera A, Echeverría M, Zarate M. y Escosteguy L. Hojas Geológicas 3963-II Bahía Blanca. Provincia de Buenos Aires. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires (Argentina) (445): 96 p. **2017**

Fournier B, Bérubé MA, Folliard K, Thomas M. Report on the diagnosis, prognosis, and mitigation of alkali-silica reaction (ASR) in transportation structures. Report 09-004. Office of Pavement Technology. Federal Highway Administration. Washington (USA): 154 p. **2010a**

Fournier B, Ideker J, Folliard K, Thomas M, Nkinamubanzi P y Chevrier R. Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR). Materials Characterization Journal (60): 669-679. **2010b**

Fournier B, Ideker J, Folliard K, Thomas M, Nkinamubanzi P y Chevrier R. Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR). 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Eds.: Drimalas T, Ideker J y Fournier B. Austin (USA): 10 p. **2012**

Geng G, Barbotin S, Shakoorioskooie M, Shi Z, Leemann A, Ferreira Sanchez D, Grolimund D, Wieland E, y Dähn R. An in-situ 3D micro-XRD investigation of water uptake by alkali-silica-reaction (ASR) product. Cement and Concrete Research (141): 106331. **2021**

Giovambattista A, Batic O y Traversa L. Reactivity of alkalis and sandstone cemented with opal and chalcedony. 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Ed.: Grattan-Bellew P. New Jersey (USA): 408-412. **1986**

González Díaz E y Malagnino E. Geomorfología de la provincia de Río Negro. 9º Congreso Geológico Argentino. Publicación Especial Nº 9. San Carlos de Bariloche (Argentina): 1-159. **1984**

González J, Andrade Perdrix C, Alonso M y Feliú S. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. Cement and Concrete Research 25 (2): 257-264. **1995**

Grattan-Bellew P. Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali-silica reaction. 9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete. Ed.: Poole A. Londres (Inglaterra): 383-394. **1992**

Grattan-Bellew P. Petrographic and technological methods for evaluation of concrete aggregates. Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology Principles, Techniques, and Applications. Eds: Ramachandran V y Beaudoin J. 990 p. **2001**

Grecco L. Geoquímica y petrología de los intrusivos graníticos Cerros Colorados y Aguas Blancas, Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur (Argentina): 159 p. **1990**

Grecco L y Gregori D. Estudio geoquímico de los intrusivos graníticos Cerros Colorados y Aguas Blancas, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires, Argentina. 12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Mendoza (Argentina). Acta 4: 81-89. **1993**

Grecco L, Gregori D y Ruvíños M. Characteristics of Neoproterozoic magmatism in Sierras Australes, southeast Argentina. Zentralblatt Geologische Paläontologische Teil I, Hefte 3-6. Hamburgo (Alemania): 609-619. **1997**

Gregori D. Síntesis sobre la geología, estratigrafía y estructura de Sierra de la Ventana, provincia de Buenos Aires. Grupo Pillahuincó. Cátedra de Geología Argentina. Universidad Nacional del Sur (inédito). **2002**

Hansen W. Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction proceeds in concrete. Journal of the American Concrete Institute, USA 15(3): 213-227. **1944**

Harrington H. Explicación de las hojas geológicas 33m (Sierra de Curamalal) y 34m (Sierra de la Ventana). Provincia de Buenos Aires. Boletín de la Dirección de Geología y Minería (61): 42 p. **1947**

Harrington, H. Explanation of the geological map of the Arroyo Piedra Azul region, Sierra de Pillahunco (Buenos Aires Province, Argentina). Gondwana Stratigraphy, IUGS Symposium, Buenos Aires: 989-1002. **1969**

Harrington H Sierras Australes. Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba (Argentina): 394-405. **1972**

Hagelia P y Fernandes I. On the AAR susceptibility of granitic and quartzitic aggregates in view of petrographic characteristics and accelerated testing. 14th International Conference on AAR, ICCAR. Austin (USA): 12 p. **2012**

Hobbs D. Alkali-silice reaction in concrete. American Society of Civil Engineers. Ed.: Thomas Telford (Ltd). USA: 192 p. **1988**

