



***UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR***

*Tesis Doctor en Geología*

**“Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras  
Septentrionales de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción  
álcali – sílice (RAS)”**

*Lic. Gabriela Soledad Coelho dos Santos*

**BAHÍA BLANCA**

**ARGENTINA**

**2018**



## ***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 la cátedra de Geoquímica, dependiente del Departamento de Geología de la UNS y el LEMIT-CIC (La Plata) durante el período comprendido entre el 23 de agosto de 2013 y el 28 de septiembre de 2018, bajo la dirección de la Dra. Silvina Andrea Marfil (Profesor Titular UNS – Investigador Principal CIC) y del Ing. Luis Pascual Traversa (Director del Laboratorio LEMIT-Investigador Emérito de la CIC de la Prov. de Buenos Aires).

Fecha:

Departamento de Geología

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

*A mi padre, Orlando, por haber soñado, creído y confiado en mí siempre...  
(En su memoria)*

*“Si admitimos una primera causa,  
la mente aún anhela saber de dónde vino aquélla  
y cómo se originó”  
Charles Darwin.*



## **Agradecimientos:**

En estos párrafos expreso mis infinitos agradecimientos a todas y cada una de las personas que me acompañaron en este camino que he recorrido durante cinco años de trabajo arduo.

En primer lugar a mis Directores. A mi Directora Dra. Silvina Marfil por estar siempre y cada una de las veces que he recurrido a ella para desarrollar cualquier aspecto relacionado al trabajo de Tesis y por transmitirme tan afectuosamente la calidad de sus conocimientos en el tema. A mi Director Ing. Luis Traversa por guiarme en el amplio e inmenso tema de la tecnología del hormigón. A ambos muchas gracias.

A las instituciones que me acogieron en todos estos años: a la Universidad Nacional del Sur por abrirme las puertas para desarrollar este trabajo de Tesis, y muy especialmente al Departamento de Geología, dentro del cual debo hacer una mención especial al Dr. Pedro Maiza por transmitirme con calidez su inmenso conocimiento geológico, mineralógico y de la tecnología de los materiales. A las chicas de Departamento de Geología: a mi colega y amiga Leticia Lescano por estar atenta siempre en los detalles durante mis estadías en Bahía Blanca, a Lenis Madsen y Paula Pérez Marfil. A todas ellas por su compañerismo, sobre todo en la etapa final de este trabajo.

Al Laboratorio LEMIT, Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires. A mis compañeros y amigos del personal técnico del área de Durabilidad y Ligantes Hidráulicos del LEMIT: Maxi Rodríguez, Carlos Rodríguez, Javier González y Mauricio Rucci por haber colaborado en el procesamiento del material y la realización de los ensayos de laboratorio, y por las horas compartidas, a ellos mi inmensa gratitud. Al Ing. Darío Falcone por haber colaborado con los ensayos de laboratorio y compartido sus conocimientos sobre la reacción álcali-sílice y al Ing. Carlos Milanesi por haberme transmitido su experiencia en el tema. A mis compañeros y amigos Ing. Agustín Rossetti y al Lic. Damián Benito por su ayuda en las cuestiones de la química de la RAS. Al Ing. Fabián Iloro, jefe del área de Patrimonio del LEMIT, por su colaboración y consejos. A Rosana Lofeudo, del área de Patrimonio, por brindarme su amistad, apoyo incondicional y constante a lo largo de todos estos años. A los ingenieros del área de Tecnología del Hormigón por su compañerismo y por las horas de almuerzos compartidos. A mi amiga y siempre compañera de oficina Dra. Natalia Alderete por estar presente en cada momento de la etapa de mi trabajo de tesis, a pesar de la distancia. A la Ing. Graciela Giaccio por sus consejos y aportes bibliográficos. Al Dr. Francisco

Locati (Pancho), del Instituto CICTERRA-CONICET de la UNC, por la gran ayuda y colaboración en la aplicación de los métodos petrográficos utilizados en esta Tesis y por sus siempre bienvenidos consejos.

Muy especialmente a Canteras Yaraví y a su presidente, el Ing. Javier Leggiero por su hospitalidad y por darme acceso al estudio de las canteras de del área de Batán. Especialmente al Dr. Luis del Río y al Ing. Guillermo Álvarez, a ambos gracias por su asesoramiento y colaboración en el muestreo en las canteras en la zona de Mar del Plata.

A mi compañero, amigo y amor, Norberto Javier Uriz que en esta etapa de mi vida estuvo siempre presente con su amor, cariño y consejo y por su gran colaboración al socorrerme y guiarme en el armado de las figuras presentadas en este trabajo de Tesis.

A mi hija y gran compañera de la vida, Sarah Belén Noguera por su presencia y paciencia en estos 13 años, por ser mi eje y devolverme a la realidad cada día, una realidad que sin ella no sería tan bella.

Muy especialmente a mi familia: a mi madre Beatriz Carocella por enseñarme que el mejor trabajo y el que nos ofrece mayor satisfacción es logrado con honestidad, esfuerzo y pasión.

A mis hermanos Javier, Fernanda, María José y Juan Pablo Coelho dos Santos, por su afecto y estar presentes en cada etapa de mi carrera profesional. Especialmente a mi hermano mayor, Javier Coelho dos Santos por haberme marcado en el camino de la ciencia y demostrarme con su lucha que todo se puede. A mis sobrinas Agustina, Camila, Julieta, Sofía y Lara, y sobrinos Lautaro y Valentino por el amor e interés demostrado hacia mi persona. A mis pequeñas sobrinas Delfina y Cielo por su amor dulce y desinteresado.

A mi familia de adopción: mis suegros Beba García y Mario Uriz, mi cuñada Alejandra Uriz y Sergio Gastaminza, a mis sobrinos Florencia y Federico. A todos ellos, gracias por cada palabra de aliento, cada alegría compartida y por ofrecerme su cariño incondicional.

A mi amiga de toda la vida Evangelina Cardoso y Santi, su pequeño hijo, por su afecto y por estar siempre en mi vida.

A mis maestros y profesores de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la UNLP, mi pilar en la vida profesional.

Finalmente mi mención especial y gratitud al Ing. Oscar Batic por haberme introducido en el área de conocimiento de la reacción álcali-sílice. En su memoria.

## **RESUMEN**

La roca cuarcítica que se explota como agregado en el partido de General Pueyrredón, en cercanías de Mar del Plata se conoce comercialmente como cuarcita Mar del Plata y pertenece a las arenitas cuarzosas de la Formación Balcarce. Estas rocas contienen cuarzo tensionado y/o microcristalino que puede ocasionar la reacción álcali-sílice en el hormigón de tipo diferida o lenta. El análisis de las características micro-texturales de estas rocas permite determinar el grado de deformación del cuarzo, además de la presencia y tipos de matriz o cemento que pueden contener componentes deletéreos como ópalo, calcedonia o alguna otra forma de sílice metaestable, mediante lo cual será posible calificar el comportamiento de estos materiales como agregado en hormigón. La complejidad de la temática requiere cada vez más investigaciones donde se efectúan trabajos interdisciplinarios entre la ingeniería civil y la geología, asegurando una mejor comprensión e interpretación de la problemática. En el presente trabajo se procedió a resumir la geología y sedimentología de las Sierras Septentrionales mediante una recopilación bibliográfica extensa. También se tratan aspectos de la geoquímica de las rocas cuarcíticas en relación a su estabilidad bajo distintas condiciones ambientales tanto naturales como en el hormigón y se abordan los antecedentes de la reacción álcali-sílice (RAS) y los métodos utilizados para su estudio. Para esta Tesis se relevaron y muestrearon cinco canteras, realizando además perfiles estratigráficos de los frentes estudiados. Los análisis se orientan a la petrografía del agregado cuarcítico, de los hormigones de laboratorio post-ensayo y de casos de obra de pavimentos de hormigón confeccionados con dichos agregados. Se utilizaron técnicas de microscopía óptica, electrónica de barrido y de fluorescencia con luz UV y difracción de rayos X. Para calificar adecuadamente los agregados se realizaron ensayos físicos de expansión en barras de mortero y prismas de hormigón según las normativas vigentes en Argentina. El trabajo aporta información original e inédita sobre las características petrográficas de las rocas cuarcíticas de canteras de la zona de Mar del Plata y zona de influencia, y del área de Balcarce para su uso como agregado para hormigón. Esto contribuye a implementar métodos y diseños de explotación de canteras para agregados ya que se deberán tener en cuenta los porcentajes de cada litotipo potencialmente reactivo como componente de la mezcla final de los agregados producidos en planta.

## ***ABSTRACT***

The quartzite currently exploited as aggregate in the area of General Pueyrredón, nearly of the city of Mar del Plata, is commercially named Mar del Plata quartzite and belongs to the quartz arenite from Balcarce Formation. These rocks have tensioned and microcrystalline quartz that can cause delayed or slow alkali-silica reaction in concrete. The analysis of the micro-textural characteristics of these rocks allows determining the deformation degree reached by quartz and the presence and types of matrix or cement that can be constituted by deleterious components, such as opal, chalcedony or some other variety of metastable silica. This study will allow qualifying the behavior of these materials as aggregate in concrete. The complexity of the subject requires more researches, where interdisciplinary works are carried out between civil engineering and geology, contributing to a better understanding and interpretation of the problem.

In the present work, the geological and sedimentological characteristics of Sierras Septentrionales were summarized by means of an extensive bibliographic compilation. The geochemistry of quartzite rocks are also discussed related with their stability under different environmental conditions, both natural and in concrete. Also the alkali-silica reaction (ASR) and the methods used for their study are evaluated. For this work five quarries were sampled, and stratigraphic profiles of the fronts were studied. The main analyzes are oriented to the petrography of the quartzite aggregate, the post-test laboratory concretes and the concrete pavements cases of study, made with these aggregates. Optical, scanning electron, and fluorescence UV light microscopy, and X-ray diffraction techniques were used. To characterize the aggregates, physical tests of expansion in mortar bars and concrete prisms were carried out according to Argentina standards. This Thesis provides original and unpublished information about the petrographic characteristics of quartzite from quarries of Mar del Plata and Balcarce areas, for their use as aggregate for concrete. This also contributes to implement methods for mining quarries for aggregates, considering the percentages of each reactive lithotype as components of the final mixture of the aggregates produced in plant.

# ÍNDICE

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS 1**

- 1.1. INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA 2
- 1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 8
  - 1.2.1. Marco geológico 10
  - 1.2.2. Antecedentes de extracción minera 11
- 1.3. OBJETIVOS Y MÉTODOS APLICADOS 11
  - 1.3.1. Objetivos 12
  - 1.3.2. Métodos 13
    - 1.3.2.1. Trabajo de campo 13
    - 1.3.2.2. Trabajos de gabinete y laboratorio 13
- 1.4. FUNDAMENTOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS 15
  - 1.4.1. Fundamentos 15
  - 1.4.2. Organización 15

## **CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA DE LAS SIERRAS SEPTENTRIONALES Y DE LAS ROCAS CUARCÍTICAS DE LA FORMACIÓN BALCARCE 19**

- 2.1. INTRODUCCIÓN 20
- 2.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA REGIÓN 21
- 2.3. BASAMENTO CRISTALINO 23
- 2.4. CUBIERTA SEDIMENTARIA 24
  - 2.4.1. Grupo Sierras Bayas – Neoproterozoico 27
    - 2.4.1.1. Formación Villa Mónica 27
    - 2.4.1.2. Formación Cerro Largo 28
    - 2.4.1.3. Formación Olavarría/Las Águilas (homólogas) 29
    - 2.4.1.4. Formación Loma Negra 30
  - 2.4.2. Grupo La Providencia – Neoproterozoico?-Ediacariano/Cámbrico 31
  - 2.4.3. Formación Balcarce – (Ordovícico-Silúrico) 32
    - 2.4.3.1. Litotipos de la Formación Balcarce 34
- 2.5. ACTIVIDAD EXTRACTIVA-MINERA DE LAS ROCAS CUARCÍTICAS DE LA FORMACIÓN BALCARCE 37
  - 2.5.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal 38
  - 2.5.2. Área de Balcarce 40

## **CAPÍTULO 3. ASPECTOS QUÍMICOS DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CUARCÍTICAS 41**

- 3.1. INTRODUCCIÓN 42
- 3.2. GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CLÁSTICAS 43

3.2.1. Meteorización y relación con los procesos sedimentarios	43
3.2.2. Diagénesis	45
3.2.2.1. Fábrica diagenética	50
3.2.2.2. Cementación silíceo	52
3.2.2.3. Matriz	53
3.3. TIPOS DE ARENITAS CUARZOSAS	54
3.3.1. Aspectos diagenéticos de las sedimentitas de las Sierras Septentrionales	55
3.3.2. Texturas en arenitas de la Formación Balcarce	56
<b>CAPÍTULO 4. REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE</b>	<b>59</b>
4.1. INTRODUCCIÓN	60
4.2. ANTECEDENTES	61
4.3. FACTORES NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE (RAS)	63
4.4. AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS	63
4.4.1. Polimorfos de la sílice	64
4.4.2. Cuarzo fuertemente tensionado o deformado	66
4.4.3. Variedades de sílice amorfa, criptocristalina y microcristalina	69
4.4.4. Vidrio volcánico	73
4.4.5. Variedad de sílice en rocas cuarcíticas	74
4.4.6. Solubilidad de los agregados silíceos	76
4.5. DESARROLLO DE LA REACCIÓN	78
4.5.1. Alcalis y humedad	78
4.5.2. Etapas y mecanismos de la reacción	81
4.5.2.1. Mecanismos de expansión	83
4.5.2.2. Rol del calcio	87
4.5.3. Velocidad de la reacción	89
4.5.4. Productos de la RAS	91
4.6. MANIFESTACIONES EXTERNAS DE LA RAS	95
4.7. ANTECEDENTES DE LA RAS EN ROCAS CUARCÍTICAS	98
<b>CAPÍTULO 5. MÉTODOS DE ENSAYO APLICADOS EN EL ESTUDIO DE LA RAS</b>	<b>103</b>
5.1. INTRODUCCIÓN	104
5.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS ROCAS CUARCÍTICAS Y HORMIGONES	105
5.2.1. Densidad y absorción de los agregados. Norma IRAM 1533	105
5.2.2. Ensayos de resistencia al desgaste Los Ángeles. Norma IRAM 1532	106
5.2.3. Densidad y absorción de hormigones. Norma ASTM C 642	107

### 5.3. MÉTODOS APLICADOS EN EL ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL 108

5.3.1. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Norma IRAM 1649 109

5.3.1.1. Difracción de rayos X (DRX) 112

5.3.1.2. Microscopía electrónica de barrido -espectrometría de energía dispersiva 112

5.3.2. Agregado grueso para hormigón de cemento. Norma IRAM 1531 113

5.3.3. Método acelerado de la barra de mortero. Norma IRAM 1674 116

5.3.4. Método del prisma de hormigón. Norma IRAM 1700 122

5.3.5. Método químico y método de la barra de mortero 118

5.3.6. Examen petrográfico de hormigón endurecido. Norma ASTM C 856 123

5.3.6.1. Microscopía de fluorescencia (MF) 126

5.3.6.2. Difracción de rayos X (DRX) 128

5.3.6.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS) 129

### 5.4. OTROS MÉTODOS PARA EVALUAR LA RAS 130

5.4.1. Normas de petrografía ASTM y RILEM 130

5.4.2. Normas de ensayos físicos ASTM y RILEM 133

### 5.5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE LA RAS 137

## **CAPÍTULO 6. RESULTADOS: RELEVAMIENTO Y PETROGRAFÍA DE LAS CANTERAS ESTUDIADAS**

### **139**

#### 6.1. INTRODUCCIÓN 140

#### 6.2. MUESTRO Y DESCRIPCIÓN DE LAS CANTERAS 141

6.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal 144

6.2.1.1. Cantera Minera Yaraví 144

6.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros) 149

6.2.1.3. Cantera La Cerámica (ex - Cerámica del Plata) 151

6.2.1.4. Cantera Pétreo 154

6.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos 156

#### 6.3. PETROGRAFÍA 159

6.3.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal 159

6.3.1.1. Cantera Minera Yaraví 159

6.3.1.1.1. Estereomicroscopía y microscopía óptica de polarización 159

6.3.1.1.2. MEB-EDS 175

6.3.1.1.3. Discusión 177

6.3.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros) 177

6.3.1.3. Cantera La Cerámica (ex - Cerámica del Plata) 182

6.3.1.4. Cantera Pétreá 185

6.3.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos 187

6.4. DIFRACCIÓN DE RAYOS X 191

6.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 194

## **CAPÍTULO 7. RESULTADOS: MÉTODOS PETROGRÁFICOS Y ENSAYOS FÍSICOS 197**

7.1. INTRODUCCIÓN 198

7.2. CALIFICACIÓN DE LA CUARCITA MAR DEL PLATA MEDIANTE PETROGRAFÍA 199

7.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal 200

7.2.1.1. Cantera Minera Yaraví 200

7.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros) 206

7.2.1.3. Cantera Pétreá 209

7.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos 212

7.3. DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE EXTINCIÓN ONDULANTE (AEO) 215

7.3.1. Introducción 215

7.3.2. Medición del AEO 218

7.3.3. Área de Batán-Estación Chapadmalal 219

7.3.3.1. Cantera Minera Yaraví 219

7.3.3.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros) 221

7.3.3.3. Cantera Pétreá 222

7.3.4. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos 223

7.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS FÍSICOS 224

7.4.1. Ensayos físicos de RAS. Norma IRAM 1674 e IRAM 1700 224

7.4.1.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal 228

7.4.1.1.1. Cantera Minera Yaraví 228

7.4.1.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros) 231

7.4.1.1.3. Cantera Pétreá 233

7.4.1.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos 234

7.4.2. Ensayos físicos de desgaste, densidad y absorción. Norma IRAM 1532 y 1533 235

7.5. DISCUSIÓN 236

## **CAPÍTULO 8. RESULTADOS: PETROGRAFÍA Y ENSAYOS FÍSICOS EN HORMIGONES CON CUARCITA MAR DEL PLATA 239**

8.1. INTRODUCCIÓN 240

8.2. PRISMAS DE HORMIGÓN POST-ENSAYO. ESTEREOMICROSCOPIA, MICROSCOPIA ÓPTICA Y MEB-EDS. NORMA ASTM C 856 242



8.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal	242
8.2.1.1. Cantera Minera Yaraví	243
8.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)	252
8.2.1.3. Cantera Pétreo	256
8.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos	259
8.3. CASOS DE ESTUDIO	262
8.3.1. Introducción	262
8.3.2. Estereomicroscopía, microscopía óptica, MEB-EDS. Norma ASTM C 856	263
8.3.2.1. Pavimento de hormigón: Avenida 122, ciudad de La Plata	263
8.3.2.2. Pavimento de hormigón: Ruta RP88, partido de General Pueyrredón	270
8.3.2.3. Pavimento de hormigón: Avenida Libertad, ciudad de Mar del Plata	274
8.3.3 Densidad y absorción de los hormigones. Norma ASTM C 642	279
8.3.4. Determinación de la densidad de fisuras mediante microscopía UV	281
8.3.5. Relación entre densidad de fisuras, absorción y densidad de hormigones de obra	283
<b>CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES</b>	<b>285</b>
9.1. GENERALES	286
9.2. DENSIDAD, ABSORCIÓN Y DESGASTE DE LOS AGREGADOS	286
9.3. REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL DE LAS ROCAS CUARCÍICAS DE LAS SIERRAS SEPTENTRIONALES	287
9.3.1 Examen petrográfico de agregados para hormigón. Norma IRAM 1649	287
9.3.2. Agregado grueso para hormigón de cemento. Norma IRAM 1531	287
9.3.3. Método acelerado de la barra de mortero. Norma IRAM 1674	288
9.3.4. Método del prisma de hormigón. Norma IRAM 1700	288
9.4. PETROGRAFÍA DE LOS HORMIGONES (ASTM C 856)	289
9.4.1. Probetas de hormigón post-ensayo	289
9.4.2. Casos de obra: Pavimentos de hormigón	290
9.5. APORTES Y CONSIDERACIONES FINALES	290
9.6. RECOMENDACIONES	292
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>293</b>

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

## **1.1. INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA**

## **1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **1.2.1. Marco geológico**

### **1.2.2. Antecedentes de extracción minera**

## **1.3. OBJETIVOS Y MÉTODOS APLICADOS**

### **1.3.1. Objetivos**

### **1.3.2. Métodos**

#### **1.3.2.1. Trabajo de campo**

#### **1.3.2.2. Trabajos de gabinete y laboratorio**

## **1.4. FUNDAMENTOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

### **1.4.1. Fundamentos**

### **1.4.2. Organización**

## 1.1. INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

El hormigón, es un material compuesto, constituido básicamente por agregados y pasta de cemento pórtland, que puede tener incorporado aditivos químicos, adiciones minerales, fibras metálicas o de polipropileno, entre otros, que modifican sus características tecnológicas. En la actualidad, los cementos adicionados poseen escorias granuladas de alto horno, ceniza volante, filler calcáreo, etc. Por otra parte los agregados son, en su mayoría, materiales producto de la trituración artificial de rocas o naturales originados por los procesos de meteorización, transporte y depositación de sedimentos en ríos, mares, lagos, etc., y son extraídos sin ningún proceso previo de preparación. Estos se dividen, según su granulometría en: agregado grueso y agregado fino. El cemento, el agua, los agregados y las adiciones se mezclan para constituir una masa plástica y trabajable, que permite ser moldeada de acuerdo a la forma elegida y que se endurece, desarrollando resistencia e interactúa con el medio en el cual se encuentra expuesta. El cemento y el agua de mezclado, se combinan químicamente cuya reacción es la hidratación, de la cual resulta el fraguado y endurecimiento gradual del hormigón. Una vez en estado endurecido continúa, bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura, incrementando la resistencia hasta alcanzar un porcentaje importante de su resistencia final en el primer mes de edad. Además, durante la etapa de hidratación se conforma una estructura de poros y capilares interconectados entre sí y con el medio externo, la cual define, entre otras características, las de durabilidad del material (Giovambattista *et al.* 1981; Traversa 2004, 2012).

El diseño del hormigón de una cierta estructura requiere que se tenga en cuenta la durabilidad del mismo, dependiendo del tipo de estructura y la vida útil de la misma. El envejecimiento, entendiendo este concepto como el deterioro de una o todas las propiedades del material, es un proceso natural e inevitable, en particular cuando se encuentran expuestos en ambientes agresivos, ya que siempre evolucionan hacia formas más estables. Desde el punto de vista de su empleo, el principal problema no es el deterioro que sufren sino la velocidad del mismo. Esta velocidad, para que el material resulte económicamente viable, debe implicar tiempos menores de alteración que la vida útil de la estructura de la cual forma parte (Traversa 2012).

Debido a los problemas de durabilidad intrínsecos del hormigón, las estructuras pueden disminuir su vida útil debido a patologías que tienen su origen durante la etapa del proyecto, durante la construcción como así también cuando se le aplican modificaciones que pueden introducirse durante su vida en servicio. Las patologías se agrupan en cuatro causales de deterioro: proyecto (deficiencias de cálculo, sobrecargas, fundaciones inadecuadas, etc.), materiales (características inadecuadas del hormigón, corrosión de armaduras, durabilidad del hormigón, materiales inadecuados, etc.), construcción (fallas de control, falta de control, etc.), uso y mantenimiento (sobrecargas, modificación en el medio ambiente, etc.). Estudios realizados en el LEMIT sobre un total de 177 estructuras evaluadas en el período 1975/1990, indica que dentro de la causa materiales, las subcausas durabilidad y corrosión de armaduras son del orden del 44%. La alta incidencia porcentual de los materiales debe ser atribuida a la incorporación de las subcausas de características inadecuadas del hormigón, durabilidad y corrosión de armaduras (Traversa 2004, 2012).

Dentro de los temas de durabilidad del hormigón se encuentra el problema de la reacción álcali-sílice (RAS), la cual se genera como consecuencia de la potencial reactividad de los agregados que contienen sílice metaestable o amorfa, vidrio volcánico, cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino, con los álcalis cemento pórtland en presencia de humedad elevada (Stanton 1940). El estudio de las reacciones químicas que se producen entre algunos agregados pétreos y la pasta de cemento, ha sido motivo de numerosas discusiones a nivel nacional e internacional, tratando de interpretar los fenómenos que tienden a debilitar las estructuras y por ende a disminuir su vida útil (Holm y Geiker 1992). Con el tiempo la petrografía tanto de los agregados como del hormigón mismo ha adquirido un rol clave junto al desarrollo de nuevas técnicas y métodos de estudio que permiten hoy en día, realizar una completa caracterización y evaluación tendiente a efectuar políticas de prevención y/o mitigación de los procesos que deterioran el hormigón y las estructuras (Mielenz 1954, 1958; Gogte 1973; Dólar-Mantuani 1983; St. Jhon *et al.* 1998; Fernandes *et al.* 2016 y referencias allí citadas).

Stanton (1940, 1942), señaló que las expansiones anormales desarrolladas en el hormigón se debían a la reacción producida entre los álcalis del cemento y la sílice reactiva de los agregados pétreos. Esta reacción, conocida como álcali-agregado o más específicamente álcali-sílice (RAS), no solo provoca la expansión del hormigón sino

también, en ocasiones, la destrucción del mismo. Desde entonces, si bien son numerosos los trabajos realizados en todo el mundo sobre el tema (Dent Glasser y Kataoka 1981; Diamond 1989; Helmuth *et al.* 1993; Bérubé y Fournier 1993; Ulm *et al.* 2000, entre otros), existen gran cantidad de obras afectadas por este proceso y dudas acerca del mecanismo que lo produce. Esta reacción se manifiesta por un típico fisuramiento poligonal en forma de “mapa”, sobre hormigones, especialmente en obras sometidas a condiciones de temperatura y humedad elevadas. Se desarrollan exudaciones de geles sílico-alcálicos sobre superficies del hormigón y/o manchas sin ningún tipo de ordenamiento que permita interpretar el proceso. El grado de cristalinidad, composición, distribución espacial de los productos y su textura es variable (Helmuth *et al.* 1993; Maiza y Marfil 2003a).

Para que se produzca esta reacción es necesario que se presenten simultáneamente varias condiciones, la presencia de un agregado reactivo que contenga sílice metaestable, álcali en la solución de poro del hormigón y elevada humedad, además de temperatura y tiempo adecuados (Batic y Sota 2001, y referencias allí citadas). El aporte de álcalis, no solo proviene del cemento, sino también de los agregados. Los materiales potencialmente reactivos que pueden estar presentes en los agregados y que participan en la RAS son: vidrio volcánico, variedades de sílice amorfa o criptocristalina (ópalo, tridimita, cristobalita, calcedonia), cuarzo con deformación o tensionado y cuarzo microcristalino. Estos materiales tienen una fuerte tendencia a solubilizarse en medio alcalino y, en especial, en condiciones extremas como en las que se desarrollan el fraguado del hormigón (Diamond 1976; Marfil *et al.* 1988; Helmuth *et al.* 1993; Broekmans 2004, entre otros).

La RAS se desarrolla puntualmente entre la sílice metaestable y los iones hidroxilos en presencia de álcalis y calcio, que provoca una transformación de la sílice en un “gel” de sílice y álcali, el cual produce una fuerza expansiva por aumento de volumen causada por la imbibición de agua de los poros que rodean al gel. Esta expansión puede, finalmente, provocar la fisuración y consecuentemente el deterioro de la estructura (Batic y Sota 2001).

En Argentina existe una gran variedad de rocas que se utilizan como agregados en la construcción de obras civiles. Desde los estudios pioneros realizados en el LEMIT por Fava *et al.* (1961) y Colina *et al.* (1967) relacionados con la RAS se han realizado

numerosas investigaciones sobre la potencial reactividad de los agregados utilizados en todo el país a través de ensayos físicos, químicos y técnicas petrográficas, tanto en las rocas y arenas a ser utilizadas como agregados, así como de estructuras de hormigón deterioradas por esta patología. El primer pavimento estudiado con fisuración fue el de camino Punta Lara de la ciudad de La Plata, cuya afectación fue relacionada con la reactividad de arenas con ópalo-calcedonia como constituyente (Fava *et al.* 1961). Se destacan trabajos realizados sobre los agregados utilizados en la zona de Bahía Blanca, Viedma y zona patagónica (Marfil y Maiza 1989, 1993; Maiza *et al.* 1988; 2006, 2008), provincia de Córdoba (Locati *et al.* 2008, 2010), provincia de Buenos Aires (Batic *et al.* 2005) y de estructuras de hormigón deterioradas por esta patología (Di Maio *et al.* 1996; Batic *et al.* 1999; Marfil y Maiza 2001, Maiza y Marfil 2003b; Milanesi *et al.* 2008; Locati 2012), aunque son recientes los antecedentes sobre el comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires, (Falcone y Coelho dos Santos 2013; Coelho dos Santos *et al.* 2014a, 2016, 2017a).

En el territorio de la República Argentina existen amplias áreas productoras o proveedoras de agregados para hormigón (Batic *et al.* 2005; Traversa 2012; Falcone y Batic 2012). En la provincia Buenos Aires se usan agregados de trituración de rocas graníticas del centro de la provincia, cuarcitas, metacuarcitas y en algunos casos rodados de río. Los agregados graníticos contienen cuarzo tensionado y deformado con texturas que le confieren características del tipo de agregado de reacción lenta con influencia del tamaño de grano (cuarzo microcristalino), la proporción y grado de deformación, que influye en la velocidad de reacción. El método acelerado (IRAM 1674 1997) da resultados que ubican, en muchos casos, a estos materiales en la zona de duda. Las manifestaciones de reactividad se han observado en pavimentos y en algunos puentes después de 10 años en servicio. Fuera de la provincia de Buenos Aires, agregados tanto gruesos como finos, utilizados en las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán y noroeste de Santiago del Estero provienen en su mayoría de los ríos. Se observan areniscas y limonitas potencialmente reactivas, confirmado por los resultados de ensayos de laboratorio. En Salta y Jujuy se observan signos de reacción en pavimentos y en Tucumán, en pavimentos y obras hidráulicas (diques, canales, distribuidores de agua, etc.) con manifestaciones severas de RAS, cuando se emplean agregados del río Salí. En Chaco y Formosa existe una roca empleada como agregado grueso, identificada como arenisca

silíceas (arenisca del Chaco) con ópalo y calcedonia. Numerosos pavimentos, estructuras y bases de líneas de alta tensión (Figura 1.1) muestran manifestaciones severas de RAS (Giovambattista *et al.* 1986; Falcone y Batic† 2012). También se ha observado su presencia en rodados de ríos de la zona de influencia. En las provincias de Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego los agregados se obtienen de gravas y arenas provenientes de los ríos patagónicos y morenas de glaciares; deben ser considerados potencialmente reactivos por contener riolitas con vidrio volcánico y clastos con cuarzo tensionado. La reacción se observa con mucha frecuencia, en acueductos, aeropuertos, pavimentos y obras de defensa costera (Batic *et al.* 2005; Traversa 2012).



**Figura 1.1:** Base torre de alta tensión de Salto Grande, Entre Ríos. Se observa un patrón de fisuras tipo “mapa” y chorreaduras blanquecinas de materiales de RAS (tomado de Falcone y Batic†2012).

Dentro de las rocas sedimentarias, las areniscas y cuarcitas son factibles para uso en agregados pétreos para hormigón, aunque son complejas y deben reunir una serie de propiedades físicas y químicas para ser utilizadas con tal fin (Añón Suárez *et al.* 1969; Angelelli *et al.* 1973). Muchas de estas rocas pueden contener sílice metaestable, ya sea como clasto, matriz o cemento. En muchos casos si este último es abundante, es común que en rocas relativamente jóvenes el cemento este conformado por ópalo y/o calcedonia, componentes potencialmente reactivos (Giovambattista *et al.* 1986; Marfil *et al.* 2012; Hagelia y Fernandes 2012; Fernandes *et al.* 2016). Este es el caso de la conocida arenisca del Chaco, la cual corresponde a areniscas fluviales de la Formación

Las Piedritas, asignadas al Jurásico-Cretácico (Batic *et al.* 1995; Coelho dos Santos y Falcone 2012; Falcone y Batic† 2012; Falcone y Coelho dos Santos 2013; Coelho dos Santos 2015) y rocas similares en la provincia de Corrientes (Batic *et al.* 2010; Marfil *et al.* 2012).

Por otra parte, las metacuarcitas (originalmente rocas sedimentarias) poseen granos principalmente de cuarzo que se hallan deformados (tensionados). Las altas presiones y temperaturas producen inestabilidad de los granos de cuarzo por presencia de dislocaciones en sus redes cristalinas y reducción del tamaño de grano, conduciendo a que este tipo de material sea potencialmente reactivo frente a los álcalis del cemento portland. Un ejemplo de ello es la denominada metacuarcita de la Formación Napostá (Ordovícico-Silúrico) que aflora en el área de Pigüé, Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires (von Gosen *et al.* 1990, 1991), la cual presenta una elevada reactividad alcalina potencial (Batic *et al.* 2005; Coelho dos Santos 2015; Berezosky *et al.* 2016).

Por último rocas sedimentarias, fundamentalmente cuarzosas, como la cuarcita Mar del Plata aflorante en las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires, objeto de estudio en esta tesis, no habían sido abordadas desde el punto de vista de la RAS por ser consideradas inocuas (Marfil y Maiza 2011). Las mismas pertenecen a cuarzoarenitas de la Formación Balcarce (Ordovícico-Silúrico) las cuales presentan rasgos diagenéticos importantes, como la precipitación de cuarzo secundario y la presencia de minerales en los poros de estas rocas relacionados con procesos posteriores a su formación. Los principales minerales presentes son: variedades de sílice como tridimita, ópalo-CT, calcedonia y cuarzo microcristalino, además de carbonatos y arcillas, entre otros (Zimmermann y Spalletti 2009; Zalba *et al.* 2010a, Coelho dos Santos *et al.* 2016). Recientemente, debido a la escasez de antecedentes sobre su comportamiento respecto a la RAS, se les ha comenzado a prestar especial interés (Coelho dos Santos y Falcone 2012; Falcone y Coelho dos Santos 2013; Coelho dos Santos *et al.* 2014, 2016, 2017a).

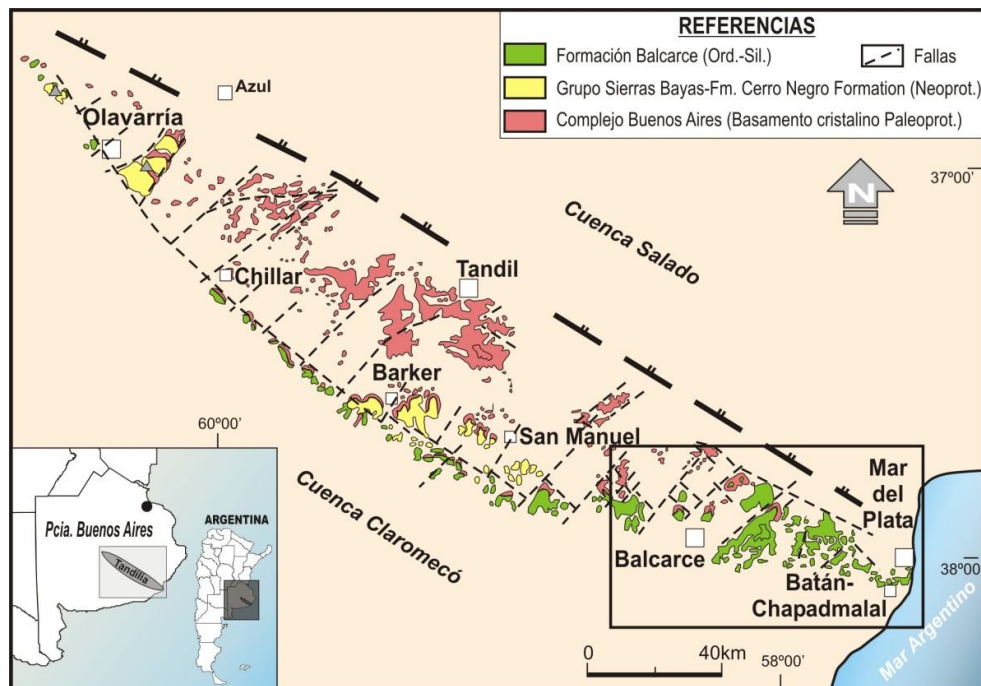
Angelelli *et al.* (1973) citan para las cuarcitas del área de Batán-Estación Chapadmalal valores de densidad entre 2,3 g/cm<sup>3</sup> - 2,56 g/cm<sup>3</sup> y 0,6% - 1,7% de absorción. Para estas mismas rocas los valores de desgaste Los Ángeles varían entre 30% y 55% y los valores promedio de resistencia a la compresión simple entre 80 Mpa y 160 Mpa dependiendo de la cantera.



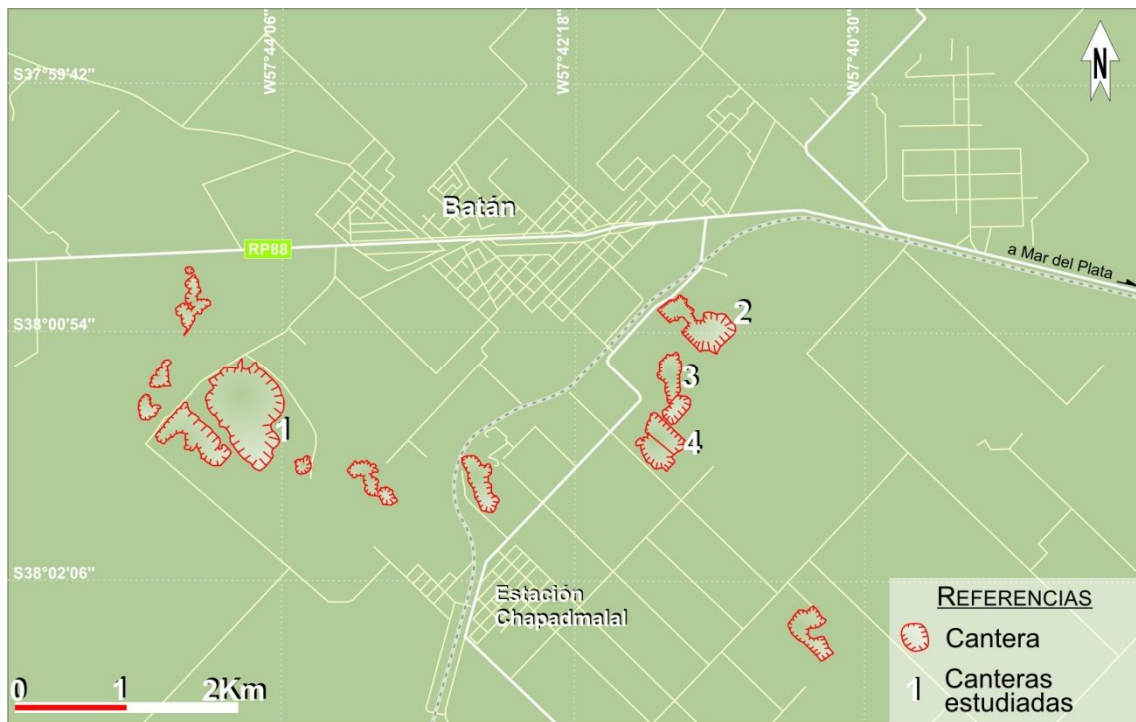
Investigaciones realizadas por Giaccio y Zerbino (1994, 1997) y Zerbino (1998) determinaron resistencias en hormigones elaborados con rocas cuarcíticas del área de Batán de hasta 100 MPa, prácticamente iguales a los de la matriz (pasta cementícea), considerándolos como hormigones de alta resistencia. Estos valores superaban incluso a los de resistencia a la compresión de la propia roca de 86 MPa. La resistencia de los hormigones confeccionados con estas cuarcitas fue atribuida a que generan una interfase pasta-agregado con excelente adherencia.

## 1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

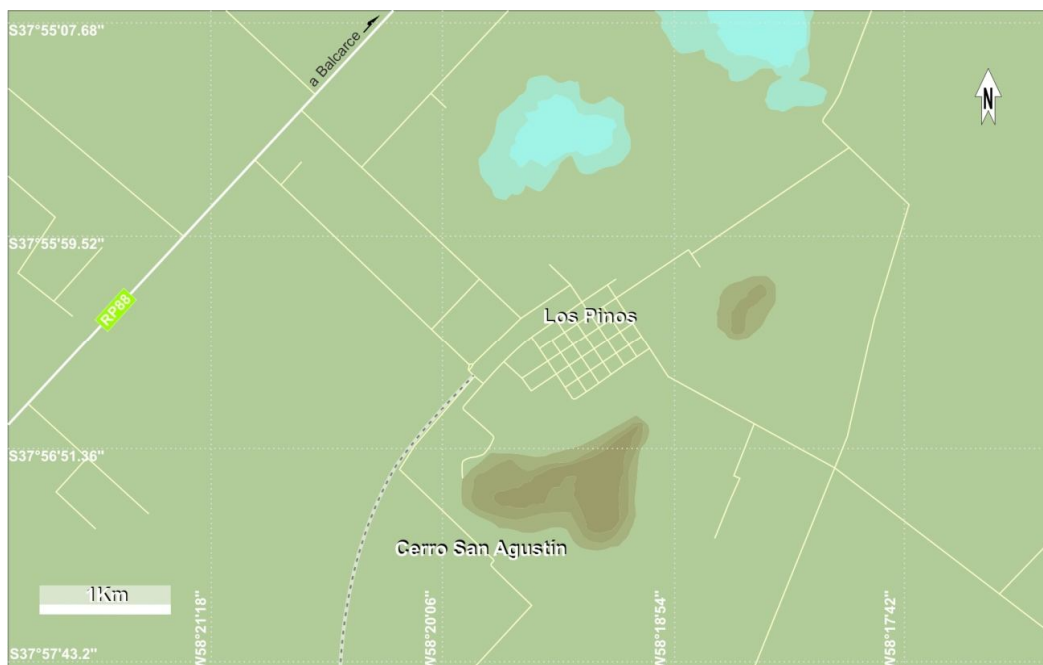
El área de estudio comprende los sectores donde los afloramientos cuarcíticos de la Formación Balcarce son más importantes. Esto es en el sector oriental y sur de las Sierras Septentrionales, equivalente al Sistema de Tandilia (Figura 1.2). Los sitios estudiados pertenecen a afloramientos de canteras, algunas de ellas en actividad, ubicadas en el área de Batán- Estación Chapadmalal, cercana a la ciudad de Mar del Plata, partido de General Pueyrredón (Figura 1.3) y a canteras próximas a la ciudad de Balcarce, las cuales se encuentran inactivas desde hace varias décadas (Figura 1.4).



**Figura 1.2:** Mapa geológico-estructural del Sistema de Tandilia. El recuadro señala el área estudiada, que incluye a la localidad de Batán Chapadmalal y Balcarce (modificado de Cingolani 2011).



**Figura 1.3:** Mapa de la localidad de Batán-Estación Chapadmalal en la cercanías de la ciudad de Mar del Plata y ubicación de las canteras estudiadas y abandonadas.



**Figura 1.4:** Mapa de la Localidad de Los Pinos y Cerro San Agustín, Partido de Balcarce. En el cerro se encuentran frentes de canteras abandonados, entre ellas Los Pinos ubicada en el sector oriental.

### 1.2.1. Marco geológico

Los sitios estudiados (Figura 1.3 y 1.4), se hallan en el marco geológico de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires (Figura 1.2), cuya orientación es noroeste-sudeste, presentando afloramientos desde la localidad de Blanca Grande a Cabo Corrientes en el litoral atlántico, abarcando aproximadamente 350 km de extensión, con un ancho máximo en su parte central de alrededor de 60 km en Tandil. Es un sistema de serranías bajas y aisladas, conformadas por rocas de basamento del Complejo Buenos Aires, el cual está constituido por un conjunto ígneo-metamórfico de gneises, migmatitas, anfibolitas, plutones graníticos y enjambres de diques básicos, cuya edad oscila entre el Paleoproterozoico y Mesoproterozoico (2,2-2,0 Ga y 1,6 Ga). En los alrededores de Azul y Tandil también se presentan diversas fajas miloníticas. El Complejo Buenos Aires está parcialmente cubierto, hacia el O y SE por tres secuencias de ambiente marino de poca profundidad: Grupo Sierras Bayas del Neoproterozoico, separado por una discordancia regional del Grupo La Providencia (Neoproterozoico-Cámbrico inferior). Luego, se apoyan las cuarzoarenitas de la Formación Balcarce, de edad Ordovícico-Silúrico en discordancia regional sobre este último grupo o sobre el basamento en el área de Chillar, en cercanías de Azul (Cingolani 2011).

La Formación Balcarce está constituida por ortocuarzitas o cuarzo arenitas de grano fino a grueso hasta sabulítico, que intercalan con arcillitas caoliníticas y conglomerados de grano fino subordinados, y algunos bancos piroclásticos. Aflora fundamentalmente en el sector oriental de Tandilia, desde San Manuel-Balcarce hasta la costa atlántica y en este sector está constituida por secciones de hasta 90 metros de espesor, en estratos bien diseccionados dispuestos en bancos de 0,3 m a 1,5 m de espesor, con estratificación entrecruzada, laminación convexa y otras estructuras de ambiente litoral a sub-litoral (Dalla Salda *et. al.* 2006; Cingolani 2005; Zimmermann y Spalletti 2009; Cingolani *et al.* 2010).

### 1.2.2. Antecedentes de extracción minera

La roca, conocida comercialmente como "Piedra Mar del Plata" es extraída en canteras en la zona de Batán, Estación Chapadmalal y Benito Juárez (Echeveste *et al.* 2005). Angelelli *et al.* (1973), describen 23 canteras en el área de los Partidos de Balcarce y General Pueyrredón. Muchas de las canteras se encuentran inactivas y en algunos casos es difícil reconocer su ubicación exacta, debido al crecimiento de vegetación y actividad antrópica (del Río *et al.* 2015). De estas 23 canteras, la mayoría ha sido explotada como piedra partida para la construcción de obras civiles (Angelelli *et al.* 1973; Coelho dos Santos *et al.* 2015), otras para piedra laja y ornamental (Cravero *et al.* 2015), y de algunos yacimientos se han extraído arcillas caoliníticas (Zalba *et al.* 2010b). Las canteras que se hallan en actual producción se encuentran en el área de Batán-Estación Chapadmalal pero ninguna en el área de Balcarce (Coelho dos Santos *et al.* 2014a, 2017a).

Desde el inicio de la explotación a finales del siglo XIX debido a la necesidad de áridos para el desarrollo de la actual ciudad de Mar del Plata, la actividad minera extractiva de la roca cuarcítica no ha cesado, siendo muy importante hacia las décadas del 1950-1970, conformándose un distrito minero en el área de Batán-Estación Chapadmalal. En las décadas de 1980-1990, debido a una crisis económica se produce el cierre de canteras con acumulación de pasivos ambientales, y en 1990-2000 se desarrollan nuevas normativas de protección ambiental, mientras que en 2001 el sector sufre una importante contracción, retornando a la actividad en 2005. A partir de esta época se inicia un nuevo periodo de expansión y consolidación de la actividad incorporando una fuerte componente de cuidado y protección ambiental (del Río *et al.* 2015).