Hooton R, Rogers C, MacDonald C y Ramlochan T. Twenty-year field evaluation of alkali-silica reaction mitigation. ACI Materials Journal (110): 539-548. **2013**

Ichikawa T y Miura M. Modified model of alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research 37: 1291-1297. **2007**

IRAM 1501. Tamices de ensayo. Definiciones. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Primera edición: 10 p. **1978**

IRAM 1505. Agregados. Análisis granulométrico. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Cuarta edición: 20 p. **2019**

IRAM 1512. Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Cuarta edición: 25 p. **2013**

IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Sexta edición: 40 p. **2022**

IRAM 1546. Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Tercera edición (con Modificación N°1): 15 p. **2017**

IRAM 1551. Hormigón de cemento Póortland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Sexta edición: 40 p. **2022**

IRAM 1569. Morteros, hormigones y sus componentes. Definiciones. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Primera edición: 20 p. **1992**

IRAM 1627. Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Primera edición: 23 p. **1997**

IRAM 1637. Reacción álcali-agregado. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método de la barra de mortero. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Primera edición: 18 p. **1992**

IRAM 1649. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Segunda edición: 18 p. **2008**

IRAM 1650. Reactividad alcalina en áridos. Método de ensayo químico. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Primera edición: 15 p. **1968**

IRAM 1674. Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Primera edición: 14 p. **1997**

IRAM 1700. Agregados. Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Segunda edición: 16 p. **2013**

IRAM 1871. Hormigón. Método de ensayo para la determinación de la capacidad y el coeficiente de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Segunda edición: 20 p. **2021**

IRAM 1874-2. Agregados para hormigones. Evaluación de estructuras en servicio. Parte 2: Reacción álcali-sílice. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Primera edición.: 12 p. **2004**

IRAM 50001. Cementos. Cementos con propiedades especiales. Requisitos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Cuarta edición: 16 p. **2020**

Isla F. The southern hemisphere sea level fluctuation. Quaternary Sciences Review (8): 359-368. **1989**

Isla F y Buyalesky G. Tendencias evolutivas y disponibilidad de sedimento en la interpretación de formas costeras: casos de estudio de la costa argentina. Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología (II): 75-89. **1995**

Isla F, Cortizo L y Turno Orellano H. Dinámica y evolución de las barreras medanosas, provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista Brasileira de Geomorfología 1 (II): 73-83. **2001**

Isla F. Descripción geológica de la zona costera de Buenos Aires. Eds.: Martins L, Toldo E y Dillenburg S. Erosao Costeira: Causas, Analise ee Risco e Sua Relacao com a Genese de Depósitos Minerais. Organización de Estados Americanos, Porto Alegre (Brasil). **2002**

Isla F, Garzo P y Cortizo L. Las reservas de dunas de Buenos Aires: Una actualización ante la reversión del nivel del mar. Revista de la Asociación Geológica Argentina 79 (4): 586-599. **2022**

Japas S y Sellés Martínez J. Análisis de la microfábrica deformacional de los "Pórfidos Riolíticos" en el área de basamento de Pigüé, Sierras Australes de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina (53): 317-324. **1998**

Katayama T. ASR gel in concrete subject to freeze – thaw cycles – comparison between laboratory and field concretes from Newfoundland, Canada. 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Eds.: Broekmans M y Wigum B. (Canadá): 1-10. **2008**

Katayama T. The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. Cement and Concrete Research (40): 643-675. **2010**

Katayama T. Petrographic study of alkali-aggregate reactions in concrete. PHD Thesis. Department of Earth and Planetary Science. University of Tokyo (Japan): 168p. **2012a**

Katayama T. ASR gel and their crystalline phases in concrete. Universal products in alkali-silica, alkali-silicate and alkali-carbonate reactions. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Eds.: Drimalas T, Ideker J y Fournier B. Austin (USA): 12 p. **2012b**

Katayama T. Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in Eastern Japan. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Eds.: Drimalas T, Ideker J y Fournier B. Austin (USA): 10 p. **2012c**

Kim T y Olek J. Chemical sequence and kinetics of alkali–silica reaction Part I. Experiments. Journal of the American Ceramic Society (97): 2195-2203. **2014**

Larive C, Joly M y Coussy O. Heterogeneity and anisotropy in ASR affected concrete, consequences for structural assessment. 11th ICAAR. Eds.: Bérubé M, Fournier B y Durand B. Québec (Canada): 969 - 978. **2000**

Leat P, Jackson S, Thorpe R y Stillman C. Geochemistry of bimodal basalt-subalkaline/peralkaline rhyolite provinces within the Southern British Caledonides. Journal of the Geological Society (143). Londres (Inglaterra): 259-273. **1986**

Leemann A y Lura P. E-modulus of the alkali–silica-reaction product determined by micro-indentation. Construction and Building Materials (44): 221-227. **2013**

Leemann A, Katayama T, Fernandes I y Broekmans M. Types of alkali–aggregate reactions and the products formed. Ed.: Institution of Civil Engineers. Constr. Materials 169 (3): 128-135. **2016**

Leeman A. Alkali silica reaction sequence, products and posible mechanisms of expansion. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Eds: Lopes Batista A, Santos Silva A, Fernandes I, Oliveira Santo, L, Custódio J. y Serra C. Lisboa (Portugal): 33-52. **2021**

Leemann A. Alkali silica reaction sequence, products and possible mechanisms of expansion. 16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete. Eds.:

Batista A, Santos Silva A, Fernandes I, Oliveira Santos L, Custódio J y Serra C. Lisboa (Portugal): 33-52. **2022**

Leemann A, Rezakhani R, Gallyamov E, Lura P, Zboray R, Griffa M, Shakoorioskooie M, Shi Z, Dähn R, Geng G, Boehm-Courjault E, Barbotin S, Scrivener K, Lothenbach B, Bagheri M y Molinari J. Alkali-silica reaction – a multidisciplinary approach. RILEM Technical Letters (6): 169-187. **2022**

Leeman A, Góra M, Lothenbach B y Heuberger M. Alkali silica reaction in concrete - Revealing the expansion mechanism by surface force measurements. Cement and Concrete Research (176): 107392. **2024**

Lindgård J, Rodum E y Pedersen B. Alkali-silica reactions in concrete—Relationship between water content and observed damage on structures. American Concrete Institute Symposium Paper (234): 147 - 166. **2006**

Lindgård J, Nixon P, Borchers I, Schouenborg B, Wigum B, Haugen M y Åkesson U. The EU “PARTNER” Project — European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations. Cement and Concrete Research (4): 611-635. **2010**

Llambías E. Geología de la provincia de La Pampa y su aspecto minero. Dirección de Minas de la Provincia de La Pampa. Informe inédito. Santa Rosa (Argentina): 38 p. **1975**

Locati F, Marfil S y Baldo E. Effect of ductile deformation of quartz-bearing rock on the alkali-silica reaction. Engineering Geology (116): 117-128. **2010**

Locati F, Marfil S, Maiza P y Giovambattista A. Variación química de los productos de reacción y su relación con agregados pétreos de reacción lenta en una estructura de hormigón afectada por la RAS. IX Congreso Internacional de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón y 23ª Reunión Técnica. La Plata (Argentina): 575-582. **2020^a**

Locati F, Cravero F, Marfil S, Lescano L, Madsen L y Maiza P. Zeolites in acid vitreous rocks, southern Mendoza, Argentina. Journal of South American Earth Sciences (98): 102440. **2020^b**

Locati F, Pérez Marfil P, Marfil S y Lescano L. Stability of acid volcanic glasses in alkaline solutions: Understanding their potential to participate in the alkali-silica reaction. Materials Today Communications (31): 12 p. **2022**

Maiza P, Marfil S, Sota J y Batic O. Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de reactividad potencial alcalina en agregados finos utilizados en Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. 2º Jornadas Geológicas Bonaerenses, Bahía Blanca (Argentina): 697-709. **1988**