### 1.3. OBJETIVOS Y MÉTODOS APLICADOS

Las rocas cuarcíticas tienen cuarzo tensionado y/o microcristalino que pueden ocasionar reacciones deletéreas en el hormigón de tipo diferida o lenta. El análisis de las características micro-texturales de estas rocas permitirá caracterizar el grado de deformación alcanzado por el cuarzo, además de la presencia o ausencia y tipos de

matriz o cemento, mediante lo cual será posible anticipar el comportamiento de estos materiales frente a las RAS y su calificación.

Además de las citadas cuarcitas, la presencia de intercalaciones de bancos de pelitas y rocas piroclásticas, o incluso la presencia de ópalo o calcedonia en los poros de las rocas hace necesario el estudio detallado de las mismas debido a las posibles afecciones que estos tipos de rocas pueden causar en el hormigón.

Comparando los productos de la RAS, obtenidos mediante ensayos de laboratorio sobre las rocas cuarcíticas de la Formación Balcarce de las distintas canteras con los generados en estructuras de hormigón donde se utilizó la misma roca, sería factible deducir el grado de representatividad que tienen los ensayos de laboratorio frente al comportamiento real del material en las estructuras.

### 1.3.1. Objetivos

- Investigar el comportamiento de estas rocas frente a la reacción álcali-sílice (RAS), identificando los componentes potencialmente deletéreos en los agregados cuarcíticos, como así también los productos de tales reacciones, estudiando las barras de mortero y los prismas de hormigón luego de cumplido el tiempo de ensayo.
- Analizar estructuras construidas con cuarcita Mar del Plata mediante el estudio *in situ* de obras de hormigón de la región, especialmente aquellas que presenten patologías de RAS si existiesen.
- Determinar la relación existente entre las características petrográfico-mineralógicas, químicas y físicas (densidad, absorción y desgaste) de las rocas cuarcíticas de la Formación de Balcarce y su potencial uso como agregado para hormigón en industria de la construcción (edilicia, vial, de diques, represas, etc.).
- Caracterizar y calificar las rocas cuarcíticas, que actualmente son utilizadas como agregados para hormigón principalmente en cercanías de la ciudad de Mar del Plata, Partido de General Pueyrredón y de canteras inactivas de la localidad de Balcarce para establecer su potencialidad como yacimiento.

- Comparar los resultados obtenidos con los diferentes métodos de ensayos utilizados para evaluar la reacción álcali-sílice en este tipo de roca.

### **1.3.2. Métodos**

#### **1.3.2.1. Trabajo de campo**

Se realizó el relevamiento de las principales canteras de cuarcitas proveedoras de agregados en la zona de Batán-Mar del Plata y de una cantera inactiva de la localidad de Balcarce a fin de evaluar áreas potenciales en las Sierras Septentrionales. Se colectaron muestras para el análisis petrográfico y ensayos físicos de densidad, absorción, desgaste y ensayos para determinar la reactividad alcalina potencial de los agregados. El muestreo se realizó en afloramientos de los frentes y en pilas de acopio de las canteras estudiadas.

También se realizó el muestreo principalmente de testigos y de trozos de pavimentos de hormigón en estructuras con y sin patologías en la ciudad de La Plata y Mar del Plata, elaborados con estas agregados cuarcíticos.

#### **1.3.2.2. Trabajos de gabinete y laboratorio**

Se realizó el trabajo de gabinete clásico del estudio geológico sobre las áreas de yacimientos potenciales y de extracción de las áreas previamente mencionadas. Se llevó a cabo la recopilación y análisis de bibliografía científica y técnica de las rocas de la zona y su relación con las demás unidades geológicas de las Sierras Septentrionales, y respecto a la reactividad alcalina potencial de los agregados en general y de los agregados cuarcíticos.

También se determinó la posición geográfica precisa de las canteras y zonas de muestreo, realizando columnas estratigráficas de los perfiles de cantera analizados y su distribución areal, así como el análisis del origen de los materiales.

Los métodos de ensayo aplicados regulados por normativas argentinas e internacionales, son los siguientes:

- Determinación de la densidad y absorción de agua de los agregados, norma IRAM 1533 (2002).

- Ensayo de resistencia al desgaste "Los Ángeles", norma IRAM 1532 (2000).
- Petrografía de agregados para hormigón, norma IRAM 1649 (2008).
- Agregado grueso para hormigón de cemento pórtland, norma IRAM 1531 (2016).
- Método acelerado de la barra de mortero, norma IRAM 1674 (1997).
- Método del prisma de hormigón, norma IRAM 1700 (2013).
- Petrografía de hormigón endurecido, norma ASTM C-856 (2017).
- Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido, norma ASTM C 642 (2013).

En los métodos petrográficos, además de esteromicroscopio y microscopio petrográfico se utilizaron técnicas complementarias como difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) acoplado a un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS), para la identificación de los materiales finos como arcillas o materiales presentes en los poros de las rocas y también para la identificación de los productos de reacción en los poros y fisuras de hormigones y morteros.

Para la aplicación de las normas de petrografía de agregados IRAM 1649 y de hormigón ASTM C 856, se utilizó estereomicroscopio o lupa binocular (Olympus SZ-61) y microscopio petrográfico (Olympus, BH-2 UMA) del área de ligantes hidráulicos del LEMIT. Los estudios con MEB se llevaron a cabo a través de un microscopio electrónico de barrido acoplado a un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (3 equipos: JEOL JSM 35 CP del Laboratorio CCT de Bahía Blanca, Philips 505 del CINDECA de La Plata y FEI Quanta 200 de barrido ambiental del Laboratorio LIMF de La Plata). Para los estudios por difracción de rayos X (DRX) se utilizó un difractómetro Rigaku D-Max III C, con radiación de Cu K $\alpha$  y monocromador de grafito del Departamento de Geología de la UNS, mientras que el análisis de fisuras de los hormigones se realizaron con microscopio óptico Leica M4500 P LED con luz UV incidente (epifluorescencia) del Instituto CICTERRA (CONICET-UNC).

## **1.4. FUNDAMENTOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

### **1.4.1. Fundamentos**

El trabajo de tesis aporta información original e inédita sobre las características petrográficas de las rocas cuarcíticas de canteras de la zona de Mar del Plata y áreas de influencia, y del área de Balcarce para su uso como agregado para hormigón. También se contribuye a implementar metodologías y diseños de explotación de canteras para áridos ya que se deberán tener en cuenta los porcentajes de cada litotipo reactivo como componentes de la mezcla final. Esto tendrá influencia además en el tipo de cemento a utilizar y en la elaboración del hormigón (incluyendo medidas preventivas).

Se prevé la delimitación de sectores donde se identifiquen los distintos tipos de cuarcitas de mayor y menor riesgo frente a la RAS, para las áreas de trabajo mencionadas, especialmente las del área de Mar del Plata y zonas de influencia. Esto es necesario ya las rocas cuarcíticas pueden variar en su contenido y tipo de matriz y/o cemento dependiendo el nivel de exposición al intemperismo o por la variabilidad en la circulación de fluidos que pueden afectar zonas más permeables dentro de la cuarcita y modificar sus condiciones originales en esos sectores.

Además, se procede a la evaluación de pavimentos de la ciudad de Mar del Plata y áreas de influencia y de la ciudad de La Plata, realizadas con este agregado cuarcítico, con el fin de informar sobre patologías que hayan afectado o afecten al hormigón, principalmente en lo que respecta al desarrollo de la RAS y otras patologías que puedan estar asociadas (carbonatación, sulfatos, etc.).

### **1.4.2. Organización**

La complejidad de la temática relacionada con la reacción álcali-agregado, requiere cada vez más investigaciones donde se efectúen trabajos interdisciplinarios entre diferentes áreas como la ingeniería civil y la geología, asegurando una mejor comprensión e interpretación de la problemática. De este modo se generarán pautas y mecanismos que conducirán, en última instancia, a mejorar la prestación y vida útil de las distintas obras, disminuyendo los gastos de mantenimiento y remediaciones, otorgándole una mayor seguridad a los usuarios de las mismas.



El presente trabajo será un aporte al conocimiento de la potencial reactividad de los agregados cuarcíticos de la zona de Mar del Plata y áreas de influencia utilizando métodos petrográficos, caracterizando a los agregados en estudio y mediante la realización de ensayos físicos para evaluar la expansión en probetas de laboratorio, que luego de finalizado los mismos serán estudiadas petrográficamente a fin de analizar la microestructura de los hormigones elaborados con cuarcita sometidos a las condiciones de ensayo.

Se evaluarán las características petrográfico-mineralógicas y texturales de las rocas de las principales canteras proveedoras de agregados de la región y su comportamiento en obras ingenieriles. La base geológica es fundamental, tanto para entender el comportamiento de las rocas como agregados y las implicancias de su uso en obras de ingeniería.

La primera parte incluye el capítulo introductorio. El segundo capítulo se centra en la geología y sedimentología de las Sierras Septentrionales o Sistema de Tandilia, explicando la estratigrafía y las características principales tanto de las rocas del basamento como de las sedimentitas con el objetivo de tener un panorama amplio de la región en donde se enmarcan las rocas estudiadas. Luego se aborda brevemente el comportamiento geoquímico de las rocas cuarcíticas (capítulo 3) en relación a su estabilidad bajo distintas condiciones ambientales (pH, temperatura, humedad, etc.).

La segunda parte enlaza la geología aplicada a la ingeniería de los materiales. Hace referencia a los antecedentes del estudio de la RAS (capítulo 4) y a los métodos de estudio de los agregados para hormigón y de los hormigones elaborados con dichos agregados (capítulo 5) principalmente desde la problemática de la reacción álcali-sílice (RAS). En la tercera parte, del capítulo 6 al 8, se presentan los resultados de los análisis petrográficos de los agregados cuarcíticos y hormigones y de los ensayos físicos de expansión y de las obras realizadas agregados cuarcíticos. Aquí el aspecto más importante es la petrografía del agregado y de los hormigones que permiten evaluar y avalar los resultados de los ensayos físicos obtenidos.

En resumen, se ha tratado de no desatender ningún aspecto de las rocas estudiadas, analizando por separado sus aspectos geológicos más sobresalientes y relacionando algunos de ellos con su comportamiento como agregado en hormigones y morteros de cemento pórtland. Se debe entender que el medio que ofrece el hormigón a las rocas es

muy distinto a las condiciones normales del ambiente natural de exposición y por esto la evaluación de la reactividad alcalina potencial es una tema que requiere el estudio continuo de los materiales implicados en el desarrollo de la RAS a fin de prevenir futuros inconvenientes en las obras de ingeniería y mejorar las prestaciones de las estructuras durante su vida en servicio.

## **CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA DE LAS SIERRAS SEPTENTRIONALES Y DE LAS ROCAS CUARCÍTIICAS DE LA FORMACIÓN BALCARCE**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

### **2.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA REGIÓN**

### **2.3. BASAMENTO CRISTALINO**

### **2.4. CUBIERTA SEDIMENTARIA**

#### **2.4.1. Grupo Sierras Bayas – Neoproterozoico**

##### **2.4.1.1. Formación Villa Mónica**

##### **2.4.1.2. Formación Cerro Largo**

##### **2.4.1.3. Formación Olavarría/Las Águilas (homólogas)**

##### **2.4.1.4. Formación Loma Negra**

#### **2.4.2. Grupo La Providencia – Neoproterozoico?-Ediacariano/Cámbrico**

#### **2.4.3. Formación Balcarce - Paleozoico.**

##### **2.4.3.1. Litotipos de la Formación Balcarce**

### **2.5. ACTIVIDAD EXTRACTIVA-MINERA DE LAS ROCAS CUARCÍTIICAS DE LA FORMACIÓN BALCARCE**

#### **2.5.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

#### **2.5.2. Área de Balcarce**

## 2.1. INTRODUCCIÓN

En la provincia de Buenos Aires se encuentra la región geomorfológica conocida como Positivo Bonaerense (Yrigoyen, 1975), conformada por una extensa llanura que se extiende entre los cordones serranos de Tandilia y Ventania.

Teruggi y Kilmurray (1975) definen a Tandilia como unidad morfoestructural conformada por un sistema de montañas en bloque conocidas como Sistema de Tandilia o Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires. Se caracterizan por ser una alineación de sierras en sentido NO-SE, con afloramientos de la localidad de Blanca Grande, en las inmediaciones de Olavarría, hasta Cabo Corrientes en el litoral marítimo. El Sistema de Tandilia tiene una extensión aproximada de 350 km con un ancho máximo en la zona de Tandil de 60 km, y está caracterizado por pequeñas colinas y cordones que se destacan 50-250 msnm sobre la llanura de pampeana, generalmente cubierta por sedimentos modernos. El cerro Albión con 525 msnm en cercanías a la ciudad de Tandil es la mayor elevación. Los afloramientos se hallan entre la cuenca del Salado (unidades meso-cenozoicas) y la cuenca de Claromecó (unidades del Neoproterozoico al Paleozoico), las cuales han sido estudiadas mediante perforaciones de exploración. Estudios geofísicos marinos muestran la continuación del cinturón hacia la plataforma oceánica continental (Ramos 1999). Su estructuración puede seguirse hacia la plataforma continental con el hallazgo de una unidad geomorfológica de 57 km al SE de Punta Mogotes. La altura máxima que alcanza en la Sierra La Juanita desciende progresivamente hacia el NO y SE (Cingolani 2005 y referencias allí citadas).

El conjunto serrano se presenta en forma discontinua, con morfologías redondeadas (rocas ígneo-metamórficas) y mesetiforme (sedimentitas). Entre los grupos orográficos definidos por Nágera (1940), se encuentran las Sierras de Olavarría en el extremo septentrional (que incluye a las de Quillalauquén, China, Chica y Bayas), y las Sierras de Balcarce en el extremo SE (Cingolani 2005). El segmento norte, denominado costa de Heusser, es relativamente recto, mientras que el sur, costa de Claraz, es un arco suavemente convexo hacia el SO. El segmento norte, correspondería a una escarpa de falla de rumbo NO-SE que representaría la fractura que limita el sistema y la cuenca tectónica del Salado (Zárate y Rabassa 2005). La geología del Sistema de Tandilia comprende principalmente un basamento ígneo-metamórfico, Paleoproterozoico

(Complejo Buenos Aires), cubierto por las sedimentitas del Grupo Sierras Bayas (Neoproterozoico), la Formación Cerro Negro (Ediacariano) y la Formación Balcarce (Paleozoico inferior), las cuales poseen microorganismos primitivos, así como trazas fósiles dejadas por ellos (Cingolani 2011).

Según Dalla Salda *et al.* (2005, 2006) la estructuración de Tandilia, la cubierta sedimentaria, la alteración del Complejo y el nivel estructural expuesto, dificultan la identificación de los procesos tectónicos. Aún en los límites de las serranías es muy difícil interpretar las fracturas que limitan supuestos bloques. Se destacan las fajas miloníticas y partes de pliegues meso y megascópicos respecto de las fracturas, las cuales en su mayoría, son inferidas por la presencia de trazas planares que interrumpen la continuidad litológica. La evolución tectónica comprende más de un episodio de deformación, que produjo estructuras de alta complejidad. Por ello estos autores dividen el estudio en: Estructura interna del Complejo, generada por deformación dúctil, y estructura de fracturación, que es simultánea o más joven.

## 2.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA REGIÓN

La provincia geológica de Tandilia, forma parte de un bloque de basamento que expone a las rocas más antiguas de Argentina en la región central de la pampa bonaerense alcanzando la costa en Mar del Plata (Holmberg 1972; Ramos 1999). Se atribuye el término Tandilia a Bonarelli (1932), quién utilizó esta denominación para incluir a rocas de un antiguo macizo que llegaban hacia el norte hasta la isla Martín García, pero su designación actual se debe a Nágera (Ramos 1999). La evolución geológica de Tandilia es relativamente bien conocida. Muchos autores han contribuido al conocimiento del basamento de Tandilia, de la sucesión sedimentaria y de la evolución tectónica de la región desde los pioneros como Darwin (1846), D'Orbigny (1847), Moussy (1860), Aguirre (1879), Hauthal (1896), Heusser y Claraz (1863), Nágera (1919, 1940), González Bonorino (1954) y muchos otros.

El primer mapa geológico de las Sierras Bayas fuér realizado por Nágera (1919). Además, este autor realizó luego el primer mapa geológico de Tandilia y una monografía completa de la misma región (Nágera 1932, 1940). Heusser y Claraz (1863) comienzan sus trabajos en la sierra de La Tinta, nombrando a la secuencia sedimentaria aflorante

como Formación La Tinta. La tectónica del basamento y estratigrafía general han sido revisadas por Teruggi y Kilmurray (1980), Dalla Salda *et al.* (1988), Teruggi *et al.* (1988), Dalla Salda (1999), Iñíguez Rodríguez (1999), Cingolani y Dalla Salda (2000). La cubierta sedimentaria de Tandilia fue llamada inicialmente Formación La Tinta (Heusser y Claraz "Estratos de La Tinta" (Nágera 1919), retomando la nomenclatura de Formación La Tinta González Bonorino (1954) y Borrello (1966), también denominada como Grupo La Tinta por Amos *et al.* (1972). Además, Borrello (1966) incluye a la Formación La Tinta dentro del Grupo Tandil, junto a la formación Punta Mogotes (Borrello 1962) en el área del Partido de General Pueyrredón.

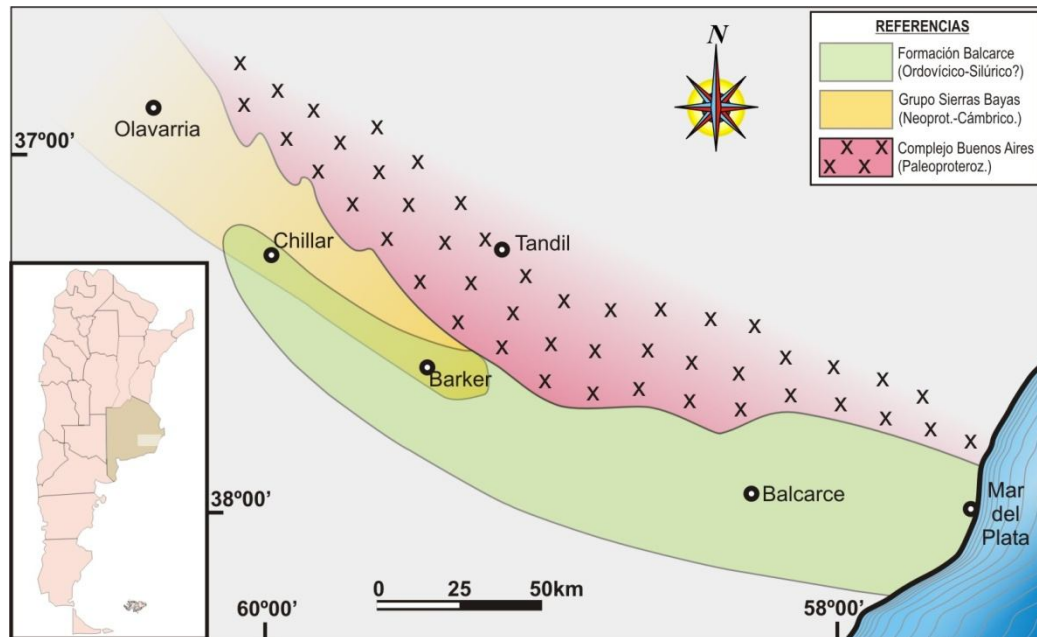
El esquema estratigráfico más ampliamente aceptado para las unidades neoproterozoicas fue propuesto por Dalla Salda e Iñíguez Rodríguez (1979) y posteriormente modificado por Poiré (1987, 1993), Iñíguez Rodríguez (1999 y referencias allí citadas). Leveratto y Marchese (1983) argumentaron que la Formación La Tinta fue depositada como única secuencia con cambios laterales de litofacies. Los primeros estudios de paleocorrientes y paleogeografía realizados por Teruggi (1964) de las ortocuarcitas de la Serie La Tinta, revelaron dos direcciones de paleocorrientes, una hacia el sector oriental y otra hacia el sector occidental de las sierras. Esto contribuyó posteriormente a diferenciar las distintas secuencias depositacionales de la región. En la Figura 2.1 se muestra el primer mapa geológico esquemático en donde se diferencian ambas secuencias sedimentarias por separado (Dalla Salda e Iñíguez Rodríguez 1979).

Aspectos geológicos como estratigrafía, facies, litotipos, paleontología e icnología fueron tratados en publicaciones de Borrello (1966), Teruggi y Kilmurray (1980), Iñíguez Rodríguez (1999), Dalla Salda *et al.* (1988, 2005, 2006), Poiré *et al.* (2003) y Arrouy *et al.* (2016).

Estudios mineralógicos, geoquímicos, de procedencia sedimentaria y diagenéticos-hidrotermales de las sedimentitas de Tandilia fueron desarrollados por Dristas y Friscale (1987), Dristas *et al.* (2003), Zimmermann *et al.* (2005), Dristas y Martínez (2007), Gómez Peral *et al.* (2007), Gaucher *et al.* (2008), Zimmermann y Spalletti (2009), Gómez Peral *et al.* (2017), entre otros.

Algunos trabajos sobre diferentes aspectos de Tandilia fueron publicados por Cingolani y Dalla Salda (2000), Andreis (2003), Pankhurst *et al.* (2003), Rapela *et al.*

(2007), Poiré y Spalletti (2005), Dalla Salda *et al.* (2006), Poiré y Gaucher (2009), Gaucher *et al.* (2009), Bossi y Cingolani (2009), Cingolani (2011), Zimmermann (2018).



**Figura 2.1:** Esquema geológico de las Sierras Septentrionales (modificado de Dalla Salda e Iñiguez 1979).

### 2.3. BASAMENTO CRISTALINO

El basamento cristalino de las Sierras Septentrionales es una asociación ígneo-metamórfica de edad paleoproterozoica, denominada por Marchese y Di Paola (1975 a y b) Complejo Buenos Aires, compuesto fundamentalmente por gneises, migmatitas, anfibolitas y plutones graníticos, a los que se agregan esquistos, mármoles, metavulcanitas y diques básicos y ácidos. La edad del Complejo es de 2,1 a 2,2 Ga y la edad de estabilización del Sistema de Tandilia, está indicada por enjambres de diques máficos de 1,6 y 1,7 Ga, (Dalla Salda *et al.* 2006). Fajas miloníticas afectan a las rocas de basamento como producto de una tectónica de transcurrancia, en las zonas de Azul (NE) y Tandil (SE). Estos cinturones de milonitas fueron mencionados por primera vez por Backlund (1913) y las unidades metavolcánicas dentro del complejo fueron descritas por Lema y Cucchi (1981, 1985) y Dristas (1983). También se hallan rocas metamórficas de bajo grado diferenciadas como Formación El Cortijo (Teruggi *et al.* 1988) expuesto solo en la región de Tandil y consiste en metacherts, metagrauvas y metabasitas que

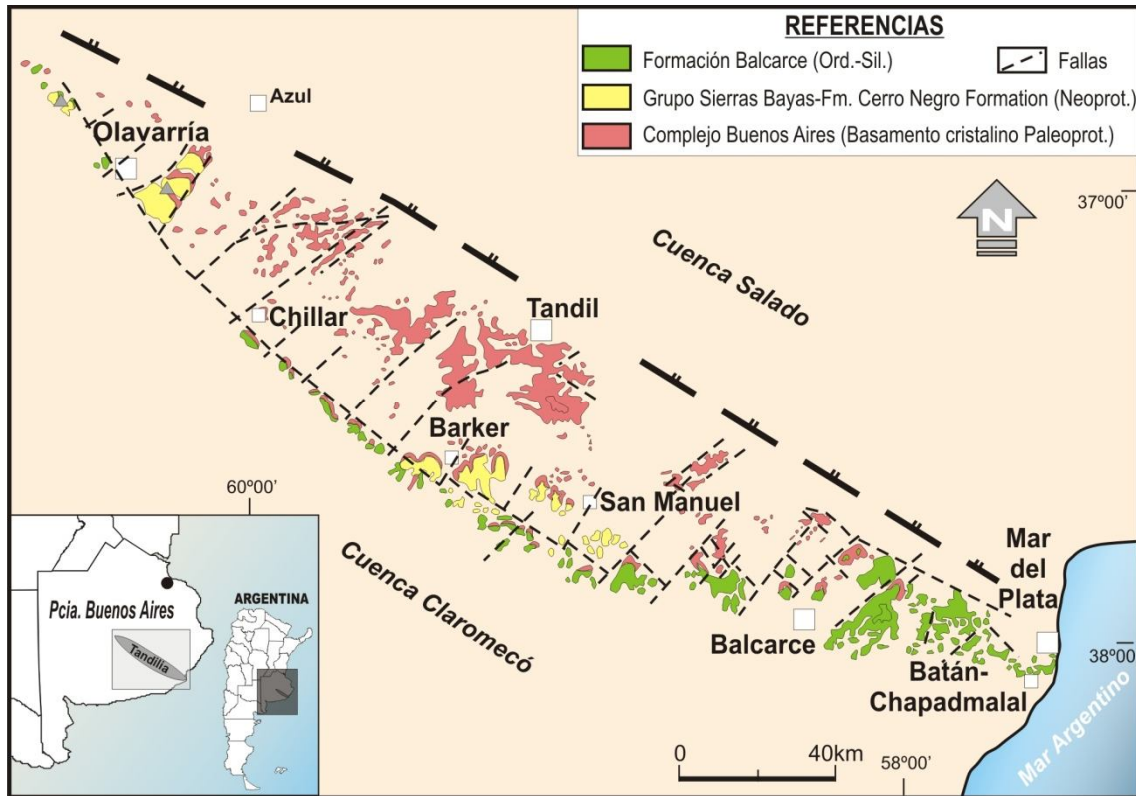
podrían representar una porción de corteza oceánica (Cingolani 2011, Chernicoff *et al.* 2014).

El Complejo Buenos Aires forma parte del cratón del Río de la Plata el cual comprende terrenos del Arqueano y del Paleoproterozoico, representando al basamento autóctono de Gondwana (Cordani *et al.* 2000; Pankhurst *et al.* 2003; Dalla Salda *et al.* 2005; Rapela *et al.* 2007). El cratón presenta afloramientos en el margen continental Atlántico, principalmente en Uruguay y en la provincia de Buenos Aires (Tandilia), además de exposiciones en la isla Martín García (Chernicoff *et al.* 2014). El desarrollo tectónico sedimentario del sistema de Tandilia es complejo y varios autores proponen que la evolución del mismo habría sido iniciada por la extensión de la corteza arqueana entre los 2.500-2.300 Ma, causando la separación entre los terrenos de Balcarce, Tandilia y Buenos Aires, con el desarrollo de océanos acompañados por sedimentación (2.300-2.200 Ma) y magmatismo de arco en el terreno Tandilia. Posteriormente, se produciría el cierre de los estrechos océanos, y la incorporación de la corteza del arco de isla de El Cortijo, así como la actividad magmática en el terreno de Balcarce (Zimmermann y Spalletti 2009; Cingolani 2011; Chernicoff *et al.* 2014).

#### **2.4. CUBIERTA SEDIMENTARIA**

El Complejo Buenos Aires está parcialmente cubierto por unidades sedimentarias de plataforma marina, las más antiguas neoproterozoicas-cámbricas, y la más joven de edad Ordovícico-Silúrico (Figura 2.2). Recientemente el esquema estratigráfico-sedimentario de Tandilia ha sido modificado en base a evidencias petrográficas-composicionales, estratigráficas y quimio-estratigráficas (Arrouy *et al.* 2015, 2016; Gómez Peral *et al.* 2017; Zimmermann 2018). Además, por debajo de 400 m de arenitas de la Formación Balcarce, 80 m de metapelitas de la Formación Punta Mogotes ligeramente deformadas (Borrello 1962; Di Paola y Marchese 1974; Marchese y Di Paola 1975a y b). El evento metamórfico fue datado en illitas por K-Ar en 600 Ma (Cingolani y Bonhomme 1982). Estas metapelitas son las únicas rocas que podrían correlacionarse con el Cinturón Cuchilla de Dionisio al este de Uruguay (Ramos 1988; Rapela *et al.* 2008).



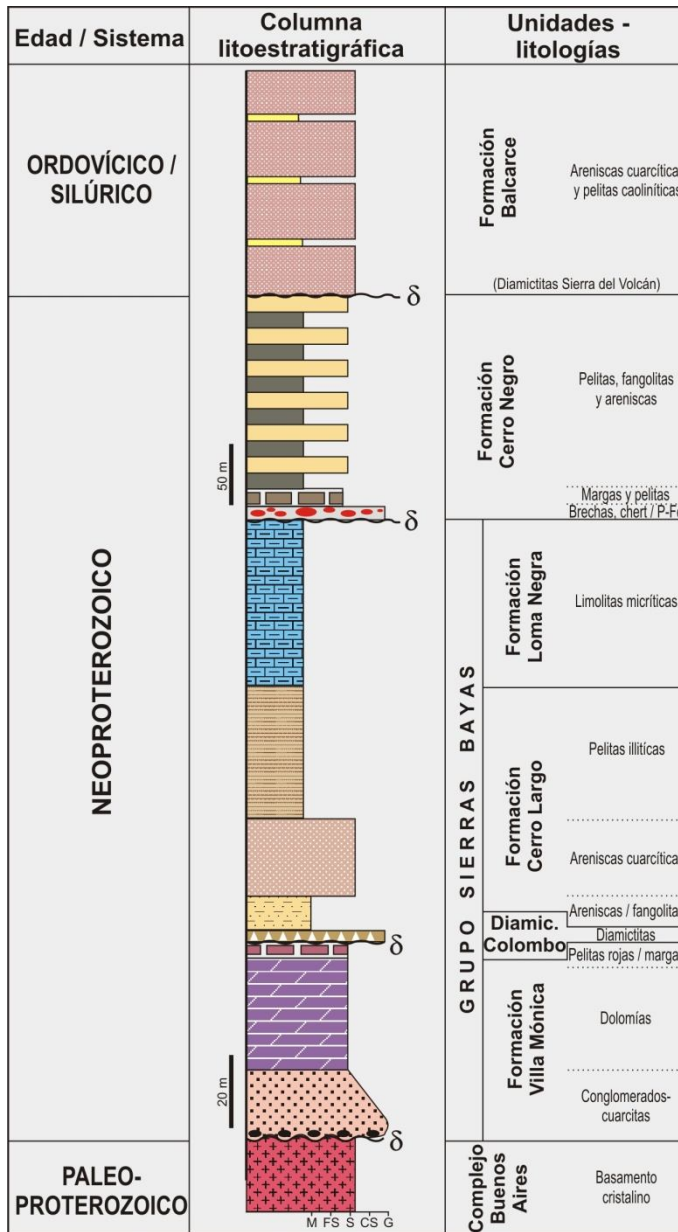


**Figura 2.2:** Mapa geológico regional de las Sierras Septentrionales (Sistema de Tandilia) de la Prov. de Buenos Aires. La unidad sedimentaria con mayor desarrollo es la Formación Balcarce (modificado de Cingolani 2011).

La distribución de las unidades sedimentarias no es uniforme. El complejo Buenos Aires está parcialmente cubierto hacia el oeste y sudoeste por secuencias sedimentarias del Neoproterozoico y del Paleozoico Inferior, generadas en ambiente de plataforma marina de poca profundidad (Figura 2.2).

El relleno sedimentario Neoproterozoico está integrado por las unidades sedimentarias esquematizadas en la Figura 2.3 (Poiré y Gaucher 2009; Cingolani 2011). Arrouy *et al.* (2015), proponen modificaciones en la estratigrafía correspondiente a las facies supra-yacentes del Grupo Sierras Bayas. Estos autores realizaron estudios de detalle en frentes de cantera y de muestras de perforaciones de subsuelo del área de Olayarría-Sierras Bayas, reconociendo tres facies denominadas de base a techo como facies I o Formación Avellaneda, facies II o Formación Alicia y facies III o Formación Cerro Negro, reuniéndolas en una unidad litoestratigráfica de mayor jerarquía, denominada como Grupo La Providencia, ya que consideran que estas tres formaciones están asociadas a una misma cuenca sedimentaria, diferenciándose de las unidades que

integran al Grupo Sierras Bayas, principalmente por cambios en el ambiente sedimentario.



**Figura 2.3:** Columna litoestratigráfica integrada. Unidades principales que conforman la estratigrafía del Sistema de Tandilia (modificado de Poiré y Gaucher 2009).

La Diamictita Sierra del Volcán (Spalletti y Del Valle 1984), previamente asignada al Neoproterozoico por Iñiguez Rodríguez (1999), se considera actualmente miembro inferior de la Formación Balcarce de edad Ordovícico - Silúrico (Rapela *et al.* 2007; van Staden *et al.* 2009). Tanto las rocas del basamento como las sedimentitas, se encuentran cubiertas hacia el sur por depósitos de eopaleozóicos a triásicos que se extienden desde

la Cuenca de Claromecó y hacia el norte están cubiertas por los depósitos más modernos de la Cuenca del Salado (Cingolani 2011).

#### **2.4.1. Grupo Sierras Bayas - Neoproterozoico**

Los procesos sedimentarios del Sistema de Tandilia comienzan hace unos 800 Ma con un saprolito arcósico no consolidado que registra un superficie de paleo-meteorización del basamento (Poiré 1987; Dristas *et al.* 2003; Zalba y Andreis 1998). Este nivel alterado, de menos de 4 m de espesor fue registrado en las áreas de Olavarría y Barker. En el esquema estratigráfico actual (Cingolani 2011 y referencias allí citadas), el Grupo Sierras Bayas posee un espesor medio de 185 m (integrando todas las unidades), y representa el registro sedimentario del Neoproterozoico, que comprende de base a techo las siguientes unidades: Formación Villa Mónica, Diamictita Colombo, Formación Cerro Largo, Formación Olavarría-Las Águilas y Formación Loma Negra.

##### **2.4.1.1. Formación Villa Mónica**

Corresponde a la primera transgresión marina, definida por dos unidades: Miembro Cuarcitas Inferiores y Miembro Dolomías. Los principales afloramientos se desarrollan en Olavarría y Barker. Posee un espesor total entre 50 y 70 metros, limitada por discordancias erosivas. Se encuentran algunos niveles fosfáticos y asociaciones ricas en estromatolitos (Poiré 1993) que sugieren una edad de 850 Ma (Toniano-Criogeniano). La depositación cuarzo-arcósica inicia el primer ciclo sedimentario que implica una transgresión del mar sobre la zona de alteración del basamento. En primer lugar se desarrolla un ortoconglomerado cuarzo-arcósico de grano fino y arenitas. Hacia los sectores superiores vaques arcósicos, arenitas subarcósicas y arenitas cuarzosas, depositadas bajo condiciones litorales más estables. La secuencia es madura, composicional y texturalmente, y culmina con lutitas asociadas a niveles delgados de areniscas (Dalla Salda *et al.* 2006; Cingolani 2011). Zimmermann *et al.* (2005) revelan que estas sedimentitas derivaron de las rocas del basamento. El miembro superior está representado por dolomías estromatolíticas y lutitas depositadas en un ambiente de plataforma marino-somero (Poiré y Spalletti 2005). Fósiles de acritarcos hallados en

pelitas verdes son los representantes fósiles más antiguos registrados en Tandilia (Gaucher *et al.* 2005). El contacto con el basamento saprolizado (paleosuelos) se halla bien expuesto en canteras ubicadas en el área de Olavarría (Poiré 1993).

Para la misma unidad, Dristas *et al.* (2003) analizaron minerales los cuales atribuyeron a un estado avanzado de alteración argílica en depósitos cerca de la ciudad de Barker. Zalba *et al.* (2010a) describen una compleja historia de meteorización y diagénesis de esta unidad en la sierra de La Juanita (Barker), y mencionan estructuras microbianas bien conservadas.

Cingolani y Bonhomme (1988) determinaron por Rb-Sr en illitas una edad para esta formación de  $793 \pm 32$  Ma, además la geocronología realizada en circones detríticos muestra una única moda en el Paleoproterozoico (Cingolani 2011 y referencias allí citadas).

Por encima de la Formación Villa Mónica y separada por una discordancia regional, se desarrollan depósitos predominantemente diamictíticos de unos 8 m de espesor correspondientes a la Diamictita Colombo (Poiré y Gaucher 2007).

#### **2.4.1.2. Formación Cerro Largo**

Corresponde a la segunda transgresión marina, separada de la formación anterior por una discordancia. Esta unidad posee un espesor de 40 m y está representada por areniscas glauconíticas finamente estratificadas, facies heterolíticas y cuarzo arenitas con estratificación entrecruzada. La sección inferior se halla conformada por un nivel de diamictitas, facies de fangolitas amarillentas y blanquecinas cuarzo-illíticas con lentes de ftanita, brechas y bloques cuarcíticos. Continúan rocas pelíticas varicolores y conjuntos heterolíticos. Hacia el tope la unidad se torna más gruesa y de poca profundidad. Este arreglo vertical de facies se interpreta como el pasaje desde una etapa de mar alto hacia condiciones más someras, es decir, desde una zona fango arenosa submareal con glauconita que pasa regresivamente a otra menos profunda areno-fangosa, y luego arenosa prácticamente pura (cuarcítica), correspondiente a una zona de transición (Poiré 2004; Zimmermann *et al.* 2005).

En la Formación Cerro Largo se registraron trazas fósiles correspondientes a *Palaeophycus sp.* y *Didymaulichnus* (Poiré *et al.* 2003), y biopelículas que indican un

sustrato colonizado por microorganismos algales y bacterianos generados en aguas someras (Poiré y Spalletti 2005).

Gaucher *et al.* (2008) determinaron en circones detríticos una moda dominante del Paleoproterozoico y aportes importantes de circones del Arqueano, Paleoproterozoico más bajo y Mesoproterozoico. La depositación de la unidad se produjo en un ambiente de margen continental estable (Cingolani 2011).

#### **2.4.1.3. Formación Olavarría/Las Águilas (homólogas)**

Son depósitos marinos poco profundos que afloran en la región de Olavarría, donde las arenitas cuarzosas de la Formación Cerro Largo pasan transicionalmente a facies heterolíticas, limolitas y arcillitas de la Formación Olavarría, de 35 metros de espesor máximo. El intervalo inferior es el de mayor potencia (27 m) y está constituido por arcillitas y limolitas amarillentas con estratificación mixta, ondulosa a lentiforme. Las limolitas poseen laminación entrecruzada como resultado de procesos mareales, y se encuentran intercaladas con capas delgadas, concrecionales, con un contenido de óxidos de hierro de hasta 70%. Las suceden 8 m de arcillitas rojizas, con lentes de areniscas verdes glauconíticas. Pöthe de Baldis *et al.* (1983) han mencionado para la Formación Olavarría microfósiles de acritarcos. Gaucher *et al.* (2005) y Poiré y Spalletti (2005) reconocen a *Leiosphaeridia tenuissima* como elemento dominante en pelitas del tope. Dataciones Rb-Sr realizadas por Bonhomme y Cingolani (1980) en arcillitas illíticas, dieron una edad del Neoproterozoico. Interpretaciones paleoambientales sugieren una depositación marina poco profunda en un cortejo transgresivo para la base de la secuencia (Dalla Salda *et al.* 2006; Cingolani 2011).

La Formación Las Águilas tiene un desarrollo de 25 a 30 m y abarca todas las unidades presentes en la Cuchilla de Las Águilas (Barker), e incluye tres litofacies que se hallan por debajo de la Caliza Loma Negra. Se reconocen brechas calcáreas silicificadas con oolitas y peloides (5-9 m), pelitas rojizas a blanquecinas (7 m) y una secuencia heterolítica somerizante, grano y estratocreciente que culmina en bancos cuarcíticos antes adjudicados a la Formación Balcarce. Se observan afloramientos en Arroyo Diamante y Calera El Infierno (Zalba *et al.* 1988). Posee varias estructuras sedimentarias tales como ondulitas, *hummocky*, estratificación entrecruzada, sinéresis y grietas de

deseccación. La parte media de la unidad está conformada por arcillitas rojizas de hasta 9 m de espesor con un contenido de 32-70% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el cual podría correlacionarse con otros depósitos similares del Neoproterozoico del SO de Brasil y Uruguay (Gaucher *et al.* 2003, 2004). La posición estratigráfica de la Formación las Águilas debajo de las calizas de Loma Negra fue sugerida por Leveratto y Marchese (1983) y definida por Poiré y Spalletti (2005).

#### 2.4.1.4. Formación Loma Negra

Es una secuencia esencialmente carbonática de aproximadamente 40-45 m de espesor, constituida por calizas micríticas rojizas y negras. Esta fue depositada en una rampa marina abierta carbonática asociada a un ambiente de *lagoon*. Inicia con calizas rojizas de 8 m de espesor y la suceden 32 m de espesor de calizas negras. La base de la unidad se apoya sobre una discordancia de bajo ángulo, y en el techo de la misma se desarrolla una importante superficie erosiva producto de una disolución kárstica, previo a la Formación Cerro Negro (Leanza y Hugo 1987; Barrio *et al.* 1991). Esta superficie ha sido denominada como "superficie Barker" (Poiré y Gaucher 2007) siendo correlacionable con similares secuencias de Gondwana.

Las estructuras sedimentarias de las facies rojizas basales presentan ondulas, laminación ondulítica y entrecruzada, y estratificación en artesas, señalando un ambiente de aguas someras por arriba del nivel de base de olas, en una rampa carbonática formada por subsidencia diferencial, posibilitando la transgresión paulatina del mar y la generación de una biocenosis algal que se convirtió en una fábrica de micrita. Por encima siguen *mudstones* negros laminados que representan una zona de aguas calmas ricas en materia orgánica. Sus características geoquímicas y sedimentarias indican un ambiente de albufera (Dalla Salda *et al.* 2006). La "superficie Barker" fue relacionada a un descenso del nivel del mar, provocado por una regresión marina que dejó expuesta la plataforma de Loma Negra (Poiré y Gaucher 2007; Poiré *et al.* 2007; Poiré 2008)

En cuanto a su contenido fosilífero fue registrada la presencia de *Cloudina cf. C. riemkeae* y trazas de posibles organismos medusoides. Para esta unidad se sugiere una

edad Neoproterozoico-Ediacariano (Poiré *et al.* 2003; Gaucher *et al.* 2005; Gómez Peral *et al.* 2007).

#### 2.4.2. Grupo La Providencia–Neoproterozoico?-Ediacariano/Cámbrico

Como se citó en párrafos anteriores se proponen modificaciones en la estratigrafía correspondiente a las facies suprayacentes del Grupo sierras Bayas (Arrouy *et al.* 2015, 2016; Gómez Peral *et al.* 2017). En la zona de Olavarría, la Formación Cerro Negro fue descrita por Iñiguez Rodríguez y Zalba (1974) como una sucesión sedimentaria de 150 m de potencia constituida por pelitas verdes y rojas ricas en illita y clorita que se apoya discordantemente sobre la Formación Loma Negra. La nueva estratigrafía propone la constitución de un nuevo grupo sedimentario que reúne a la Formación Cerro Negro y unidades del subsuelo, denominado Grupo La Providencia Arrouy *et al.* (2015, 2016). El esquema recientemente propuesto se basa en el estudio sedimentológico y estratigráfico de detalle sobre las sedimentitas que eran conocidas como Formación Cerro Negro, identificando además un paquete sedimentario de más de 150 m conformado por sedimentitas finas de composición silicoclástica de color gris oscuro identificadas en subsuelo y ubicadas espacialmente entre la sección basal margosa y la sucesión netamente heterolítica característica de la sección superior de la Formación Cerro Negro. La identificación de las unidades se realizó mediante el análisis de datos de subsuelo obtenidos de perforaciones realizadas en yacimientos de la empresa Cementos Avellaneda, y en afloramientos de canteras en las localidades típicas del área de Olavarría (canteras Cerro Negro S.A. y El Polvorín). La descripción y caracterización de las sedimentitas de la Formación Cerro Negro permitió la diferenciación de diez facies sedimentarias agrupadas en tres sucesiones de facies (I: margas y arcillitas rojas, II: lutitas negras, limolitas grises e intervalos heterolíticos grises y III: sucesiones heterolíticas y arenosas) que se interpretaron como depositadas en un ambiente de planicie de marea. Los análisis mineralógicos revelan que la arcilla predominante es la illita y en menor medida la clorita.

Integrando las sucesiones estratigráficas reconocidas en superficie con la información de subsuelo se elaboró un modelo evolutivo de los diferentes estadios tecto-sedimentarios del sector central y austral de las Sierras Bayas. El nuevo esquema

estratigráfico se compone de sedimentitas de la sucesión de facies I (Formación Avellaneda), restringida a las sedimentitas del sector inferior del relleno sedimentario que se encuentra sobre una discontinuidad regional a la que le sigue la sucesión de facies II, por encima de la Formación Avellaneda y se la denomina como Formación Alicia y por último la Formación Cerro Negro que queda restringida al tope de la sucesión sedimentaria, equivalente a la sucesión de facies III. Estas tres unidades conforman el denominado Grupo La Providencia el cual es suprayacente al Grupo Sierras Bayas (Arrouy *et al.* 2015, 2016; Gómez Peral *et al.* 2017; Zimmermann 2018).

La paleosuperficie kárstica desarrollada en el tope de la Formación Loma Negra, fue promovida por la disolución meteórica y posteriormente rellena por arcillas y brechas compuestas por cherts (Cingolani 2011). Leanza y Hugo (1987) describen en la base de la Formación Cerro Negro un "miembro fosfático" que sugiere el relleno de un paleovalle durante una regresión marina. El contacto superior con la Formación Balcarce, no está expuesto ya que se halla cubierto por depósitos cuaternarios, pero sí reconocido en perforaciones de exploración en el área de Barker (Cingolani 2011 y referencias allí citadas).

En la Formación Cerro Negro se registran fósiles de acritarcos en pizarras con abundante materia orgánica, asignados a *Leiosphaeridia* y *Synsphaeridium*, son consistentes con una edad ediacariana (Cingolani *et al.* 1991; Gaucher *et al.* 2005). Así mismo Arrouy *et al.* (2016) dan a conocer fósiles del Ediacariano de *Aspidella* y trazas asignadas a *Arumberia* y *cf. Archaeonassa* en el zonas próximas de Olavarría. Edades Rb-Sr obtenidas en illitas sugieren una edad del Neoproterozoico (730Ma) y edades U-Pb de circones detríticos obtenidas de muestras de la base de la unidad registran similares modas (Bonhomme y Cingolani 1980; Cingolani 2010).

#### **2.4.3. Formación Balcarce (Ordovícico-Silúrico)**

La Formación Balcarce definida por Dalla Salda e Iñiguez Rodríguez (1979) representa la última secuencia de transgresión marina de Tandilia. El estudio sobre las paleocorrientes de las sedimentitas de las Sierras Septentrionales fue realizado por Teruggi (1964) quien diferenció dos grupos, el primero en el sector norte y central (Olavarría-Barker) con dirección N-S, correspondiente a las sedimentitas precámbricas y



un segundo en el sector austral correspondiente a Sierras de Balcarce, Chapadmalal y Mar del Plata con dirección E-O. Además, estudios realizados sobre las arcillas de ambas áreas determinaron que el Grupo Sierras Bayas es de naturaleza principalmente illítica y que la Formación Balcarce se distingue de este grupo por tener arcillas caoliníticas (Iñiguez Rodríguez 1974; Iñiguez Rodríguez y Zalba 1974; Di Paola y Marchese 1974).