Maiza P y Marfil S. Principales yacimientos de arena, canto rodado y piedra partida, utilizados en la construcción en la zona de Bahía Blanca, Prov. de Buenos Aires. Primer Seminario de Tecnología del Hormigón en la Vivienda del Mercosur (Santa Fé): 253-264. **1997**

Maldonado N y Carrasco M. (Eds.). Ese material llamado hormigón. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Buenos Aires (Argentina): 366 p. **2012**

Marfil S. La reacción álcali-agregado. Investigación de la reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento, utilizados en Bahía Blanca y su zona de influencia. Tesis Doctoral. UNS: 289 p. **1989**

Marfil S y Maiza P. Los agregados gruesos utilizados en la zona de Bahía Blanca (Prov. de Bs. As.), en relación con la reacción álcali agregado. Repositorio institucional. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (Argentina): 10 p. **1993**

Marfil S y Maiza P. Agregados utilizados en hormigón en el sur de la provincia de Buenos Aires y este de la provincia de Río Negro. 1° Congreso Argentino de Áridos. Mar del Plata (Argentina) (I): 355-360. **2008**

Marfil S y Maiza P. Publicación especial agregados pétreos de las provincias de Buenos Aires y Córdoba. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. Eds: Bonalumi C. y Marfil S. Córdoba (Argentina): 90 p. **2011**

Massabie A y Rosello E. La discordancia pre-Sauce Grande y su entorno estratigráfico. 9° Congreso Geológico Argentino. Bariloche (Argentina) (I): 337-352. **1984**

McGowan J y Vivian H. Studies in cement-aggregate reaction: correlation between crack development and expansion of mortars. Australian Journal of Applied Science (3): 228-232. **1952**

Mehta P y Monteiro P. Concrete. Structure, Properties and Materials. Ed. Prentice Hall. The McGraw-Hill Companies (USA): 684 p. **1986**

Menéndez Méndez E, Préndez N, Márquez C y Aldea B. Evaluation of granitic aggregates behavior in relation with the alkaline extraction and compositional change in their phases. 14th International Conference on AAR, ICCAR. Austin (USA): 1-10. **2012**

Menéndez Méndez E, García-Rovés R y Ruiz S. Alkali release from aggregates: Contribution to ASR. Institution of Civil Engineers: Construction Materials (169): 206-214. **2016**

Mertens G, Snellings R, Van Balen K, Bicer-Simsir B, Verlooy P y Elsen J. Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. Cement and Concrete Research 39 (3): 233-240. **2009**

Milanesi C, Souza E, Marfil S y Maiza P. 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. XVII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH). Eds.: Rahhal V y Sota J. Córdoba (Argentina): 273-280. **2008^a**

Milanesi C, Pappalardi M y Violini D. Consideraciones sobre la aplicación del criterio canadiense para inhibir la reacción álcali-sílice. Ed.: Cámara de la Piedra de la Provincia de Buenos Aires. 1^{er} Congreso Argentino de Áridos. Mar del Plata (Argentina): 475-481. **2008b**

Milanesi C. Evaluación del mecanismo de expansión de rocas dolomíticas de la zona de Valcheta (provincia de Río Negro, Argentina) empleadas como agregado en morteros y hormigones de cemento pórtland. Tesis doctoral en Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca (Argentina): 294 p. **2018**

Milanesi C, Giaccio G, Falcone D, Giovambattista A y Zerbino R. Una visión actualizada sobre la reacción álcali-sílice en Argentina y el diseño y construcción de estructuras de hormigón. Revista Hormigón (60): 16-35. **2021**

Nicolas R, Kostadinoff J y Schillizzi R. 1986. Correlación entre geoformas superficiales y observaciones geofísicas en la Bahía Anegada, Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina 41(3-4): 245-255. **1986**

Nilsson L y Peterson O. A moisture problem causing pop-outs in concrete floors; alkali-silica reactions in Scania, Sweden. Division of Building Materials. Lund University. Lund (Suecia): 1-106. **1983**

Olafsson H. The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars. 7th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete. Ottawa (Canada): 461-465. **1983**