La Formación Balcarce fue depositada en una cuenca de plataforma abierta marino-somera, con la intervención de eventos glaciares y piroclásticos (Zimmermann y Spalletti 2009; Cingolani *et al.* 2010). Aflora a lo largo del borde sur de las sierras, desde el área de Olavarría hasta Mar del Plata en la costa Atlántica (Figura 2.1 y 2.2). Los máximos espesores expuestos se hallan entre los sectores de Balcarce y Mar del Plata. La unidad es discordante sobre el basamento (zona de Chillar) o sobre las sedimentitas neoproterozoicas, Formación Cerro Negro (perforaciones en Barker) o sobre la Formación Punta Mogotes (perforaciones en Mar del Plata). Su espesor promedio es de unos 75 a 90 m, registrando un espesor de 450 m en el subsuelo de Punta Mogotes. Sus afloramientos se caracterizan principalmente por cuarzo arenitas y arenitas sabulíticas, en menor proporción conglomerados y fangolitas o arcillitas caoliníticas (Dalla Salda *et al.* 2006; Zimmermann y Spalletti, 2009). Localmente, Dristas y Frisicale (1987, 1996, 2003, entre otros) identificaron, en la base de la secuencia, niveles a los que atribuyeron un origen piroclástico reconocidos en el área de Cerro del Corral, el cual fue posteriormente afectado por soluciones hidrotermales.

Estudios de detalle sugieren un ambiente epicontinental de plataforma abierta marino-somera, con desarrollo de facies costeras y de plataforma interna, dominado por mareas e influenciado por eventos de tormentas (Del Valle 1987). Se registraron clinofomas con progradación hacia el sur, confirmando que el margen de la cuenca de Balcarce se localizaba hacia el norte de la región de Tandilia (Poiré *et al.* 2003; Poiré y Gaucher 2009).

Por otra parte, el contenido de trazas fósiles de la formación Balcarce se halla bien documentado en trabajos realizados por diversos autores (Borrello 1966; Poiré *et al.* 2003; Poiré y Spalletti 2005), el cual le confieren una edad del Paleozoico Inferior, entre el Ordovícico y el Silúrico. Seilacher *et al.* (2002), realizaron una correlación icnoestratigráfica de algunas localidades entre Balcarce y Mar del Plata, identificando variada cantidad de icnogéneros de cruzianas.

Edades U-Pb y estudios realizados en circones detríticos en muestras de la cantera Los Pinos, indican una proveniencia de distintas fuentes y edades que llegan al Ordovícico Temprano (475-480 Ma), aunque se sugiere que la sedimentación de la unidad podría extenderse al Ordovícico Tardío - Silúrico Temprano (Rapela *et al.* 2007).

Desde el punto de vista mineralógico y geoquímico, Zimmermann y Spalletti (2009) proponen que gran parte del material detrítico de la Formación Balcarce provino del retrabajo de las antiguas sucesiones de basamento del cratón del Río de la Plata, e incluye material granítico relacionado al rift Cámbrico del sur de África y Sierra de la Ventana (basamento de Ventana).

Edades ID-TIMS tomadas de circones detríticos (Cingolani *et al.* 2010) de muestras provenientes de los niveles piroclásticos caolinizados del área Cerro del Corral, estancia San Ramón, indican episodios volcánicos más antiguos que el Ordovícico-Silúrico, sugiriendo que estos cristales representan el retrabajo de materiales volcánicos del Paleoproterozoico (2,1 Ga).

Otro nivel de interés para la Formación Balcarce es la Diamictita Sierra del Volcán, en el área de Balcarce, halladas entre el basamento cristalino y los bancos cuarcíticos (Spalletti y Del Valle 1984). Estas poseen 4 m de espesor, con presencia de *dropstons* en posición casi vertical que afectan a la estratificación y laminación de las capas. Esta diamictita fue asociada al evento glacial del Ediacariano (Spalletti y Del Valle 1984; Pazos *et al.* 2008), pero actualmente edades U-Pb en circones detríticos sugieren un evento glacial del Hirnantiano (Ordovícico Inferior) y se propone a la Diamictita Sierra del Volcán como el Miembro Inferior de la Formación Balcarce. Este sector de la unidad es correlacionado con un evento glacial de mayor escala registrado en el sur de Sudamérica y Sudáfrica (Zimmermann y Spalletti 2009; van Staden *et al.* 2010).

#### **2.4.3.1. Litotipos de la Formación Balcarce**

Angelelli *et al.* (1973) Estudiaron esta unidad en afloramientos de varios frentes de cantera del área de Batán - Estación Chapadmalal y Balcarce, describiéndola como una espesa cubierta conformada por una sucesión psamo-pelítica donde las ortocuarcitas se presentan en estratos de posición subhorizontal, con espesor variable, de pocos decímetros hasta 3 m, estratificación externa bien marcada, laminar, lenticular y

cuneiforme, e interna plana y tangencial. Mineralógicamente está constituida por cuarzo entre 97-99%, representado por granos subredondeados, subangulosos y angulosos, que en general, acompaña en proporciones subordinadas, clastos verde oscuros a negros de turmalina y láminas de muscovita. La textura es de grano fino, mediana y hasta conglomerádica, con partículas de 3 a 5mm y superiores. En general poseen una alta selección, con granos comprendidos entre 0,5mm y 0,8mm. En un mismo estrato se puede observar alternancia de láminas y capas de grano fino a grueso. Los bancos están separados por finas láminas de arcilla, que forman intercalaciones lenticulares de varios decímetros de potencia, presentes en diferentes niveles. Se destaca que en un mismo frente los estratos suelen mostrar un sensible cambio de textura, aunque existen otras zonas de gran uniformidad textural y destacables espesores. Los bancos de ortocuarzitas fueron descritos como de color blanco a gris claro, en algunos casos amarillos a castaño oscuro y rojizo debido a tinciones con óxidos e hidróxidos de hierro y afectadas por fallas, diaclasas y fisuras.

Análisis petrográficos, mineralógicos y geoquímicos recientes realizados por Zimmermann y Spalletti (2009), llevaron a la distinción de tres litotipos característicos describiendo su petrografía y textura. El grupo o litotipo dominante son las arenitas cuarzosas pobremente clasificadas. Estudios realizados por estos autores con catodoluminiscencia y microscopía electrónica de barrido de electrones retrodispersados, confirmaron que son escasos los granos de cuarzo bien redondeados, siendo la mayoría angulares a sub-angulares con crecimiento de cuarzo secundario. Por otra parte, no determinaron una correlación entre el tamaño de grano y la redondez. Los feldespatos son escasos e identificados principalmente por DRX, al igual que la caolinita, illita y glauconita. Los tres litotipos definidos fueron: Cuarzo-arenitas (cuarcitas típicas) pobre a moderadamente clasificadas o bimodales. Los clastos de cuarzo se presentan con diferentes grados de deformación, con bordes de disolución por presión, y con algún grado de extinción ondulante. Los granos son angulosos a sub-angulosos, escasos redondeados. Los litoclastos metamórficos son de tamaño arena fina sub-angular y sub-redondeada, representados por gneises, granulitas, esquistos y cuarzo policristalino. Los litoclastos sedimentarios corresponden a arenitas gruesas sub-redondeadas a sub-angulares. Los minerales accesorios incluyen mica blanca, glauconita, turmalina, rutilo y circón. La matriz es menor al 3% y raramente supera el 10%, conformada por cuarzo y

muscovita y el cemento está representado por el sobrecrecimiento de cuarzo secundario, parches de micro-cuarzo, caolinita e illita. El segundo tipo litológico identificado corresponde a vaques cuarzo-micáceos. El tamaño de grano varía de fino a grueso, son pobre a moderadamente clasificados (bimodales). Tienen 30% de cuarzo con disolución por presión, y predominio de clastos angulosos a sub-angulosos. Se destacan escamas u hojuelas de caolinita con morfología típica de fragmentos vítreos, y otras en reemplazo pseudomórfico de los feldespatos. También aparecen fragmentos de posible origen volcánico, elongados y curvados, pardo oscuros, formados por illita de 10 a 35  $\mu\text{m}$ . Los litoclastos metamórficos son de tamaño arena fina, sub-angulosos a sub-redondeados, constituidos por gneises, granulitas y esquistos. Los clastos sedimentarios son principalmente limolitas, aunque también mencionan clastos de origen volcánico (angulosos). Los minerales accesorios son muscovita, apatita, circón, anfíboles y cromita. Las rocas presentan un 10 a 20% de matriz, de cuarzo, muscovita, albita, caolinita, illita y anfíbol. El cemento está conformado por cuñas de caolinita intercaladas con muscovita y rutilo hidrotermal. El tercer tipo corresponde a fangolitas o arcillitas, y los niveles típicos fueron descritos en la cantera San Ramón. Son ricas en caolinita con textura finamente laminada, con *slumps*, carpetas de tracción y canales. Están compuestas por cuarzo, feldespato caolinizado y caolinita detrítica. El cuarzo, posee tamaño de grano fino a medio, es angular y con engolfamientos de origen volcánico. El feldespato está enteramente reemplazado por caolinita. Los litoclastos fueron reconocidos como fragmentos de fiames escamosos reemplazados por caolinita y aparece titanita como accesorio. La matriz constituye el 80-95 % de la roca, y es rica en caolinita, cuarzo y rutilo hidrotermal, sin cemento. En base a su textura y estructura estos niveles fueron interpretados como depósitos piroclásticos retrabajados. Estudios mediante DRX realizados sobre arcillas de diferentes canteras, desde el área de Cerro del Corral, cantera San Ramón próximo a San Manuel hasta Mar del Plata, muestran la presencia de caolinita y clorita-esmectita en sectores próximos a San Manuel (zona oeste), caolinita acompañada de muscovita y clorita en los alrededores de Balcarce (zona central), aunque en el sector oriental las arcillas son predominantemente caoliníticas con menor cantidad de illita-muscovita-clorita, y específicamente en el sector de Batán la asociación es caolinita-illita-muscovita (Zimmermann y Spalletti 2009).

## 2.5. ACTIVIDAD EXTRACTIVA-MINERA DE LAS ROCAS CUARCÍICAS DE LA FORMACIÓN BALCARCE

Las rocas cuarcíticas de la Formación Balcarce, se encuentran aflorando en el sector sur de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires, desde el área de Chillar (partido de Azul) hasta la costa atlántica en Mar del Plata. Las cuarcitas Mar del Plata (llamadas así de manera comercial), en particular los afloramientos presentes en el perfil Balcarce-Mar del Plata son las más estudiadas desde el punto de vista geológico y tecnológico para su utilización en obras civiles y viales (Añón Suárez *et al.* 1969; Angelelli *et al.* 1973). Son recientes los trabajos realizados en relación a su uso como agregado para hormigón desde el punto de vista de su reactividad alcalina potencial en hormigones de cemento portland (Coelho dos Santos y Falcone 2012; Coelho dos Santos *et al.* 2014a, b, 2016, 2017a).

La minería de agregados pétreos cuarcíticos en el partido de General Pueyrredón, se establece desde la época fundacional de la ciudad de Mar del Plata (1874) y en la zona urbana y peri-urbana de Batán-Chapadmalal entre 1920 y 1930. La minería principal se centra en la explotación de las ortocuarcitas de la Formación Balcarce como piedra partida y bloques de escollera, y también en la década de 1930 se inicia la actividad extractiva de las arcillas, las cuales intercalan entre los bancos cuarcíticos de mayor potencia (del Río *et al.* 2015; Coelho dos Santos *et al.* 2017a). Para el año 1960, de las 21 canteras existentes en la zona, 14 correspondían al área de Batán-Estación Chapadmalal (Ceppi Cabrera 1964; Angelelli *et al.* 1973), la mayoría de las cuales se encuentran actualmente inactivas. Las arcillas que intercalan con los estratos cuarcíticos se presentan como niveles lenticulares de hasta 1m de espesor, poseen coloración blanquecina a verdosa, hasta amarillenta y rojiza, siendo recuperadas en algunos casos para uso en la industria cerámica (Zalba *et al.* 2010b, 2016) y son extraídas secundariamente de la explotación de las cuarcitas, utilizadas como agregado en la construcción de obras civiles (Coelho dos Santos *et al.* 2014a).

En la localidad de Balcarce se desarrollan afloramientos de gran extensión y con alturas que rondan los 100 m. Los mismos conforman serranías aisladas de morfología mesetiforme y laderas abruptas, sobre las cuales se han desarrollado amplios frentes de

explotación de cuarcitas, aunque estas canteras se encuentran actualmente inactivas (Coelho dos Santos *et al.* 2017b).

Angelelli *et al.* (1973) cita para finales de la década de 1960, 17 canteras de cuarcita y 8 de arcilla refractaria en el partido de General Pueyrredón y 1 de arcilla refractaria en Balcarce. Actualmente sólo algunas canteras de cuarcita son explotadas en el sector de Batán-Estación Chapadmalal y ninguna en la localidad de Balcarce.

### 2.5.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal

Esta área es la más productiva de la región de las Sierras Septentrionales en lo que se refiere a rocas cuarcíticas. En este sector hay una serie de canteras que se encargan de la extracción de la cuarcita Mar del Plata. De su explotación se obtienen secundariamente materiales arcillosos (caolinita-illita-cuarzo) de posible uso cerámico e ingenieril (Forte *et al.* 2014; Coelho dos Santos *et al.* 2017a). Otras canteras siguen siendo de interés como potenciales yacimientos, tanto de cuarcitas como de arcillas (Coelho dos Santos *et al.* 2014a, 2017a, b; Zalba *et al.* 2016).

Coelho dos Santos *et al.* (2014a, 2016) realizaron una revisión y actualización de estudios geológicos, petrológicos y petrográficos con fines ingenieriles, sobre 4 canteras de la zona, estudiadas previamente por Angelelli *et al.* (1973). La cantera Minera es una de las principales en producción de áridos en el área de Batán-Estación Chapadmalal. En estos frentes el espesor de los estratos cuarcíticos varía de mediano a grueso (50 cm hasta 1 metro), y poseen diaclasas de longitudes variables que los cortan a distintos ángulos, además se hallan teñidos por óxidos e hidróxidos de hierro, y pueden tener concentraciones de minerales pesados en algunos sectores (Figura 2.4.a). Las intercalaciones de arcillas son escasas, excepto en el tope del banco inferior de explotación, donde se desarrolla una capa de aproximadamente 1 m de espesor con gran continuidad lateral.

En la Figura 2.4b y c se observan los frentes de la cantera La Florida (ex - Los Curros) la segunda en producción, que actualmente presenta 3 bancos de explotación de cuarcita. En estos, se identifican estratos de hasta 2 metros de espesor, con tonalidades blanca grisácea y amarillenta debido a la presencia de hidróxidos de hierro y poseen una estratificación tabular y cuneiforme, y una estratificación interna masiva, aunque

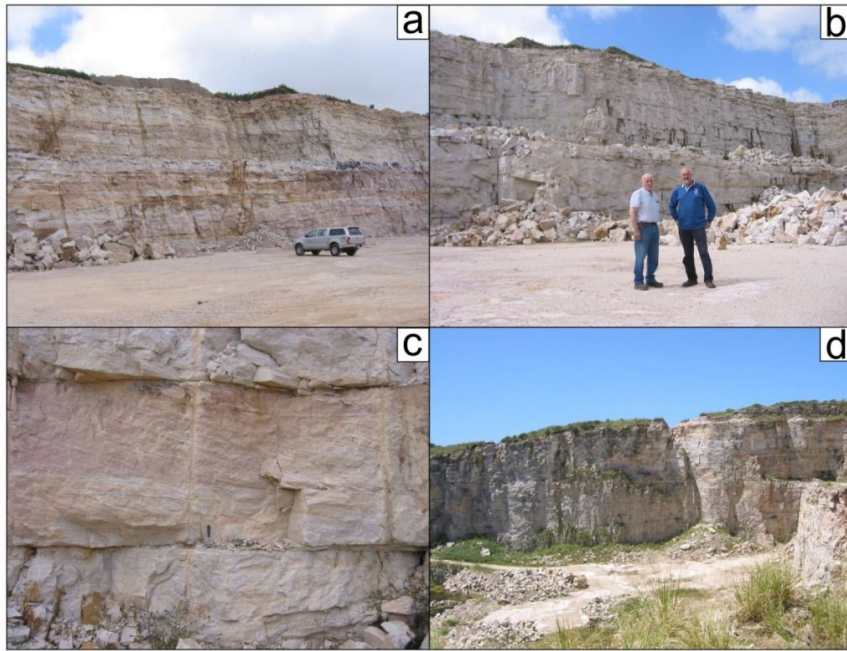
algunos estratos también poseen estratificación entrecruzada plana. A diversas alturas de los cortes, intercalan con las cuarcitas capas lenticulares de arcillas verdosas claras, de espesores variables (hasta 30 cm).

Por otra parte, cantera Pétreá, actualmente en reserva, se desarrolla en 3 bancos no muy bien definidos en cuanto a continuidad y altura. El desnivel total es de aproximadamente 30 metros (Figura 2.4d). Los frentes se hallan diaclasados y afectados por pequeñas fallas de desplazamiento horizontal. Entre dichos bancos intercalan capas lenticulares de arcillas, distribuidas irregularmente.

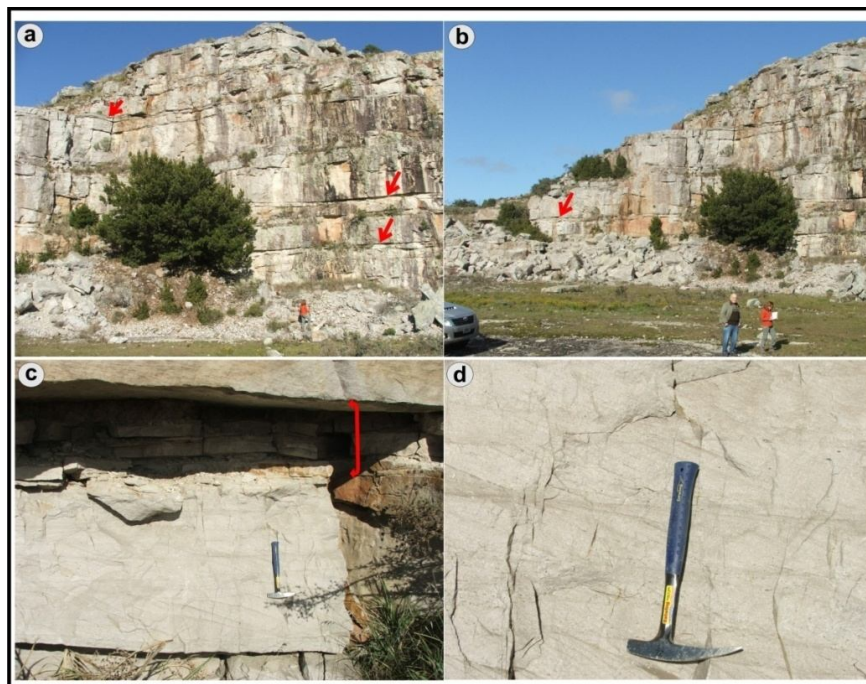
Por último, la cantera La Cerámica (ex – Cerámica del Plata), es un laboreo antiguo cubierto por vegetación con dirección N-S. El sector N está explotado en 3 niveles y el SE en un único banco de 12 a 15 metros de altura. Los niveles arcillosos son más potentes, hasta 1 m de espesor. Además se identificaron areniscas, arcillitas ferruginosas y pequeños niveles de ocre de alta dureza desarrollados en el contacto entre las capas cuarcíticas y arcillosas. El piso de esta cantera está constituido por un conglomerado fino compuesto por clastos redondeados de cuarcita (Coelho dos Santos *et al.* 2014a).

### 2.5.2. Área de Balcarce

En el área de Balcarce, Angelelli *et al.* (1973) citan cuatro canteras de rocas cuarcíticas; describen a la cantera La Barrosa, ubicada en cercanías del autódromo de Balcarce, que consiste en un corte de 35 m de largo y 15 m de alto que muestra una sucesión de bancos de cuarcita de grano fino a mediano de hasta 2 m de potencia con intercalaciones de lentes de arcilla de color verde grisáceo, de hasta 50 cm de espesor. Las otras tres canteras se hallan en el cerro San Agustín (Los Pinos, Sierras de Balcarce y Tea). La cantera Sierras de Balcarce, ubicada en el faldeo oeste del cerro, se desarrolla en dos amplios frentes de 400 m de longitud conformados por estratos de cuarcita de color blanco grisáceo, de grano fino a medio, los cuales alcanzan potencias de hasta 3 m y muestran estratificación entrecruzada e intercalan con capas lenticulares de arcilla de hasta 1,8 m. En el faldeo oriental del cerro se ubica la cantera Los Pinos que se desarrolla en un corte de 100 m de largo y 25 m de altura. Se observan arenitas cuarzosas de grano medio a fino en estratos de hasta 3 m de potencia, de color blanco grisáceo que intercalan con lentes de arcilla de hasta 50 cm de espesor (Figura 2.5).



**Figura 2.4:** (a) Frente diaclasado y con óxidos de hierro de cantera Minera (frente sur, orientación SE-NW). (b) Frente de cantera La Florida (vista hacia el sur, orientación (ESE-WNW) y (c) detalle de estratos gruesos de cuarcita con estratificación entrecruzada. (d) Vista del frente SE de cantera Pétrea de tonos blanco-grisáceo y amarillento (Coelho dos Santos *et al.* 2014a).



**Figura 2.5:** Cantera Los Pinos. (a) y (b) Vista general del frente de cantera de orientación SE-NW. Las flechas rojas indican los niveles de arcillitas que intercalan con espesos bancos de cuarcita. (c) Nivel de 30 cm de arcillita entre dos estratos de cuarcita de granulometría muy fina de tonos grisáceo y amarillento (sector SE del frente); (d) detalle de (c) donde se destaca la cuarcita con estratificación entrecruzada interna fina (Coelho dos Santos *et al.* 2017a).



## **CAPÍTULO 3. ASPECTOS QUÍMICOS DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CUARCÍTIICAS**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

### **3.2. GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CLÁSTICAS**

#### **3.2.1. Meteorización y relación con los procesos sedimentarios**

#### **3.2.2. Diagénesis**

##### **3.2.2.1. Fábrica diagenética**

##### **3.2.2.2. Cementación silícea**

##### **3.2.2.3. Matriz**

### **3.3. TIPOS DE ARENITAS CUARZOSAS**

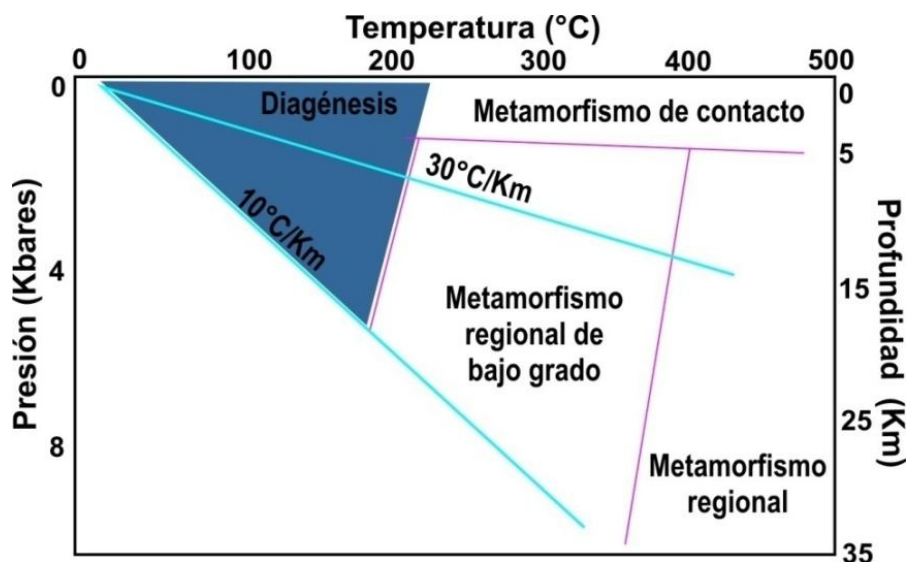
#### **3.3.1. Aspectos diagenéticos de las sedimentitas de las Sierras Septentrionales**

#### **3.3.2. Texturas de las arenitas de la Formación Balcarce**

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Las rocas sedimentarias clásticas están constituidas por partículas provenientes de rocas preexistentes. En su formación intervienen varios procesos, tales como meteorización (química y/o física), erosión, transporte, depositación y diagénesis.

La distancia, el medio de transporte de los sedimentos y la naturaleza de la cuenca sedimentaria (tectónica, profundidad, química de las aguas, etc.) determinan el tipo de desgaste y ruptura de los materiales durante el transporte y el grado de transformación durante la diagénesis posterior (González Bonorino 1972). En la diagénesis, el sedimento es convertido en una roca consolidada y tienen lugar procesos tales como la compactación, recristalización, disolución, reemplazo, autigénesis y cementación. Los mismos comienzan inmediatamente después de producida la depositación y continúan hasta llegar al campo del metamorfismo a temperaturas inferiores a los 200°C y presiones equivalentes al gradiente geotérmico correspondiente (Gómez Peral 2008 2011; Zalba *et al.* 2010a). Los límites entre la diagénesis y los procesos metamórficos se esquematizan en la Figura 3.1 (Burley y Worden 2003).



**Figura 3.1:** Relación Presión vs. Temperatura de los regímenes diagenéticos y metamórficos (Modificado de Burley y Worden 2003).

## 3.2. GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CLÁSTICAS

La composición química de las rocas sedimentarias clásticas depende de la naturaleza de los materiales de las que derivan, de los factores intervinientes durante la meteorización, erosión, transporte de detritos y procesos posteriores vinculados a la depositación y diagénesis de los sedimentos (Middleton 1960; Piper 1974; Bhatia 1983; McLennan *et al.* 1993; Cox y Lowe 1995).

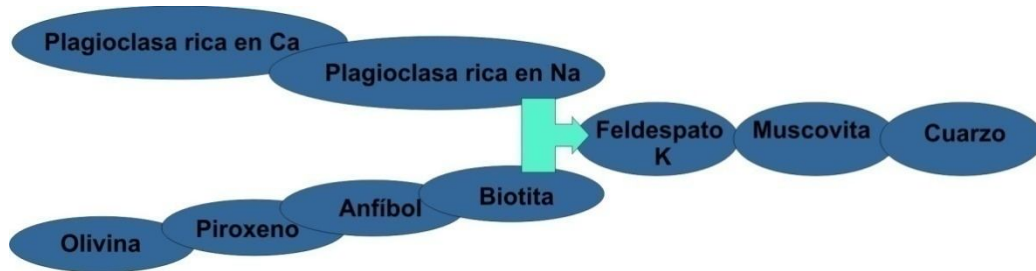
La meteorización de rocas preexistentes produce la descomposición química parcial o total de los minerales, y un aumento en la permeabilidad y/o debilitamiento de la unión entre ellos. Factores externos importantes en la formación de sedimentos y sedimentitas son el clima y el relieve que condicionan el grado de alteración y movilización de las partículas. Factores internos, como el pH y el potencial rédox (Eh), son muy variables en el medio externo. En la sedimentación el pH varía entre oxidante en la zona de meteorización a levemente reductor en ciertos ambientes subaéreos y en el ambiente diagenético (González Bonorino 1972).

### 3.2.1. Meteorización y relación con los procesos sedimentarios

Desde el punto de vista geoquímico, los cambios que experimentan las rocas durante la meteorización química son los más importantes. La transformación fundamental es la hidrólisis de los silicatos, principalmente de los feldespatos. La estructura silicática, donde el hidrógeno ocupa los sitios de los cationes metálicos, es inestable, se rompe y se convierte en un agregado amorfo que se reordena con el aluminio ( $AlSi_3O_8^-$ ,  $Al_2Si_2O_8^{-2}$ ) en coordinación octaédrica y se adosa a otra capa constituida por tetraedros de  $SiO_4^{-4}$ . La unión tetraedro-octaedro da origen a diferentes arcillas. Por otra parte, el cuarzo resulta prácticamente insoluble en la mayoría de los ambientes, al igual que otros minerales como la muscovita y el rutilo. Por su comportamiento en la zona de meteorización los elementos químicos se distribuyen básicamente en tres grupos distintos: cationes solubles fácilmente movilizables ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ), sílice, difícilmente soluble (sólo en condiciones extremas) e hidróxidos insolubles de Al y Fe (González Bonorino 1972.)

Teniendo en cuenta que el potencial de meteorización es la tendencia de los minerales a transformarse en otras especies minerales en equilibrio con el medio, los

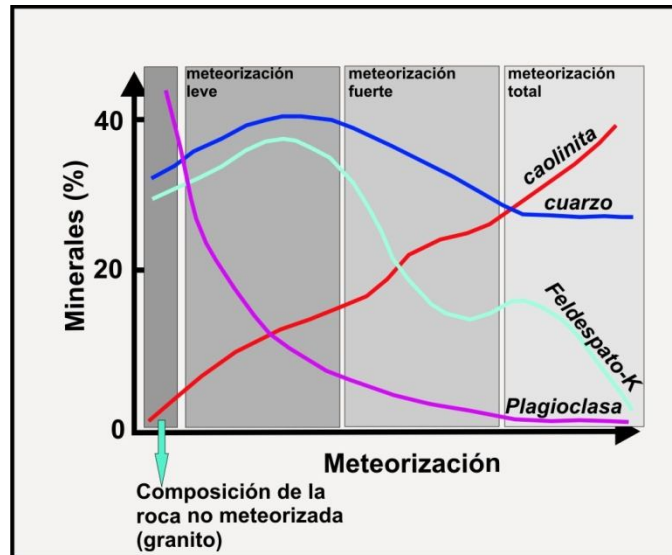
minerales primarios que se formaron primero a mayor temperatura serán los más meteorizables (Tarbuck y Lutgens 2005). Esto fue esquematizado por Goldich (1938) que elaboró una serie de estabilidad mineral (Figura 3.2), inversa a la serie de Bowen de cristalización magmática.



**Figura 3.2:** Orden creciente de izquierda a derecha de la resistencia de los minerales primarios a la meteorización (Goldich 1938).

En el ambiente exógeno, los productos de la meteorización química y física son transportados en forma de detritos y/o solutos. El primero comprende dos tipos: el detrito residual de rocas y minerales con escasa modificación química, y el detrito hidrolítico producto de la transformación de los silicatos primarios, principalmente arcillas. El soluto está formado por sales de cationes alcalinos y alcalinotérreos (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos) (González Bonorino 1972).

En la Figura 3.3 se muestra, los productos finales de una meteorización química intensa de una roca granítica, principalmente cuarzo residual y arcilla caolinítica e illita como producto de la alteración de los feldespatos; aunque también son comunes óxidos de hidróxidos de Al y Fe. La meteorización y alteración de rocas basálticas da origen a distintos productos, entre ellos esmectitas y óxidos e hidróxidos de Fe (Goldich 1938).



**Figura 3.3:** Relación entre el grado de meteorización y el porcentaje de minerales primarios y secundarios (Goldich 1938).

El grado de diferenciación geoquímica en los sedimentos depende de las condiciones geológicas del proceso sedimentario, de la intensidad de la meteorización y de la morfología de la cuenca determinante de la energía del transporte. La diferenciación tiende a ser menor en regiones tectónicamente activas, donde la erosión y el transporte rápido dificultan la meteorización química y física de los materiales. El grado de diferenciación es mayor en las rocas clásticas de plataforma estable (González Bonorino 1972; Scasso y Limarino 1997).

### 3.2.2. Diagénesis

La diagénesis produce cambios químicos y físicos que conducen a la litificación del sedimento. Estos cambios se traducen en la composición y textura de las rocas silicoclásticas, y la intensidad de los mismos dependerá de la profundidad y/o temperatura del soterramiento. La compactación, cementación, solución-cristalización, reemplazo de minerales, y carbonización y degradación de la materia orgánica son procesos que actúan en la transformación de un sedimento en una roca. El primer fenómeno diagenético es la compactación por la expulsión del agua original. Esta fase es importante en arcillas y limos, no así en arenas y gravas. El proceso principal en la diagénesis es aquel vinculado a la precipitación de sustancias sólidas en los poros de una

roca clástica a partir de soluciones circulantes en el subsuelo, es decir la cementación. Los cementos más comunes son sílice, carbonatos, principalmente de calcio (calcita), y óxidos e hidróxidos de hierro. Otro fenómeno importante es la cristalización de las partículas que componen el material detrítico fino entre los granos de granulometría mayor (matriz) fundamentalmente de areniscas. La matriz, que está compuesta en su mayor parte por arcilla, mica, cuarzo y feldespato, crece lo suficiente para entrelazarse y dar cohesión a la trama. Los granos de arena (cuarzo, feldespato, turmalina, etc.) también pueden desarrollarse dentro del sedimento, siendo el cuarzo el más común, alrededor de cuyos granos crece una zona que al ligar las partículas vecinas, convierte a las arenas cuarzosas en arenitas cuarzosas o cuarcitas (González Bonorino 1972; Scasso y Limarino 1997; Gómez Peral 2008).

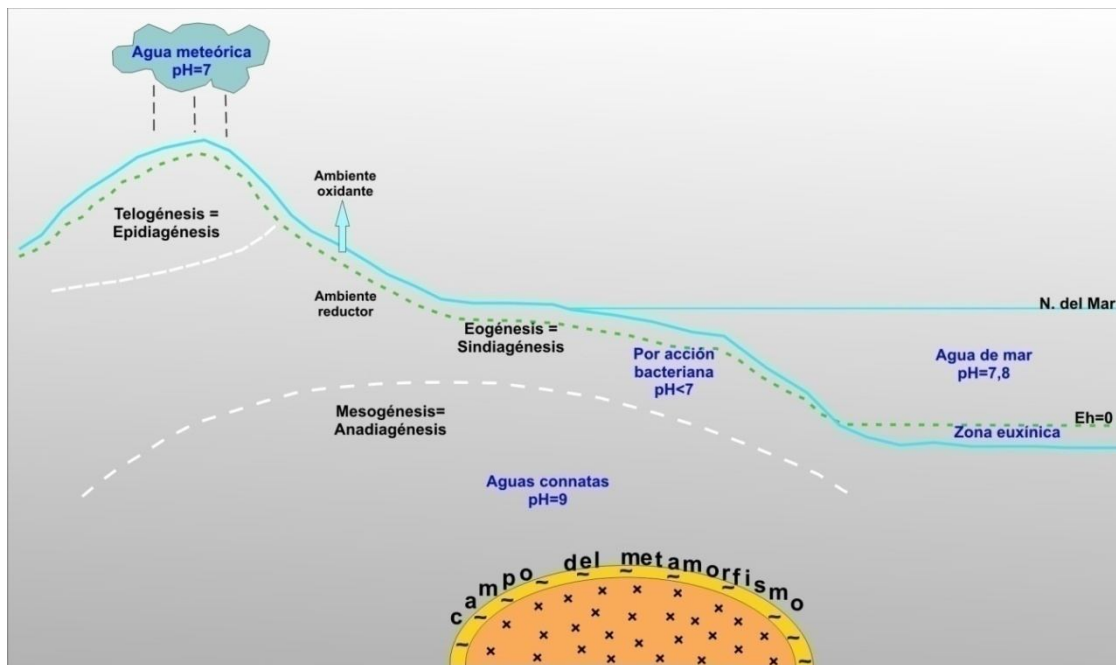
La autigénesis es el crecimiento de individuos cristalinos alrededor de un núcleo preexistente del mismo mineral, siendo los minerales más comunes feldespatos, turmalina, dolomita, arcillas y zeolitas. Los fenómenos de la diagénesis se desarrollan en condiciones levemente alcalinas y reductoras. El oxígeno atmosférico, por lo general no alcanza el interior de los sedimentos en el fondo de las cuencas. En profundidad, el agua de mar, excepto en zonas someras y agitadas, es levemente reductora. Por ello, los sedimentos marinos tienden a presentar una tonalidad verdosa debido a la presencia de hierro ferroso. Por el contrario, los sedimentos depositados en ambientes continentales (ríos, deltas) expuestos a la circulación de aguas atmosféricas, son de tonalidad rojiza por la oxidación del hierro. Por otra parte, la demostración del carácter reductor de la diagénesis es la carbonización y bituminización de la materia orgánica, que en medios oxidantes tiende a descomponerse sin dejar residuo (Gómez Peral 2008 y referencias allí citadas).

Los regímenes diagenéticos se dividen en tres tipos principales: eogénesis, mesogénesis y telogénesis que corresponden respectivamente a una diagénesis subsuperficial, de soterramineto, y a levantamiento tectónico o relacionado a una discontinuidad. En el Cuadro 3.1 se relacionan las etapas de la diagénesis, según Fairbridge (1967) y Choquette y Pray (1970), mostrando los procesos que se desarrollan en cada uno de ellas.

ETAPAS DE LA DIAGÉNESIS		PROCESOS RELACIONADOS
Fairbridge (1967)	Choquette y Pray (1970)	
Sindiagénesis	Eogénesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porosidad abierta</li> <li>- Circulación de fluidos</li> <li>- Reducción de la porosidad</li> </ul>
Anadiagénesis	Mesogénesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Expulsión del agua intersticial</li> <li>- Reducción de porosidad</li> <li>- Litificación</li> <li>- Deshidratación</li> <li>- Transición al metamorfismo</li> </ul>
Epidiagénesis	Telogénesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emersión y reacción con aguas freáticas</li> <li>- Creación de porosidad</li> </ul>

**Cuadro 3.1:** Principales procesos que sufre el sedimento durante la diagénesis (Fairbridge 1967; Choquette y Pray 1970).

En la Figura 3.4 se resume la participación de las aguas superficiales y sub-superficiales que interfieren en la eogénesis o sindiagénesis y en la telogénesis o epidíagénesis, y de las aguas que afectan el ambiente mesogénético o anadiagenético hasta las zonas próximas al metamorfismo (Fairbridge 1967; Choquette y Pray 1970).



**Figura 3.4:** Ambientes de la diagénesis (modificado de Fairbridge 1967 y Choquette y Pray 1970).

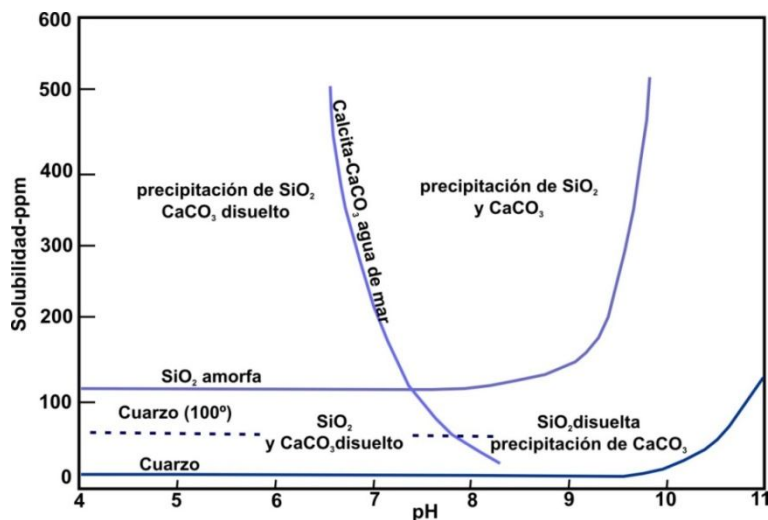
Durante la eogénesis suceden procesos de disolución o reemplazo de componentes inestables, precipitación de cuarzo, feldespatos, arcillas, zeolitas, etc., y pirita (ambientes reductores). En sedimentos marinos y transicionales, las transformaciones en la eogénesis incluyen la precipitación de nuevas fases como ópalo, sílice, carbonatos, sulfatos y zeolitas. También se produce una redistribución mineralógica y química que conduce a la formación de arcillas autigénicas, cloritas, chamosita, glauconita, etc., crecimiento secundario de cuarzo, feldespato, cementos carbonáticos, etc. Las alteraciones producidas durante la mesogénesis son albitización de feldespatos, cloritización de esmectitas e illitización de la caolinita, además de compactación química, y cementación carbonática y silíceo. Por otro lado, durante la telogénesis predomina la caolinización y disolución de carbonatos. Las modificaciones telogenéticas se desarrollan a una cierta profundidad o en la superficie, sujetas a procesos de meteorización, alteración y disolución y/o formación de cementos. También puede darse la oxidación de sulfuros, disolución de minerales máficos y alteración de feldespatos detríticos a caolinita. Por ello, en esta etapa se origina una pérdida adicional de información sobre los procesos previos y puede conducir también a un aumento o disminución de la porosidad de las rocas. El cambio de la mesogénesis a la telogénesis puede ser brusco y producirse en cualquier instancia (Gómez Peral 2008). En el Cuadro 3.2 se describen los procesos que suceden en las tres etapas de la diagénesis.

Es importante la identificación de facies diagenéticas para caracterizar un sector de la columna sedimentaria sobre la base de sus rasgos diagenéticos de acuerdo a cambios en la mineralogía, tipos de cementos, etc. Su desarrollo depende de los cambios en el fluido intersticial y de las variaciones en las condiciones de pH y del potencial redox (Eh). El grado y velocidad de disolución va a depender de la fase mineral (cristalina o amorfa), del pH del agua de poro y de la temperatura. El diagrama de solubilidad calcita vs. sílice (Figura 3.5) es un ejemplo de cómo influye el pH en la estabilidad de las fases (Scasso y Limarino 1997).



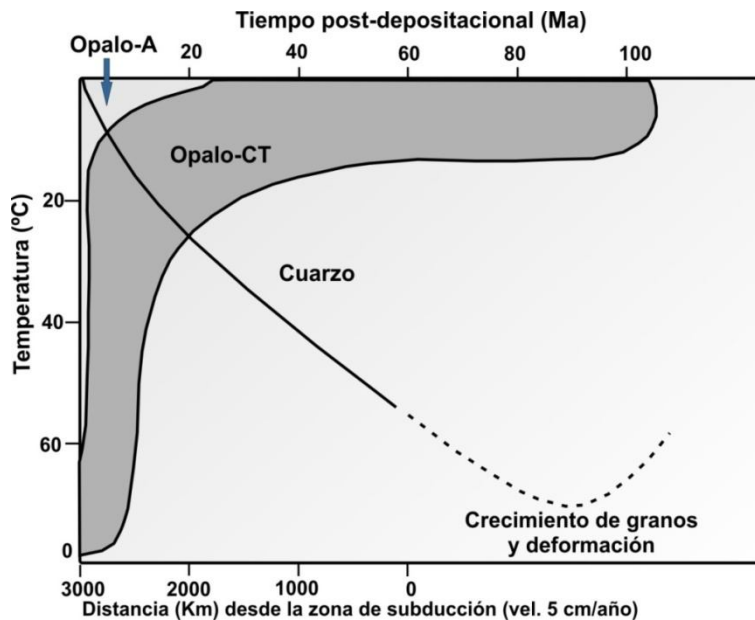
ETAPA DE LA DIAGÉNESIS	PROCESOS	PRODUCTOS
<b>EOGÉNESIS</b>	- Bioturbación	- Destrucción de estructuras primarias - Formación de trazas y marcas orgánicas
	- Disolución y reemplazo	- Pirita (ambientes reductores) u óxidos de hierro (ambientes oxidantes) - Precipitación de cuarzo y feldespatos (sobrecrecimiento), cemento carbonatico, caolinita y clorita
<b>MESOGÉNESIS</b>	- Compactación física - Compactación química (presión - disolución) - Cementación - Disolución promovida por fluidos de poros - Autigénesis de minerales de arcilla	- Aumento de empaquetamiento - Disolución parcial de granos; disminución de porosidad - Carbonatos y sílice. Disminución de porosidad - Reemplazo parcial o total de silicatos y matriz arcillosa (ej. feldespato por calcita) - Alteración de un mineral de arcilla por otro (ej. esmectita a clorita o caolinita a illita)
<b>TELOGÉNESIS</b>	- Ingreso de fluidos meteóricos - Disolución - Oxidación - Precipitación	- Alteración de feldespatos a minerales de arcilla (caolinización) - Disolución de carbonatos - Oxidación de carbonatos de hierro a óxidos de hierro y de pirita a sulfatos (yeso) - Nuevos cementos: síliceos o carbonáticos

**Cuadro 3.2:** Principales procesos y productos producidos durante la diagénesis. Tomado de Gómez Peral (2008).



**Figura 3.5:** Diagrama de solubilidad (ppm) vs. pH de las fases calcita-cuarzo-sílice amorfa en condiciones superficiales.

Para promover la disolución de la sílice es necesario que se produzca un incremento en el pH de las soluciones. Este incremento puede darse por el consumo de iones  $H^+$  por disolución de carbonatos y feldespatos. La solubilidad del cuarzo es mucho menor que la de la sílice amorfa (ópalo) debido a una mayor estabilidad estructural del cuarzo (Figura 3.5). Los cambios que ocurren en sedimentos silíceos, tipo chert y otros sedimentos son producidos por procesos diagenéticos, siendo la temperatura y el tiempo los principales factores que regulan estos cambios. En la Figura 3.6 se observa que otra variante en el sistema es la proximidad de los depósitos sedimentarios a las zonas de mayor gradiente geotérmico (Boogs 1992).



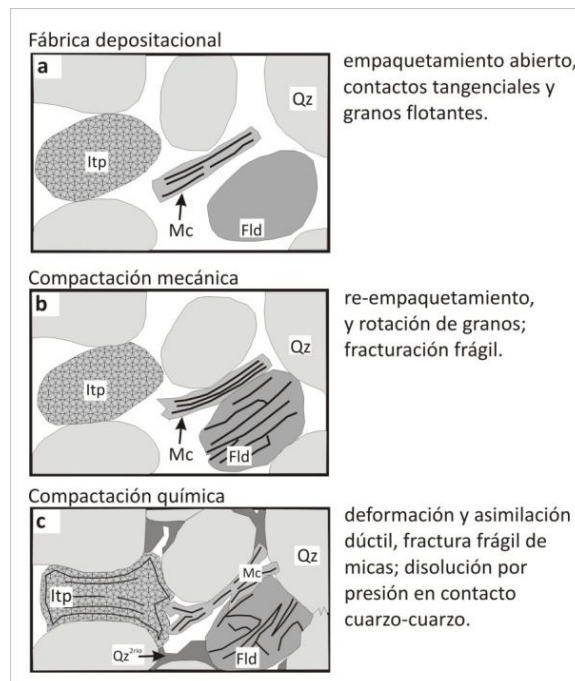
**Figura 3.6:** Transformaciones diagenéticas de la sílice según regiones con alto y bajo gradiente geotérmico (Modificado de Boogs 1992).

### 3.2.2.1. Fábrica diagenética

Los procesos que llevan a la construcción de una fábrica diagenética (compactación, disolución, cementación) incluyen a todas las fábricas originadas por procesos capaces de producir cambios en la disposición geométrica de las partículas. La compactación produce el empaquetamiento del sedimento por un aumento del enterramiento y de la carga (estrés efectivo), el cual se define como la diferencia entre la presión litostática y la presión de fluido. Se asume que la porosidad inicial en una arenisca es de 40%. En

general, la pérdida de porosidad es dominada por la compactación cuando el volumen intergranular es mayor, y por la cementación cuando éste es menor (Scasso y Limarino 1997; Gómez Peral 2008).