Olajide O, Nokken M y Sanchez L. Alkali-silica reactions: Literature review on the influence of moisture and temperature and the knowledge gap. Materials 17(1): 10 p. **2024**

Oliver Domingo J. De Architectura. Recopilación de los escritos de Marco Vitrubio. Editorial Alianza. Madrid (España): 227 p. **1995**

Pearce J, Harris N y Tindle A. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology 25: 956-983. **1984**

Pedneault A. Development of testing and analytical procedures for the evaluation of the residual potential of reaction, expansion, and deterioration of concrete affected by ASR. Master's Thesis, Laval University. Quebec (Canadá). **1996**

Pereyra F. Geomorfología de la provincia de Buenos Aires. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Ordenamiento territorial. Buenos Aires (Argentina) N° 10: 85 p. **2018**

Pérez Marfil P Reactividad alcalina potencial de rocas metamórficas de las sierras septentrionales de la provincia de Buenos Aires. Factibilidad de uso como agregado en hormigón. Tesis doctoral. UNS: 301 p. **2022**

PETG VN. Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para Pavimentos de Hormigón. Vialidad Nacional. Ministerio de Transporte de la Nación (Argentina): 106 p. **2017**

Plusquellec G, Geiker M, Lindgård J, Duchesne J, Fournier B y De Weerd, K. Determination of the pH and the free alkali metal content in the pore. Cement and Concrete Research (96): 13-26. **2017**

Powers T y Steinour H. An interpretation of some published researches on alkali-aggregate reaction, Part 1: The chemical reactions and mechanisms of expansion. Journal of the American Concrete Institute (51): 497-516. **1955**

Priano C, Marfil S, Maiza P y Señas L. Petrografía del hormigón de obras del sur de la Prov. de Buenos As. Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, CINPAR, La Plata: 20 p. **2012**

Rabassa J. Geología de los depósitos del Pleistoceno Superior y Holoceno en las cabeceras del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires. 1^{ra} Jornadas Geológicas Bonaerenses (Buenos Aires): 765-790. **1989**

Rajabipour F, Giannini E, Dunant C, Ideker J y Thomas M. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. Cement and Concrete Research 76 (3): 135-146. **2015**

Rapela C, Pankhurst R, Fanning C y Grecco L. Basement evolution of the Sierra de la Ventana Fold Belt: new evidence for Cambrian continental rifting along the southern margin of Gondwana. Journal of the Geological Society. Londres (Inglaterra) (160): 613-628. **2003**

Rapela C y Kostadinoff J. El basamento de Sierra de la Ventana: historia tectonomagmática. Relatorio de la Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Eds.: De Barrio R, Etcheverry R, Caballé M y Llambías E. XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata (Argentina): 69-83. **2005**

Reed R. Measuring relative humidity in concrete pavements as a method to assess ASR mitigation measures. Bachelor's Thesis, University of Arkansas, Fayetteville (USA). **2016.**

CIRSOC 201. Capítulo 3. Materiales. Granulometrías del agregado fino y grueso. INTI: 666 p. **2005**

RILEM ARR-1.1. Recommended test method: AAR-1.1—Detection of potential alkali-reactivity—Part 1: Petrographic examination method. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures: 35-60. **2003**

RILEM ARR-2. RILEM recommended test method: AAR-2—Detection of potential alkali-reactivity—accelerated mortar-bar test method for aggregates. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures: 61-77. **2016**

RILEM ARR-3. RILEM recommended test method: AAR-3—detection of potential alkali-reactivity—38 °C test method for aggregate combinations using concrete prisms. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures: 79-97. **2016**

RILEM ARR-4.1. RILEM recommended test method: AAR-4.1—Detection of potential alkali-reactivity—60 °C Test method for aggregate combinations using concrete prisms. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures: 99-116. **2016**

Rincón O, Carruyo A, Andrade C, Helene P y Díaz I. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED (España): 205 p. **1998**

Rizaoğlu T. Alkali-silica reaction potential of arc-related volcanic rocks from the Göksun ophiolite (Kahramanmaraş-Turkey). AKU Journal of Sciences and Engineering 17(1) 247–256. <https://doi.org/10.5578/fmbd.53955>. **2017**

Sanchez L, Fournier B, Jolin M y Duchesne J. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). Cement and Concrete Research (67): 74-92. **2015**

Sanchez L, Fournier B, Jolin M, Bastien J y Mitchell D. Practical use of the stiffness damage test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. Construction and Building Materials (125): 1178-1188. **2016**

Sanchez L Fournier B, Jolin M, Mitchell D y Bastien J. Overall assessment of alkali-aggregate reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. Cement and Concrete Research 93: 17-31. **2017**

Sanjuán Barbudo M y Chinchón Yepes S. Introducción a la fabricación y normalización del cemento Pórtland. Universidad de Alicante. Unión de Editoriales Universitarias Españolas (España): 181 p. **2014**

Sellés-Martínez J. Geología de la Ventania (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Journal of Iberian Geology an International Publication of Earth Sciences (27): 43-69. **2001**

Shayan A, Xu A y Morris H. Comparative study of the concrete prism test (CPT 60 degrees Celsius, 100 per cent RH (relative humidity)) and other accelerated tests. 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR). Eds.: Broekmans M y Wigum B. Trondheim, Norway (2008): 391-400. **2008**

Shi Z, Geng G, Leemann A y Lothenbach B. Synthesis, characterization, and water uptake property of alkali-silica reaction products. *Cement and Concrete Research* (121): 58-71. **2019**

Shrimer F. Application and use of damage rating index in assessment of AAR affected concrete-selected case studies. 11th International Conference on Alkali-aggregate Reaction. Eds: Berubé M., Fournier B y Durand B. Quebec (Canada): 899-907. **2000**

Sims I, Hawthorn F y Nixon P. Developing and international specification to combat AAR- Proposals of RILEM TC 191-ARP. 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Eds.: Tang M y Deng M. Beijing (China): 8-16. **2004**

Sims I y Poole A. Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review. CCR Press. Taylor & Francis Group (Londres): 805 p. **2017**

Smaoui N, Bérubé M, Fournier B, Bissonnette B y Durand B. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by ASR - Part I: Experimental study. *Canadian Journal of Civil Engineering* (31): 826-845. **2004**

Snellings R, Mertens G, Gasharova B, Garbev K y Elsen J. The pozzolanic reaction between clinoptilolite and portlandite a time and spatially resolved IR study. *European Journal of Mineralogy* 22 (6): 767-777. **2010**

Stanton T. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 66 (10): 1781-1811. **1940**

Stark D. The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity. 2nd CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Ed.: Malhotra, V. Montreal (Canadá) ACI SP 126-52: 973 - 987. **1991**

Stark D, Okamoto P y Diamond S. Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity. Strategic Highway Research Program. SHRP-C. Washington (USA): 273 p. **1993**

Suero T. Geología de la sierra de Pillahuincó (Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires). *LEMIT La Plata (Argentina)* (74): 5-31. **1957**

Tapan M. Alkali-silica reactivity of alkali volcanic rocks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19 (1) 94-108. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.939303>. **2015**

Tarbuck E y Lutgens F. *Essentials of Geology*. 11th Edition. Pearson Education, Inc. Ed: Crissy Dudonis. New Jersey (USA): 49-56. **2012**

Teruggi M. The nature and origen of the argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology* 27 (3): 322- 332. **1957**

Tiecher F, Gomes M, Dal Molin D, Hasparyk N y Monteiro P. Relationship between degree of deformation in quartz and silica dissolution for the development of alkali-silica reaction in concrete. *Materials* 10(9): 1022.10.3390/ma10091022. **2017**

Tiecher F, Florindo R, Vieira G, Gomes M, Dal Molin D y Lermen R. Influence of the quartz deformation structures for the occurrence of the alkali-silica reaction. *MDPI Materials* (11). Basel (Suiza): 21 p. **2018**

Thomas M, Fournier B y Folliard K. Report on determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction. Report FHWA-HIF-09-001. Office of Pavement Technology, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington (USA): 21 p. **2008**