Harwood (1991, en Gómez Peral 2008) divide a las fábricas diagenéticas en: 1) de compactación mecánica, que conduce a una mayor aproximación de los clastos y a la deformación de los granos dúctiles, o fractura y 2) de compactación química, la cual se desarrolla cuando el espacio se ha reducido lo suficiente para producir el comienzo de la disolución de granos en los puntos de contacto (disolución por presión). La compactación mecánica sería dominante hasta 1 km de profundidad. Desde la depositación y hasta una determinada profundidad aumentan los contactos rectos y cóncavo-convexos. A los 4 km aparecen los contactos suturados producto de la presión-disolución, y a los 6 km la porosidad de las areniscas se reduciría a cero (Scasso y Limarino 1997). Worden *et al.* (2000) establecieron que el grado de compactación dependerá de la relación entre clastos dúctiles y frágiles, y que la compactación en una arenisca se produce en respuesta el acomodamiento de granos, deformación (plástica o dúctil), disolución y fracturación frágil (Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Procesos de compactación en areniscas (Burley y Worden 2003, modificado de Worden *et al.* 2000). **Qz:** cuarzo detritico; **Fld:** feldespato detritico; **Mc:** mica detritica; **Itp:** interclasto pelítico (dúctil); **Qz<sup>2rio</sup>:** crecimiento de cuarzo secundario.

Por otro lado Tucker (1988), divide a las fábricas diagenéticas en una relacionada a procesos de compactación y otra a alteraciones químicas (Cuadro 3.3).

FÁBRICA	CLASE	PROCESO
DIAGENÉTICA	Fábrica por compactación	Compactación mecánica o frágil
		Compactación química o presión disolución
	Fábrica de alteración química	Cementación
		Disolución
		Reemplazo mineralógico (minerales autigénicos)

**Cuadro 3.3:** Tipos de fábricas diagenéticas en rocas sedimentarias (Tucker 1988).

### 3.2.2.2. Cementación silícea

La sílice aparece en gran variedad de formas diagenéticas. La única termodinámicamente estable es el cuarzo, que crece secundariamente alrededor de los granos del mismo mineral. El ópalo CT (cristobalita-tridimita) y ópalo A (amorfo) aparecen como rebordes fibrosos alrededor de granos detríticos, principalmente de origen volcánico, o como "cristales" sub-microscópicos en cemento opalino. El cuarzo puede aparecer como chert microcristalino, mosaicos gruesos o como fibras elongadas de calcedonia. El intercrecimiento de cuarzo-arcilla en pequeñas masas de matriz es frecuente. Es destacable que el término microcuarzo se utilice para cristales de tamaño inferior a los 20 µm. El ópalo es un cemento común e inestable, que durante la diagénesis tiende a cambiar rápidamente a chert, aunque la cinética de la reacción en condiciones de escaso sepultamiento puede ser muy lenta (Figura 3.6). El crecimiento secundario del cuarzo, se produce en continuidad óptica con el grano y por lo común queda incluido un reborde de impurezas, como testigo del borde original del clasto, aunque otras veces no es visible y deben emplearse técnicas de luminiscencia para identificarlo (Scasso y Limarino 1997).

Un factor importante que se debe considerar es la fuente de sílice diagenética. La disolución por presión, por ejemplo, puede aportar 1/3 del volumen total de sílice. Las fuentes de cementos cuarzosos pueden dividirse en internas (albitización, alteración de feldespatos, pasaje de esmectita a illita, presencia de sílice amorfa, generación de

estilolitas) y externas provenientes de rocas que yacen en áreas próximas. El ópalo A y el ópalo C-T se disuelven en agua a presión y temperatura ambiente (120 y 70 ppm respectivamente), pero la solubilidad de la sílice aumenta rápidamente con la temperatura, siendo a 150°C, 20 veces mayor que a temperatura ambiente. Por lo tanto una cementación con ópalo es típica de poca profundidad, por el contrario, en areniscas profundamente soterradas, el cemento es casi siempre cuarzo por su menor solubilidad y porque a mayor temperatura es más probable que precipite una fase ordenada. El aumento de la presión litostática genera un incremento en la solubilidad de los granos, lo que provoca un incremento del contenido de sílice en solución, que puede migrar o ser precipitada localmente. La mesogénesis temprana es la etapa más probable de cementación silícea. Sin embargo el crecimiento secundario de cuarzo, estaría asociado a profundidades mayores (mesogénesis intermedia a tardía) y a temperaturas de hasta 200°C, pero a medida que aumenta la profundidad se requieren concentraciones más elevadas de sílice en solución en las aguas porales para que el cuarzo pueda precipitar (Worden y Morad 2000). Es importante considerar que a medida que la temperatura aumenta, los límites de los cristales tienden a migrar, incrementando el tamaño de los granos. Además, en rocas sedimentarias antiguas se distinguen diferentes formas de cuarzo diagenético como crecimiento secundario, agregados cristalinos, venas de soldadura y mosaicos de recristalización. Aunque el cemento silíceo es el más importante en la oclusión de poros en las areniscas a profundidades mayores a 2,5 km, su origen y el control de la distribución dependen de la mineralogía, temperatura, presión y fuentes de sílice. La cementación con cuarzo es susceptible a los cambios térmicos, constituyendo un cemento mayoritario en aquellas rocas afectadas por temperaturas mayores a 80°C, aunque es menos abundante en rocas expuestas a sobrepresión (Gómez Peral 2008). Otro punto importante en la cementación silícea es que la conversión de ópalo A (amorfo) a ópalo C-T (cristobalita-tridimita) que se produce a los 50°C y la transformación a cuarzo estaría cercana a los 80°C (Pollastro 1993).

### **3.2.2.3. Matriz**

La matriz representa un detrito fino que se ha depositado simultáneamente con los clastos mayores, lo que indica condiciones especiales del agente de transporte.

Dickinson y Suczek (1979) reconocieron 4 tipos: protomatriz o matriz primaria(depositacional); ortomatriz, que es la transformación mineralógica por diagénesis de la protomatriz; epimatriz o formación de matriz *in situ* por alteración de clastos químicamente inestables que conduce al crecimiento autigénico de arcillas y la pseudomatriz generada por deformación post-depositacional de fragmentos lábiles, por lo general litoclastos, produciendo su estiramiento y formación de bordes difusos del grano, hasta hacerlo prácticamente indiferenciable de la protomatriz (Teruggi 1982). La pseudomatriz se identifica muchas veces como agregados de arcilla que se extienden y cubren parcialmente los intersticios entre clastos rígidos. También puede aparecer como anillos concéntricos generados por la deformación de la fábrica original del fragmento lítico y de carácter muy irregular, con desarrollo frecuente de parches (Scasso y Limarino 1997).

### 3.3. TIPOS DE ARENITAS CUARZOSAS

Desde el punto de vista sedimentológico, las cuarcitas pertenecen al grupo de las areniscas o arenitas. Pettijohn (1975) las define como un grupo de areniscas caracterizadas por su alto contenido en cuarzo. Teruggi (1982) hace referencia a ortocuarcitas, más específicamente a las que poseen cemento silíceo con crecimiento secundario, y las diferencia de las cuarcitas metamórficas o metacuarcitas, que presentan recristalización y reorientación tectónica de los granos de cuarzo. Además este autor, diferencia a las ortocuarcitas de las areniscas silíceas, debido a que estas últimas poseen un cemento silíceo que no ha cristalizado en continuidad óptica con los granos de cuarzo. También agrega que el comportamiento mecánico de las ortocuarcitas es similar al de las metacuarcitas, debido a que se rompen a través del grano por fracturas lisas, aunque pueden comportarse como areniscas, con superficies de fractura ásperas por la rugosidad de los granos, por ausencia de crecimiento secundario o bien porque la cementación fue insuficiente o no silícea.

El principal constituyente detrítico es cuarzo, que puede provenir de rocas ígneas, metamórficas y/o sedimentarias. Por lo general, el cuarzo está bien redondeado, clasificado y seleccionado. Es muy común hallar granos individuales con caras o facetas bien desarrolladas, resultado de un crecimiento del cristal de cuarzo por depositación de

sílice secundaria en continuidad óptica con el mismo. Los clastos adyacentes también pueden crecer juntos, generando intercrecimientos de tipo anhedral. Muchas areniscas u ortocuarcitas contienen pequeñas cantidades de cherts; si el porcentaje es elevado se las considera como derivadas de sedimentos preexistentes. Con la aparición de distintos fragmentos de roca, chert y micas detríticas, las ortocuarcitas pasan a denominarse protocuarzitas. La transición también se caracteriza por un menor redondeamiento de los granos de cuarzo. Las arenitas cuarzosas, en general están empobrecidas en minerales pesados, limitando la presencia de las especies más estables, como turmalina y circón (Pettijhon 1975).

Los trabajos recientes se refieren a las ortocuarcitas como arenitas cuarzosas (Spalletti y Poiré 2005; Dalla Salda *et al.* 2006; Zimmermann y Spalletti 2009, entre otros).

Los afloramientos de estas rocas por lo general son blancos y límpidos, con estratificación o capas entrecruzadas, ondulas de oscilación y de corriente. La estratificación entrecruzada varía en sus tipos y puede extenderse a gran escala.

A pesar de que en general las arenitas cuarzosas poseen buena selección, muchas poseen niveles con clastos tamaño sábulo-grava fina, bien redondeados en la base de las capas más espesas. En muestras y secciones delgadas, se observa una excelente selección y grado de redondeamiento del cuarzo detrítico, que corresponde a arenas de playa y a dunas. Estas rocas son típicamente arenas en mantos que pueden tener una gran extensión areal en relación a su espesor. Están asociadas por lo general a calizas o dolomías, aunque puede haber excepciones (Pettijohn 1975). A modo de ejemplo se pueden mencionar algunas arenitas del Grupo Sierras Bayas (Tandilia) que se asocian a calizas y dolomías, y también a capas arcillosas. En la Formación Balcarce, están asociadas a capas o lentes de arcillas de poco espesor (Poiré y Spalletti 2005; Dalla Salda *et al.* 2006; Zalba *et al.* 2010b y referencias allí citadas).

### **3.3.1. Aspectos diagenéticos de las sedimentitas de las Sierras Septentrionales**

Las rocas que contienen elevada proporción de cuarzo, en general ofrecen mayor dificultad interpretativa respecto a los procesos diagenéticos que las afectaron. Los minerales presentes en los poros y la fábrica diagenética, contribuyen a interpretarlos.

En depósitos antiguos, muchos procesos diagenéticos están sobreimpuestos e influenciados por mecanismos de erosión y meteorización que pueden borrar parcial o totalmente la fábrica original imposibilitando la lectura de sus características diagnósticas. Las secuencias sedimentarias de Tandilia presentan esta particularidad lo que ha dificultado su clasificación petrológica por más de 40 años. Tanto en las rocas del Grupo Sierras Bayas como en las de la Formación Balcarce, los cementos identificados son: sílice en variedades de tridimita, cuarzo y calcedonia; minerales de arcilla (illita-esmectita, caolinita, etc.); pirita, hematita, goethita, y minerales APS (aluminio-fosfo-sulfatos: alunita, svanvergita-Ce-florencita). Todos estos cementos se formaron en diferentes regímenes de diagénesis, y algunos de ellos están sobreimpuestos. Un ejemplo de la mesodiagénesis en cuarzo-arenitas es indicado por la presencia de triple unión y sutura en los contactos entre granos (disolución) interpretado como los efectos la compactación por soterramiento. También pueden presentar estilolitas como producto de la disolución (Zalba *et al.* 2007, 2010a).

### 3.3.2. Texturas de las arenitas de la Formación Balcarce

Las sedimentitas de la Formación Balcarce difieren en algunos aspectos de las definiciones clásicas postuladas para las arenitas cuarzosas (Pettijohn 1975, 1976; Teruggi 1982). Los principales puntos de discordancia con la bibliografía tradicional son los siguientes:

- Por lo general se trata de rocas cuyos granos poseen un alto grado de redondeamiento.
- En general no poseen matriz y el cemento es silíceo y/o carbonático.
- Están frecuentemente asociadas a bancos de caliza o dolomías y raramente a arcillas.

Por el contrario las arenitas cuarzosas de la Formación Balcarce, sobre todo en el área de Batán-Mar del Plata están compuestas por alto porcentaje de granos de cuarzo, angulosos y sub-angulosos; en algunos sectores presentan matriz cuarzo-micácea y arcillosa, y el cemento puede ser silíceo, arcilloso, ferruginoso o estar ausente, con abundante crecimiento de cuarzo secundario. Están asociadas a bancos de arcillas y/o



fangolitas cuarzo-arcillosas caoliníticas con espesores máximos de hasta 1 metro (Angelleli *et al.* 1973; Poiré *et al.* 2003; Zimmermann y Spalletti 2009).

En la zona de Batán, la presencia de óxi-hidróxidos de hierro se evidencia por el tono amarillento, rosado y rojizo de los estratos cuarcíticos (Angelleli *et al.* 1973; Coelho dos Santos *et al.* 2014a). Esto sugiere que las rocas han sido sometidas a condiciones oxidantes en procesos posteriores a su depositación.

En cuanto a los bancos de arcillas que intercalan con los espesos bancos de cuarcita, hay diversas opiniones. La hipótesis más aceptada es que son depósitos volcánicos re-trabajados y alterados a arcillas principalmente a caolinita y en menor proporción a illita, hallándose registros de texturas volcánicas y piroclásticas (Dristas y Frisicale 2003; Zimmermann y Spalletti 2009; Cingolani *et al.* 2010). La caracterización de las arcillas ha sido documentada por trabajos de Dristas y Frisicale (2003), Zalba *et al.* (2010a, b, 2016), entre otros.

Por otro lado, la movilización de los materiales finos por un agente de transporte eólico y el retrabajo de los mismos en una cuenca marino-somera, explicaría la presencia de bancos y capas arcillosas en la unidad cuarcítica, principalmente en el sector oriental de la cuenca Balcarce-Mar del Plata (Zimmermann y Spalletti 2009).

## **CAPÍTULO 4. REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

### **4.2. ANTECEDENTES**

### **4.3. FACTORES NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE (RAS)**

### **4.4. AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS**

#### **4.4.1. Polimorfos de la sílice**

#### **4.4.2. Cuarzo fuertemente tensionado o deformado**

#### **4.4.3. Variedades de sílice amorfa, criptocristalina y microcristalina**

#### **4.4.4. Vidrio volcánico**

#### **4.4.5. Variedad de sílice en rocas cuarcíticas**

#### **4.4.6. Solubilidad de los agregados silíceos**

### **4.5. DESARROLLO DE LA REACCIÓN**

#### **4.5.1. Alcalis y humedad**

#### **4.5.2. Etapas y mecanismos de la reacción**

##### **4.5.2.1. Mecanismos de expansión**

##### **4.5.2.2. Rol del calcio**

#### **4.5.3. Velocidad de la reacción**

#### **4.5.4. Productos de la RAS**

### **4.5. MANIFESTACIONES EXTERNAS DE LA RAS**

### **4.6. ANTECEDENTES DE RAS EN ROCAS CUARCÍTICAS**

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

En Argentina existe una gran variedad de materiales de posible uso en la elaboración de hormigón para la construcción de obras civiles. Las rocas empleadas son de diferente origen y variada composición y textura (Batic *et al.* 2005). Se utilizan principalmente agregados de trituración (piedra partida y arena: mono litológicos) y naturales (canto rodado y arena: poli litológicos). La composición y textura de algunos agregados que se utilizan habitualmente para elaborar hormigón, pueden producir reacciones perjudiciales o deletéreas de diverso origen, por contener sulfatos, sulfuros, óxidos, sílice metaestable, vidrio volcánico, arcillas, etc.

Dentro de estas reacciones puede mencionarse la reacción álcali-agregado que se produce entre ciertos componentes potencialmente reactivos de los agregados y los álcalis presentes en la solución de poro del hormigón y que provienen principalmente del cemento (Stanton 1940; Stanton *et al.* 1942; Fava *et al.* 1961; Colina *et al.* 1967; Diamond 1976; Helmuth *et al.* 1993). Dentro de ésta se incluyen a la reacción álcali-sílice (RAS) y álcali-carbonato (RAC). La RAC se produce a partir de rocas que contienen dolomita, mientras que la RAS se desarrolla a partir agregados que contienen vidrio volcánico, sílice metaestable (ópalo, tridimita, calcedonia, cristobalita) y/o cuarzo microcristalino y/o tensionado. Este último reacciona debido a su inestabilidad estructural y a su progresiva reducción en el tamaño de grano (Gogte 1973; Diamond 1976; Dólar-Mantuani 1983).

Gillott (1975) y Diamond (1976) propusieron otra categoría denominada reacción álcali-silicato aunque en la actualidad esta denominación está en desuso.

La RAS es la reacción más común, ya que los componentes silíceos forman parte de casi todos los agregados. Tal reacción sucede entre la sílice metaestable y los iones hidroxilos en presencia de álcalis ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), provocando la formación de un gel sílico-alcálico. Este gel produce una fuerza expansiva por aumento de volumen. Uno de los mecanismos más aceptados por el cual este material cambia su volumen es por la imbibición de agua presente en los poros del hormigón. Esta expansión puede, finalmente, provocar la fisuración y consecuentemente el deterioro prematuro de las estructuras de hormigón. Los álcalis son aportados principalmente por el cemento, aunque también pueden provenir de los aditivos, los agregados, y en algunos casos del

ambiente que rodea al hormigón como sales del suelo o del agua de mar, ambientes industriales, etc. (Batic y Sota 2001, y referencias allí citadas).

## 4.2. ANTECEDENTES

Los primeros estudios de la reacción álcali agregado o álcali sílice fueron realizados por Thomas E. Stanton, director de la División Estatal de Carreteras de California en la década de 1930. Stanton (1940) había observado ciertos deterioros en pavimentos de hormigón en California, los cuales estaban confeccionados con agregados identificados como una mezcla arena-grava con mala gradación, provenientes de yacimientos sedimentarios producto de la rápida erosión de las montañas Rocosas. En estos trabajos Stanton y colaboradores (1940, 1942) destacaron que las gravas constituían del 5 al 15% en peso del agregado y que eran predominantemente graníticas, por otro lado, las arenas eran cuarzo feldespáticas, pero manteniendo un porcentaje significativo de ópalo, vidrio volcánico, calizas impuras con ópalo, pizarras opalinas y chert. Por lo tanto, determinaron que esta reacción a la que denominaron reacción álcali-agregado (RAA), se originaba entre los álcalis del cemento liberados y sílice metaestable en presencia de humedad elevada (permanente o periódica), y que dada la participación de la sílice, se denomina puntualmente a esta reacción, como reacción álcali-sílice (RAS). Estos autores comprobaron que la RAS produce un aumento de volumen que fisura al hormigón, y que la reacción se produce más intensamente cuando se usan agregados naturales con ópalo u otras formas de sílice hidratada.

Antes de Stanton (1940), los agregados eran considerados químicamente inertes, por lo tanto los estudios realizados en California fueron determinantes, demostrando que los agregados silíceos eran propensos a reaccionar químicamente con los álcalis del cemento, y consecuentemente originar la expansión y agrietamiento de los morteros y hormigones (Fava *et al.* 1961).

En Argentina se conocen antecedentes desde 1950 en los que se observaron obras con signos de la RAS. El LEMIT, institución precursora en el estudio e investigación de materiales, conformó a mediados de los 50´ un grupo de trabajo multidisciplinario, haciendo uso de equipamiento y técnicas similares a los utilizados en los Estados Unidos. En el año 1950 se informa la primera estructura afectada por la RAS en Argentina,

perteneciente al pavimento del camino Punta Lara en la ciudad de La Plata. La reacción fue atribuida a la presencia de calcedonia como componente del agregado fino (Fava *et al.* 1961). Posteriormente, se iniciaron estudios sobre la RAA en Obras Sanitarias de la Nación, y en el año 1964 se creó la Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Árido, la cual publicó en 1972 los primeros datos de ensayos de reactividad de agregados provenientes de los ríos Paraná y Uruguay, además de redactar informes y recomendaciones, y realizar una amplia campaña de difusión vinculada con la construcción de obras civiles.

En la década de 1980 comenzaron los estudios en la Universidad Nacional del Sur (Bahía Blanca) en conjunto con investigadores del LEMIT. Se pueden citar los primeros estudios sobre la evaluación de la reactividad alcalina potencial de los agregados de Bahía Blanca y sobre observaciones de productos de reacción en hormigones afectados por RAS, así como estudios puntuales sobre agregados con sílice metaestable de diferentes zonas de la provincia de Río Negro y análisis más avanzados sobre síntesis de productos de reacción a partir de tridimita y vidrio volcánico, reproduciendo experimentalmente el fraguado en hormigones de cemento portland (Batic *et al.* 1985; Marfil *et al.* 1988).

Ejemplos de estructuras con daños severos producto de la acción deletérea de la RAS son abundantes a nivel mundial. Falcone (2013) cita los primeros antecedentes de estructuras afectadas por esta patología, detectada entre los años 1920 y 1930 en los Estados Unidos, como la planta hidroeléctrica Buck, construida en 1912 en Virginia, cuyas primeras evidencias de RAS, expansión y fisuración, fueron observadas 10 años más tarde de la construcción. Otro ejemplo es la presa Owyhee en Oregón construida en 1932 con un agregado natural caracterizado como altamente reactivo al ser evaluado mediante el método de la barra de mortero, pero solo detectando evidencias de RAS en escasos sectores para el año 1937. También la presa Parker, sobre el río Colorado, construida en 1938, y con indicios de reacción dos años después de la construcción. Otros referentes son el puente de Lachwehr en Alemania de la década del 60' que al cabo de 4 o 5 años debió demolerse ante el peligro de colapso. Esto no es muy común, ya que las estructuras de hormigón afectadas por RAS van degradándose lentamente con el tiempo (Longet *et al.* 1973). En Argentina, la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires solicitó al LEMIT, evaluar el deterioro progresivo del camino de

hormigón a Punta Lara, construido en la década del 50'. Los análisis realizados a los agregados y al cemento confirmaron que era posible la existencia de la RAS en el hormigón (Fava *et al.* 1961).

A nivel internacional se han recibido aportes al conocimiento de la reacción desde Stanton (1940, 1942) quién identificó el problema, Rhoades y Mielenz (1946) quienes aportaron los primeros conocimientos de la petrografía de agregados para hormigón, Hansen (1944) iniciando el estudio de los mecanismos de reacción, Mac Gogwan y Vivian (1952) que estudiaron expansiones en morteros, Powers y Steinour (1955a y b) profundizaron en la química de la reacción, Dent-Glasser (1979) y Batic *et al.* (1987), entre otros, aportaron al estudio de la teoría osmótica.

#### **4.3. FACTORES NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE (RAS)**

Para que se produzca la RAS es necesario que se presenten simultáneamente tres condiciones:

- Un agregado potencialmente reactivo
- Una concentración mínima de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{OH}^-$ ) en la solución de poro
- Humedad elevada, permanente o periódica

También tienen incidencia la porosidad del mortero, la temperatura ambiente y el tiempo para que se alcancen las condiciones óptimas para el inicio de la reacción (Grattan-Bellew 1989; Batic y Sota 2001).

#### **4.4. AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS**

Rhoades y Mielenz (1946) mencionan que el comportamiento de los agregados depende de la resistencia y durabilidad de la unión que establecen los mismos con la pasta de cemento, es decir de la interfase pasta-agregado. Estos autores hicieron hincapié sobre las propiedades individuales de las partículas, establecidas por su composición, textura y estructura y que pueden ser determinadas por métodos petrográficos. Además determinaron la importancia de orientar los estudios a la

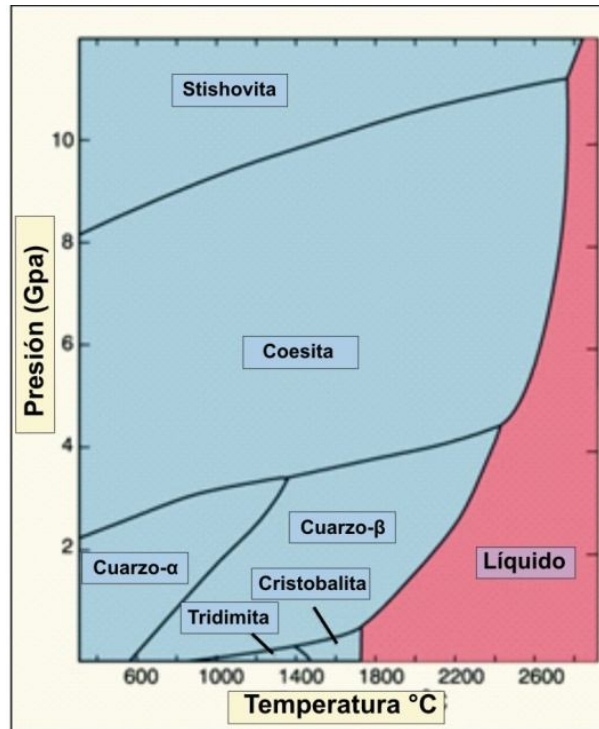
composición y textura de las rocas e interpretarlos en relación a la alteración natural a la cual estos materiales han sido expuestos.

Por ello a partir de la década de 1940 se dio comienzo a la identificación de los principales materiales potencialmente reactivos presentes en los agregados. Entre ellos, además de la sílice metaestable, se incluye al cuarzo tensionado, y microcristalino (Diamond 1976; Grattan-Bellew 1986, 1992).

#### 4.4.1. Polimorfos de la sílice

Tanto las variedades amorfas como cristalinas de sílice se clasifican dentro de la clase de los silicatos, subclase tectosilicatos (Klein y Hurlbut 1998). En el grupo de la sílice, el armazón  $\text{SiO}_2$ , en su forma más simple, es eléctricamente neutro y no contiene ninguna otra unidad estructural. Sin embargo, existen nueve polimorfos de la  $\text{SiO}_2$  conocidos, uno de los cuales es sintético. Cada uno de ellos tiene su propio grupo espacial, dimensiones de celda, morfología y energía reticular, siendo esta última característica la que determina el grado de estabilidad del polimorfo. El de mayor temperatura de formación, posee mayor energía reticular, estructura más dilatada, reflejado en un menor peso específico y menor índice de refracción. Los principales polimorfos son representados en el gráfico presión-temperatura (P-T) de la Figura 4.1.

Existen tres categorías estructurales de cuarzo: cuarzo bajo (hexagonal), tridimita baja (monoclínica) y cristobalita baja (tetragonal), que están relacionadas entre sí por transformaciones reconstructivas. Cada uno de estos tipos estructurales posee una inversión alta-baja, por ejemplo cuarzo bajo ( $\alpha$ ) y alto ( $\beta$ ). Estas transformaciones tienen lugar rápidamente y son reversibles a una temperatura relativamente constante y bien definida. Por otra parte, el aumento de la presión tiene por efecto elevar todas las temperaturas de inversión y para cualquier temperatura, favorecer la cristalización del polimorfo que ocupe el menor espacio posible (Klein y Hurlbut 1998).



**Figura 4.1:** Diagrama P-T de los polimorfos de la sílice. Modificado de Klein y Hurlbut 1998.

Si bien los polimorfos están constituidos casi exclusivamente por  $\text{SiO}_2$ , pueden contener iones  $\text{Al}^{3+}$  en reemplazo de  $\text{Si}^{4+}$  y otros cationes que se hallan en solución sólida. La tridimita y la cristobalita al tener una estructura más abierta, permiten un mayor reemplazo de  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ , además de la entrada de cationes alcalinos en la estructura. En la Tabla 4.1 se muestra análisis químicos de cuarzo, tridimita y cristobalita (Deer *et al.* 1967).



% en peso de óxidos				
Composición en óxidos	Cuarzo (1)	Tridimita (2)	Tridimita (3)	Cristobalita (4)
SiO <sub>2</sub>	99	95,1	95,1	98,4
TiO <sub>2</sub>	----	0,26	0,28	----
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----	2,4	2,7	0,35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----	0,36	0,25	----
FeO	0,36	----	----	0,068
MnO	0,02	0,003	0,0005	----
MgO	----	0,3	0,03	----
CaO	----	0,4	0,2	0,85
Na <sub>2</sub> O	----	0,8	0,67	----
K <sub>2</sub> O	----	0,37	0,75	----
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,39	----	----	----
<b>Total</b>	<b>99,77</b>	<b>99,99</b>	<b>99,98</b>	<b>100,48</b>

**Tabla 4.1:** Análisis químicos de polimorfos de la sílice. (1) Cuarzo; (2) tridimita en andesita; (3) tridimita en traquita; (4) cristobalita (Tomado de Deer *et al.* 1967).

#### 4.4.2. Cuarzo fuertemente tensionado o deformado

Frente a condiciones ambientales normales, el cuarzo es termodinámicamente estable, es decir, que desde el punto de vista de la RAS no toma parte de la misma (Diamond 1976), ya que cuando está bien cristalizado se comporta como inocuo en el hormigón, mientras que si ha sufrido deformación su reactividad cambia (Marfil 2013).

En las rocas sedimentarias clásticas las partículas de cuarzo pueden provenir de fuentes metamórficas y poseer extinción ondulante o alto grado de deformación formando granos de cuarzo policristalino (Figura 4.3a-d). Además, las sedimentitas sufren una deformación litostática generada por el peso de la columna sedimentaria, produciendo la disolución de sílice, cristalización de cuarzo secundario en los bordes del cristal (Figura 4.2a y 4.3a-b) y otros procesos relacionados a la diagénesis (Larsen y Chilingar 1979).

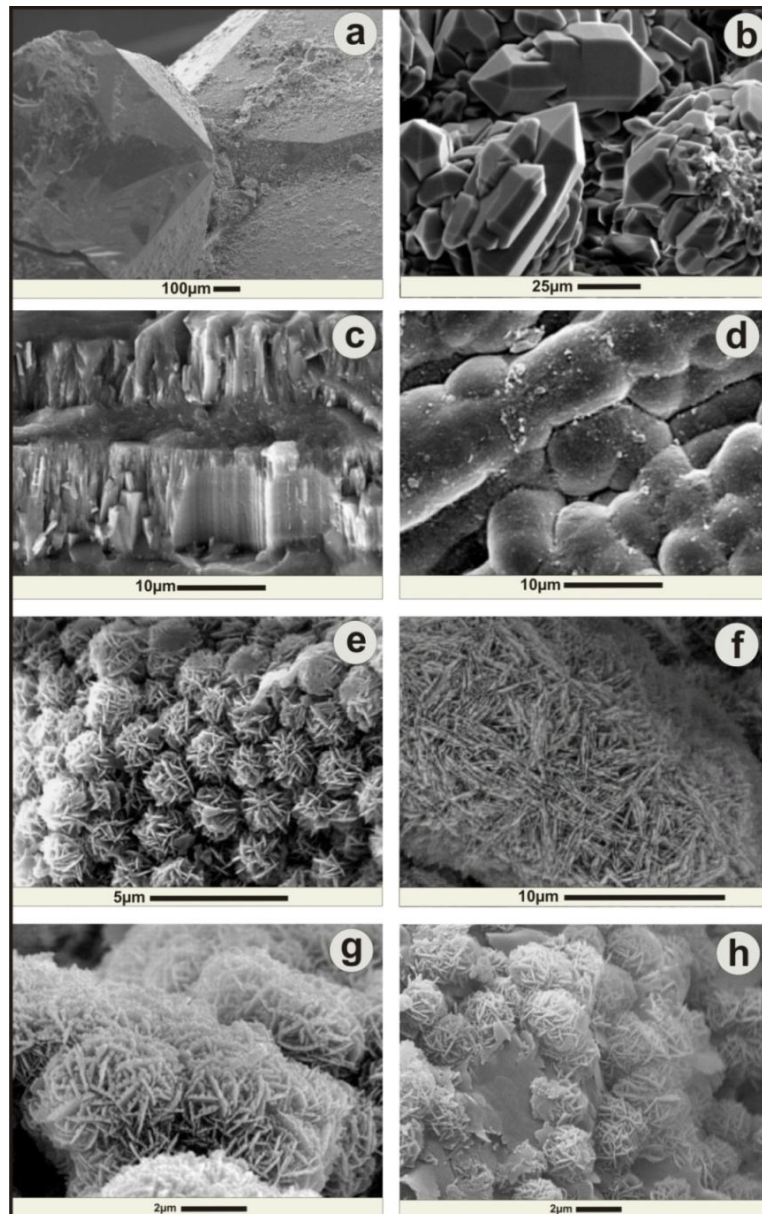
El cuarzo que ha sido sometido a estrés o tensiones importantes (diagénesis, metamorfismo), se considera metaestable debido a que se generan defectos en la estructura cristalina y/o una disminución progresiva en el tamaño de grano a medida que aumenta la deformación. Brown (1955) y Mielenz (1958) mencionan que rocas con cuarzo que han estado expuestas a deformaciones severas, son potencialmente reactivas cuando son utilizadas en el hormigón. Estudios llevados a cabo por Gogte (1973) sobre hormigones con signos de RAS, demostraron que se debía a la presencia de agregados metamórficos compuestos principalmente por cuarzo deformado o tensionado, y proponen que la deformación del mismo debe ser medida utilizando microscopio petrográfico (Sims 1992).

En trabajos posteriores Dólar-Mantuani (1981, 1983) estudió rocas con cuarzo policristalino con extinción ondulante, elaborando alternativas para establecer un método de cuantificación de la deformación a través del ángulo de extinción ondulante (AEO) y en función del mismo determinar la potencial reactividad de los agregados conteniendo cuarzo tensionado. Este autor sugiere que las rocas con valores de AEO menor a  $15^\circ$ , califican como no reactivas. Buck y Mather (1984) han sugerido un criterio para el reconocimiento de agregados con cuarzo tensionado, tomando como valor límite 20% de cuarzo con un promedio de AEO de  $15^\circ$ . Melver y Sims (1981) propusieron un límite inferior de  $25^\circ$  y aconsejan complementar la medida del AEO con la determinación del porcentaje de cuarzo total del agregado, de cuarzo tensionado, y con la medida del tamaño de grano.

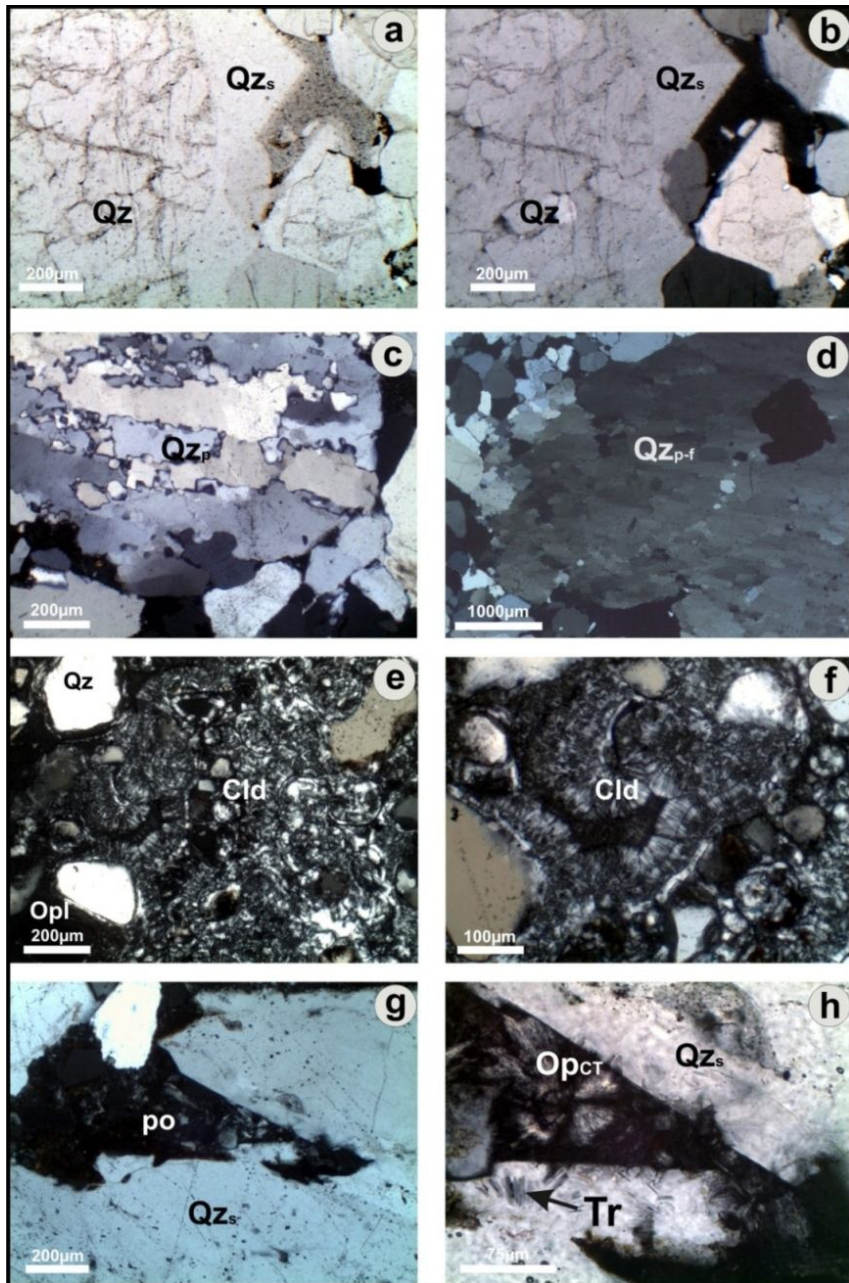
Cortelezzi *et al.* (1990) estudiaron agregados de la provincia de Buenos Aires con cuarzo tensionado utilizando la técnica de Dólar-Mantuani (1981), aplicando además difracción de rayos X a fin de determinar la relación entre el AEO y la deformación intracristalina de los granos de cuarzo. De los siete agregados estudiados, sólo dos (una metacuarcita y una milonita) fueron calificados como potencialmente reactivos mediante ensayos físicos de la barra de mortero (ASTM-C-227) y acelerado de la barra de mortero (ASTM-C-1260), manteniendo una relación directa con los valores del AEO.

Grattan-Bellew (2001) propuso el valor umbral de AEO de  $25^\circ$  para considerar una roca como reactiva. Por otro lado, West (1991 y 1994) lo señaló como un posible indicador, más que una característica diagnóstica para la reacción álcali-silice ya que

el cuarzo con alto AEO era usualmente asociado con la presencia de cuarzo microcristalino.



**Figura 4.2:** Fotomicrografías con MEB: (a) Cuarzo secundario sobre cuarzo sedimentario en cuarzo arenita de la Fm. Balcarce; (b) prismas bipiramidales de cuarzo; (c) fibras de calcedonia; (d) ópalo microcristalino; lepiesferas de ópalo-CT en: (e) madera fósil, (f) y (g) sinteres silíceos, (h) con illita en un poro de la roca de la Fm. Balcarce. (b), (c), (d) y (e) tomadas de George (2015) y (g) de Rodgers *et al.* (2002).



**Figura 4.3:** Fotomicrografías de arenitas cuarzosas. (a-b) granos de cuarzo (Qz) con crecimiento secundario; (c) clastos de cuarzo policristalino (Qzp); (d) granulación de cuarzo más fino (Qzpf); (e-f) caledonia y ópalo cementando granos de cuarzo (Qz); (g-h) crecimiento secundario de cuarzo (Qzs) y un poro (po); (h) cristales fibro-radiados de ópalo C-T ( $Op_{CT}$ ) y tridimita (Tr) hacia el borde del grano de cuarzo. (a) Imagen con polarizadores paralelos (PP) y (b) a (h) imágenes con polarizadores cruzados (PC).

#### 4.4.3. Variedades de sílice amorfa, criptocristalina y microcristalina

La tridimita y cristobalita son polimorfos de la sílice, los cuales son metaestables bajo condiciones normales de temperatura y presión, por lo que se comportan como

potencialmente reactivos con los álcalis en el hormigón. Pero los mayores problemas de reactividad están asociados a agregados que contienen ópalo (Diamond 1976). El ópalo posee muy baja cristalinidad o carencia de una estructura cristalina ordenada en patrones regulares (Klein y Hurlbut 1998).

Por otro lado, la tridimita baja ( $\alpha$ ) cristaliza en el sistema monoclinico u ortorrómbico, mientras que la alta ( $\beta$ ) lo hace en el sistema hexagonal. Los cristales son pequeños y la estructura cristalina consta de hojas paralelas a la cara que corta el eje c. La tridimita es estable entre los 870°C y los 1470°C. A mayores temperaturas pasa a cristobalita y a temperaturas inferiores a cuarzo alto. La transición a tridimita baja, a 1 atm de presión, tiene un rango entre 120°C y 140°C. En general, forma placas que pueden ser extremadamente finas y frágiles, también tabulares. El tamaño de los cristales es de unos pocos milímetros o menor, aunque en rocas ígneas se han hallado como fenocristales de varios centímetros. También se puede presentar en agregados radiados o esferoidales, rosetas y racimos (Fron del 1962; Klein y Hurlbut 1998). La estructura de la tridimita es más abierta que la del cuarzo pudiendo alojar iones alcalinos ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y alcalino-térreos ( $\text{Ca}^{+2}$ ) (Deer *et al.* 1967).

La tridimita de alta temperatura aparece en rocas ígneas volcánicas de composición ácida a intermedia (riolitas, traquitas y andesitas) y menos frecuentemente en basaltos. También se encuentra en cavidades de estas rocas, asociada a cristobalita y cuarzo. El ópalo-cristobalita y la calcedonia (más que la tridimita) también se forman cuando la sílice es depositada a partir de soluciones a temperaturas relativamente bajas, por ejemplo en los poros de rocas sedimentarias (Figura 4.2c-h y 4.3e-h) (Fron del 1962; Klein y Hurlbut 1998).

Existen dos polimorfos de la cristobalita, la baja ( $\alpha$ ) que cristaliza en el sistema tetragonal, y la alta ( $\beta$ ) que cristaliza en el sistema cúbico o isométrico. La cristobalita isométrica es estable desde 1470°C hasta el punto de fusión en 1728°C a 1 atmósfera de presión (Fron del 1962). La cristobalita alta se presenta en cristales pequeños, octaédricos; también se halla en agregados esféricos. Puede presentar hábito masivo o aparecer como agregados microcristalinos constituyendo costras opalinas, rellenando cavidades, en agregados microscópicos de estructura fibrosa (lusatita) o como cristales inferiores a 1 mm. Contiene pequeñas cantidades de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$ . A su vez, hay dos variedades de cristobalita baja: lusatita, con una estructura fibrosa visible en bajas

magnificaciones (Figura 4.3g-h) y ópalo con apariencia vítrea. La lusatita frecuentemente está asociada a ópalo y calcedonia, y se desarrolla en ambientes cercanos a la superficie e hidrotermales de baja temperatura. La composición de la lusatita es similar a la del ópalo, pero con bajo contenido de moléculas de agua. Este material ha sido clasificado como calcedonia y como tridimita por algunos autores, aunque su estructura es idéntica a la cristobalita baja. Su densidad es similar a la del ópalo ( $2,0-2,1\text{gr/cm}^3$ ), pero menor a la de la calcedonia y posee birrefringencia más baja. Es habitual encontrarla como agregados botroidales, formando pequeñas estalactitas, esferulitas, en bandas o láminas intercaladas con calcedonia en madera fosilizada. La cristobalita, groseramente fibrosa a columnar, forma esférulas en riolitas, obsidianas y otras rocas ígneas. En orden de cristalinidad, el "ópalo" birrefringente muestra evidencias ópticas de estructura en fibras. Luego, las fibras de lusatita pueden sufrir una conversión a calcedonia. Esto ha sugerido que la orientación de las mismas en la lusatita y ópalo, pueden haber sido controladas por el estrés producido durante la cristalización de un gel inicial (Fronde 1962; Deer *et al.* 1967).

La calcedonia es una variedad compacta de sílice criptocristalina, compuesta de diminutos cristales de cuarzo con poros sub-microscópicos. En general se divide en variedades fibrosas y granulares. Los términos chert y pedernal (variedades granulares) son utilizados para la calcedonia opaca, de colores apagados o negro. La calcedonia es depositada por soluciones acuosas y frecuentemente se encuentra rellenando cavidades, como material cementante en ambientes sedimentarios y también en madera fosilizada (Figura 4.2c y 4.3e-f). Los haces de fibras, pueden ser del orden de cientos de micrones de largo y pocos micrones de ancho. Las fibras no pueden ser físicamente diferenciadas del resto de la masa en la cual están incluidas. Estructuralmente, forma una red de microcristales de cuarzo con un gran número de microporos ( $0,1\ \mu\text{m}$  de diámetro). El porcentaje de agua en la estructura es del orden del 1% (Klein y Hurlbut 1998; Deer *et al.* 1967; Diamond 1976).

El ópalo ha sido caracterizado como un "mineral" de gel amorfo, ya que bajo microscopía de luz polarizada es isótropo, pero se ha demostrado que está formado directamente por cristobalita baja en una estructura más o menos desordenada (ópalo – cristobalita). Las variedades opalinas de cristobalita, junto a calcedonia (Figura 4.4) se hallan en cavidades precipitadas a partir de fluidos hidrotermales, como producto de



recristalización en areniscas arcillosas cercanas a una fuente de calor. La fórmula química general es  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , en la cual el agua varía entre 4 y 9%, aunque puede llegar al 20% o más. El desorden de la estructura es causado por la entrada de cationes ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y probablemente también de  $\text{H}_2\text{O}$  y  $(\text{OH}^-)$  en solución (Fron del 1962; Deer *et al.* 1967; Diamond 1976; Klein y Hurlbut 1998). En la Figura 4.2d se observa bajo MEB, ópalo microcristalino (“globoso”) y en 4.2h lepiesferas de ópalo C-T asociado a illita. El ópalo se puede formar superficialmente por acción de procesos bioquímicos, los cuales son dominantes en ambientes de mares o lagos, así como por precipitación inorgánica a partir de soluciones a temperatura y presión ambiente. En rocas sedimentarias clásticas puede conformar el cemento parcial o total de la roca (Fron del 1962; Scasso y Limarino 1997; Klein y Hurlbut 1998). Las Figuras 4.3e y f muestran una asociación de ópalo-calcedonia como cementante de los granos de una arenisca. En ambientes superficiales, el ópalo u ópalo-cristobalita es metaestable y tiende a convertirse en cuarzo o calcedonia. Las fuentes más importantes de sílice disuelta en aguas naturales profundas provienen de restos de organismos en sedimentos y de la alteración química con liberación de sílice, de material vítreo y de silicatos presentes en cenizas volcánicas y tobas. También es frecuente la presencia de ópalo y calcedonia en materiales petrificados (George 2015) (Figura 4.2b-g).

Análisis químicos de ópalo, indican que el porcentaje de  $\text{SiO}_2$  supera el 90% y el resto lo constituyen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  y álcalis atribuidos a arcillas, co-precipitando geles de  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Esta composición es similar en cherts y calcedonia. El aluminio y álcalis en solución sólida pueden ser los responsables de la cristalización de cristobalita. A altas temperaturas en presencia de agua o vapor, un gel de sílice puede pasar a cristobalita y luego a cuarzo. Esta conversión es sensible a la presencia de álcalis y otros cationes presentes en el gel. Es importante destacar que el ópalo es soluble en soluciones calientes y fuertemente alcalinas, aunque puede quedar un residuo insoluble de arcillas, calcedonia, etc. El rápido ataque por ácidos y álcalis, se produce por la elevada porosidad y por el escaso desarrollo de la estructura cristalina. Este comportamiento ha conducido a pensar que la calcedonia, soluble en solución alcalina, contiene ópalo como material intersticial (Fron del 1962; Cortelezzi *et al.* 1971).

El ópalo también posee poros entre y dentro de las partículas estructurales. Estos poros, de tamaño variable, se hallan interconectados y parcialmente rellenos de agua. A

su vez, estos poros contribuyen a la reactividad potencial del material ya que incrementan la permeabilidad y disminuyen la resistencia al ataque de las soluciones alcalinas (Diamond 1976).

El chert y pedernal son variedades de rocas de origen químico constituidas por ópalo y calcedonia en proporciones variables. El chert puede estar compuesto por cuarzo criptocristalino, calcedonia, ópalo o una combinación de éstos. Por lo general son hallados en depósitos sedimentarios calcáreos, pero también aparecen en otros tipos sedimentarios. Su forma más frecuente es como nódulos, lentes o capas, o como partículas en arenas y gravas. El pedernal es descrito como duros nódulos de sílice de coloración oscura que aparece dentro de una matriz de roca más blanda, por lo general carbonática (Diamond 1976). Estos materiales tienen distintos comportamientos frente a la RAS, por ejemplo, los cherts compuestos por cuarzo microcristalino poligonal no son reactivos, pero la presencia de ópalo o calcedonia aún en bajas proporciones hace que sean potencialmente reactivos con los álcalis en el hormigón (Marfil 2013).

#### **4.4.4. Vidrio volcánico**

El vidrio volcánico es un material natural, originalmente amorfo que se halla en las pastas de rocas volcánicas ácidas a básicas o en rocas piroclásticas, como tobas e ignimbritas. El retrabajo de partículas vítreas removilizadas por los agentes de transporte y vueltos a depositar pasan a formar parte de los depósitos sedimentarios clásticos, convirtiéndose posteriormente en rocas del mismo origen (Scasso y Limarino 1997).

En rocas volcánicas, la velocidad de enfriamiento generará distintas cantidades de vidrio volcánico con diferentes texturas. La metaestabilidad del mismo dependerá de la edad y composición de la roca, ya que por ejemplo los vidrios de composición básica son más vulnerables a la alteración y descomposición que los vidrios de composición intermedia y ácida. También dependerá de su textura, que puede ser compacta o porosa. La condición externa ambiental es muy importante ya sea para que se produzca la alteración y procesos de desvitrificación. Por lo general este último proceso favorece a la ganancia de estabilidad del material (Marfil 2013).

Esencialmente todos los vidrios de origen volcánico reaccionan con los álcalis del hormigón, aunque depende de la inestabilidad del mismo, en relación a su composición



y grado de recristalización. En cuanto a los materiales piroclásticos como las tobas, son más abundantes las de composición ácida, riolíticas y dacíticas que se meteorizan rápidamente, ya que además de la metaestabilidad de las trizas vítreas son materiales muy permeables. Dependiendo de la composición original de los vidrios y del pH del medio darán origen a productos de alteración, principalmente arcillas. El excedente en sílice se depositará como ópalo, o cristalizará como calcedonia, tridimita o cristobalita, dando lugar a un proceso de silicificación, que originará cementación, produciendo la litificación del sedimento (Diamond 1976; Sims 1992; Marfil 2013).

En ensayos de laboratorio se logró sintetizar calcedonia a partir de vidrio volcánico síliceo o cristobalita en soluciones hidrotermales a moderada temperatura y presión. La conversión a calcedonia no se produce en medios levemente ácidos, pero es completa y rápida en soluciones ligeramente alcalinas (Deer *et al.* 1967; Diamond 1976). Estudios relacionados al desarrollo de la reacción álcali-sílice en el hormigón, demostraron la síntesis de zeolitas ricas en sodio y potasio a partir de tridimita y vidrio volcánico de composición riolíticas. Estos agregados fueron expuestos a condiciones alcalinas en soluciones de NaOH y KOH y a una temperatura de 40°C (Marfil *et al.* 1988).

#### **4.4.5. Variedad de sílice en rocas cuarcíticas**

Las rocas sedimentarias clásticas, compuestas casi exclusivamente por cuarzo y/o con cemento síliceo, pueden ser potencialmente reactivas, debido a que los granos de cuarzo pueden estar tensionados, contener partículas de chert o porque el material cementante de los granos puede ser ópalo, calcedonia u otra variedad de sílice metaestable (Marfil 2013), como se observa en la Figura 4.3.

Por otra parte, en las rocas sedimentarias, la diagénesis produce que los minerales de sílice sufran una transformación de ópalo-A (amorfo) a ópalo-C/CT (cristobalita / cristobalita-tridimita) y finalmente a cuarzo microcristalino (Figura 4.4). En el ópalo-CT, la cristobalita y tridimita se encuentran en proporciones similares, ambas inmersas en una matriz de sílice amorfa (Lee 2007; Ishii 2011). La transformación diagenética se produce principalmente por mecanismos de disolución - reprecipitación, gobernados por el tiempo y la temperatura. Por lo general las formas opalinas son las primeras en desarrollarse, indicando que los sedimentos o materiales que los contienen se formaron

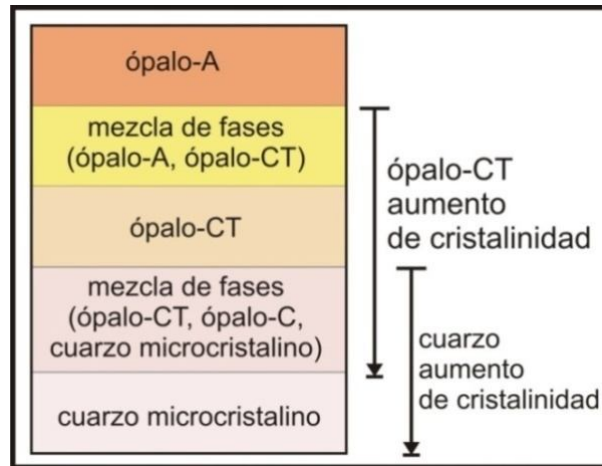
en tiempos relativamente recientes, o que han intervenido procesos posteriores a los eventos de diagénesis principales (Rodgers 2002; George 2015; Viney *et al.* 2016).

En Argentina ejemplos de areniscas cuarzosas reactivas provenientes de la provincia de Chaco han sido estudiadas por Batic *et al.* (1991), Coelho dos Santos y Falcone (2012) y Falcone y Coelho dos Santos (2013), y areniscas cuarzosas de la provincia de Corrientes por Marfil *et al.* (2012). Ambas presentan similitudes petrográficas, poseen un cemento silíceo de calcedonia, cuarzo criptocristalino y ópalo. La reactividad de estas rocas se ha comprobado mediante ensayos físicos y estudios petrográficos sobre probetas de hormigón post-ensayo. En la Figura 4.3e y f se observan imágenes tomadas con microscopio de polarización de las areniscas de la provincia de Chaco.

Fernandes y Broekmans (2013) han estudiado casos de obras en Portugal y Noruega, donde hormigones con rocas cuarcíticas y cherts presentan daños debido al desarrollo de la RAS, con precipitación de productos de reacción. Mediante técnicas petrográficas de detalle Fernandes *et al.* (2016) determinaron problemas de reactividad en areniscas, cherts, grauvacas, calizas y fangolitas silíceas las cuales han sido utilizadas tanto en Europa como en América del Norte como agregados en hormigones, presentando efectos deletéreos en obras.

En la Figura 4.3.g y h se observa la presencia de calcedonia y ópalo C-T presente en un poro de una muestra de arenita cuarzosa de la Formación Balcarce (Coelho dos Santos *et al.* 2016).

En rocas sedimentarias clásticas las transformaciones de la sílice dependen del grado de diagénesis de los materiales (Scasso y Limarino 1997; Gómez Peral 2008). El ópalo, ópalo cristobalita-tridimita (CT), ópalo-cristobalita (C), calcedonia y micro cuarzo forman parte de esta secuencia de sucesos desarrollados en los sedimentos (Lee 2007) (Figura 4.4).

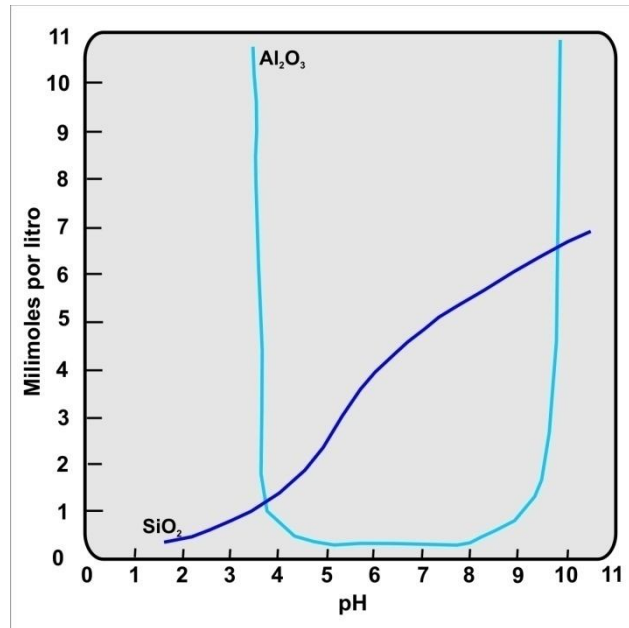


**Figura 4.4:** Esquema de las zonas diagenéticas en ambiente sedimentario, mostrando la conversión de ópalo-A a cuarzo y fases intermedias ópalo-C y ópalo-CT (Lee 2007).

#### 4.4.6. Solubilidad de los agregados silíceos

Para promover la disolución de la sílice amorfa y del cuarzo es necesario un elevado pH. En las rocas este incremento puede darse por el consumo de iones  $H^+$  por la disolución de carbonatos y feldespatos. La solubilidad de la sílice aumenta fuertemente con el pH, siendo insoluble a pH ácido, comienza producirse a pH mayor que 8, incrementándose rápidamente a pH mayor que 9,5 (Scasso y Limarino 1998).

Para el par  $Al_2O_3$  y  $SiO_2$  la influencia del pH sobre la solubilidad se muestra en el gráfico de la Figura 4.5, donde se observa que influye en el tipo de alteración en rocas silicatadas. En condiciones muy ácidas ( $pH < 4$ ) el aluminio es más soluble que el silicio, lo que supone que puede ser transportado fuera del sistema dejándolo enriquecido en silicio (Si) y formándose geles de sílice. Entre pH de 5 y 9 el Al es virtualmente insoluble, pero la solubilidad del Si aumenta al aumentar el pH. En sistemas naturales, bajo estas condiciones, el residuo puede hacerse cada vez más rico en aluminio, formándose minerales de arcillas y/o hidróxidos de aluminio. Por encima de pH 9 la solubilidad aumenta para ambos elementos (Mason 1966).



**Figura 4.5:** Solubilidad (en milimoles por litro) del conjunto SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. pH de la solución en sistemas naturales (tomado de Mason 1966).

Es de interés destacar que el ópalo A y CT se disuelven en agua a presión y temperatura ambiente, entre 120 ppm y 70 ppm respectivamente, con lo cual la solubilidad de la sílice aumenta rápidamente con la temperatura, por ejemplo a 150°C la solubilidad es 120 veces mayor que a temperatura ambiente, pero es menos soluble con el aumento de la presión. Así, un cemento de ópalo es común a poca profundidad. En areniscas profundamente soterradas, el cemento es casi siempre cuarzo, por su menor solubilidad y porque a mayor temperatura probablemente precipite una fase más ordenada (Scasso y Limarino 1998).

En el hormigón el líquido encerrado en la red de poros y capilares está constituido por iones (OH<sup>-</sup>) a lo que se debe su alta alcalinidad. En un principio se consideró que el Ca(OH)<sub>2</sub> era lo que generaba la elevada alcalinidad (pH~ 12, 5), pero se ha demostrado que el líquido de poros alcanza una alcalinidad con valores de pH entre 13 y 14, debido a la presencia de hidróxido de sodio Na(OH) y de potasio K(OH), ya que el ion calcio prácticamente desaparece al progresar la hidratación del cemento. La cantidad relativa de cada ión depende de la composición química y el grado de hidratación del cemento, empleo de adiciones y relación agua cemento (Traversa 2012).

En la Tabla 4.2 se expresan los valores de solubilidad de la sílice en agua con distintos pH y en la solución de poro de pastas de cemento de bajo y alto álcali.

Medio	pH	Solubilidad de la sílice (ppm)
Agua natural	7-8	100-150
Agua alcalina	10	< 500
Agua saturada en Ca(OH)	12	90.000
Solución de poro en pasta de cemento de bajo álcali	Aprox. 12,5	Aprox. 500.000
Solución de poro en pasta de cemento de alto álcali	> 13	> 500.000

**Tabla 4.2:** Efecto del pH sobre la solubilidad de la sílice amorfa (Mindness y Young 1981).

## 4.5. DESARROLLO DE LA REACCIÓN

### 4.5.1. Álcalis y humedad

La RAS es esencialmente una reacción ácido-base. El ácido reactante es la sílice (presente en los agregados), y las bases reactantes son los hidróxidos de sodio (NaOH) y de potasio (KOH) de la solución de poro del hormigón. La reacción es mediada por el agua ( $H^+ + OH^-$ ) (Dron y Brivot 1992). Dent Glasser y Kataoka (1981) postularon que los cationes alcalinos juegan un rol secundario en la primera fase de la reacción, acompañando al ion  $OH^-$ , el cual es el principal agente del ataque.

El rol del calcio es esencial para la formación del producto final de la RAS, siendo la portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) del cemento la fuente de origen. El  $Ca^{+2}$  es capaz de migrar por difusión a los sitios donde aparece el producto de reacción. Por otra parte, la velocidad de disolución de la sílice depende del pH de la solución de poro, el cual está regulado por el contenido de álcalis. Se asume, que la reacción se produce sólo si el pH está por encima de un límite crítico denominado umbral alcalino. Por lo tanto, es necesario que la solución de poro tenga un pH elevado para que se produzca la RAS (Plusquellec *et al.* 2016).

En un hormigón elaborado con cemento portland normal, el pH es de aproximadamente 12,5 a 13,8 (Vollpracht *et al.* 2015), dependiendo del contenido de álcalis del cemento (Diamond 1989). Un pH de 12,5 corresponde a una solución saturada respecto al  $Ca(OH)_2$  yes obtenido en presencia de álcali ( $Na^+$  y  $K^+$ ). La RAS tiene lugar

cuando el pH está por encima del umbral límite, y también depende de los agregados presentes en el hormigón (Fournier y Bérubé 2000).

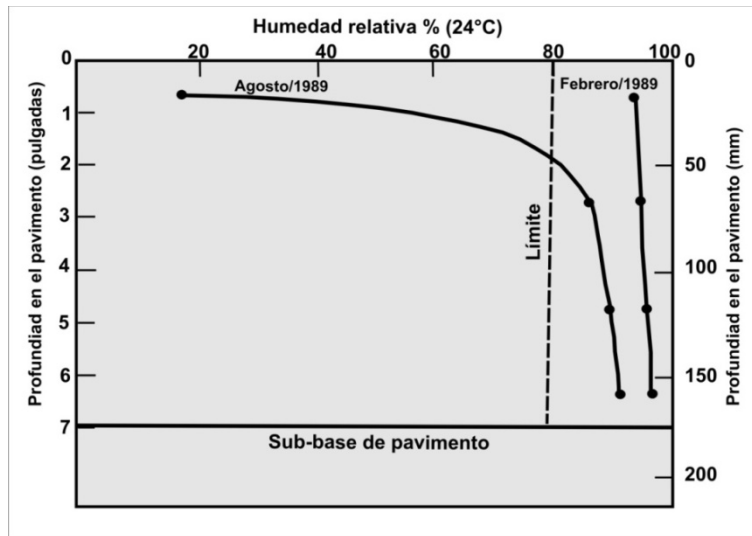
Plusquellec *et al.* (2016) describen y comparan métodos de determinación del pH y del contenido de álcalis libre en la solución de poro, analizando las ventajas y desventajas de cada método (Tabla 4.3). El método de extracción del agua de poro, fue descrito por primera vez por Longuet *et al.* (1973) y Barneyback y Diamond (1981), y es el método más empleado, el cual requiere un equipo de compresión (Sota 1997) donde una muestra de hormigón endurecido se somete a una alta presión, y resulta en la liberación de la solución de poro, de la cual se mide el pH y alcalinidad. Sota *et al.* (1996, 1997), haciendo uso del dispositivo de extracción, aplicaron un presión equivalente a 450 MPa para extraer el líquido de poro de diferentes morteros calificados como de alta performance y de hormigones afectados por la RAS y así analizar el contenido de álcalis y el pH de estas soluciones.

Método/duración	Abreviatura en inglés	Muestra	Valoración del pH
Extracción del agua de poro/0,5-4 h	PWE	cilindros (no trozos)	electrodo o análisis de la solución (AS)
Exudación in situ/1-2 meses	ISL	bloques	electrodo o AS
Exudación ex situ	ESL		
- extracción de agua fría/5 min	CWE	polvo <80 µm	electrodo o AS
- extracción de agua caliente/~12 h	HWE	polvo <160 µm	AS
- expreso/ 5 min.	-	polvo <160 µm	AS
Sensor de fibra óptica	FOS	bloques	sensor de pH

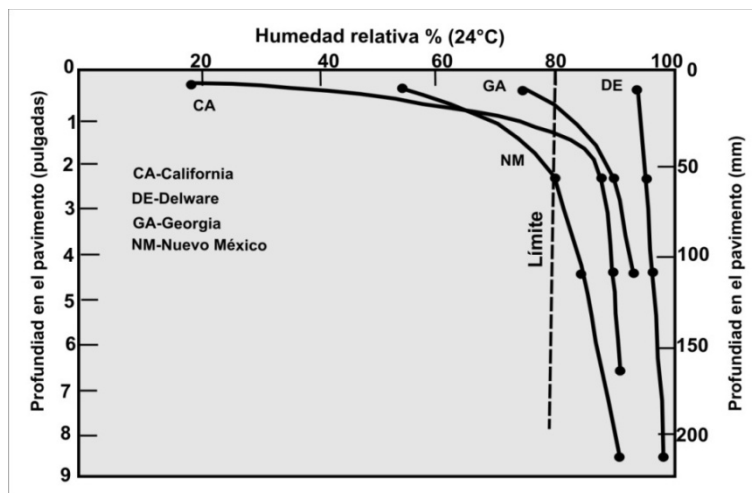
**Tabla 4.3:** Métodos utilizados para la determinación del pH y álcali libre (modificado de Plusquellec *et al.* 2016).

En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestran las variaciones de humedad relativa (HR), corregidas a 24°C, medidas en pavimentos a diversas profundidades desde la superficie en diferentes épocas del año y localizaciones geográficas con diferentes climas. Estos datos muestran que los valores de HR son lo suficientemente altos (80%) para sostener reacciones expansivas álcali-sílice en la mayor parte del pavimento debajo de la capa

superficial, incluso en verano o en un clima árido y temperaturas elevadas (Helmut 1993).



**Figura 4.6:** Gráfico de humedad relativa vs. profundidad de un pavimento de hormigón en distintos climas. Se muestran dos curvas de datos tomados en invierno (febrero de 1989) y verano (agosto de 1989) (modificado de Helmut *et al.* 1993).



**Figura 4.7:** Humedad relativa vs. profundidad en pavimentos de diferentes regiones climáticas (modificado de Helmut *et al.* 1993).

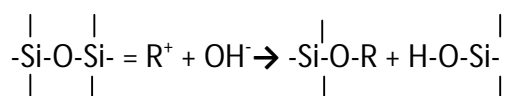
Estudios realizados por Kagimoto y Kawamura (2011) demostraron que las variaciones de la humedad a distintas profundidades desde la superficie del hormigón y a una humedad ambiental dada, eran determinantes para la generación de tensiones internas. Por lo tanto, es importante conocer el comportamiento expansivo de los

hormigones con agregados reactivos en atmósferas con distintos valores de H.R. Además, el agrietamiento superficial en muchas estructuras de hormigón afectadas por RAS, se debe a esfuerzos de tracción inducidos en zonas cercanas a la superficie, generados en el proceso de repetición de humectación y secado, aunque también pueden ser causados por diferencias de expansión entre zonas próximas a la superficie y el interior del hormigón con atmósfera seca. Se puede considerar que la humedad ambiental y la temperatura a la que se sometieron los hormigones está relacionado con la generación y extensión de las fisuras superficiales además de aquellas causadas por la expansión de los materiales de reacción al tomar agua del medio (Kagimoto *et al.* 2016).

Trabajos realizados por Lenzner y Ludwig (1978) y Olafsson (1986) sobre barras de mortero confirmaron que la humedad relativa (HR) del ambiente influyó en gran medida en la expansión de barras. Olafsson (1986) demostró que barras de mortero comenzaron a expandir 12 meses después de haber estado expuestas a una atmósfera con un valor de HR de 73%. Stark (1991) informó en base a sus experiencias que la expansión no se produce por debajo del 80%deHR.En la actualidad, es difícil precisar como la humedad ambiental influye en la expansión de morteros con agregados reactivos, especialmente la expansión de barras de mortero colocadas en ambientes secos durante largos períodos (Kagimoto *et al.* 2016).

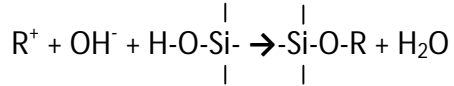
#### 4.5.2. Etapas y mecanismos de la reacción

Como se mencionó anteriormente, los agregados ricos en sílice metaestable (Figura 4.8) reaccionan con la solución alcalina presente en los microporos del hormigón, causando un lento pero severo deterioro en las estructuras de hormigón (Fournier y Bérubé 2000; Ichikawa y Miura 2007). La primera etapa de la reacción, es la ruptura por iones OH<sup>-</sup> de los enlaces siloxanos de la estructura de los componentes silíceos, generando como productos principales un silicato alcalino y ácido silícico (Dent Glasser y Kataoka 1981; Dent Glasser 1979; Rajabipour *et al.* 2015):

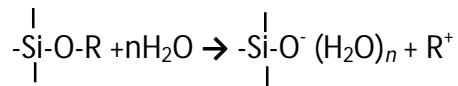




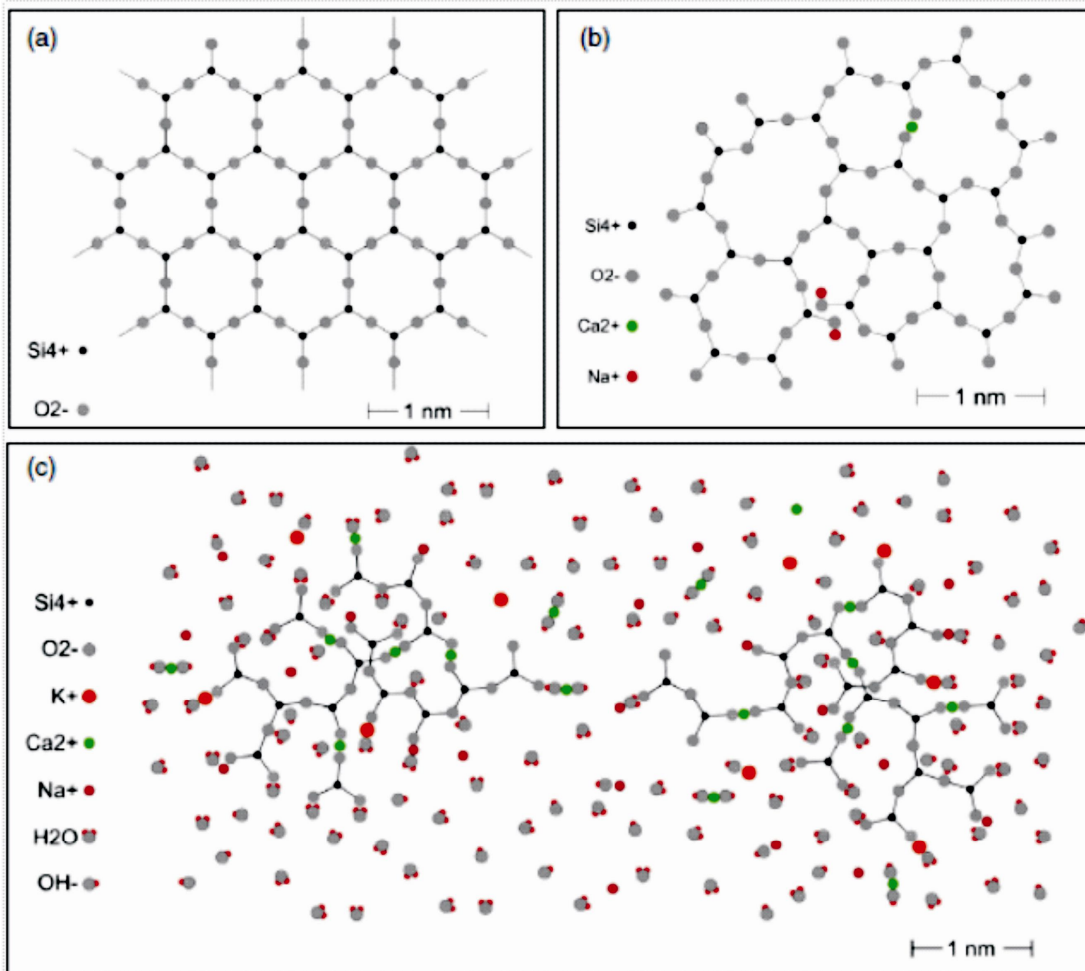
En esta ecuación  $R^+$  representa un ion alcalino tal como  $Na^+$  y  $K^+$ . El ácido silícico es un ácido débil que es capaz de reaccionar rápidamente con el  $OH^-$  para convertirse en un silicato alcalino:



El compuesto resultante es un silicato alcalino oligomérico o gel sílico-alcalino (Figura 4.8), el cual es higroscópico, excepto cuando el ion alcalino ( $R^+$ ) es  $Li^+$ . La hidratación de este gel es la causante de la expansión del mismo:



Por lo tanto, la presión expansiva generada por esta reacción induce a la fisuración del agregado y de la pasta de cemento circundante. El consumo de  $OH^-$  y álcalis ( $Na^+$  y  $K^+$ ) por la RAS induce a la disolución del ion  $Ca^{+2}$  que pasa a formar parte de la solución de poro para luego reaccionar con los silicatos alcalinos y formar un gel hidratado de sílice-calcio-álcali (Ichikawa y Miura 2007; Pan *et al.* 2012; Rajabipour *et al.* 2015).

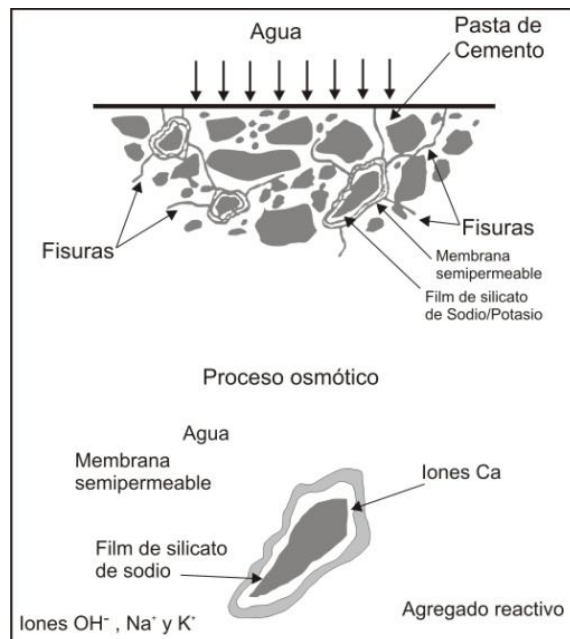


**Figura 4.8:** (a) Representación esquemáticamente de la estructura ordenada de una forma de sílice estable como el cuarzo y (b) desordenada de sílice amorfa como el ópalo; (c) ruptura de enlaces siloxanos en la estructura (b) por la presencia de OH<sup>-</sup> y iones alcalinos (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) y la formación del gel sílico alcalino (Rajabipour *et al.* 2015).

#### 4.5.2.1. Mecanismos de expansión

La reacción álcali-sílice es aceptada a nivel internacional, pero existen diferentes hipótesis para explicar el o los procesos de expansión. La primera fue elaborada por Hansen (1944) quién propuso la teoría de la presión osmótica como mecanismo de expansión, según la cual la pasta de cemento que envuelve a un agregado reactivo constituiría una especie de membrana semipermeable continua por la que los iones de los complejos sílico-alcalinos no pueden difundirse desde los sitios reactivos hacia el interior, pero el agua sí puede pasar de la solución de poro a través de la misma. Por lo tanto, el agua impulsada dentro del agregado reactivo, donde la reacción química

potencial es menor, forma una celda de presión osmótica y el aumento del gel sílico-alcalino. Esto produce un incremento de la presión hidrostática que se ejerce sobre la pasta de cemento que circunda al agregado, y de este modo induce a la fisuración de la misma (Figura 4.9). Este concepto es la base del ensayo de las celdas osmóticas (Batic *et al.* 1987; Batic y Sota 2001; Pan *et al.* 2012).



**Figura 4.9:** Esquema del aumento de volumen por RAS según la teoría de la membrana osmótica (Veronelli1978, modificado por Batic y Sota 2001).

McGowan y Vivian (1952) propusieron una teoría mecánica para explicar la expansión de los productos de la RAS. En esta teoría, una capa sólida de álcali-silicato formada sobre la superficie de un agregado potencialmente reactivo, absorbe humedad de la solución de poro y se transforma en gel, que aumenta su volumen e induce a la fisuración de la pasta de cemento. La expansión es acompañada por la formación y ampliación de las fisuras debido a la acción de la presión hidráulica.

Powers y Steinour (1955a y b), establecen que tanto la teoría de la presión osmótica (membrana semipermeable) como la de presión de imbibición pueden ser generadas dependiendo de que el complejo álcali-silicato sea fluido o sólido. Independiente del mecanismo, la causa del hinchamiento sería termodinámicamente la misma. Glasser (1979) sugiere que el producto de reacción (RAS) se comporta como una membrana semipermeable como resultado de su insolubilidad.

Según Pan *et al.* (2012) la teoría de la presión osmótica y la teoría de la expansión mecánica son fundamentalmente lo mismo. El gel sílico-alcálico puede existir en la forma de sólido o de fluido coloidal, dependiendo de la cantidad de agua embebida. La expansión del hormigón es generada primariamente a través de la celda de presión osmótica por el gel fluido, o a través del hinchamiento del gel sólido.

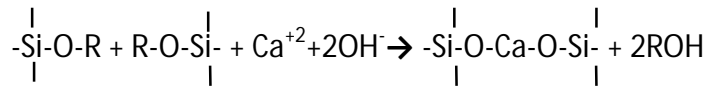
Dron y Brivot (1992, 1993) proponen que el producto de la RAS hidratado es transportado desde el agregado hacia el mortero a través de micro-poros interconectados mediante canales, que luego reaccionaría con el ion  $\text{Ca}^{+2}$ , produciendo la expansión del gel y con ello la fisuración de hormigón. Bazant y Steffens (2000) proponen que la expansión en el hormigón debido a la RAS, es causada por la presión (de hinchamiento) acumulada en la zona de interfase del agregado y la pasta de cemento. La imbibición de agua genera una presión en el gel, el cual es inicialmente liberado por empuje, y penetra en los microporos de la pasta de cemento cercana a la superficie del agregado. Una vez que estos están completamente llenos, la formación de más gel induce al incremento de la presión, fisurando de este modo a la pasta de cemento.

De acuerdo a los citados mecanismos de expansión, las fracturas toman lugar solo en la pasta de cemento y en los agregados sujetos a una compresión. Sin embargo, Ponce y Batic (2006) demostraron mediante técnicas petrográficas, que el origen de las fracturas de los hormigones afectados por la RAS depende de la naturaleza y mineralogía de los agregados. Estos autores concluyeron que constituyentes de los agregados tales como ópalo y rocas volcánicas vítreas producen geles de RAS que generan expansión en la zona de interfase pasta-agregado, causando la fisuración de la pasta del mortero, mientras que agregados con mineralogía mixta, por ejemplo graníticos, con reacción interna, generan fisuras tanto en el agregado como en la pasta de cemento.

Basados en patrones reales de fisuración en hormigones por causa de la RAS, Idorn (2001) manifestó que la presión expansiva debido a la formación de gel hidratado se desarrolla directamente dentro del agregado reactivo causando un esfuerzo de tracción. El incremento de la tensión expansiva es liberado por la fisuración tanto del agregado como de la pasta de cemento que rodea al mismo.

Ichikawa y Miura (2007), plantean que el agregado potencialmente reactivo se encuentra herméticamente sellado por una corona de reacción rígida e insoluble, la cual

no permite la difusión del gel sílico-alcálico viscoso, pero sí la penetración de la solución alcalina. Estos autores basaron su trabajo en el análisis de los patrones de fisuras y de dureza de agregados afectados por la RAS en el hormigón. En base a esto proponen que el anillo de reacción generado juega un rol significativo en el deterioro del hormigón. Este anillo sería generado por la siguiente reacción:



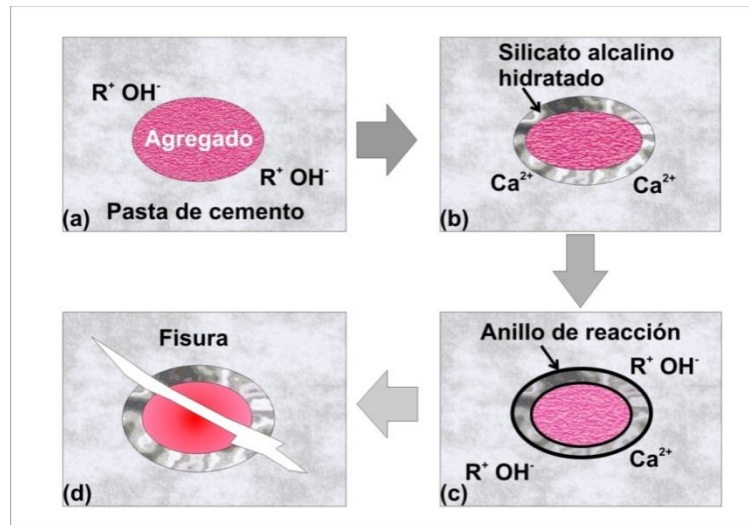
El modelo propuesto se basa en tres supuestos:

- 1) El anillo de reacción sería generado por la reacción del  $\text{Ca}^{2+}$  con el silicato alcalino hidratado fluido que cubre la región superficial del agregado, de manera que el anillo presentaría huecos que permitirían la fuga de gel que se genera después de la formación del borde de reacción.
- 2) El anillo de reacción actuaría como una membrana dura semipermeable para permitir la penetración de la solución alcalina en el agregado.
- 3) Este reborde de reacción sería lo suficientemente duro para acumular la presión expansiva necesaria para fisurar al agregado.

De esto concluyen que el deterioro del hormigón procede de acuerdo a las siguientes etapas (Figura 4.10):

- 1) Los iones  $\text{OH}^-$  y  $\text{R}^+$  en la solución de poro despolimerizan a los agregados ricos en sílice metaestable para formar el silicato alcalino hidratado (fluido). La región superficial del agregado es cubierta homogéneamente con el silicato alcalino. El consumo de iones  $\text{OH}^-$  ayuda a la disolución de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  en la solución.
- 2) Los iones  $\text{Ca}^{2+}$  penetran fácilmente en el silicato alcalino de menor viscosidad para volver a polimerizarlo. El agregado queda herméticamente cerrado por un borde de reacción rígido que no permite la penetración de silicatos alcalinos pero sí de los iones  $\text{R}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$ . El  $\text{Ca}^{2+}$  penetra mucho más lentamente que los  $\text{R}^+$ .
- 3) Los iones  $\text{OH}^-$  y  $\text{R}^+$  penetran a través del anillo de reacción para convertir el silicato recién formado en un silicato alcalino de mayor volumen. La presión expansiva resultante se almacena en el agregado. La presión acumulada fisura al agregado y a la pasta de cemento circundante cuando excede la resistencia de ambos. Este modelo

propone que la reacción álcali-sílice no causa el deterioro del hormigón, si se completa antes de la formación del anillo de reacción.



**Figura 4.10:** Representación esquemática del mecanismo de la RAS induciendo a la fisuración del hormigón (Ichikawa y Miura 2007).

#### 4.5.2.2. Rol del calcio

Algunos autores omiten la participación del  $Ca^{2+}$  en el mecanismo primario de reacción y expansión (Hansen 1944; Mc Gowan y Vivian 1952; Dent Glasser 1979) o en la descripción primaria del gel. Sin embargo, Hensen (1944) postula que el  $Ca^{2+}$ , si bien no participa en el mecanismo inicial de la reacción, la activa a través de la regeneración de álcalis, reaccionando con el complejo álcali-silicato y proveyendo de álcalis a la solución de poro. Powers y Steinour (1955a, 1955b), concluyeron que la relación  $Ca^{2+}/$  álcalis determina el tipo de producto de reacción. Una baja concentración de  $Ca(OH)_2$  generaría un producto sílico-alcalino no expansivo, pero cuando se encuentra presente en cantidad suficiente formaría un producto expansivo compuesto por un complejo de álcali-calcio-sílice. Por otro lado, Struble y Diamond (1981) observaron que los geles que contenían calcio sufrían una transformación de líquido a sólido, mientras que los que no poseían calcio se transformaban del estado líquido inicial a membranas semipermeables.

Diamond (1989), Sota *et al.* (1996, 1997) y otros autores aplicaron la técnica de extracción de la solución de poro propuesta por Longuet *et al.* (1973), y demostraron que en ausencia de calcio, el "gel" sílico-alcalino no se formaría. Las soluciones obtenidas

por este método se hallaban compuestas por Na(OH), K(OH), con trazas de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{SO}_4^-$ . Algunos autores proponen esta técnica como diagnóstica de la RAS (Sota *et al.* 1996; Pan *et al.* 2012; Plusquellec *et al.* 2016).

Experimentalmente se determinó que el hidróxido de calcio es mucho menos soluble en agua pura (20 m mol/L a 25°C) que los álcalis, y produce soluciones de pH 12,4. Los contenidos alcalinos y el pH de las soluciones de poro en los hormigones aumentan a medida que se liberan los álcalis, y el contenido de agua se reduce mediante la hidratación del cemento. Cuando las pastas y los morteros de cemento portland se curan durante varias semanas como sistemas sellados, el agua en los poros se convierte esencialmente en una solución de hidróxidos alcalinos que alcanza concentraciones casi constantes (Helmuth *et al.* 1993). Estudios realizados por Chatterji (1979) en barras mortero con ópalo en donde se redujo el contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$ , demostraron que no se produce expansión, pero sí una gran cantidad de gel de sílice sobre la cara de las barras. Chatterji (1989) propone un mecanismo en el que sugiere que la reacción se produce en el hormigón cuando el contenido neto de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  que ingresa al agregado reactivo excede la cantidad de  $\text{Si}^{4+}$ , y que la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  que rodea al grano controla la velocidad de difusión del  $\text{Si}^{4+}$  hacia el exterior del agregado reactivo, por lo que estima que altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  prevendrían la migración de  $\text{Si}^{4+}$  y conducirían a la expansión.

La concentración de iones en una solución se determina por la solubilidad del sólido menos soluble que puede precipitar, de modo que la concentración de iones  $\text{Ca}^{2+}$  en la solución alcalina está dada por  $[\text{Ca}^{2+}] = 4,8 \times 10^{-5} / [\text{OH}^-]^2$ , donde  $4,8 \times 10^{-5}$  es el producto de solubilidad a temperatura ambiente, y  $[\text{Ca}^{2+}]$  y  $[\text{OH}^-]$  son las concentraciones de los iones en mol/dm<sup>3</sup>. Suponiendo que  $[\text{OH}^-]$  en la solución alcalina es de 0,1 mol/dm<sup>3</sup> (pH = 13), la  $[\text{Ca}^{2+}]$  sería sólo 0,0048 mol/dm<sup>3</sup>. Por lo tanto, la solución contiene iones  $\text{Ca}^{2+}$  que no son suficientes para generar un borde de reacción duro compuesto de redes -O-Si-O-Ca-O-Si-O-. El consumo de iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$  por la formación de silicato alcalino disminuye la concentración de iones  $\text{OH}^-$  en la pasta de cemento que rodea al agregado, lo que conduce al aumento de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  en la solución (Dent Glasser y Kataoka 1981; Sota *et al.* 1996; Sota 1997). El silicato alcalino originalmente fluido y homogéneo que rodea al agregado afectado por RAS, se convertiría radicalmente en un reborde o anillo de reacción rígido, suficientemente denso para prevenir la fuga de gel sílico-alcalino

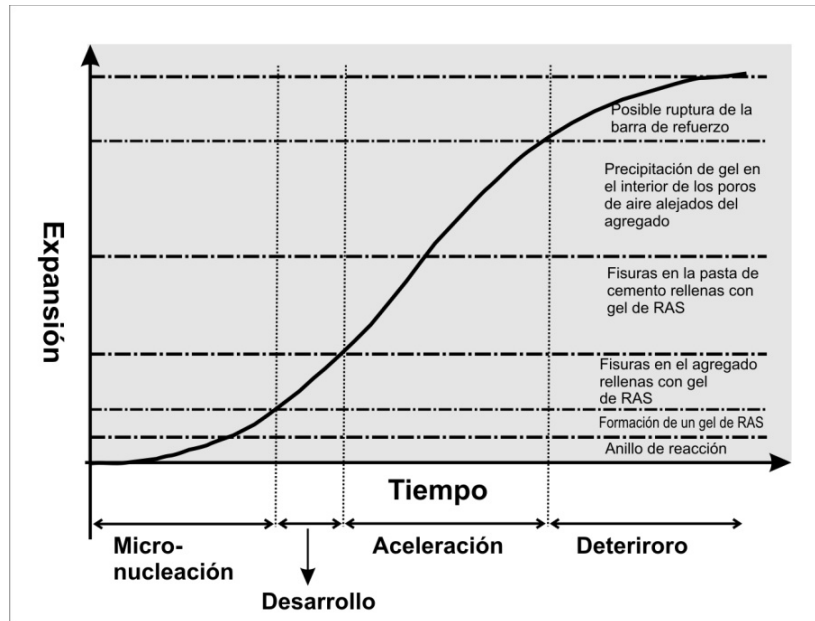
fluido generado después de la formación del reborde de reacción. Esto podría producir un reciclado de los iones alcalinos con lo cual, bajo ciertas circunstancias, la RAS no podría ser detenida ni aún usando sustancias inhibidoras (Ichikawa y Miura 2007).

#### 4.5.3. Velocidad de la reacción

La velocidad y curso de la reacción álcali-sílice en el hormigón y la composición de los productos de reacción formados dependen de la disponibilidad relativa de humedad, de los álcalis y del calcio en solución, así como también del tipo de agregado (Helmuth et al. 1993; Grattan-Bellew 1981). El transcurso del tiempo también es importante a fin de que se alcancen las condiciones óptimas para que se produzca el inicio de la reacción (Batic y Sota 2001).

Los agregados se dividen según el tipo de sílice metaestable presentes en ellos en (Saouma *et al.* 2015): de reacción rápida, también llamados de expansión temprana (ópalo, cristobalita, tridimita y calcedonia) incluyendo al vidrio volcánico, y de reacción lenta o de expansión tardía con cuarzo fuertemente tensionado, micro o criptocristalino. Los autores proponen en base a observaciones petrográficas los siguientes estadios: 1) formación del anillo de reacción y exudación; 2) exudación del material en estado sol-gel sobre el agregado reactivo, rellenando parcialmente los microporos de la pasta de cemento, 3) fisuración del agregado reactivo y posterior relleno de las fisuras con gel, 4) propagación radial y expansión de fisuras rellenas con el gel de la RAS desde la zona interfase con el agregado hacia la pasta de cemento, y 5) la precipitación del gel de la RAS en el interior de poros de aire a lo largo de las fisuras propagadas lejos del agregado. Esto se puede correlacionar con el desarrollo cinético de la reacción álcali-sílice y se establece un modelo matemático para explicar de manifiesto las evidencias físicas de la RAS. En la Figura 4.11 se puede observar la evolución cinética de la reacción en relación a los cambios petrográficos observados: 1) nucleación, 2) desarrollo, 3) aceleración de la reacción y deterioro, y finalmente 4) deterioro severo.





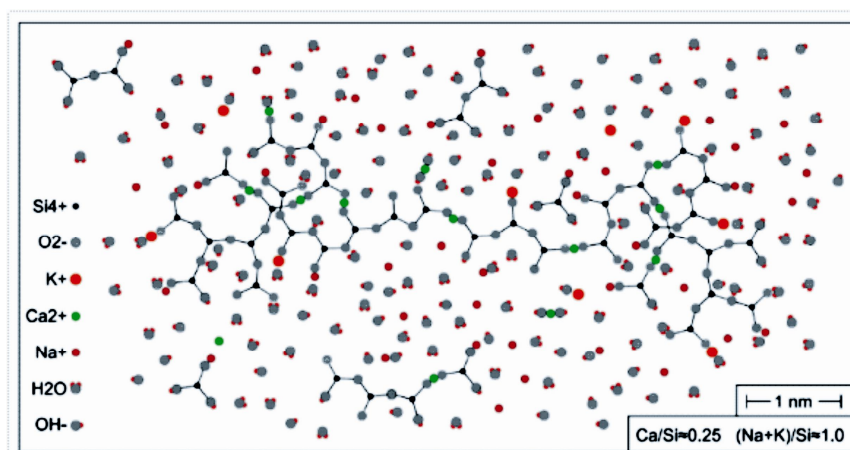
**Figura 4.11:** Correlación entre la cinética de la reacción y la aparición de rasgos deletéreos y productos de la RAS (Modificado de Saouma *et al.* 2015).

Por lo tanto, Saouma *et al.* (2015) plantean que las coronas de reacción se desarrollan de forma visible con los agregados de expansión temprana (ópalo, vulcanitas con vidrio volcánico, etc.), mientras que este anillo es menos marcado en los agregados de expansión tardía (esquisto, gneis, cuarcita, etc.), observando como una característica de diagnóstico en la petrografía que la precipitación del gel de la RAS en los poros de aire distantes del agregado reactivo no es la causa de la expansión sino un resultado de la reacción en estado avanzado.

Según la forma y el estado en que se presenta la sílice en el agregado, Batic y Sota (2001) reconocen las dos cinéticas de reacción, y establecen que los hormigones elaborados con agregados de reacción rápida (ópalo, tridimita, cristobalita, calcedonia y vidrio volcánico) en porcentajes tan bajos como 1 o 2%, pueden sufrir deterioros por la RAS en un periodo de tiempo relativamente corto a partir de 1 año o menos de ser construido, mientras que los elaborados con agregados calificados como de reacción lenta o diferida (con cuarzo microcristalino o tensionado) presentan signos de deterioro externo y fisuración luego de un periodo de 8 a 25 años posteriores a la construcción de la obra.