Thomas M, Fournier B y Folliard K. Selecting measures to prevent deleterious alkali-silica reaction in concrete: Rationale for the AASHTO PP65 prescriptive approach. Report FHWA-HIF-13-002. Office of Pavement Technology, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington (USA): 47 p. **2012a**

Thomas, M., Folliard, K., Fournier, B., Ahlstrom, G. A prescriptive specification for the selection of measures for preventing alkali-aggregate reaction. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Eds.: Drimalas T, Ideker, J y Fournier B. Austin (USA): 10 p. **2012b**

Thomas M, Fournier B y Folliard K. Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book. Office of Pavement Technology Federal Highway Administration. Washington (USA): 211 p. **2013**

Tomezzoli R y Cristallini E. Secciones estructurales de Las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires: Repetición de la secuencia estratigráfica a partir de fallas inversas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (59): 330-340. **2004**

Varela R y Cingolani C. Nuevas edades radiométricas del basamento aflorante en el perfil del Cerro Pan de Azúcar-Cerro del Corral y consideraciones sobre la evolución geocronológica de las rocas ígneas de las Sierras Australes. Pcia. de Bs. As. 6^{to} Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires (Argentina): 543-556. **1976**

Varela R, Dalla Salda L y Cingolani C. Estructura y composición geológica de las Sierras Coloradas, Chasicó y Cortapié: Sierras Australes de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (40): 254-261. **1986**

Velasco Torres A. Estudio experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (España): 440 p. **2014**

Villeneuve V y Fournier B. Determination of the damage in concrete affected by ASR — the damage rating index (DRI). Eds.: Drimalas T, Ideker J y Fournier B. 14th ICAAR. University of Texas, Austin (USA): 1-10. **2012**

Visconti G. Sedimentología de la Formación Cerro Azul (Mioceno superior) de la provincia de La Pampa, Argentina. Tesis Doctoral inédita. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de La Pampa (Argentina): 208 p. **2007**

Vollpracht A, Lothenbach B, Snellings R y Haufe J. The pore solution of blended cements: a review. *Materials and Structures* (49): 3341-3367. **2016**

Walsh, JB. The effects of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks. *Journal of Geophysical Research* (70): 339 - 411. **1965**

Weiler N. Rasgos morfológicos evolutivos del sector costanero comprendido entre Bahía Verde e isla Gaviota. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (38). Buenos Aires (Argentina): 392-404. **1983**

Weiler N. Evolución de las islas de barrera durante el Holoceno en Bahía Anegada (provincia de Buenos Aires). 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Asociación Geológica Argentina e Instituto Argentino del Petróleo y Gas (4) Buenos Aires (Argentina): 71 p. **1996**

Whalen J, Currie K y Chappell B. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (95): 407-419. **1987**

Wigum B. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. *Engineering Geology* 40 (3-4): 195-214. **1995**

Xu H. On the alkali content of cement in AAR. Concrete alkali-aggregate reactions. 7th International Conference on Alkali-Silica Reaction. Ed.: Grattan-Bellew P. New Jersey (USA): 451-455. **1987**

Yang Q. Inner relative humidity and degree of saturation in high-performance concrete stored in water or salt solution for 2 years. *Cement and Concrete Research* (29): 45-53. **1999**

Zahedi A, Trottier C, Sanchez L y Noël M. Condition assessment of alkali-silica reaction affected concrete under various confinement conditions incorporating fine and coarse reactive aggregates. *Cement and Concrete Research*: 153, 106694. **2022**

Zárate M y Blasi A. Late Pleistocene-Holocene deposits of the southern Buenos Aires Province, Argentina: A preliminary model. *Quaternary International* (17): 15-20. **1993**

Zavala C, Azúa G, Freije R y Ponce J. Sistemas deltaicos dominados, por avenidas fluviales en el Grupo Curamalal (Paleozoico inferior), cuenca Paleozoica de Ventania, provincia de Buenos Aires. Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (55): 165-178. **2000**

Zhang J, Gao Y, Han Y y Sun W. Shrinkage and interior humidity of concrete under dry-wet cycles. *Drying Technology* (30): 583-596. **2012**