#### 4.5.4. Productos de la RAS

Los productos de la reacción álcali-sílice son tanto amorfos como cristalinos. El análisis de los mismos es importante para comprender como contribuyen al deterioro del hormigón. Existen diferentes estructuras y morfologías de los productos de RAS que pueden ser estudiados mediante microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectrometría de rayos X con el fin de analizar su morfología y composición. Los análisis demuestran que las composiciones de los productos formados son similares para hormigones confeccionados con diferentes tipos de agregados (Helmuth *et al.* 1993). Regourd y Hornain (1986) realizaron estudios con MEB y DRX sobre productos de reacción en hormigones de dos presas hidroeléctricas en Québec (Canadá) afectados por la RAS, una de ellas con agregados cuarcíticos y otra con agregados dolomíticos, clasificando a estos productos en 4 principales grupos cristalinos: rosetas, lamelas, fibras, agujas (acículas o filamentos) además de los geles masivos. Análisis químicos realizados sobre los productos mostraron las siguientes composiciones: 56-86% SiO<sub>2</sub>, 2-8% K<sub>2</sub>O, 0,4-20% Na<sub>2</sub>O, 1-28% CaO y 10-30% H<sub>2</sub>O (Hobbs y Gutteridge 1979; Bérubé y Fournier 1986). Gholizadeh Vayghan *et al.* (2016) elaboraron un modelo esquemático de la estructura de un gel masivo (Figura 4.12) donde se puede observa la distribución del Ca<sup>+2</sup> y los álcalis (K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>).

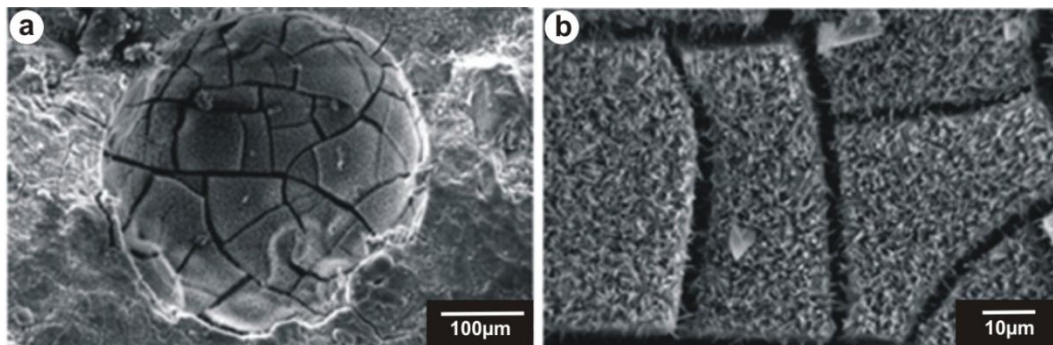


**Figura 4.12:** Modelo molecular esquemático de un gel de RAS (Gholizadeh Vayghan *et al.* 2016).

Los geles masivos aparecen depositados sobre los agregados reactivos o sobre paredes de poros y fisuras. Estos se observan isótopos bajo microscopio óptico de

polarización, los cuales pueden aparecer agrietados y/o con fractura concoidea, apreciable también con microscopio electrónico de barrido (Figura 4.13a). Es común que los geles reemplacen por pseudomorfismo a los agregados (Regourd-Moranville 1989). Composicionalmente son silicatos que contienen potasio y calcio pero con baja relación  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , entre 0,1 y 0,5. Análisis con EDS sobre los productos, han mostrado una variación composicional de una medida a otra incluso sobre una misma muestra. También existen diferencias en la relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  que conducen a diferencias en la viscosidad del gel a medida que se aleja de los agregados reactivos. También, una completa gelificación de la pasta de cemento fue observada en morteros conteniendo agregados con ópalo. La solidificación de geles alrededor de las partículas de ópalo fue atribuida por Kawamura *et al.* (1983) a la incorporación de iones  $\text{Ca}^{2+}$ .

Los geles masivos, pueden desarrollar distintas morfologías al ser observados con MEB y aparecer granulados, esponjosos, foliados y botroidales (Regourd y Hornain 1986; Bérubé y Fournier 1986). Sobre la superficie de geles masivos, también pueden desarrollarse cristales romboédricos de calcita en hormigones con ortocuarzitas como agregado reactivo. En la Figura 4.13b se observa un gel masivo agrietado con una superficie con textura esponjosa (Beglarigale y Yazici 2014).



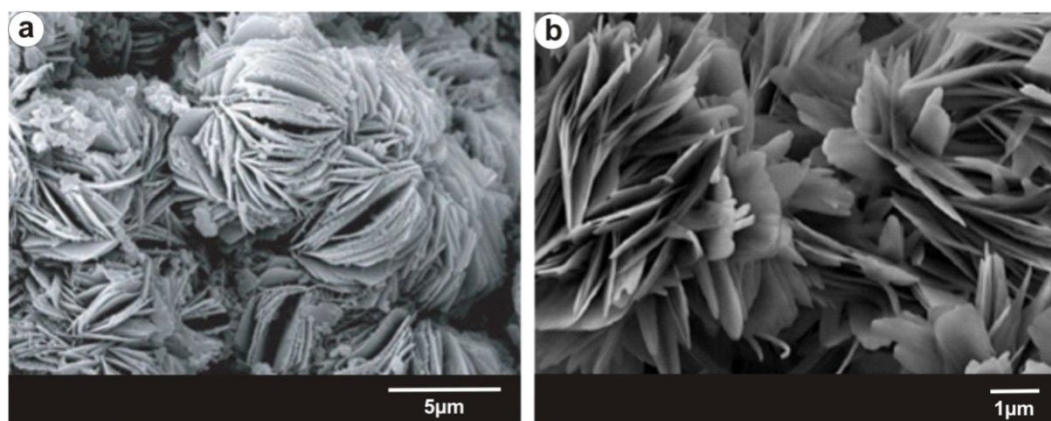
**Figura 4.13:** Imágenes de MEB. (a) Gel masivo en poro en mortero de hormigón y (b) detalle del mismo que muestra una textura superficial esponjosa (Beglarigale y Yazici 2014).

En cuanto a los geles cristalinos, los que tienen una morfología en roseta están constituidos por silicatos alcalinos que contienen aluminio. Bérubé y Fournier (1986) observaron estos productos en hormigones con cuarcitas. La composición de los mismos era relativamente más estable que la de los geles, conteniendo 56-63% de  $\text{SiO}_2$ , 20-27% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 8-11% de  $\text{K}_2\text{O}$  y 6-8% de  $\text{CaO}$ . Los cristales lamelares pueden ser similares en

composición a los cristales en rosetas, pero difieren en su contenido de aluminio y sodio. Se halló que los productos fibrosos poseen la composición de un silicato de potasio, y comparado con otras morfologías tienen menor proporción de  $\text{SiO}_2$  (Davies y Oberholster 1986b). Estos últimos se observaron asociados a ettringita rica en  $\text{SiO}_2$  y a thaumasita en muestras del hormigón con agregado dolomítico (Regourd y Hornain 1986).

Katayama (2012) y Braithwaite y Heath (2014) mencionan que tanto los geles como los productos cristalinos con morfologías en rosetas son similares en composición, tanto si involucran agregados silíceos o carbonáticos.

Morfologías foliadas como las observadas en la Figura 4.14 b, y fibrosas tienen estructura y composición similares a zeolitas y pueden ser identificadas mediante DRX y MEB-EDS (Maiza *et al.* 1999; Marfil y Maiza 2001; Braithwaite y Heath 2014; Leemann *et al.* 2016).



**Figura 4.14:** Productos de reacción en cavidades de aire accidental en mortero: **(a)** morfología cristalina en rosetas (Braithwaite y Heath 2014); **(b)** cristales con morfología foliada (Leemann *et al.* 2016).

La Tabla 4.4 modificada de Helmuth *et al.* (1993) muestra productos de la RAS de similar composición formados en morteros y hormigones realizados en laboratorio con diferentes tipos de agregados. Los productos de reacción en una solución de NaOH a 80°C son similares química y morfológicamente a los formados en estructuras de hormigón. La composición de los geles de RAS hallados en el hormigón son altamente variables, pero en base a los análisis publicados se pueden agrupar en tres principales categorías: 1) sílice parcialmente reactiva; 2) geles de silicato alcalino relativamente

puro, con contenido variable en álcali y moléculas de agua; 3) una simple mezcla de dos componentes (sílice y calcio) de composición casi constante, excepto por su contenido de agua. Estudios por difracción de rayos X, exhiben numerosos picos, indicando que coexiste una mezcla de fases. La okenita, tobermorita ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O},\text{OH})_{18}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), zeolitas y otras fases han sido encontradas (Davies y Oberholster 1986a; Regourd-Moranville 1989; Helmuth *et al.* 1993).

Maiza y Marfil (1991) realizaron comparaciones entre los productos de reacción de hormigones de obra y barras de mortero, y los materiales sintetizados en laboratorio obtenidos por la exposición de materiales naturales a soluciones de NaOH y KOH a una temperatura de 40°C. Esto fue realizado con el objetivo de estudiar el intercambio catiónico y relacionarlo con los fenómenos de reacción en el hormigón. En hormigones deteriorados por RAS identificaron zeolitas como productos de reacción. Por otra parte, zeolitas obtenidas a partir de tridimita no evidenciaron ningún cambio, mientras que las obtenidas a partir de vidrio volcánico intercambiaron sodio por potasio pero no potasio por sodio. En base a las propiedades ópticas-petrográficas los autores determinaron erionita, gmelinita, mordenita y clinoptilolita.

En Argentina, estudios realizados con MEB-EDS sobre productos de reacción en estructuras de hormigón con agregados con cuarzo tensionado (migmatitas, gneises y cuarcitas), han determinado que las fases cristalinas halladas poseen una estructura y composición similares a zeolitas (Marfil y Maiza 1992, 1999; Poklepovic *et al.* 2010; Locati y Marfil 2013; Coelho dos Santos *et al.* 2014c). Estos materiales, hallados en cavidades, son silicatos con menores cantidades de aluminio y álcalis (Ca, Na, K) y moléculas de agua, coincidente con una clinoptilolita ( $(\text{Na},\text{K},\text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al},\text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36}\cdot 12[\text{H}_2\text{O}]$ ), hallándose además otros productos asociados como la tobermorita ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O},\text{OH})_{18}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) y ettringita. Marfil y Maiza (2001), determinaron mediante SEM-EDS y DRX en hormigones con agregados con cuarzo tensionado materiales del tipo zeolitas identificadas como erionita ( $\text{KNaCa}(\text{Si}_{14}\text{Al}_4)\text{O}_{36}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) de morfología fibrosa, aunque también observaron productos de RAS masivos (Si-Ca-K-Na) y ettringita ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ). Una importante evidencia de la RAS es la identificación de los productos en fisuras, rellenando poros y cavidades en el mortero, y en la interfase agregado-pasta. Estos materiales fueron estudiados mediante MEB por numerosos autores, tanto en estructuras como en probetas de laboratorio, y mostraron similar

variación morfológica y composicional. Los elementos químicos detectados con EDS fueron Si, Ca, Na y K, y en menor cantidad Al, Fe, Mg y S. (Davies y Oberholster 1986a, 1986b, 1988; Bérubé y Fournier 1986, entre otros).

Producto de reacción	Agregado	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Referencia
<b>1. Geles del ensayo acelerado en prismas de hormigón (H) y morteros (M) a 80°C</b>								
<i>Geles exudados en superficie</i>								
H-Masivo - Masivo lavado	Meta-sedimentaria con cuarzo	49,4-61,9		28,2-31,9	22,5			-5
M-Esponjoso-Esponjoso lavado	""	18,5-56,6		20,3-43,4	56,6	4,1		-5
<i>Geles en fisuras y poros</i>								
M-Masivo - Masivo lavado	""	61,7-60,8		16,3-37,6	17,7	1,2		-5
H-Masivo - Masivo lavado	""	63,3-52,4		12,9-47,6		23,8		-5
<b>2. Productos cristalinos de RAS en prismas de hormigón (H) y morteros (M) a 80°C</b>								
M-Rosetas* - Rosetas lavado	Meta-sedimentaria con cuarzo	71,7-71	0,18-0,4	12,4-26,5	14,8-1,7	0,4-0,8		-5
H-Rosetas* - Rosetas lavado	""	63,5-67	0,35-0,35	20,7-21,7		15,8-11,8		-5
<b>3. Geles masivos en estructuras de hormigón</b>								
<i>Varios orígenes</i>								
Masivos	Varios	56-86		1-28	0,4-20	2-8	10-30	-2
""	Cuarcita	73		15	1,8	9,6		-3
""	Grauvacas/Hornfels	72		16	1,8	9		-3
<i>Geles en venas de los agregados</i>								
Masivos	Calizas silíceas	51		12	6	8		-4
<b>4. Productos cristalinos de RAS en estructuras de hormigón</b>								
Rosetas*	No identificados.	68,6		18,2		13,2		-1
Rosetas*	""	71,1		17,1		11,8		-1
Rosetas*	""	76,9	4,6	9,4		9,1		-1
Fibras	""	63,7		8,9	13,1	14,3		-1
Fibras	""	60,3		1,1	8,4	18,2		-1
Paletas/lamelas	""	71,2		11,6		17,2		-1

**Tabla 4.4:** Análisis semicuantitativos (% en masa) de productos de reacción. Tomado de Regourd-Moranville (1989). Referencias: (1) Davies y Oberholster(1986a); (2) Bérubé y Fournier(1986b); (3) Davies y Oberholster (1986b); (4) Durand y Bernard 1987; (5) Davies y Oberholster (1988). \* Posible lamelar.

#### 4.6. MANIFESTACIONES EXTERNAS DE LA RAS

Batic y Sota (2001) describen que las manifestaciones externas que presentan las estructuras afectadas por la RAS son fisuración y agrietamiento con un patrón de diseño

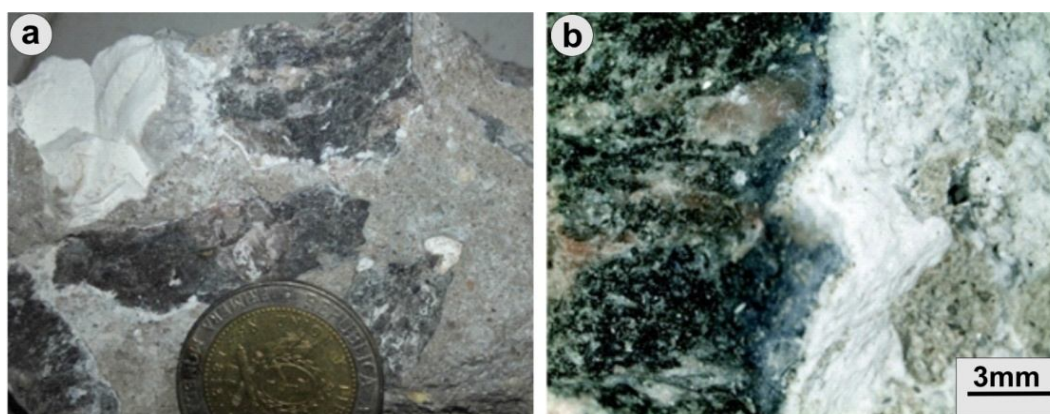


pseudo-hexagonal. Las fisuras parten de un punto, con un ángulo entre ellas de  $120^\circ$  (Figura 4.15a-f).



**Figura 4.15:** Estructuras afectadas por la RAS. **(a)** fisuración a  $120^\circ$  en pilar de compuerta, presa Cinco Saltos, Río Negro (Falcone 2013); **(b)** casa de playa en Nueva York (1930), con fisuras paralelas a las armaduras y productos de la RAS (Bentivegna y Ideker 2016); **(c)** presa de Pirapora (Brasil), contrafuerte con fisuración y eflorescencias; **(d)** fisuración con patrón a  $120^\circ$  en la parte superior del contrafuerte (Pirapora); (c) y (d) tomadas de Sollero *et al.*(2016); **(e)** pavimento de un aeropuerto en Japón con patrón de fisuras de la RAS, Kawamura *et al.*(2016); **(f)** fisuras típicas de RAS con relleno y chorreaduras de material blanquecino sobre la cara interna de un puente vial de 1925, Sierra de la Ventana, Prov. de Bs. As. (Imagen de autor).

A veces las fisuras presentan una coloración oscura sobre sus bordes, debido a la expulsión o exudación de geles de reacción, que en húmedo presentan un color ámbar y cuando pierden humedad o se carbonatan toman una coloración blanquecina (Figura 4.15b, c y f). En los pavimentos, es característica la ondulación de las losas, cerrado de las juntas de contracción (Figura 4.15e), superposición de losas, rotura en cuña debido a la presión de hinchamiento y en algunas ocasiones saltaduras del hormigón conocidas como pop-out. Cuando la estructura contiene armaduras, las fisuras pueden ser paralelas a ellas (Figura 4.15b), mientras que cuando hay restricciones de borde se orientan con cierto ángulo, por ejemplo  $45^\circ$  (Figura 4.15e). Por lo común las aperturas de las fisuras sobre la superficie exterior del hormigón varían desde décimas de milímetro hasta varios centímetros. Puede ocurrir que en testigos extraídos de estructuras afectadas, se observe que el fenómeno se produce en toda la masa del hormigón. Otro rasgo característico del hormigón afectado por la RAS es la presencia de aureolas o coronas, de coloración oscura o blanquecina (en materiales carbonatados) en la interfase pasta-agregado, además de la micro-fisuración de la interfase, de la pasta o incluso de los agregados. También pueden observarse variaciones en la coloración de la pasta, de los agregados y la presencia de materiales de reacción relleno fisuras y poros (Figura 4.16).



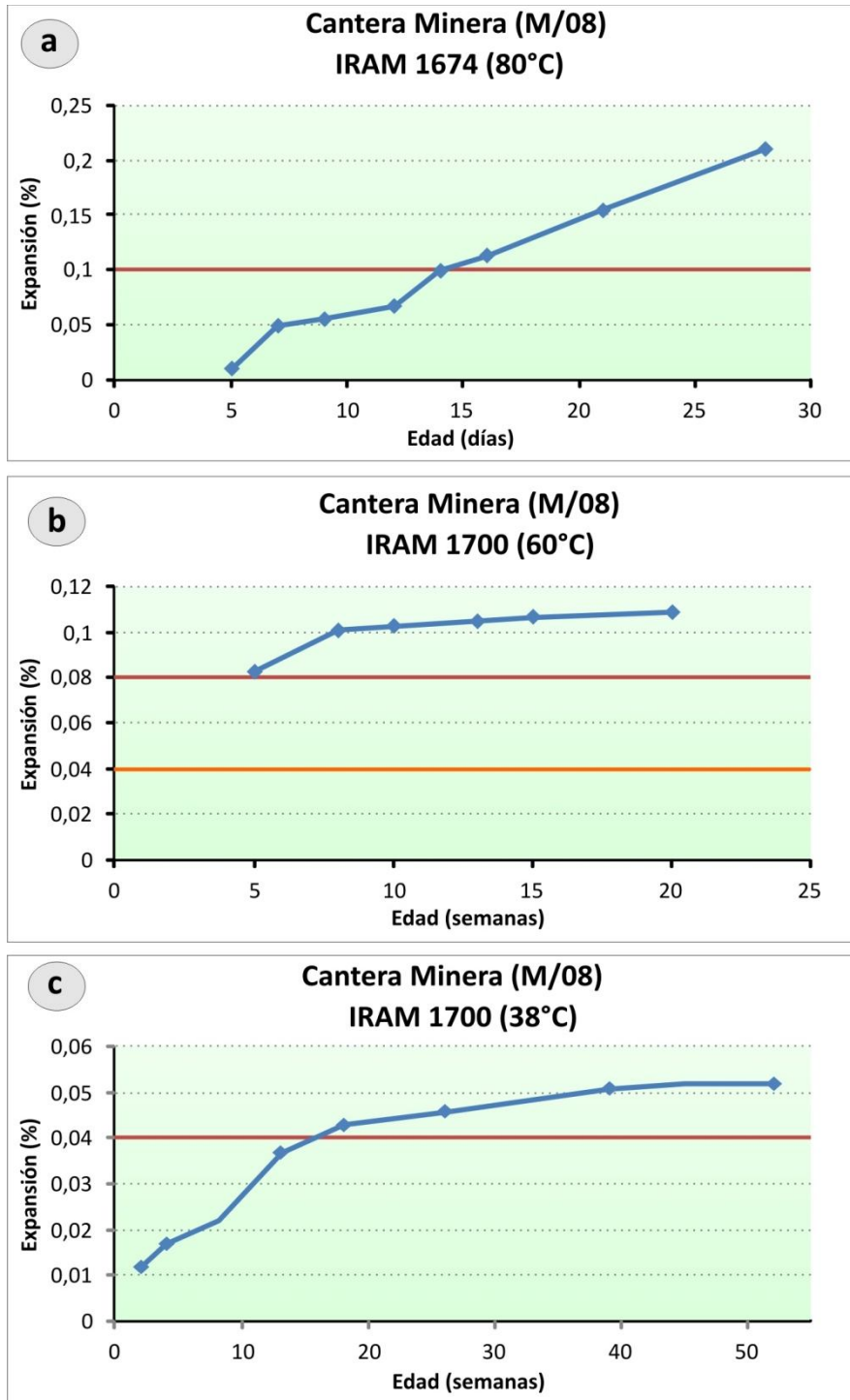
**Figura 4.16:** Pavimento de hormigón (La Plata, Buenos Aires) confeccionado con un agregado grueso con cuarzo tensionado (milonita). **(a)** Finos rebordes o aureolas de material de reacción blanquecino alrededor de los agregados y una fina fisuración en la pasta de cemento, además de macro y microporos rellenos con el mismo material. **(b)**Detalle de la corona de reacción en torno al agregado (visto con esteromicroscopio).



Los daños producidos por la RAS afectan las propiedades durables y resistentes de los hormigones. Experiencias realizadas por Giaccio *et al.* (2008) en hormigones preparados con agregados reactivos determinaron que las propiedades mecánicas de los hormigones disminuyen a medida que se desarrolla la RAS. Sin embargo, concluyen que no es fácil asociar los cambios en las propiedades mecánicas con un nivel de expansión específico. Según estos autores los cambios en las propiedades mecánicas debido a la RAS depende de los materiales y mecanismos implicados en la reacción como la mineralogía de la roca, el tamaño de grano del agregado (grueso o fino) agregados reactivos y de la cinética de reacción (tasa de expansión).

#### **4.7. ANTECEDENTES DE LA RAS EN ROCAS CUARCÍICAS**

Rocas cuarcíticas provenientes del área de General Pueyrredón estudiadas en el LEMIT calificaron según la norma IRAM 1674 e IRAM 1700 como potencialmente reactivas frente a la RAS. Estas muestras no fueron calificadas previamente por la norma IRAM 1649 y, disponiendo sólo de los resultados de expansión, se estudiaron las probetas de laboratorio post-ensayo, las cuales fueron analizadas petrográficamente según lo especificado por la norma de petrografía de hormigón endurecido, ASTM C 856 (Coelho dos Santos *et al.* 2014a y b). En la Figura 4.17 se muestran los gráficos expansión-edad tanto de ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674 1997) como del prisma de hormigón a 38° y 60° (IRAM 1700 2013).



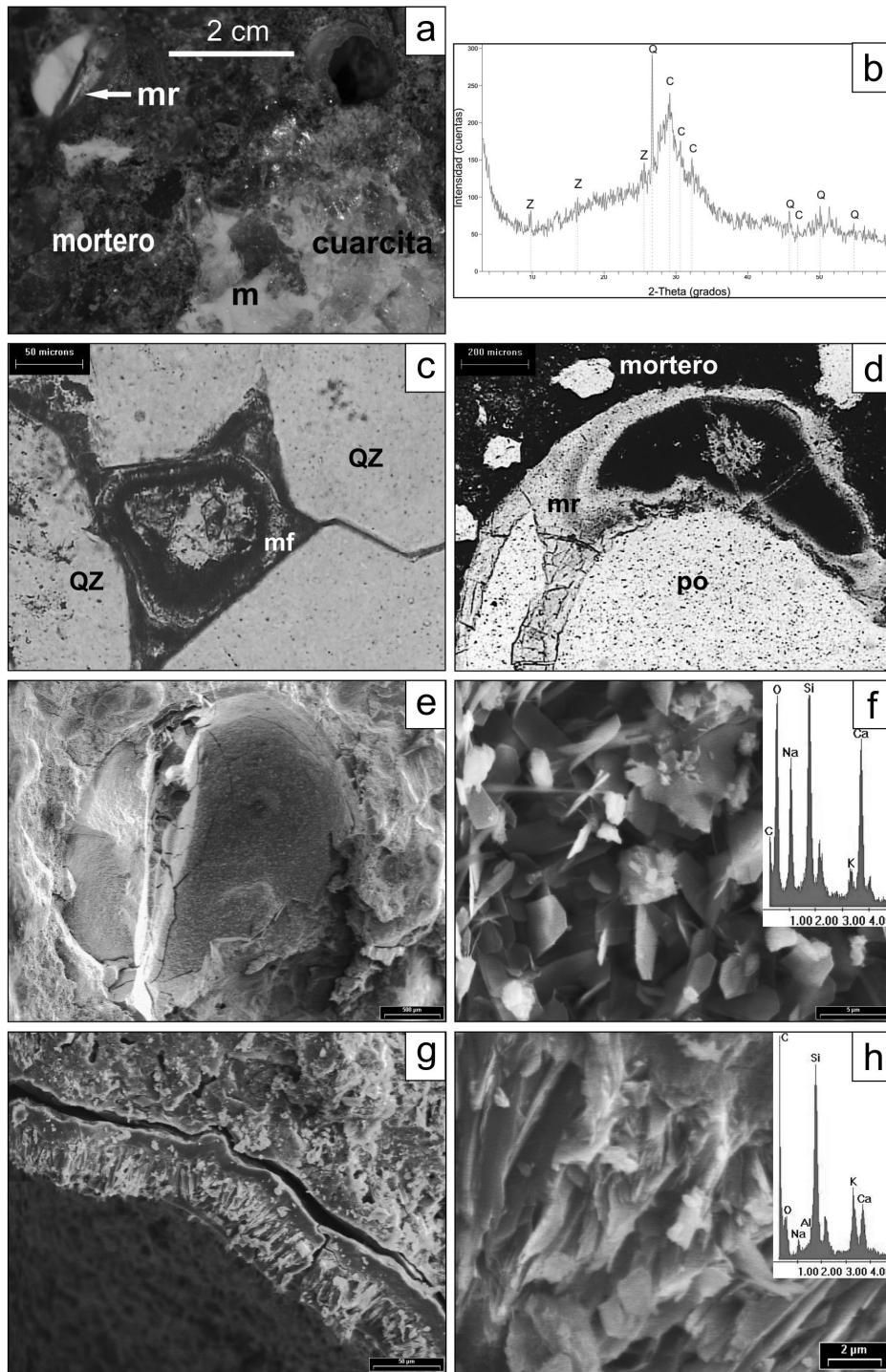
**Figura 4.17:** Gráficos expansión-edad de muestras de rocas cuarcíticas. **(a)** Resultados de IRAM 1674 (80°C); **(b)** IRAM 1700 (60°C); **(c)** IRAM 1700 (38°C).

Estos autores observaron mediante esteromicroscopio que los morteros y hormigones de las probetas post-ensayo presentaban buen estado, sin microfisuras, identificándose materiales de color blanco y/o incoloros en cavidades de aire accidental y en las zonas de interfase agregado grueso-mortero (Figura 4.18a). Además el material

colectado del interior de cavidades de la zona de interfase fue analizado mediante DRX. La Figura 4.18b muestra los resultados obtenidos, donde se observa que el difractograma presenta una elevación del fondo entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$  ( $2\theta$ ) que evidencia la presencia de abundante material amorfo. Como principales reflexiones se identifican calcita (C) y cuarzo (Q), este último constituyente del agregado. Las reflexiones de muy baja intensidad en 9,01, 5,43 y 3,48 Å se adjudicaron a un material de estructura zeolítica.

En estudios sobre secciones delgadas se observó una leve modificación en la textura de la cuarcita, principalmente pérdida parcial de la matriz que provoca el desprendimiento de granos de cuarzo y la cristalización de productos de neoformación en los espacios intergranulares de hábito fibro-radiado (Figura 4.18.c). También en cavidades de aire accidental se identificó material amorfo (Figura 4.18.d), isótropo si se observa con polarizadores cruzados. Los estudios con MEB-EDS sobre los productos de reacción presentes en poros del hormigón, muestran estructuras cristalinas bien desarrolladas que contienen Si, Al, Ca, Na y K, en su composición (Figura 4.18e-h).

En resumen, Coelho dos Santos *et al.* (2014b) demostraron con el estudio petrográfico de los prismas de hormigón ensayados según lo establecido en la norma IRAM 1700 (a  $38^\circ\text{C}$  y  $60^\circ\text{C}$ ) la existencia de productos de reacción rellenado poros y en la interfase del agregado grueso cuarcítico con el mortero. Por microscopía óptica y electrónica y DRX se identificaron materiales cristalinos y amorfos. Los productos cristalinos presentan estructura, morfología y composición química comparable con minerales del grupo de las zeolitas (Figura 4.18f y h).



**Figura 4.18:** Estereomicroscopía: **(a)** Cavidad en el mortero, rellena con material de reacción (mr) y cuarcita con matriz (m) arcillosa. **(b)** DRX del material. Microscopía óptica: **(c)** Material de habito fibroso (mf) entre granos de cuarzo (Qz). **(d)** Poro (po) con material de reacción (mr), luz paralela. MEB: **(e)** Cavidad con productos de reacción. **(f)** Detalle del buen desarrollo cristalino del material y EDS. **(g)** Poro con material de neoformación. **(h)** Detalle de g donde se observa la estructura cristalina y EDS del material.

## **CAPÍTULO 5. MÉTODOS DE ENSAYO APLICADOS EN EL ESTUDIO DE LA RAS.**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

### **5.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS ROCAS CUARCÍTICAS Y HORMIGONES**

**5.2.1. Densidad y absorción de los agregados. IRAM 1533**

**5.2.2. Ensayos de resistencia al desgaste Los Ángeles. IRAM 1532**

**5.2.3. Densidad y absorción de hormigones. ASTM C 642**

### **5.3. MÉTODOS APLICADOS EN EL ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL**

**5.3.1. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Norma IRAM 1649**

**5.3.1.1. Difracción de rayos-X (DRX)**

**5.3.1.2. Microscopía electrónica de barrido (MEB)-espectrometría de energía dispersiva (EDS)**

**5.3.2. Agregado grueso para hormigón de cemento. Norma IRAM 1531**

**5.3.3. Método acelerado de la barra de mortero. Norma IRAM 1674**

**5.3.4. Método del prisma de hormigón. Norma IRAM 1700**

**5.3.5. Método químico y método de la barra de mortero**

**5.3.6. Examen petrográfico de hormigón endurecido. Norma ASTM C 856**

**5.3.6.1. Microscopía de fluorescencia (MF)**

**5.3.6.2. Difracción de rayos-X (DRX)**

**5.3.6.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS)**

### **5.4. OTROS MÉTODOS PARA EVALUAR LA RAS**

**5.4.1. Normas de petrografía ASTM y RILEM**

**5.4.2. Normas de ensayos físicos para evaluar RAS: ASTM y RILEM.**

### **5.5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE LA RAS**

## 5.1. INTRODUCCIÓN

Los trabajos de Stanton (1940, 1942) incluyen métodos para determinar la reactividad potencial de los agregados, como el método de la barra de mortero, los que fueron adoptados por la Sociedad Americana para ensayo de Materiales (American Society for Testing Materials o ASTM) en 1950 (Murlidhar *et al.* 2016).

En la actualidad, a nivel nacional e internacional, se cuenta con varios reglamentos y normativas, que apuntan a la caracterización petrográfica de los agregados (así como también del hormigón) a fin de determinar si pueden o no desencadenar la reacción álcali-silice (RILEM AAR-1, ASTM C 295, ASTM C 856, IRAM 1649, además de IRAM 1512 2013, IRAM 1531 2016). Además existen ensayos que valoran la reactividad potencial de los agregados mediante la elaboración de prismas de hormigón y barras de mortero en laboratorio, sometidos en un tiempo determinado a condiciones de humedad, alcalinidad y temperatura determinada (ASTM-C-1260; ASTM-C-1293; RILEM AAR-2, RILEM AAR-3, RILEM AAR-4.1; IRAM 1674; IRAM 1700). Esta última serie de ensayos, sobre todo los métodos acelerados, se han desarrollado por la necesidad de obtener resultados de caracterización del hormigón y de sus materiales en un corto período de tiempo, existiendo la tendencia a considerar la aptitud y viabilidad del uso de los materiales en función de los resultados obtenidos (Giovambattista *et al.* 1985, 1997).

En Argentina, el primero en evaluar la potencial reactividad frente a la RAS utilizando ensayos normalizados fue el LEMIT (Colina *et al.* 1967). Para ello utilizaron distintos porcentajes de agregados compuestos por ópalo y calcedonia como componentes deletéreos, en reemplazo de una arena natural no reactiva procedente del río Uruguay. Los agregados potencialmente reactivos fueron clasificados petrográficamente por la norma ASTM-C-295, ya que en Argentina la norma de petrografía del agregado (IRAM 1649) fue implementada a partir de 1968. Los materiales también se ensayaron por el método de la barra de mortero, ASTM-C-227 para determinar su reactividad potencial (Mortar Bar Method), obteniendo curvas expansión-edad para los diferentes porcentajes. A partir de estas curvas se obtuvieron valores máximos de expansión para cantidades específicas de cada agregado (efecto *pessimum*).

Wainsztein y Traversa (1975), evaluaron algunos ensayos normativos implementados en Argentina a partir de los 60', como el examen petrográfico IRAM 1649 (2008), el

método químico IRAM 1650 (1968) y el método de la barra de mortero IRAM 1637(1992). Estos dos últimos están actualmente en desuso.

Las normas que establecen la potencial reactividad de los agregados se fueron actualizando desde su creación hasta el presente. En los últimos 50 años, se intensificaron los ensayos y estudios a fin de detectar agregados potencialmente reactivos y aplicar soluciones con la utilización de cementos especiales, adiciones minerales activas (AMA) y/o aditivos como lo establece actualmente la norma de agregados gruesos para hormigón IRAM 1531 (2016).

## **5.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS ROCAS CUARCÍTICAS Y HORMIGONES.**

En cuanto a los parámetros físicos del agregado, la absorción y densidad (IRAM 1533 2002) son importantes para poder dosificar adecuadamente las mezclas de hormigón, sobre todo respecto de la relación agua – cemento. La densidad está en función de la densidad individual de cada componente del agregado, pero la absorción puede estar ligada ya sea a la porosidad de la roca como a la existencia de componentes que absorban agua como por ejemplo las arcillas.

Otro parámetro físico importante a realizar en los agregados es el ensayo de desgaste Los Ángeles (IRAM 1532 2000), relacionado también a la composición mineralógica, alteraciones y texturas de las rocas.

También en el hormigón es importante la determinación de los parámetros de absorción y densidad la cual está relacionada al volumen de poros permeables del material (ASTM-C-642 2013).

### **5.2.1. Densidad y absorción de los agregados. Norma IRAM 1533**

Para determinar la densidad relativa real, la densidad relativa aparente y la absorción de agua en agregados gruesos se aplica la norma IRAM 1533 (2002). Para ello se determina por duplicado la masa sumergida en agua ( $m_a$ ), la masa saturada superficie seca ( $m_s$ ) y la masa seca en estufa ( $m$ ) de una muestra del agregado grueso a ensayar.

Densidad relativa real:

$$d1 = \frac{m}{m - ma}$$

Densidad relativa aparente del agregado seco:

$$d2 = \frac{m}{ms - ma}$$

Densidad relativa aparente del agregado saturado y superficie seca:

$$d3 = \frac{ms}{ms - ma}$$

Absorción:

$$A = \left( \frac{ms - m}{m} \right) * 100\%$$

### 5.2.2. Ensayos de resistencia al desgaste Los Ángeles. Norma IRAM 1532

La muestra a ensayar se obtiene por tamizado según la norma IRAM 1501 (2006), se lava y se seca por separado y se selecciona la granulometría que más se acerca a la muestra del agregado. Luego se pesan las cantidades correspondientes a la graduación seleccionada. Las graduaciones son 7 y se identifican con letras (A, B, C, D, E, F y G). Una graduación B corresponde las granulometrías: pasa tamiz IRAM 19 mm retenido tamiz 12,5 mm y pasa tamiz IRAM 12,5 mm retenido tamiz 9,5 mm de las cuales se requiere 2,5 kg de cada fracción. La muestra total con la carga abrasiva se somete a 500 vueltas (30-33 v/minuto) en el tambor de la máquina Los Ángeles. La carga abrasiva corresponde a bolas de acero de 47 mm de diámetro y 390 g de peso. Para un graduación tipo B se utilizan 11 bolas correspondientes a  $4584 \pm 25$  g. Finalizado el ensayo se retira el material del tambor y se pasa por el tamiz IRAM 1,7 mm cuya fracción retenida en dicho tamiz se lava y se seca en estufa hasta lograr peso constante, se enfría y luego se pesa. Finalmente se calcula el porcentaje de pérdida por abrasión mediante la siguiente fórmula:

$$P = \left( \frac{m - mf}{m} \right) * 100\%$$

$P$ = pérdida por abrasión por ciento (%)

$m$ = masa de la muestra seca a ensayar (g)

$mf$ = masa del material retenido en el tamiz IRAM 1,7 mm (g)



### 5.2.3. Densidad y absorción de hormigones. Norma ASTM C 642

El método ASTM-C-642 (2013) es útil para determinar el cumplimiento de especificaciones requeridas en el hormigón y para mostrar diferencias entre varios puntos de un mismo hormigón. Desde hace algunos años son propiedades útiles para caracterizar a los agregados reciclados.

Básicamente la norma especifica que el espécimen del hormigón a ser analizado se somete a secado en estufa durante 24 horas, se deja enfriar y se registra la masa. Luego se sumerge en agua a 21°C un tiempo menor que 48 horas. Se seca la superficie y se determina la masa en intervalos de 24 horas hasta peso constante. Se registra con estola masa saturada después de inmersión. Luego se coloca la muestra en un recipiente, se llena con agua y se somete a ebullición. Se deja enfriar a temperatura ambiente, se seca la superficie y se registra la masa (saturada después ebullición). Se suspende la muestra y se sumerge en agua determinando la masa aparente en agua. Con estos datos se calcula la absorción, la densidad aparente y el volumen de poros permeables.

Las muestras a medir deben tener un volumen de al menos 350 cm<sup>3</sup> o pesar al menos 800 g para hormigones de densidad normal.

Las masas (en gramos) registradas son: masa sumergida en agua ( $m_a$ ), la masa saturada superficie seca ( $m_s$ ) y la masa seca en estufa ( $m$ ) de una muestra del hormigón a ensayar. Las formulas utilizadas son:

Densidad relativa aparente del agregado saturado y superficie seca:

$$d_3 = \frac{m_s}{m_s - m_a}$$

Absorción:

$$A = \left( \frac{m_s - m}{m} \right) * 100\%$$

Volumen de poros permeable:

$$\text{Vol. de poros permeable (\%)} = \left( \frac{m_s - m}{m_s - m_a} \right) * 100\%$$

### 5.3. MÉTODOS APLICADOS EN EL ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL

En un hormigón la durabilidad es función de las características del cemento y de los agregados, de la dosificación, de las condiciones de elaboración, forma de colocación, del curado y de las características del medio circundante (Veronelli 1978). Por otro lado, en las investigaciones vinculadas con la durabilidad del hormigón y de los materiales que lo constituyen, existen dos tipos de ensayos: 1) estudios *in situ* sobre estructuras o probetas sometidas a la acción de agentes naturales; 2) ensayos de laboratorio sobre probetas expuestas a ambientes específicos de temperatura, humedad, concentraciones de agentes agresivos (soluciones con sulfatos, alcalinas, etc.). Se recomienda que los estudios de laboratorio sean realizables en corto en tiempo y de fácil ejecución, pero para que tengan validez debe verificarse que el proceso físico-químico no difiera marcadamente del que se desarrolla en el medio natural; y los parámetros de evaluación deben cuantificar todos los aspectos vinculados con la alteración. La necesidad de contar con resultados en períodos de tiempo breves, en particular para la evaluación de la reactividad de los agregados, ha llevado al diseño de ensayos denominados acelerados, en los cuales se incrementa la superficie expuesta del material, la temperatura y la concentración de álcalis de manera que el ambiente se torne altamente agresivo (Giovambattista *et al.* 1997).

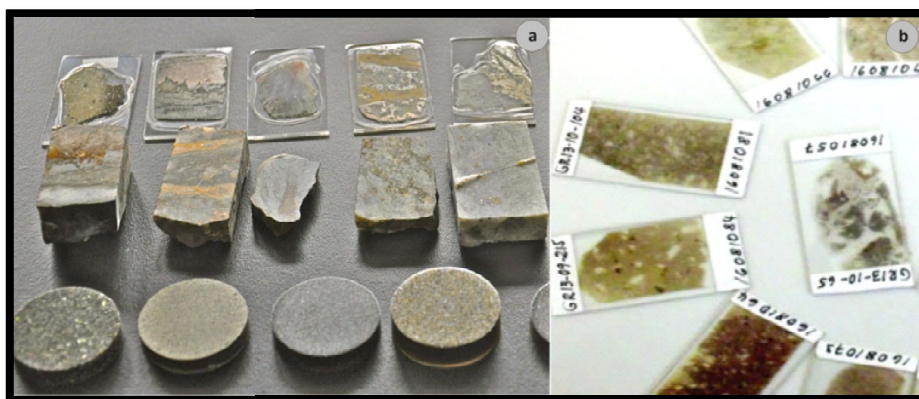
A continuación se mencionan los métodos normativos para evaluar la potencial reactividad de los agregados aplicados en este trabajo de tesis.

- Examen petrográfico de agregados para hormigón. Norma IRAM 1649.
- Agregado grueso para hormigón de cemento. Norma IRAM 1531
- Método acelerado de la barra de mortero. Norma IRAM 1674.
- Método del prisma de hormigón. Norma IRAM 1700.
- Examen petrográfico de hormigón endurecido. Norma ASTM-C-856.

### 5.3.1. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Norma IRAM 1649

El objeto de esta norma es establecer los procedimientos para el examen petrográfico de muestras representativas de materiales propuestos para uso como agregados para hormigón. Se establece qué técnicas petrográficas deben usarse y como se aplican.

Para los muestreos del material de las canteras se aplica el procedimiento indicado en el inciso 4 de la norma. Por lo tanto, se especifica el lugar exacto de donde se extrajeron las muestras y la geología del lugar y para canteras en explotación, en las cuales se encuentran disponibles pilas de material acopiado o producido, la norma recomienda muestrear como mínimo 45 kg o 300 trozos; en canteras no productivas en las que no exista acopio de material procesado se muestrea como mínimo 2 kg de cada unidad geológica con trozos de masas iguales o mayores que 0,5 kg. Las muestras de rocas son analizadas según lo estipulado en el inciso 9 de la norma, orientado a rocas de afloramiento rocoso y frente de explotación. Las muestras deben examinarse mediante lupa binocular o esteromicroscopio en la superficie de los agregados, realizar cortes delgados y observarlos mediante microscopio petrográfico, lo cual implica la identificación de los tipos litológicos, sus condiciones físicas y variaciones de tenacidad, porosidad, tamaño de grano, textura y presencia de constituyentes capaces de producir reacciones perjudiciales en el hormigón. Los equipos y procedimientos realizados en la preparación de secciones delgadas se detallan en el inciso 3 de la norma. En la Figura 5.1 se muestran los pasos de preparación de una sección delgada.



**Figura 5.1:** (a) Secciones de roca que ejemplifican los pasos de corte, impregnación y pulido. (b) Secciones delgadas.

En el caso de los minerales de arcilla se complementa su investigación con estudios de difracción de rayos X (DRX), especialmente valioso para la identificación semicuantitativa de estos minerales.

Para agregados de trituración el inciso 10 de la norma establece que el examen para agregado grueso es similar que para testigos de roca, excepto que sean necesarios datos cuantitativos los que se obtienen por conteo de partículas de las distintas fracciones por tamizado.

En la norma 1649 se indica cómo se realiza la cuantificación de constituyentes por fracción granulométrica, el cálculo ponderado por fracción y por último, en base a los dos puntos anteriores, la composición y condición de una muestra de agregado. El procedimiento se basa en calcular la composición de cada fracción sobre tamiz, de una muestra y el promedio ponderado de la composición de toda la muestra. Como se muestra en la Tabla 5.1, se expresa la composición de cada fracción sobre tamiz por la suma del número total de partículas de cada fracción contada, y se calcula cada constituyente en cada condición (por ej. con distinto grado de alteración) como un porcentaje de la cantidad total (nº de partículas en porciento en cada fracción de tamiz).

Composición de fracciones retenidas en tamices IRAM indicados						
Porcentaje individual retenido en tamiz IRAM	12,5 mm		9,5 mm		4,75 mm	
	33,30%		33,30%		33,30%	
Constituyentes	Nº de partículas	%	Nº de partículas	%	Nº de partículas	%
A1	302	60	220	44	170	34
A2	57	11	140	28	195	39
B	139	28	135	27	110	22
C	4	1	5	1	25	5
<b>Total</b>	500	100	500	100	500	100

**Tabla 5.1:** Cuantificación de constituyentes por fracción.

Luego se obtienen los porcentajes por pesada de la fracción sobre tamiz en el total de la muestra y se calculan los porcentajes de un constituyente en el total de la muestra en un determinado tamaño (porcentajes de constituyentes ponderados en la fracción de tamiz) multiplicando el porcentaje del constituyente en cada fracción de tamiz (cálculo anterior, Tabla 5.1) por el porcentaje de la fracción sobre tamiz en toda la muestra (Tabla 5.2). Así se obtiene el porcentaje ponderado de cada constituyente en el total de la

muestra, por adición de los porcentajes ponderados de cada constituyente en cada fracción de tamiz. A continuación se da un ejemplo del cálculo para la confección de la Tabla 5.2.

$$\text{Cálculo del \% ponderado: } \frac{60\% * 33,3\%}{100\%} = 20\%$$

Constituyentes	% de constituyente ponderados en cada fracción tamiz IRAM			Composición Ponderada (%)
	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	
A1	20,1	14,7	11,3	46,1
A2	3,8	9,3	13	26,1
<b>Total A</b>	<b>23,8</b>	<b>24</b>	<b>24,3</b>	<b>72,1</b>
B	9,2	9	7,3	25,5
C	0,2	0,3	1,7	2,2
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>100</b>

**Tabla 5.2:** Cálculo ponderado por fracción granulométrica.

En caso de ser necesario se puede confeccionar una tabla adicional a partir de los datos de las Tablas 5.1 y 5.2 de la composición y condición de la muestra de agregado. En el trabajo realizado en la presente Tesis no se toma en cuenta ya que se trata de un agregado de trituración (prácticamente) monolitológico y esta tabla es especial para el estudio de rodados y arenas naturales.

Por último el inciso 11 de la norma establece realizar la descripción cuali y cuantitativa de las propiedades o constituyentes que tienen efectos desfavorables en el hormigón, en este estudio, componentes que reaccionen con los álcalis del cemento portland (sílice metaestable). Cuando los constituyentes identificados no pueden ser cuantificados apropiadamente se realizan estudios complementarios para evaluar las propiedades adversas determinadas por el análisis petrográfico. Como se indica en anexo B de la norma, para este análisis, además del uso del esteromicroscopio y microscopio petrográfico se procede a la aplicación de las técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis con espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS).

### 5.3.1.1. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es una de las pocas técnicas que realiza la identificación directa de fases minerales cristalinas y es ampliamente utilizada en la ciencia y tecnología de los materiales. Los resultados obtenidos de las técnicas de DRX son, en el mejor de los casos, semicuantitativos (St. John *et al.* 1998; Poole y Sims 2016).

Los distintos difractómetros utilizados para el estudio tanto de monocristales como de polvos, procesamiento de las muestras y los tipos de espectros producidos son detallados en abundante información bibliográfica sobre DRX (Klein y Hurlbut 1998). En la práctica los resultados se materializan en un espectro de difracción. Los picos del espectro de una mezcla de materiales cristalinos proveen de cuatro tipos de información de la misma: posición del pico que da la especie cristalina presente, la intensidad del pico (altura y fondo) relacionada a la composición (sustituciones en soluciones sólidas) y cantidad de la fase cristalina, la orientación preferencial de las partículas en la muestra y el ancho del pico que nos indica el grado de cristalinidad y distribución del tamaño de partícula. En la práctica, los límites de detección de fases dependen del grado de cristalinidad y ordenamiento de la fase analizada. Como una guía aproximada, si el porcentaje presente de una determinada fase cristalina en una muestra es inferior al 2% la detección mediante la DRX puede ser muy difícil (Poole y Sims 2016).

En este trabajo de tesis la identificación de los materiales finos implica el conocimiento de la presencia de arcillas expansivas o de materiales potencialmente reactivos como ópalo-calcedonia y/o cuarzo criptocristalino.

### 5.3.1.2. Microscopía electrónica de barrido -espectrometría de energía dispersiva

El microscopio electrónico de barrido (MEB) (siglas en inglés SEM, Scanning Electron Microscope) es uno de los instrumentos más versátiles para el examen y análisis de características microestructurales de objetos sólidos. Posee alta resolución (de 20 a 50 Å) y da una apariencia tridimensional de las imágenes, producto de su gran profundidad de foco (entre 100 y 1000 veces mayor que la de un microscopio óptico a la misma magnificación). En general los MEB cuentan con capacidad analítica mediante un detector de rayos X de energía dispersiva, que permite obtener información

composicional. Un MEB operando a una energía de 20Kv tiene un tamaño del spot (del haz de electrones) de aproximadamente 2-2,5 nm (Kang *et al.* 2013; Poole y Sims 2016). Si al microscopio se acopla un detector de rayos X dispersivo en energías, este permite obtener imágenes de rayos X, además de los espectros de composición química elemental. Estos análisis proveen información cualitativa y semicuantitativa de la zona en que se encuentran determinados elementos en forma simultánea.

La alta resolución y magnificación del MEB es una ayuda invaluable para las investigaciones petrográficas, siendo una técnica complementaria a la microscopía óptica con luz polarizada.

### **5.3.2. Agregado grueso para hormigón de cemento. Norma IRAM 1531**

Los agregados que se empleen en hormigones que vayan a estar expuestos en forma permanente o periódica al contacto con agua, suelos húmedos o atmósferas con humedad relativa mayor que 60%, deben ser analizados desde el punto de vista de la reacción álcali-agregado, siguiendo una serie de indicaciones especificadas en las normas según corresponda. Se establece que el examen petrográfico se debe realizar según IRAM 1649 (2008). En la Tabla 5.3 se muestran los minerales potencialmente reactivos, los cuales pueden presentarse en forma de partículas individuales en arenas y gravas o formar parte de rocas o clastos (ejemplo: vidrio volcánico en andesita) y se indican los porcentajes límites de cada uno. En el caso del agregado grueso, si el mismo está constituido por una mezcla de dos o más fracciones de diferente granulometría y petrología, los límites mostrados en la tabla mencionada deben ser aplicados a cada una de las fracciones individualmente. Por otro lado si el agregado contiene dos o más minerales de los indicados en la Tabla 5.3, el agregado debe ser considerado potencialmente reactivo, independientemente del contenido en que se halle presente.

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

**Tabla 5.3:** Componentes reactivos y sus respectivos porcentajes para considerados potencialmente reactivos frente a la RAS (modificado de IRAM 15312016).

Cuando se determina que el agregado es potencialmente reactivo a partir del estudio petrográfico, su reactividad debe ser comprobada por algún método acelerado (IRAM 1674 o IRAM 1700 a 60 °C) o por el método tradicional del prisma de hormigón (IRAM 1700 a 38 °C). En la Tabla 5.4 se especifica para cada ensayo el tiempo de evaluación y los valores límite de expansión para considerar a un agregado potencialmente reactivo. Por el contrario, los agregados que no resulten potencialmente reactivos, pueden ser utilizados sin restricciones. Aunque el examen petrográfico aporta información acerca de la composición de un agregado, mediante la identificación y la determinación de las cantidades aproximadas de los minerales reactivos, permitiendo a su vez determinar cuáles son los métodos de ensayo más convenientes para estudiar su comportamiento y ayudando a interpretar los resultados obtenidos en los ensayos físicos, deja en claro que si bien un agregado puede ser aceptado como no reactivo (desde el punto de vista petrográfico) existe un riesgo asociado a esta determinación, ya que algunos componentes reactivos pueden no ser detectadas mediante microscopía óptica.



Método de ensayo		Aplicable para evaluar agregados		Edad de evaluación	Valor límite de expansión (%)
		Afectados por:	Potencialmente reactivos debido a la presencia de:		
IRAM 1674		RAS	Ver excepciones <sup>1)</sup>	16 días	0,1
IRAM 1700	60°C	RAS y/o RAC	Ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita, dolomita (RAC)	13 semanas	0,04
			Cuarzo tensionado y/o microcristalino		0,08
	38°C	RAS y/o RAC	Sin restricciones	52 semanas	0,04

**Tabla 5.4:** Métodos de ensayo y valores límites de expansión para determinar si un agregado es potencialmente reactivo frente a la RAS (modificado de IRAM 1531 2016).

Según la norma existen referencias bibliográficas que indican que ciertos agregados a pesar de mostrar un comportamiento deletéreo en servicio o de expandir más de 0,040% en un año al ser ensayado según la IRAM 1700, 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 también agregados que deben su reactividad al cuarzo tensionado. Por este motivo, estos tipos de agregados deben ser evaluados mediante el ensayo tradicional de la IRAM 1700 (38°C) o el método acelerado del prisma de hormigón de la IRAM 1700 (60°C).

Por último es de destacar que la norma IRAM 1531 considera al cuarzo microcristalino y fuertemente tensionado como potencialmente reactivos en el porcentaje de la Tabla 5.4, pero respecto del cuarzo fuertemente tensionado no hace ninguna especificación de los parámetros que deben considerarse para determinar el grado de deformación o tensión de este mineral. La norma americana, ASTM-C-294 y ASTM-C-295, y el reglamento europeo RILEM AAR.1., hacen mención sobre la potencial reactividad de los agregados conteniendo cuarzo microcristalino y fuertemente tensionado pero tampoco especifican como evaluar esta última condición en agregados que lo contienen. Por esto último, en este trabajo de Tesis también se dispondrá a evaluar la deformación del cuarzo en base a microtexturas de deformación, presencia de cuarzo microcristalino y al método de la determinación del AEO que algunos autores actualmente aún aplican como un parámetro para determinar el grado de tensión del cuarzo (Ramos et al. 2016).

### 5.3.3. Método acelerado de la barra de mortero. Norma IRAM 1674

La reactividad alcalina potencial de los agregados puede ser estudiada mediante el ensayo acelerado de la barra de mortero, basado en el método sudafricano propuesto por Davies y Oberholster (1987), conocido como NBRI (National Building Research Institute), y permite evaluar la reactividad potencial de agregados finos o gruesos en 16 días. Además, se ha encontrado que para este ensayo el contenido de álcali del cemento a utilizar tiene un efecto despreciable o menor sobre la expansión.

El ensayo consiste en moldear tres barras de mortero de 25 mm x 25mm x 285 mm. El agregado seleccionado se procesa tomando una muestra representativa. En el caso de un agregado grueso se tritura de modo que todo el material pase por el tamiz IRAM 4,75 mm. Luego se separa la muestra en fracciones granulométricas, se lava y se lleva a estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24hs. La Tabla 5.5 muestra los valores de abertura de los tamices y el porcentaje en peso de cada fracción granulométrica que se utiliza en la dosificación.

Abertura nominal del tamiz IRAM		Masa
Pasa por:	Retenido en:	%
4,75 mm	2,36 mm	10
2,36 mm	1,18 mm	25
1,18 mm	600 $\mu\text{m}$	25
600 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$	25
300 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$	15

**Tabla 5.5:** Fracciones granulométricas para IRAM 1674 (1997).

La proporción de materiales son de 1 parte de cemento por cada 2,25 partes en masa de agregado graduado, es decir que para el moldeo de tres probetas serán 440 g de cemento y 990 g de agregado. La relación agua cemento (a/c) es especificada en 0,47. El tiempo total de moldeo no debe exceder 135 segundos y se recomienda que el llenado de los moldes se efectúe en dos capas compactando cada una y alisando la superficie al finalizar. Los requerimientos para los moldes y los pernos deben cumplir con IRAM 1637 (1992).

Las barras se desmoldan a las 24 horas de su confección y se colocan en un recipiente (adecuado al procedimiento) con agua a  $23^{\circ}\text{C}$  y se eleva la temperatura gradualmente

hasta 80 °C. A las siguientes 24 horas se registra la lectura inicial mediante un comparador analógico o digital el cual mide los cambios de longitud de las barras. Las medidas deben ser realizadas en el lapso de  $15 \pm 5$  segundos, para prevenir el exceso de secado y el enfriamiento. Luego de la primera lectura se colocan en una solución de NaOH 1N a 80°C, realizando lecturas periódicas con lapsos de tiempo no superiores a dos días (Figura 5.2). La expansión de las probetas, después de 12 días inmersas en la solución, es usada para evaluar la reactividad potencial de los agregados.



**Figura 5.2:** Medida de la expansión de una barra de mortero en comparador digital del Laboratorio LEMIT.

La norma IRAM 1531 (2016) contempla que el agregado es potencialmente reactivo cuando la expansión del mortero es mayor de 0,100%. Cuando el agregado esté constituido por minerales de elevada reactividad (ópalo y calcedonia) se deben ensayar distintas combinaciones del agregado bajo estudio (se considera apropiado realizar cinco combinaciones como mínimo), con otro de comportamiento conocido y de características inocuas (no reactivo) de manera de evaluar la posible existencia del denominado efecto *pessimum* (porcentaje de agregado que da la máxima expansión). Cuando alguna de las combinaciones evaluadas posea una expansión mayor a la indicada, el material estudiado debe ser considerado potencialmente reactivo.

Por otra parte, cuando el agregado sea considerado potencialmente reactivo, su reactividad frente a los álcalis debe ser comprobada con cualquiera de los métodos del prisma de hormigón de acuerdo con la IRAM 1700 (2013). Como alternativa, la factibilidad de uso del agregado en la elaboración de hormigones, desde el punto de

vista de la RAS, sólo es posible si se emplea algún método preventivo que inhiba los efectos deletéreos.

#### **5.3.4. Método del prisma de hormigón. Norma IRAM 1700.**

El ensayo del prisma de hormigón fue desarrollado por Swenson (1957) a mediados de la década del '50, y posteriormente adoptado, con algunas modificaciones, por la Asociación de Normalización Canadiense, por ASTM-C-1293 (2018) y RILEM AAR-3 (TC-106-3 2016). En Argentina, también ha sido adoptado bajo la norma IRAM1700. Este ensayo puede ser usado para estudiar la reactividad de un agregado o del conjunto de agregados finos y gruesos.

Se confeccionan tres prismas con el material a estudiar usando una mezcla de proporciones definidas. Cuando el ensayo se realice para evaluar la reactividad del agregado grueso, se tiene que emplear un agregado fino calificado como no reactivo por el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674 1997), con expansión inferior a 0,08%. Esto es importante porque algunos agregados pueden no ser detectados mediante este ensayo debido a la reducida expansión obtenida (expansión a 16 días < 0,100%), por esto se utiliza un valor límite de expansión más restrictivo, con el propósito de asegurar el carácter inocuo del agregado. También se considera que si se ensaya mediante el prisma de hormigón IRAM 1700 (2013), la expansión debe ser menor a 0,015% a las 52 semanas. El agregado fino debe cumplir con la norma IRAM 1512 (2013), tener un módulo de finura entre  $2,70 \pm 0,20$  y ser procesado de modo que quede descartado el material retenido en el tamiz IRAM 4,75 mm y el pasante tamiz IRAM 150  $\mu\text{m}$ .

En la preparación del agregado grueso se debe tener en cuenta que si contiene partículas mayores que 19 mm, debe ser triturado de modo que la totalidad de la muestra pase por este tamiz. El agregado debe ser preparado conforme a la norma IRAM 1505 (Tabla 5.6), lavado y secado en estufa ( $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) durante 24 h.

Abertura nominal del tamiz IRAM		Fracción de masa	
		Tamaño máximo del agregado grueso	
Pasa por:	Retenido en:	Mayor o igual a 19,0 mm	13,2 mm
19,0 mm	13,2 mm	1/3	-
13,2 mm	9,5 mm	1/3	1/2
9,5 mm	4,75 mm	1/3	1/2

**Tabla 5.6:** Granulometría del agregado grueso (Tomado de IRAM 1700 2013).

Se recomienda utilizar un cemento portland normal CPN40 que cumpla con la norma IRAM 50000 (2017), con un contenido de álcalis de  $0,90 \pm 0,10\%$  calculado como óxido de sodio equivalente ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) mediante la fórmula:  $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$ . En cuanto a la dosificación especificada, el contenido de cemento es de  $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ , una relación agregado grueso-fino (con densidades relativas normales entre 2,0 y 3,0) de 60/40 o 1,5, y una relación agua-cemento (a/c) 0,42 a 0,45 para obtener una trabajabilidad adecuada del hormigón fresco. Si la misma se considera inadecuada, se recomienda incorporar a la mezcla un aditivo superplastificante o moderador de agua. El contenido de álcalis del cemento empleado en la preparación del hormigón, debe ser incrementado a 1,25% de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente, para lo cual se debe agregar hidróxido de sodio (NaOH) al agua de mezclado en la cantidad necesaria según los cálculos detallados en la norma; el valor en masa de cemento recomendado sería de 5,25 kg de  $\text{Na}_2\text{O}$  por  $\text{m}^3$  de cemento. El valor de 1,25%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  ha sido seleccionado para acelerar el proceso de expansión, no para reproducir las condiciones del hormigón en obra. Para el moldeo de las tres probetas, la mezcla de hormigón se prepara según lo especificado en la norma IRAM 1534 (2004), logrando un asentamiento de 8 cm y un contenido de aire menor al 2%. Los moldes de los prismas deben tener una sección cuadrada interior de  $75 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , y un largo entre 275 mm y 405 mm; los prismas de un mismo ensayo tiene que ser de un mismo largo, y los pernos colocados en el centro de cada extremo deben ser de acero inoxidable. Para el moldeo de prismas se procede a compactar y alisar la superficie del hormigón dentro de los moldes según IRAM 1597 (1992). El hormigón fresco se coloca en dos capas y cada una es compactada con una varilla del diámetro establecido, luego de este procedimiento se realiza un golpeteo a fin de asegurar la correcta compactación, eliminando así los huecos dejados por la varilla. Luego de terminado el moldeo, se cubren los prismas con una lámina de polietileno colocándolos en cámara húmeda ( $23^\circ\text{C}$

$\pm 2^{\circ}\text{C}$  y una HR mayor al 95%). El dispositivo de medición de las probetas se denomina comparador de longitudes debe cumplir con ciertos requerimientos (IRAM 1637 1992). A las 24 hs de la elaboración, los prismas se desmoldan y se procede a la lectura del largo efectivo inicial o lectura efectiva (Le), después se acondicionan y se almacenan hasta la medida de su lectura inicial, la cual dependerá si el ensayo es por el método tradicional del prisma de hormigón ( $38^{\circ}\text{C}$ ) o por el método acelerado del prisma de hormigón ( $60^{\circ}\text{C}$ ). En su acondicionamiento cada probeta se envuelve con una tela saturada con agua y en una lámina de polietileno y se coloca en una bolsa del mismo material agregando  $5\text{ cm}^3$  de agua en su interior. Finalmente, los prismas se colocan en un recipiente con tapa, revestido interiormente con papel secante; en el fondo del recipiente también se coloca agua, dejando libre unos 2 cm entre la superficie del agua y en las bolsas con los prismas. Para la lectura inicial (Li) en el método tradicional, los prismas contenidos en el recipiente se dejan 24 horas en la sala de medición ( $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ), y después de la lectura se estacionan en una cámara a  $38^{\circ}\text{C}$ . Periódicamente se realiza la medida de la longitud de los prismas hasta la edad de 52 semanas (1 año).

En el caso del ensayo del prisma de hormigón acelerado, luego del desmolde y acondicionamiento de las probetas, se realiza la lectura de la longitud y almacenamiento de cada probeta en recipientes individuales y los cuales se llevan a estufa a una temperatura de  $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Se recomienda que los recipientes contenedores de probetas sean de plástico, con tapa hermética y de espesor mayor a 6 mm, resistentes a la temperatura y en su interior debe colocarse una base que levante a las probetas  $35\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$  del fondo. La capa de agua que se coloca en los recipientes no tiene que exceder los  $20\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ . Los contenedores para el ensayo a  $38^{\circ}\text{C}$  tienen por lo general una capacidad para albergar 6 probetas, mientras que para el ensayo a  $60^{\circ}\text{C}$  el contenedor es individual para cada probeta (Figura 5.3).



**Figura 5.3:** Prisma/as de hormigón acondicionados: **(a)** para cámara a 38°C (1 año); **(b)** acondicionado en un recipiente único para ser almacenado en estufa a 60°C (13 semanas).

Al finalizar el ensayo, se aconseja quitar la tela que envuelve los prismas y observar los signos superficiales del deterioro (fisuras, cambio de color, geles y saltaduras del mortero) y en algunos casos realizar observaciones con lupa binocular y con microscopio óptico de polarización sobre secciones delgadas de los mismos para confirmar los efectos de la reacción. En algunas ocasiones, los prismas no presentan signos de reacción en la superficie pero sí expansiones que superan el límite (Figura 5.4). En esta situación es conveniente estudiar la microestructura del hormigón para confirmar el desarrollo de la reacción.



**Figura 5.4:** Prisma de hormigón post-ensayo con eflorescencias sobre la superficie.

La norma IRAM 1531 (2016) considera para el método acelerado (temperatura de almacenado a 60°C) que si las expansiones son iguales o superan los límites señalados en la Tabla 5.4 (0,040% o 0,080% dependiendo del tipo de agregado), el agregado evaluado es potencialmente reactivo, pero su reactividad alcalina debe ser comprobada con el método tradicional del prisma de hormigón (temperatura de almacenado a 38°C). En el método tradicional, los agregados son considerados no reactivos cuando la expansión no supera el límite de 0,040% al cabo de un año. Este límite también recomendado por ASTM y RILEM, ha sido incorporado como criterio de aceptación en el reglamento CIRSOC 201 (2005). Los agregados ensayados con el método de prismas de hormigón que dan expansiones menores a 0,040% pueden ser usados sin ninguna restricción, a menos que estructuras existentes muestren un comportamiento reactivo de estos agregados. Los materiales que presentan expansiones mayores a 0,040%, si se desea emplearlos, es necesario estudiar medidas seguras para evitar la RAS.

El método del prisma de hormigón requiere de un periodo de tiempo extenso para concluir la aceptación de agregados destinados a la construcción de una obra. Se cree conveniente que los productores de agregados realicen este ensayo de forma periódica en muestras de los yacimientos y canteras a fin de disponer de antecedentes previos sobre la reactividad de los materiales que proveen, a modo de control de sus productos.

### **5.3.5. Método químico y método de la barra de mortero**

El método químico (norma IRAM 1650 1968 / ASTM C 289 2007) es un ensayo rápido que se utiliza cuando no hay tiempo suficiente para realizar el prisma de hormigón, pero con el desarrollo del método acelerado de la barra de mortero, fue perdiendo utilidad. La norma ASTM C 289 ha sido dado de baja en el año 2016.

La norma IRAM 1650 es un método para determinar la reactividad alcalina en áridos y se basa en la reacción entre una solución 1 normal de NaOH a 80°C durante 24 horas y un agregado que ha sido molido y tamizado, pasante por el tamiz IRAM N° 50 (300 µm) y retenido en el tamiz N° 100 (150 µm). La muestra se enfría y se filtra de acuerdo a lo especificado en la normativa, luego se determina la sílice disuelta y la reducción de la alcalinidad. Los agregados se consideran reactivos cuando al representarlo sobre el



gráfico reducción de alcalinidad –concentración de sílice disuelta, caen sobre la curva o a la derecha de la misma (Figura 5.5).

En cuanto al método de la barra de mortero, norma IRAM 1637 (1992) en Argentina y ASTM C 227 (2010) la norma estadounidense, son normativas que se encuentran actualmente en desuso por varios problemas relacionados fundamentalmente al contenido de álcali de los cementos utilizados para las pruebas, así como a las variaciones debido al efecto *pessimum* y al tiempo requerido de ensayo (Falcone 2013). Estos ensayos han sido reemplazados por los métodos acelerados de la barra de mortero, descritos en el inciso 5.3.3.

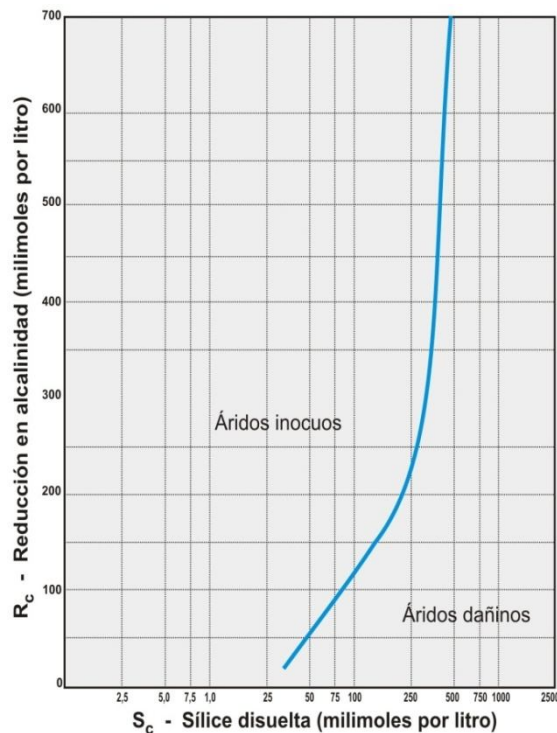


Figura 5.5: Esquema del gráfico adaptado por la norma IRAM 1650 (1968).

### 5.3.6. Examen petrográfico de hormigón endurecido. ASTM C 856

La norma ASTM-C-856, modificada por última vez en 2017, ofrece especificaciones del examen petrográfico de hormigón endurecido. No tiene su homóloga IRAM, por lo tanto para el análisis de los hormigones del presente trabajo de Tesis (Capítulo 8) se utiliza esta norma como base de estudio. La misma consiste en analizar muestras de hormigones (también aplicables a morteros) mediante el uso de esteromicroscopio o

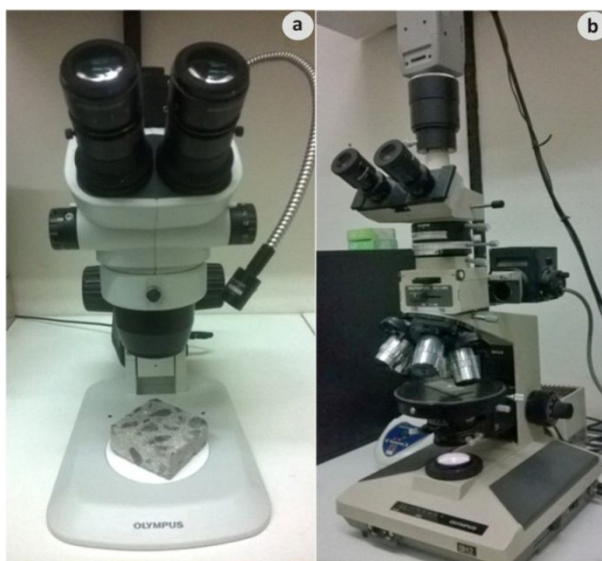
lupa binocular, microscopio petrográfico y otras técnicas complementarias (fluorescencia, MEB-EDS, DRX).

Para el estudio del hormigón, se indican las observaciones fundamentales a realizarse en la inspección visual, con esteromicroscopio y con microscopio petrográfico. En la examinación visual se toma en cuenta el conjunto de agregados que componen al hormigón. Del agregado grueso se debe indicar el tipo (grava, piedra partida, mezcla de ambas, la nomenclatura de cada tipo), el porcentaje de mezcla y la fábrica de cada roca (tamaño de las partículas, empaquetamiento, etc.); del agregado fino, el tipo (arena natural, arena manufacturada, la nomenclatura de cada tipo y la mezcla de arenas), el color, y si es perceptible la distribución, tamaño, gradación y orientación preferencial. De la pasta de cemento se describe la coloración, distribución del color, y de los vacíos, y si se observa, la abundancia, distribución, morfología, relleno, etc. de los mismos. Es importante detallar el tipo y estado de las armaduras (en el caso del hormigón armado), además de precisar el estado del hormigón y de los agregados, como son la presencia de fisuras, si están rellenas o no, si se detectan coronas o anillos de reacción en torno los agregados expuestos, etc.

Con esteromicroscopio (Figura 5.6a) se pueden realizar observaciones más precisas sobre el hormigón, ya que se trabaja con luz incidente artificial y aumentos de 7x a 70x o incluso mayores. De los agregados se describen los tipos litológicos y mineralogía (dependiendo del tamaño cristalino), al igual que su fábrica, textura superficial, tamaño, forma, distribución en la pasta de cemento, entre otras. De la pasta de cemento además de la coloración se puede evaluar la interfase pasta agregado, presencia de fisuras, y de adiciones minerales y contaminaciones (si son reconocibles bajo estas magnificaciones). Mediante esta técnica también pueden ser identificados productos neoformados en el hormigón como ettringita, productos de la RAS, entre otros. Es importante la observación de poros y fisuras que se hallen presentes tanto en la pasta de cemento e interfase, para poder caracterizar los problemas estructurales y de ataques externos que pueda tener el hormigón, y si estos se presentan o no rellenos.

En cuanto al estudio del hormigón mediante microscopio petrográfico (Figura 5.6b), los agregados tanto gruesos como finos también serán observados en cuanto a su mineralogía, textura, fábrica, si son variables u homogéneos, gradación, tamaño de grano y naturaleza de los límites cristalinos o entre granos del agregado. Es de interés la

observación del estado de unión con la matriz; fisuras periféricas dentro de los bordes de grano del agregado y/o fisuras internas y/o microfisuras generales.



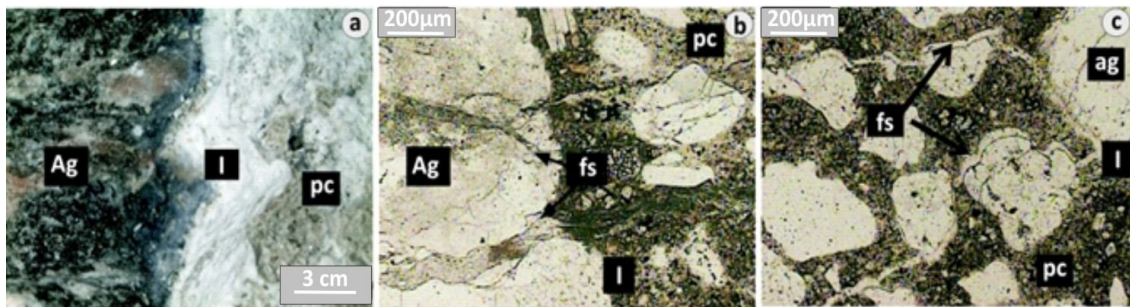
**Figura 5.6:** (a) Sección de hormigón observada con lupa binocular o esteromicroscopio. (b) Sección delgada de hormigón observada con microscopio petrográfico.

Al evaluar la reactividad alcalina potencial de los agregados se procede a identificar partículas de agregado que contengan componentes potencialmente reactivos (chert, vidrio volcánico, cristobalita, tridimita, ópalo, etc.) o si son cuarcitas, subgrauvacas metamorfizadas, arcillitas, etc., o cualquier componente conteniendo sílice metaestable; si los agregados poseen grietas internas o en la periferia, y si hay presencia de gel alrededor del agregado formando coronas de reacción (Figura 5.7a). En la pasta cementícea se identifican partículas de cemento sin hidratar, productos de hidratación del cemento y productos de neoformación (productos de la RAS, ataque por sulfato, carbonatación, etc.).

En hormigones y morteros con más de 2 años de antigüedad, solo los granos residuales de cemento de mayor tamaño son identificables y pueden estar compuestos por varios constituyentes o ser de alita o belita ( $C_3S$  y  $C_2S$ ). Los granos relictos más grandes por lo común son de alita que, vistos con microscopio petrográfico, son de sección pseudo-hexagonal de baja birrefringencia, color gris oscuro a amarillo de primer orden, visible también en maclas lamelares que rodean a granos de belita, donde también aparece aluminoferrita intersticial, desarrollada en granos prismáticos de color

de pardo a pardo verdoso o pardo rojizo y que tienen una alto índice de refracción y pleocroísmo pero que se hallan enmascarados por el color intenso del grano (vista con polarizadores paralelos).

En el estudio de la RAS se debe determinar si los agregados son o no potencialmente reactivos, además de identificar a los productos de reacción de composición sílico-alcalina que pueden rellenar poros y fisuras tanto del agregado, interfase y/o pasta de cemento (Figura 5.7b y c).



**Figura 5.7:** (a) Imagen tomada con esteromicroscopio. Agregado grueso (Ag) potencialmente reactivo (milonita), presenta corona de reacción en la zona de interfase (I) con la pasta de cemento (pc). (b) y (c) Imágenes del mismo hormigón tomadas sobre sección delgada con microscopio petrográfico, polarizadores paralelos (pp). (b) Fisuras (fs), rellenas con productos de reacción, afectando al agregado grueso (Ag) y a la pasta de cemento (pc). (c) Fisuras en las interfases (I) agregado fino (ag) - pasta (pc).

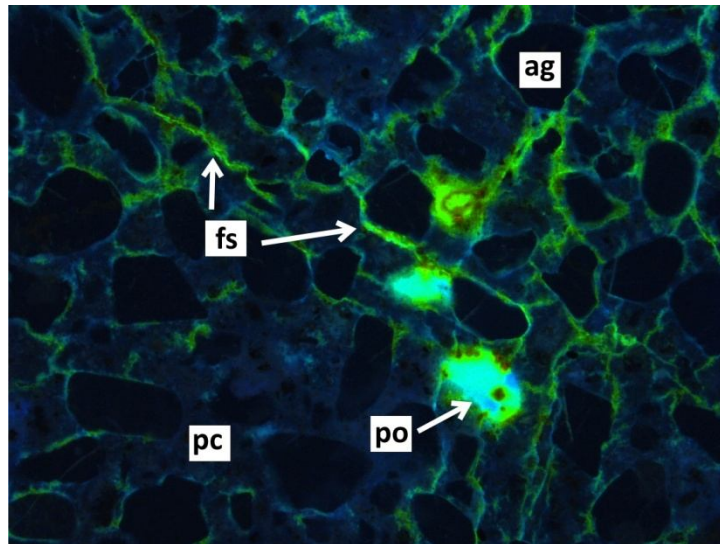
### 5.3.6.1. Microscopia de fluorescencia (MF)

El microscopio de fluorescencia utiliza luz incidente (o reflejada) UV de alta intensidad. Las secciones delgadas se preparan con resina epoxi a la cual se agrega un tinte amarillo fluorescente, que responde a la luz UV emitiendo fluorescencia. La luz UV es producida por una lámpara de vapor de mercurio a alta presión. También utiliza un filtro para limitar la luz incidente a un rango de longitudes de onda determinado y producir la máxima fluorescencia (Poole y Sims 2016).

La microscopia de fluorescencia aplicada a la petrografía del hormigón se utiliza para resaltar áreas de porosidad en la estructura, estimar la relación agua/cemento, delinear sistemas de fisuras y detectar productos de RAS (St. John *et al.* 1998). Según Walker *et al.* (2006) hay siete usos principales del microscopio con luz UV: para identificar grietas, parámetros de los vacíos de aire, porosidad relacionada con la carbonatación, relación

agua-cemento y permeabilidad, hidratación, efecto del agregado fino y análisis mediante fotomicrografías. El efecto de la tinción proporciona un alto contraste que simplifica el análisis modal y es particularmente ventajoso para el procesamiento de imágenes (Figura 5.8). Sin embargo, en morteros y hormigones, algunas variables tales como la temperatura y condiciones de curado, tipo de agregado o gradación granulométrica, o la presencia de adiciones también pueden modificar la microporosidad de la pasta de cemento, y consecuentemente conducir a la reducción en la precisión de los resultados (Poole y Sims 2016). La mezcla epóxica de impregnación crea fluorescencia en todas las grietas, incluso en aquellas de menor espesor que el detectado con la resolución de las lentes del microscopio. Las fisuras pueden identificarse pero debido a la naturaleza no colimada de la luz UV, el ancho de estas grietas muy finas puede estar algo aumentado generando un espesor aparente. Con esta técnica también se determinan las áreas carbonatadas. La reacción de carbonatación resulta en la densificación de la pasta y los productos ocupan un volumen menor que los reactivos. El producto mineral, calcita, es relativamente insoluble en la solución de poros del hormigón y su presencia produce una reducción en la porosidad capilar de la pasta. En consecuencia, la resina epoxi teñida penetra menos en estas áreas y por lo tanto mostrará una fluorescencia menor en comparación con las áreas no carbonatadas del mismo hormigón. Si la carbonatación es extensa, pueden desarrollarse fisuras en respuesta a la contracción que la acompaña las cuales son a su vez resaltadas por la fluorescencia (Walker *et al.* 2006).

También es cierto que la porosidad capilar relacionada a la permeabilidad de la pasta se ve directamente afectada por la relación agua cemento ( $a/c$ ) y como consecuencia la resina penetra menos en pastas con más baja relación  $a/c$  y la fluorescencia es menor. El grado de hidratación y el tipo/s de material/es cementíceos presentes afectan la permeabilidad de la pasta y, por lo tanto, la determinación de la relación  $a/c$  por este método puede no ser aplicable (St. John *et al.* 1998; Jakobsen *et al.* 2000).



**Figura 5.8:** Imagen tomada con luz incidente UV en una sección delgada de hormigón teñida con fluoresceína. Permanecen oscurecidas las partículas de agregado fino (ag) y en sectores de la pasta de cemento (pc). Se destacan por su color amarillo-verdoso fluorescente fisuras (fs) y poros (po) en zonas de interfase y pasta de cemento (pc).

Es importante destacar que el uso de procesamiento de imágenes es útil en la determinación de la longitud y ancho de las fisuras y el cálculo del área y densidad de fisuras sobre secciones delgadas. Si las fisuras tienen un espesor medible con el microscopio es posible determinar el área fisurada que suele ser más representativa que la densidad de fisuras para evaluar la RAS (Madsen *et al.* 2017).

### 5.3.6.2. Difracción de rayos X (DRX)

Como se explicó en el capítulo 5.3.1.1 la técnica de difracción de rayos X tiene amplio uso en ciencia y tecnología de los materiales, siendo aplicada en el estudio de morteros y hormigones, así como también en el análisis de materiales cementíceos (cementos, adiciones minerales, etc.). La identificación de las fases cristalinas presentes en la pasta de cemento de morteros y hormigones es difícil ya que el silicato de calcio hidratado es pobremente cristalino, observándose en el espectro de difracción un ancho de pico débil, el cual tiende a ser disimulado por los picos del hidróxido de calcio. Adicionalmente, los picos de los minerales de los agregados también pueden interferir. Otras especies como yeso, ettringita y calcita pueden ser fácilmente detectadas en las proporciones adecuadas (St. John *et al.* 1998; Poole y Sims 2016). Así mismo productos

de neoformación como son los de la RAS pueden ser estudiados también mediante esta técnica, ya que muchos de ellos desarrollan estructuras tipo zeolitas (Maiza *et al.* 1992; Marfil y Maiza 2001) pudiendo aparecer además calcita u otros productos de la carbonatación en mortero u hormigones, incluso generándose a partir de la carbonatación de productos de la RAS.

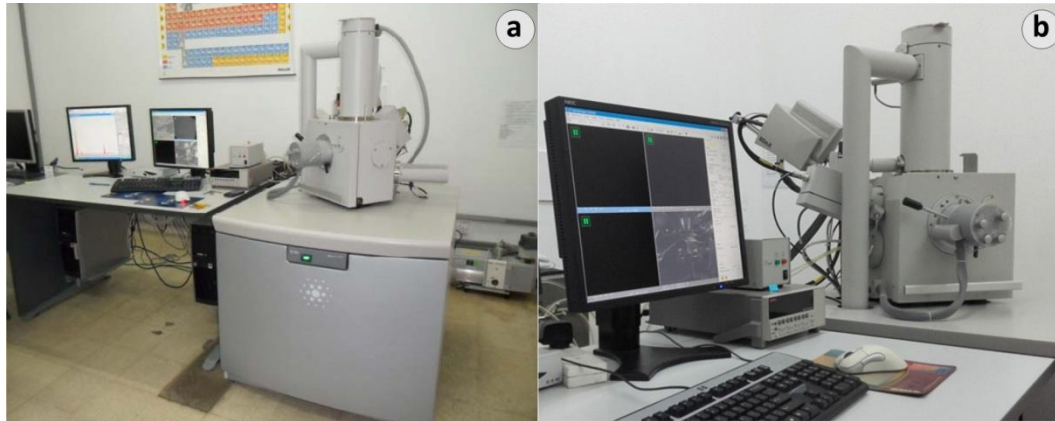
En este trabajo de Tesis se procedió a coleccionar productos de neoformación presente en los poros de los hormigones estudiados para la realización de los DRX.

### 5.3.6.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS)

La alta resolución y magnificación del MEB es una técnica complementaria importante para las investigaciones petrográficas de detalle del hormigón y materiales relacionados. Por ejemplo el microscopio electrónico de barrido ambiental (Figura 5.9), tiene la ventaja de poder analizar muestras húmedas no necesitando de metalizados ya que la fase gaseosa en torno a la muestra provee la conductividad eléctrica necesaria. Esta última propiedad hace que la técnica pueda ser ampliamente utilizada en el estudio de materiales cementíceos, geles y productos de reacción, siendo la limitación principal la distancia que el haz de electrones puede viajar a través del medio gaseoso. Por otra parte la espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS) es utilizada en la gran mayoría de los estudios realizados a hormigones y morteros para obtener algún tipo de información analítica. El tamaño del spot del haz de electrones limita el mínimo de zonas por análisis de rayos X a un volumen aproximado de  $1 \mu\text{m}^3$ , pero extensas áreas de muestra pueden ser analizadas ajustando las áreas tramadas de forma apropiada, y analizando a lo largo de una línea transversal (Poole y Sims 2016).

Para el análisis de hormigones en este trabajo, el MEB con detector de energía dispersiva de rayos X, es de sumo interés ya que con esta técnica se confirma la existencia de productos de reacción, tanto amorfos como cristalinos, presentes en poros, fisuras o interfases de los hormigones analizados, así como también la existencia de otros productos no identificados fácilmente con el microscopio petrográfico. Son numerosos los trabajos donde se aplica esta técnica para el estudio de pastas cementíceas y productos de neoformación (Marfil y Maiza 2001; Locati y Marfil 2013; Braithwaite y Heath 2014; Leemann *et al.* 2016).





**Figura 5.9:** (a) Microscopio electrónico de barrido ambiental, FEI Quanta 200 (LIMF-UNLP). Kang *et al.* 2013). (b) En la parte posterior del MEB se observa el espectrómetro de rayos X dispersivo en energías EDAX SDD Apollo 40. Imagen de autor.

## 5.4. OTROS MÉTODOS PARA EVALUAR LA RAS

### 5.4.1. Normas de petrografía ASTM y RILEM

Dentro de las normas petrográficas se pueden mencionar la ASTM C 294 (2012) y C 295 (2018). La norma ASTM C 294 (2012) ofrece una nomenclatura de minerales y rocas específica a fin de obtener una clasificación correcta de los agregados a ser usados en el hormigón. En términos generales las especificaciones de la ASTM C 295 (2018) son muy similares a la IRAM 1649 (2008). Esta supone que un completo examen petrográfico debería apuntar a investigar problemas particulares que pueden requerir de procedimientos adicionales como difracción de rayos X (DRX), análisis térmico diferencial (ATD), espectroscopia infrarroja (IR), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS), etc.

La norma ASTM-C-295 (2018) toma a la identificación de los constituyentes de la muestra como un paso necesario para el reconocimiento de las propiedades que pueden influir en el comportamiento del material. La examinación y evaluación petrográfica dependerá de la representatividad de la muestra examinada, de la información brindada por el petrógrafo respecto del origen y el uso propuesto del material, y de la habilidad del mismo para correlacionar estos datos con los resultados de los estudios. Un aspecto importante es el reconocimiento de agregados con minerales químicamente inestables, o que tengan minerales como esmectitas que poseen inestabilidad volumétrica. Por otra



parte, la identificación de partículas alteradas y el grado de alteración (débil, moderada o fuerte) es importante para identificar aspectos relacionados a la durabilidad de los agregados, el cual está sujeto a la del hormigón y a los daños que este pueda sufrir. En lo concerniente a la reacción álcali-agregado (RAS o RAC) es importante la identificación y cuantificación de los componentes deletéreos. Para esto la norma recomienda revisar las especificaciones de la norma ASTM C 33 (2010) donde se establecen los porcentajes límites de componentes potencialmente reactivos y los ensayos que se deben aplicar para aceptar o rechazar un agregado.

Por otro parte existe el reglamento RILEM AAR-1 (2016) para determinar la reactividad alcalina potencial de los agregados mediante petrografía. En este documento se siguen los lineamientos propuestos para el estudio de la RAS, teniendo en cuenta los pasos a seguir en el reglamento RILEM AAR-0 (2016), el cual es una guía de pasos a seguir para la evaluación de los agregados respecto de su potencial reactividad, y especifica los procedimientos a desarrollar para cada clase de agregado (I, II y III). Con la finalidad de calificar a los agregados, se comienza con el examen petrográfico de los componentes, estableciendo sus composiciones individuales y combinadas e identificando los tipos y concentraciones de los constituyentes potencialmente reactivos. Esto permite de un modo amplio que una combinación de agregados sea asignada a una de tres clases:

**Clase I:** muy poco probable que sea álcali-reactivo

**Clase II:** potencialmente reactivo con los álcalis o álcali-reactivo incierto

**Clase III:** muy probable que sea álcali-reactivo

Pero si la evaluación petrográfica no ha sido llevada a cabo se toma al agregado como de Clase II o III.

La norma RILEM AAR-1.1 (2016) es una de las más completas en cuanto al estudio de los agregados, en la cual se evalúa, especifica y diagnostica a la reacción álcali-agregado (RAA). También presenta definiciones a tener en cuenta al momento de realizar la petrografía. Por ejemplo, diferencia el tamaño de grano de la roca y el tamaño cristalino de los minerales que la constituyen, tomando a un material como microcristalino cuando la textura de la roca es tan fina que es necesario un microscopio petrográfico para identificar los cristales individuales, con tamaños de entre 4  $\mu\text{m}$  y 62  $\mu\text{m}$ , y como criptocristalino cuando el tamaño cristalino es inferior a los 4  $\mu\text{m}$  y no puede ser

observado con un microscopio petrográfico. Las definiciones de microcristalino y criptocristalino (Nixon y Sims 2016), son útiles para comprender la asociación que existe entre la reactividad alcalina potencial de los agregados y el tamaño cristalino del cuarzo, denominándose como microcristalino cuando el tamaño de grano es identificado únicamente con microscopio petrográfico y que el término criptocristalino implica a una textura mineral que imposibilita la evaluación de granos individuales en sección delgada con un microscopio petrográfico, es decir, que posee un tamaño de cristal o de grano inferior a  $\sim 10 \mu\text{m}$ . Por otra parte define a la proporción crítica y el comportamiento *pessimum*. La proporción crítica es el contenido del componente reactivo en el total de volumen de agregado, más allá del cual ha demostrado que desarrolla un nivel deletéreo de expansión inducido por RAS. El efecto *pessimum* se caracteriza por el desarrollo de diferentes niveles de expansión en hormigones contenido diferentes porcentajes de un constituyente reactivo. El máximo nivel de expansión se produce con un contenido específico del constituyente reactivo denominando como "*pessimum*", diferente al cambiar el tipo de componente reactivo. Esta norma sugiere que debe de conocerse el origen geológico del material y todos los aspectos del lugar de extracción del material (posición geográfica, litología, aspectos estructurales como fallas y diaclasas, grado de la alteración, etc.). El principio de la descripción y determinación de los componentes reactivos se basa: 1) en una técnica preliminar de reconocimiento visual directo y 2) otra técnica que utiliza la identificación y el conteo de puntos en secciones delgadas bajo microscopio petrográfico (Howarth 1998). En algunos casos recomienda aplicar otros métodos como el análisis químico y DRX para identificar fases minerales u amorfas difíciles de detectar por los otros medios.

La clasificación propuesta por RILEM AAR-1.1 (2016) de los tipos de rocas y los constituyentes silíceos reactivos son muy detalladas, cuya información ha surgido de la recopilación aportada por varios países, incluso Argentina. En la reciente publicación del Atlas de RILEM (Nixon y Sims 2016), por ejemplo el procedimiento AAR-1.1, toma los esquemas de clasificación de la International Union of Geological Sciences (IUGS) para rocas ígneas (Le Maitre *et al.* 2002, 2005) y metamórficas (Fettes y Desmons 2007) y para el esquema de clasificación de rocas sedimentarias toma a Hallsworth y Knox (1999) del British Geological Survey (BGS).

#### 5.4.2. Normas de ensayos físicos ASTM y RILEM.

La norma ASTM C 1260 (2014) denominada como método de prueba estándar para evaluar la reactividad alcalina potencial de los agregados (método de barra de mortero), es similar a la norma IRAM 1674 (1997). En este método también se confeccionan barras de mortero de 25 mm × 25 mm × 285 mm que se curan durante 48 horas, y luego se almacenan en una solución de NaOH 1M a 80 °C. Pero considera los siguientes límites: las barras que expanden más del 0,200 % después de 14 días califican a los agregados como potencialmente reactivos; las barras que expanden entre 0,100 % y 0,200 % incluyen agregados que pueden ser inocuos o deletéreos en obra. En ambos casos, recomienda ensayos suplementarios que podría incluir análisis petrográfico de las barras para confirmar que la expansión se debe a la RAS, así como una revisión de los registros de la historia en servicio (cuando esté disponible). Sin embargo, es conocido el hecho de que este método proporciona tanto falsos positivos (califica a un agregado como reactivo cuando no lo es), o como falsos negativos (calificando a los agregados reactivos como inocuos). Por esto se recomienda la realización de el método ASTM C 1293 (2018) para la determinación del cambio de longitud del hormigón debido a la reacción de álcali-sílice, o método del prisma de hormigón el cual tarda 1 año en realizarse y por lo tanto, la norma ASTM-C-1260 (2014) tiene una gran ventaja práctica en la velocidad de ensayo respecto de esta.

La norma IRAM 1700 fue desarrollada a partir de la ASTM-C-1293 (2018), siendo muy similares en lo que respecta a los procedimientos del ensayo del prisma de hormigón a 38°C, aunque la última modificación de la norma IRAM 1700 (2013) contempla además (a diferencia de la ASTM) el ensayo acelerado del prisma de hormigón a 60°C.

La norma ASTM-C-1293 (2018) (Método de Ensayo Estándar para la Determinación del Cambio de Longitud del Hormigón Debida a la Reacción Álcali-Sílice) está basada en las normativas canadienses CSA (Canadian Standards Association) que toman en cuenta la expansión del hormigón en el ensayo a 38°C, la medida de la fisuración debido a la expansión y la efectividad de las adiciones minerales y del litio para mitigar a la reacción (CSA A23.2-14A-00 2004).

Este método de ensayo tiene como objetivo determinar la susceptibilidad de un agregado o combinación de un agregado con puzolana o escoria, para participar en la

reacción álcali-sílice, efectuando la medición del cambio de longitud de los prismas de hormigón elaborados con estos materiales. El o los agregados utilizados deben cumplir a su vez las especificaciones de la norma de agregados para hormigón (ASTM-C-33 2010). Este ensayo evalúa el comportamiento de los áridos en hormigón de cemento portland con un contenido de álcali de  $5,25 \text{ kg/m}^3$  o en un hormigón que contenga puzolana o escoria con un contenido de álcali proporcionalmente reducido de  $5,25 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente por la cantidad de puzolana o escoria que reemplaza al cemento portland. De este modo evalúa el potencial de expansión deletérea del hormigón causado por la RAS, en condiciones de curado de laboratorio. Por lo tanto, es sabido que el rendimiento real en obra no es reproducido realmente en laboratorio, debido a las diferencias en el contenido de álcali del hormigón, la humedad, el secado, la temperatura, u otros factores o combinaciones de estos.

Cuando las expansiones en este ensayo son mayores que el límite de 0,040% al año, el agregado o combinación de un agregado con la cantidad probada de puzolana o escoria, es potencialmente reactivo. A su vez, esta norma exige que se confirme con información complementaria que la expansión es debida a la reacción álcali-sílice. Por ejemplo, realizar el examen petrográfico de los prismas de hormigón después de finalizado el ensayo según lo especificado en la norma ASTM-C-856 (2017) para confirmar que los constituyentes reactivos estén realmente presentes e identificar los productos de la reacción.

El método acelerado de la barra de mortero, RILEM AAR-2 (2016) es similar a los métodos de ASTM-C-1260 (2014) e IRAM 1674 (1997) descritos anteriormente con algunas variantes. Este reglamento establece que no es adecuado para agregados silíceos porosos como el chert, y le da importancia al contenido *pessimum* de los agregados, recomendando realizar una serie de ensayos en los que el agregado a evaluar se mezcla con un material no reactivo en un rango de proporciones. Los criterios para la interpretación de los resultados de RILEM AAR-2 (2016) aún no han sido establecidos para este reglamento. Sin embargo, sobre la base de los ensayos llevados a cabo por RILEM sobre combinaciones de agregados de varias partes del mundo, de los cuales se conoce su rendimiento en obra, la expansión (después de 16 días, usando una barra de  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 250\text{-}300 \text{ mm}$ ) menor a 0,100% indicaría que los materiales no son reactivos, mientras que los resultados que exceden el 0,200% indicarían agregados

potencialmente reactivos. En la actualidad no existe una guía definitiva para interpretar los resultados en el rango intermedio de 0,100-0,200 % y, para los fines prácticos en ausencia de experiencias adicionales, los agregados que tengan resultados dentro de este rango deberán considerarse como potencialmente reactivos frente a los álcalis. Ensayos realizados en Argentina, Australia y Canadá, demostraron que algunos agregados de reacción lenta (con cuarzo tensionado) no se detectan utilizando la especificación de este ensayo acelerado. En pruebas realizadas en Australia, el límite de 0,100 % después de 21 días de almacenamiento en NaOH 1M a 80 °C mostró buena correlación con el comportamiento de agregados de reacción lenta en estructuras de hormigón; esto equivaldría a una expansión de 0,080 % en 14 días de almacenamiento.

El ensayo de prisma de hormigón RILEM AAR-3 (2016) es similar a la norma ASTM-C-1293 (2018) e IRAM 1700 (2013) descritos anteriormente. Esta prueba puede ser utilizada de dos maneras: como un método para evaluar la reactividad alcalina de una combinación de agregados (AAR-3.1) o como un método para establecer el umbral alcalino de una combinación particular de agregados (AAR-3.2).

En AAR-3.1 (2016), los agregados gruesos y finos a ensayar se prueban juntos en una mezcla estándar y, cuando se sospecha un comportamiento *pessimum* (o cuando se desconoce), se repiten los ensayos reemplazando las fracciones gruesa y fina por un material no reactivo en forma variable. En algunos casos, podría considerarse más conveniente realizar las pruebas utilizando la combinación total planificada para un proyecto en particular, aunque los criterios de interpretación podrían ser menos aplicables. El ensayo siempre debe llevarse a cabo utilizando el contenido de cemento y álcalis estipulado en AAR-3.1, o incluso el más alto contenido de cemento permitido para ciertos tipos de combinaciones de agregados. Los criterios de interpretación sugeridos no serían aplicables a mezclas de hormigón con menor contenido de cemento y/o álcali.

En AAR-3.2 (2016), el ensayo se utiliza como un medio para establecer el umbral alcalino en el que una combinación de agregados en particular posee una expansión perjudicial, ensayándose cuatro mezclas de hormigón con niveles de álcali en incrementos entre 2 y 5 kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>. El umbral es el nivel de álcali en el que hay expansión, el cual se usa para designar la clase de reactividad de la combinación de agregados de acuerdo con AAR-7.1 (especificación para minimizar el riesgo de ASR). Se

recomienda que las especificaciones de cada país que hagan uso de los límites de álcali, deban decidir sobre un margen de seguridad apropiado.

Los criterios de interpretación de los resultados de AAR-3 aún no han sido establecidos. Sobre la base de los ensayos llevados a cabo por RILEM en combinaciones de agregados de comportamiento conocido, valores (después de 1 año) menores a 0,05% probablemente indiquen materiales no expansivos, mientras que los que exceden el 0,100 % indican materiales expansivos. Actualmente, no es posible interpretar definitivamente los resultados en el rango de 0,05-0,100 % y, en ausencia de una experiencia local adicional, los agregados deberán ser considerados como potencialmente reactivos frente a los álcalis del cemento portland. Para combinaciones de agregados que dan resultados de 0,05 % o mayores (después de 1 año), en ausencia de experiencia local, se deberán tomar precauciones.

RILEM 219-ACS (Nixon y Sims 2016) propone considerar que en muchos casos, la expansión habrá terminado o será muy reducida al finalizar el ensayo (1 año). Sugiere que la prueba puede continuar hasta que cese la expansión o haya quedado claro si los valores al término de 1 año serán superados. En ausencia de una experiencia local relevante, se considerará que el resultado excedió los valores estipulados si se estima que estos serán sobrepasados durante la prolongación del ensayo a 2 años.

El método del prisma de hormigón a 60 °C (RILEM AAR-4.1) es propuesto como una versión acelerada del ensayo AAR-3 para evaluar la reactividad de una combinación de agregados. Los criterios para la interpretación de los resultados de AAR-4.1 aún no han sido establecidos pero, la evaluación inicial de los ensayos llevados a cabo por RILEM TC 191-ARP (2005) sobre combinaciones de agregados utilizados en obras, indica que una combinación de agregados es no reactiva cuando a las 15 semanas la expansión máxima es de 0,03 % o inferior. En el caso de combinaciones de agregados que produzcan resultados superiores y en ausencia de experiencia local, se deben tomar precauciones para minimizar el riesgo de daño por RAS sobre cualquier hormigón en el que se utilice dicha combinación de materiales.

## 5.5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE LA RAS

Según las reglamentaciones vigentes en Argentina (CIRSOC 201 2005), las estructuras de hormigón, que durante algún período de su vida en servicio pueden estar en forma permanente o periódica en contacto con agua o al aire con humedad relativa superior al 80 %, deberán construirse con un conjunto de materiales (cemento, agregados, aditivos, adiciones minerales y agua) para los cuales esté comprobado que no se producen expansiones y/o deterioros como consecuencia de la reacción álcali-sílice (RAS).

Cuando se disponga de información de obras u estructuras en servicio que carezcan de evidencias de expansión y/o otros daños asociados a la RAS, y que además estén construidas con un conjunto de agregados, cemento y adiciones minerales semejantes los que se quiere utilizar en el proyecto en estudio, reuniendo otras condiciones como: mismo tipo de estructura (por ejemplo pavimentos), que estén emplazadas en la misma zona y que las condiciones de exposición ambiental sean similares y que se haya mantenido más de quince años en servicio, se considerará al conjunto de materiales como inocuo o que no reactivo. Los resultados de estas evaluaciones son definitivos para confirmar la existencia de RAS en la estructura observada y de su potencial daño en las estructuras a construir con las condiciones antes mencionadas. Estas conclusiones son válidas prescindiéndose de los resultados que se obtengan en los ensayos de laboratorio.

Cuando se utilicen agregados finos y/o gruesos de los cuales se carezca de antecedentes o se tengan dudas sobre su reactividad potencial con los álcalis, los agregados deben ser evaluados mediante métodos petrográficos, de la barra de mortero y del prisma de hormigón anteriormente descriptos en este capítulo.

Existen soluciones tecnológicas a la problemática de la RAS (Reglamento CIRSOC 201 2005). Cuando los ensayos petrográficos (IRAM 1649, IRAM 1531) y los ensayos de la barra de mortero (IRAM 1674) y del prisma de hormigón indiquen que uno de los agregados, o la mezcla de ambos en las proporciones de obra, son potencialmente reactivos con los álcalis del cemento pórtland, se adoptará alguna de las siguientes soluciones:

a) Cambiar total o parcialmente el agregado potencialmente reactivo por otro no reactivo.

- b) Usar un cemento portland inhibidor de la reacción álcali-agregado. Cuando exista posibilidad de aporte externo de álcalis, dicho cemento deberá tener adiciones minerales activas.
- c) Usar un cemento portland con o sin adiciones minerales activas que haya demostrado ser efectivo para evitar la RAS con los agregados de obra.
- d) Usar una mezcla de cemento portland más una adición mineral activa, inhibidora de la RAS.
- e) Limitar el contenido de álcalis total en el hormigón, aportados por el cemento y los demás componentes, a  $3 \text{ kg/m}^3$  expresados en  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente. Esta solución no es válida si existe posibilidad de aporte externo de álcalis como puede ocurrir en estructuras expuestas al agua de mar.
- f) Adicionar inhibidores químicos al hormigón en proporciones suficientes para evitar que se produzcan expansiones y otros daños perjudiciales por RAS.



## **CAPÍTULO 6. RESULTADOS: RELEVAMIENTO Y PETROGRAFÍA DE LAS CANTERAS ESTUDIADAS**

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

### **6.2. MUESTREO Y DESCRIPCIÓN DE LAS CANTERAS**

#### **6.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

##### **6.2.1.1. Cantera Minera Yaraví**

##### **6.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)**

##### **6.2.1.3. Cantera La Cerámica (ex - Cerámica del Plata)**

##### **6.2.1.4. Cantera Pétreo**

#### **6.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos**

### **6.3. PETROGRAFÍA**

#### **6.3.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

##### **6.3.1.1. Cantera Minera Yaraví**

###### **6.3.1.1.1. Estereomicroscopía y microscopía óptica de polarización**

###### **6.3.1.1.2. MEB-EDS**

###### **6.3.1.1.3. Discusión**

##### **6.3.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)**

##### **6.3.1.3. Cantera La Cerámica (ex - Cerámica del Plata)**

##### **6.3.1.4. Cantera Pétreo**

#### **6.3.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos**

### **6.4. Difracción de rayos X**

### **6.5. DISCUSIÓN**

## 6.1. INTRODUCCIÓN

Los materiales estudiados en el presente trabajo de Tesis corresponden a arenitas cuarzosas, vaques y fangolitas de la Formación Balcarce conocida comercialmente como cuarcita Mar del Plata. Como se dijo en el capítulo 1, el estudio se concentra principalmente en el uso de estas rocas como agregado grueso para hormigón desde el punto de vista de su reactividad alcalina potencial.

El relevamiento geológico y muestro de las canteras de cuarcita se realizó en dos localidades: cuatro canteras del área Batán-Estación Chapadmalal 17 km al este de la ciudad de Mar del Plata por la ruta RP88, y una cantera en el partido de Balcarce, en cercanías de la ciudad homónima, a aproximadamente 75 km al este de Mar del Plata por la ruta RN226.

Históricamente el estudio de las canteras de cuarcita de las Sierras Septentrionales se ha centrado en ensayos de resistencia, y en la determinación de las propiedades físicas como desgaste, densidad y absorción de los agregados cuarcíticos con el fin de establecer su aptitud para uso en la construcción de obras civiles (Añón Suárez *et al.* 1969; Angelelli *et al.* 1973). Actualmente las características de durabilidad de los materiales utilizados para la elaboración de hormigón son muy importantes, y por esto el estudio en esta Tesis tiene como base fundamental la evaluación de la reactividad alcalina potencial de las cuarcitas frente a la RAS, la cual implica uno de los principales problemas que ocasionan los materiales pétreos en el hormigón. En este capítulo se hace una descripción de las canteras estudiadas y de los frentes relevados, y se incluyen los métodos utilizados en el análisis petrográfico que aplican la norma de petrografía de agregados para hormigón en las muestras tomadas de los frentes de cantera.

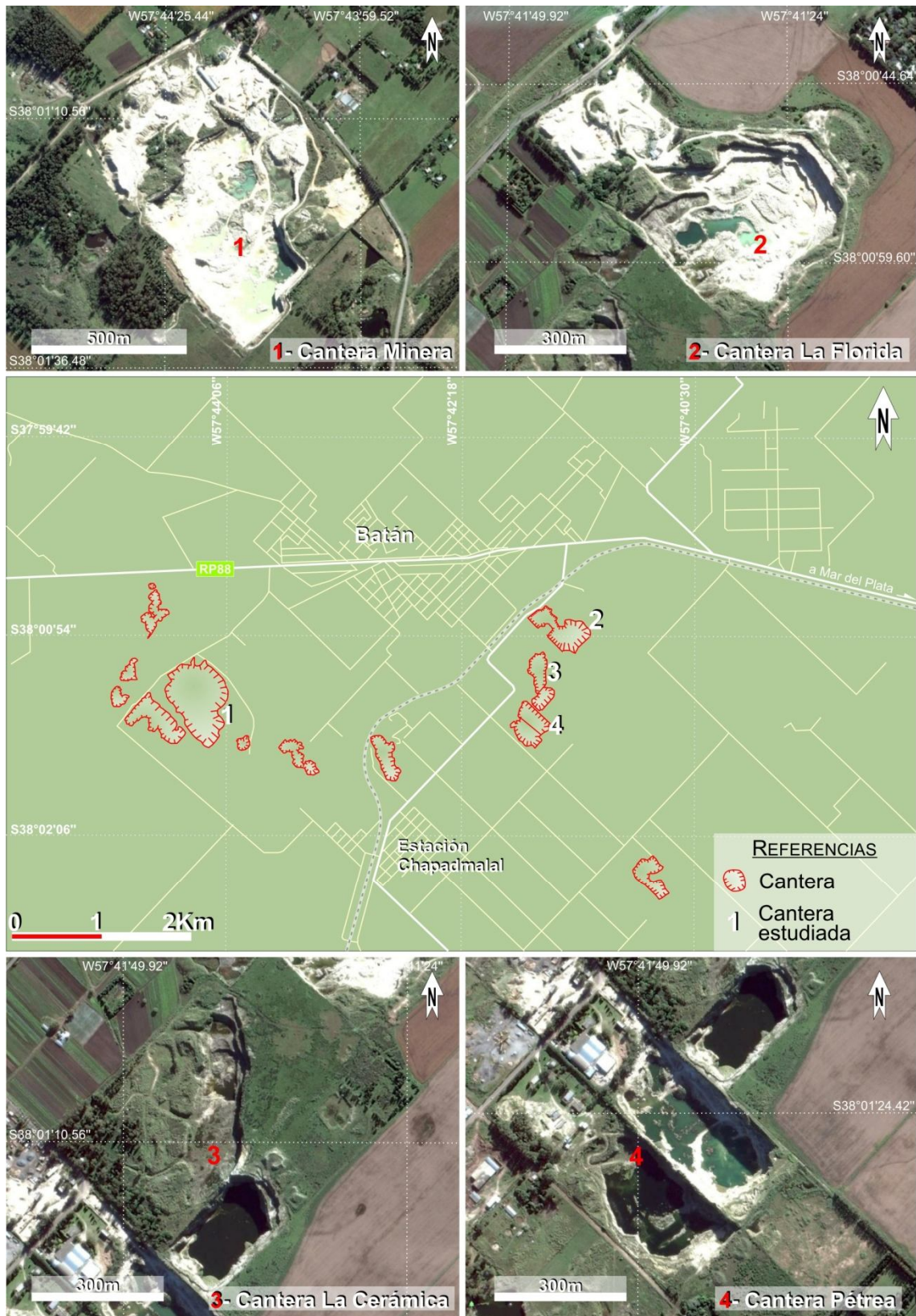
La norma IRAM 1649 (2008), indica que el estudio de los agregados debe realizarse mediante esteromicroscopio, microscopio petrográfico y, en caso necesario, análisis mineralógicos de detalle mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido (DRX y MEB-EDS), entre otros. En el presente trabajo los estudios por DRX se realizaron sobre las muestras de los niveles arcillosos y el material pasante tamiz 100 (150  $\mu\text{m}$ ) obtenido como producto de la trituración y tamizado de las cuarcitas.

El objetivo planteado para este capítulo mediante las técnicas aplicadas es la identificación de cuarzo tensionado y/o microcristalino, en general presente como

clastos, ópalo, calcedonia y/o tridimita en algunos casos como componente de la matriz, rellenando poros o como material cementante. Todas estas formas de sílice son consideradas potencialmente reactivas. Es importante la identificación del material fino y muy fino (limo-arcilla) que constituye la matriz de la roca (cuando está presente), del material que rellena los poros, además de la composición de las arcillas que conforman los niveles pelíticos entre los bancos de cuarcitas. Estos finos pueden ser perjudiciales para el hormigón, como es el caso de las arcillas expansivas, las cuales no son fácilmente identificables con microscopio petrográfico y por ello se procede al análisis mediante DRX y MEB-EDS.

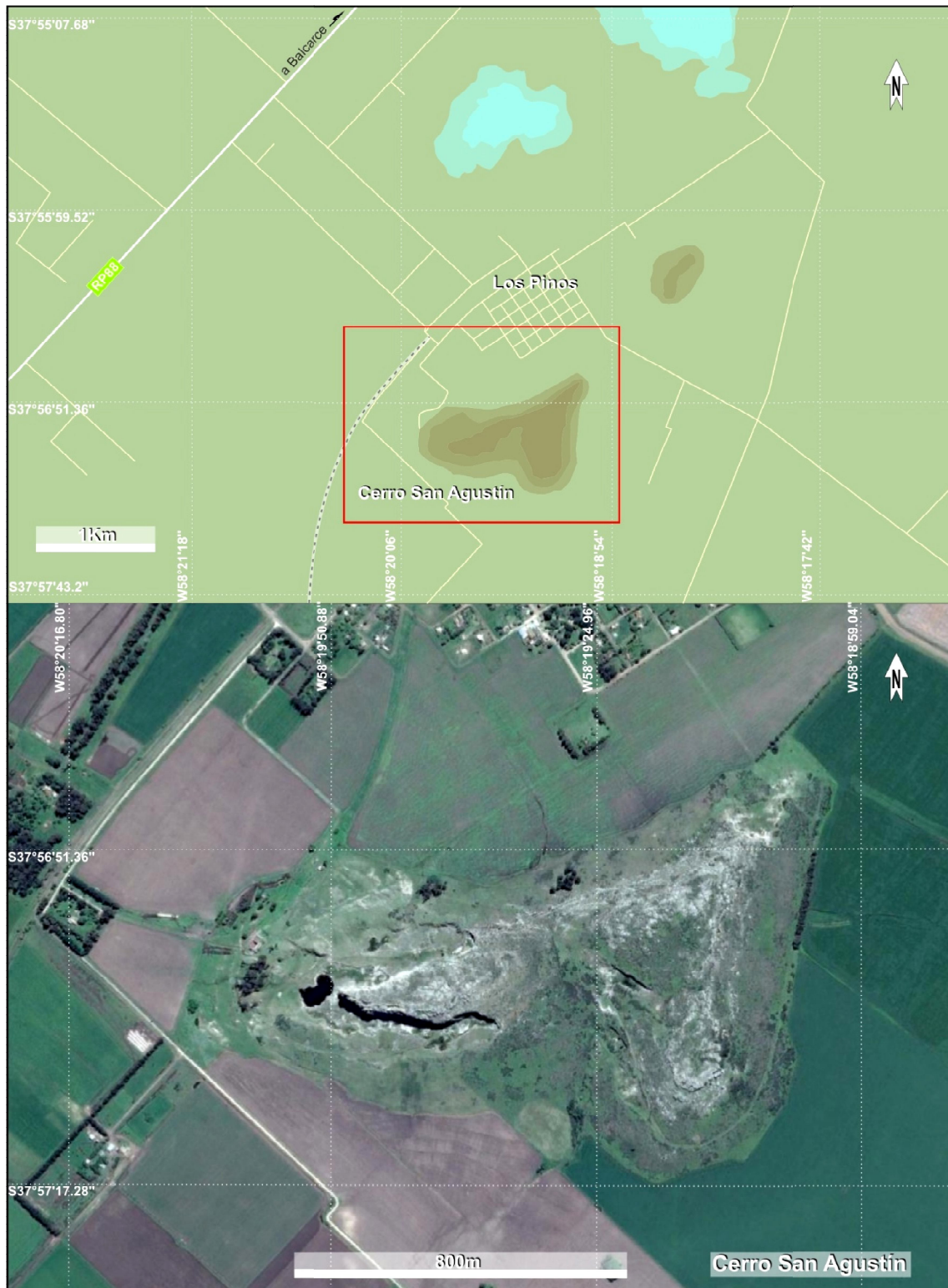
## **6.2. MUESTREO Y DESCRIPCIÓN DE LAS CANTERAS**

Se relevaron y muestrearon cinco canteras: cuatro en la localidad de Batán y una próxima a la ciudad Balcarce, con el fin de comparar el comportamiento frente a la RAS de las rocas de una misma unidad geológica, tanto dentro de la localidad productiva (Batán), como de áreas más alejadas actualmente no productoras de agregados. En Batán-Estación Chapadmalal se estudiaron dos canteras en explotación, Minera (principal yacimiento) y La Florida, y dos canteras no productivas, Pétreo y La Cerámica, consideradas como reservas potenciales de áridos (Figura 6.1). Por último, en la localidad de Balcarce se relevó la cantera Los Pinos ubicada en el sector oriental del Cerro San Agustín (Figura 6.2). En las canteras se tomaron muestras de mano de los niveles más representativos de cada frente. En las canteras productivas se muestreó el material acopiado de granulometría 6-20 mm (IRAM 1649, inciso 4.3) y bloques de cuarcita (IRAM 1649, inciso 4.4) para la realización de ensayos físicos.



**Figura 6.1:** Mapa de ubicación de la Localidad de Batán-Est. Chapadmalal y alrededores. Distribución de las canteras en el área. Las canteras estudiadas están numeradas del 1-4 y corresponden a las imágenes satelitales de la parte inferior y superior de la figura.





**Figura 6.2:** Mapa ubicación e imagen satelital del Cerro San Agustín próximo al pueblo Los Pinos, en la cercanías de la ciudad de Balcarce. En el faldeo oriental del cerro se ubica la cantera estudiada.

En la Tabla 6.1 se muestran los datos de GPS de los frentes relevados en cada cantera (Figuras: 6.3, 6.8, 6.12, 6.16 y 6.20).

Localidad	Cantera		Latitud	Longitud
Batán- Est. Chapadmalal	Cantera 1	Minera (Frente 1)	38° 1' 28.8" S	57° 44' 15,7" W
		Minera (Frente 2)	38° 1' 22.5" S	57° 44' 24.1" W
	Cantera 2	La Florida	38° 0' 54.8" S	57° 41' 24.4" W
	Cantera 3	La Cerámica	38° 1' 08" S	57° 41' 42.6" W
	Cantera 4	Pétrea	38° 1' 34" S	57° 41' 48.6" W
Balcarce	Cantera 5	Los Pinos	37° 56' 50.2" S	58° 19' 10.2" W

**Tabla 6.1:** Datos GPS de los sectores relevados en cada cantera.

Al pie de cada frente se tomaron muestras de roca de similar litología mayores a 0,5 kg (IRAM 1649, inciso 4.4), adjudicando cada litología a un nivel estratigráfico determinado dentro del perfil relevado. También se tomaron muestras de mano de los estratos basales de los frentes, las cuales fueron analizadas según las especificaciones para afloramiento rocoso y frente de explotación (IRAM 1649, inciso 9).

### 6.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal

Como se muestra en el mapa ubicación de la Figura 6.1 las canteras estudiadas en esta localidad se desarrollan en un área aproximada de 4 km x 2 km, 3 de ellas muy próximas entre sí y ubicadas en línea recta sobre un eje menor a 2 kilómetros. Los puntos (GPS) corresponden a los sitios muestreados, señalando la posición de los frentes al momento del relevamiento, invariables para las canteras no productivas.

#### 6.2.1.1. Cantera Minera Yaraví

En esta cantera se relevaron y muestrearon dos frentes, ubicados sobre el mismo corte de orientación SE-NW. Uno de ellos, en posición sur (frente 1), es el más representativo de la cantera y el otro, en posición norte (frente 2) presenta diferencias significativamente marcadas respecto del resto, destacando variaciones en cuanto a la tonalidad de los estratos, ligada a diferencias texturales, grado de fisuración, alteraciones y presencia de óxidos e hidróxidos de hierro. La imagen de satélite (Figura 6.3) muestra la posición de los frentes al momento del relevamiento. El frente 2 se encuentra actualmente inactivo.



**Figura 6.3:** Cantera Minera. Posición del frente 1 (F1) y 2 (F2) al momento del relevamiento.

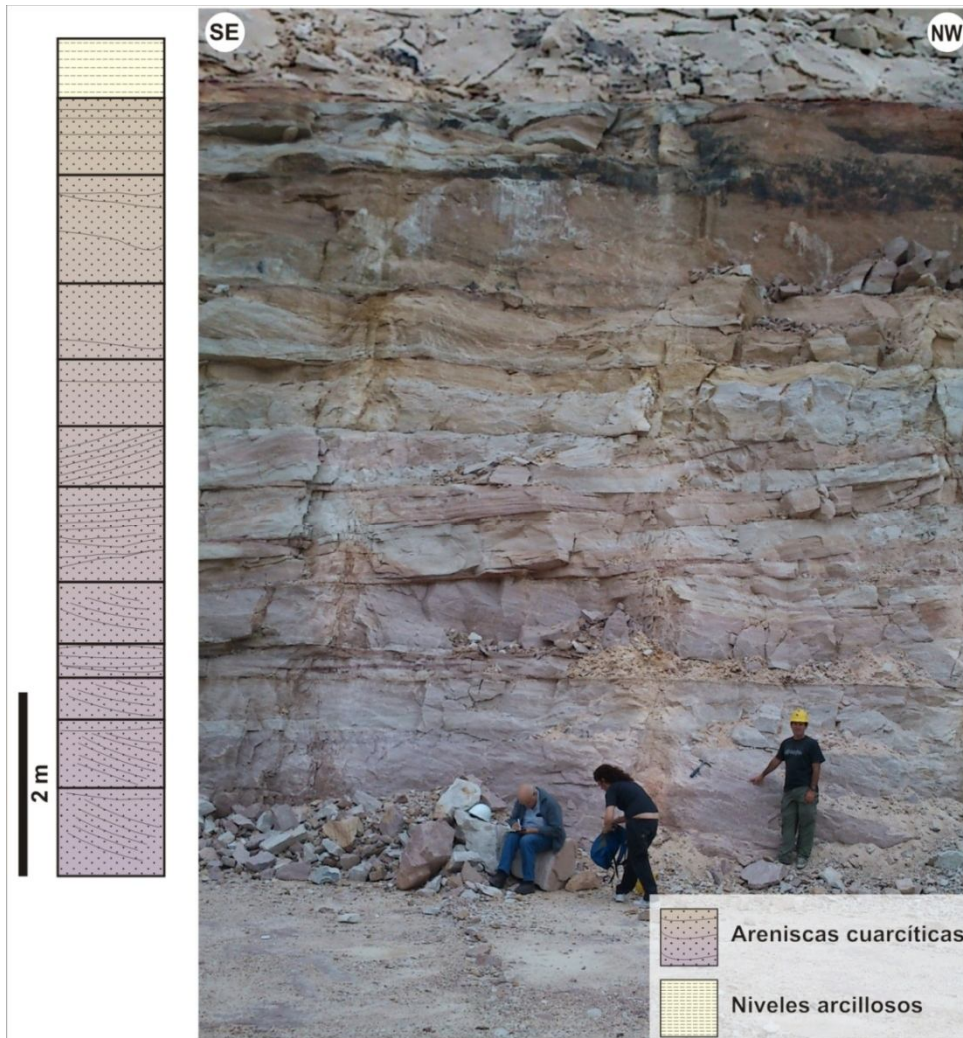
Esta cantera se encuentra en actividad desde el año 1950, y a grandes rasgos se desarrolla en dos cortes principales perpendiculares entre sí, conformados a su vez por dos bancos que suman una altura total aproximada de 30 metros. Los estratos cuarcíticos tienen espesores de medios a gruesos (0,7 m a 1,5 m), los cuales pueden estar en contacto neto con otros estratos de cuarcitas o encontrarse separados por niveles arcillosos de escasos centímetros hasta 1 m de espesor en raras excepciones (Figura 6.4 y 6.5). La coloración de los estratos cuarcíticos varía de grisácea a pardo amarillenta y rosada y, en ocasiones, a tonos morados, rojizos y ocre. Los frentes se hallan diaclasados, con juegos de diaclasas que cortan a los estratos a distintos ángulos.



**Figura 6.4:** Frentes típicos de cantera Minera. Imagen tomada desde el SW. Desarrollo de los espesores y tonalidades de los estratos de cuarcitas en los frentes de explotación.



En la Figura 6.5 se muestra la imagen del frente 1 (banco inferior) junto al perfil estratigráfico esquemático del mismo. El nivel arcilloso del tope posee un espesor aproximado de 1 m y una importante extensión areal.



**Figura 6.5:** Perfil estratigráfico esquemático e imagen del frente 1 (sur). En el perfil se representa la litología y tonalidad de los estratos, así como la estructura (planar y en cuña) y tipo de estratificación interna de los estratos. Corona un estrato de arcilla de 1 m de espesor.

En la imagen de la Figura 6.5 se observa que el espesor de los estratos del frente 1 varía aproximadamente entre 1 m y 2 m (máximo), separados por niveles finos, micáceos (vaques) de pocos centímetros de espesor, que se acuñan hacia los laterales. La coloración de los estratos gradúa de gris morada a rosada en la parte inferior a media, a gris amarillenta e incluso ocre en algunos niveles debido a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro hacia el sector superior. En general los estratos de tonos

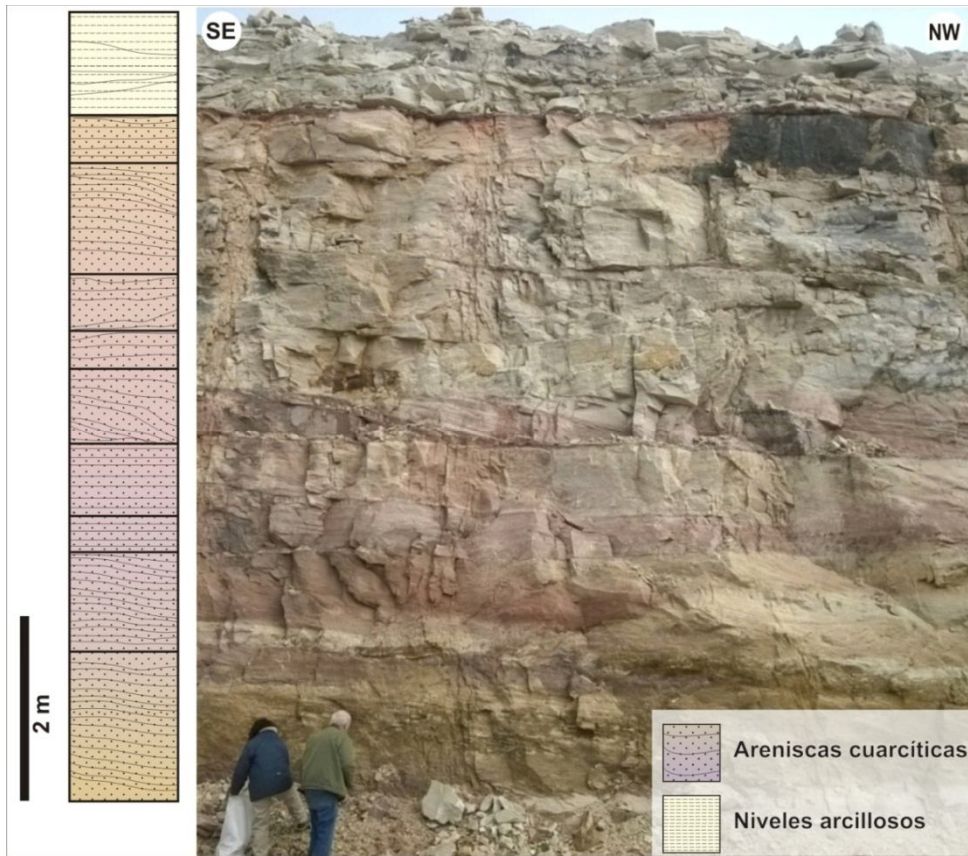


amarillento, amarillento rojizo y ocre corresponden a arenitas de granulometrías gruesas. En algunos niveles, se intensifican los cambios litológicos con pasajes de arenisca fina-media a gruesa. En los bancos superiores de explotación los estratos de cuarcita son menos potentes, con abundantes diaclasas, de tonalidades grisáceas, amarillentas y rosadas claras, hallándose pequeños niveles conglomerádicos de 2-3 cm de espesor, en una matriz arenosa de gruesa a fina y arcillosa. También se reconocieron intraclastos de arcillitas dentro de las cuarcitas. En general los frentes se encuentran afectados por diaclasas de alto ángulo, que podrían haber facilitado la circulación de fluidos produciendo lixiviación y el reemplazo por materiales ferruginosos que afectaron algunos de los estratos cuarcíticos, sobre todo en los niveles medios y superiores de explotación.

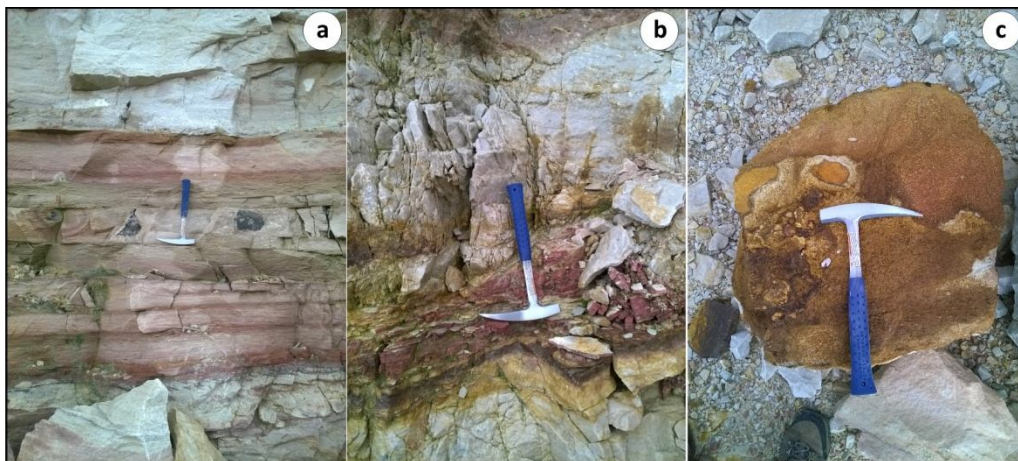
Para el análisis petrográfico se tomaron muestras de los estratos basales que conforman el frente inferior de explotación y de bloques acopiados. Además se muestrearon los acopios de granulometría 6-20 mm para ser estudiados y ensayados en el laboratorio.

El frente 2 (Figura 6.6) presenta similares características que el perfil anterior, pero se halla más fracturado lo que es generado por un entramado de diaclasas poco espaciadas, ortogonales entre sí. Las tonalidades varían desde pardo-amarillenta, pardo-grisácea rosada, rojiza y ocre, además de concentraciones de minerales oscuros (negros) en sectores superiores. Las cuarcitas se desarrollan en estratos superiores a 1 m e intercalan con vaques cuarzo-micáceos y arcillitas en niveles de poco espesor (Figura 6.7a). Los estratos son frágiles a golpe de martillo y se observan fracturados y lajosos (Figura 6.7b), sobre todo en sectores de límite entre capas, donde se hacen presentes los niveles de vaques. En algunos niveles, las cuarcitas se encuentran más afectadas por alteraciones (probablemente de origen hidrotermal) y con abundante contenido de óxidos e hidróxidos de hierro producto de estas alteraciones (Figura 6.7c).

Para el estudio petrográfico de este frente se tomaron muestras de la parte basal y se colectaron bloques para ser procesados y ensayados en laboratorio.



**Figura 6.6:** Perfil estratigráfico esquemático e imagen del frente 2 (norte). En el perfil se representa la litología, tonalidad, estructura y estratificación interna. En la imagen se observa el desarrollo de los estratos de cuarcitas. En sectores superiores se hallan mineralizaciones oscuras. Corona un estrato arcilloso de 1 m de espesor.



**Figura 6.7:** Imágenes del frente 2 (a) niveles de vaques más rojizos; (b) niveles de cuarcitas y vaques micáceos muy fracturados; (c) bloque de cuarcita muy alterada, con abundantes óxidos (e hidróxidos) de hierro que le confieren una tonalidad ocre.

### 6.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)

Esta cantera se halla en actividad desde los años 40' y se desarrolla en 3 bancos o niveles de explotación, de los cuales los inferiores poseen menos desarrollo (3-5 metros y el superior mayor a 10 m (Figura 6.8 y 6.9).



**Figura 6.8:** Imagen satelital de cantera La Florida. El punto GPS señala la ubicación del perfil al momento del relevamiento.

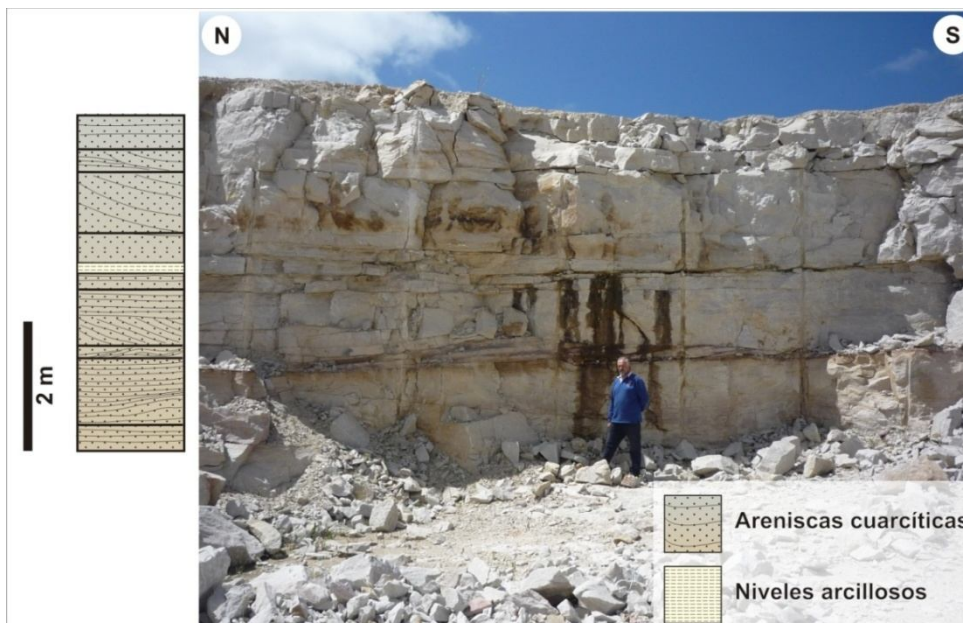


**Figura 6.9:** Cantera La Florida, vista desde el norte. Los frentes son principalmente cuarcíticos de tonos claros (grisáceos y amarillentos). Niveles arcillosos hacia la parte superior (flecha roja).



Los estratos son de tonalidades blanco-grisáceas, a pardo amarillentas debido a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (Figura 6.10). En sectores las cuarcitas intercalan con niveles de vaques cuarzo-micáceos de tonos morados y niveles de arcillas gris-verdosas de pocos centímetros hasta 30 cm de espesor (Figura 6.11), aunque en esta cantera los niveles de arcillas son escasos, tomando relevancia hacia los sectores superiores de la cantera. En el perfil estudiado, los estratos se desarrollan entre 0,5 y 2 m de espesor y presentan una estratificación a gran escala tabular y cuneiforme, estratificación interna masiva, o entrecruzada (Figura 6.10 y 6.11) e intercalaciones de arcillas. Las cuarcitas poseen mayor uniformidad que las observadas en cantera Minera, con juegos de diaclasas más espaciados. Según la dirección de rumbo del frente, se observa la presencia o no de fracturas

Se obtuvieron muestras de mano de los frentes inferior y medio de la cantera, y de bloques cuarcíticos del nivel medio para la realización de los ensayos petrográficos y físicos de RAS.



**Figura 6.10:** Perfil estratigráfico esquemático e imagen del frente inferior de la cantera. Los estratos de cuarcitas se desarrollan en espesores de hasta 2 m, que se acúan hacia los extremos e intercalan con estratos lenticulares de poco espesor. En este sector los niveles arcillosos son escasos.



**Figura 6.11:** (a) Sector inferior y medio del nivel inferior de explotación, de base a techo: nivel masivo de cuarcita de 80 cm, nivel arcilloso de 30 cm, estrato masivo de cuarcita de 50 cm y estrato de cuarcita con estratificación entrecruzada de 2 m de espesor. (b) Detalle del nivel de arcillas.

### 6.2.1.3. Cantera La Cerámica (ex - Cerámica del Plata)

El laboreo es antiguo y está parcialmente cubierto por vegetación. La dirección general de los frentes es N-S. El sector norte está explotado en 3 niveles y el sudeste se desarrolla en un único frente de 12 a 15 metros (Figura 6.12 y 6.13).



**Figura 6.12:** Imagen satelital de cantera La Cerámica. Punto GPS del perfil relevado.

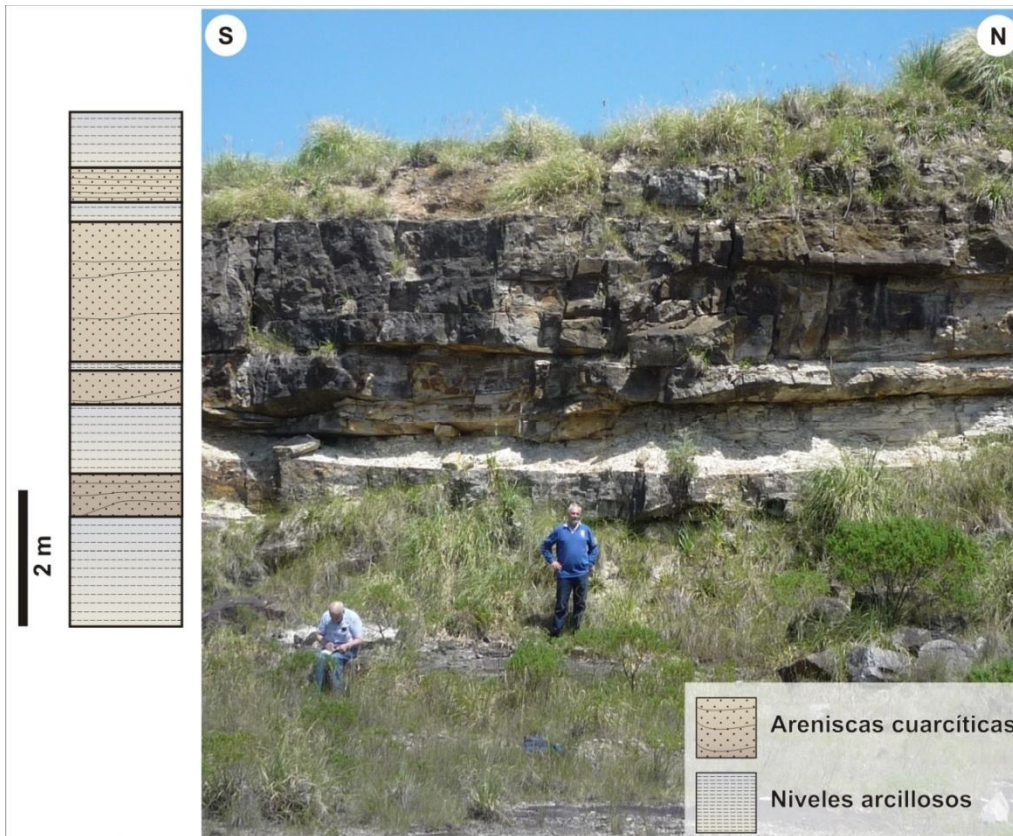


**Figura 6.13:** Imagen tomada hacia el norte de la cantera. Se visualizan los tres bancos de explotación cubiertos por vegetación.

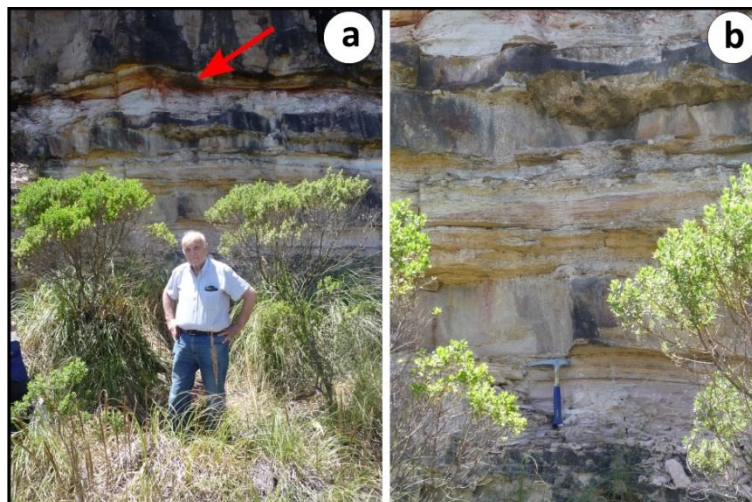
El nivel estratigráfico de los estratos en esta cantera se correspondería con el sector superior de cantera La Florida. Aquí el espesor y presencia de los niveles arcillosos es mayor que en el resto de las canteras. La intercalación arena-arcilla es regular en todos los frentes y los espesores de las arcillas varían entre 0,5 a 1 metro (Figura 6.14). La potencia de los estratos cuarcíticos es variable, por lo general inferior a 1m; presentan estratificación en cuña y también lenticular, esta última observada muy bien en los estratos superiores del perfil.

El frente analizado (Figura 6.14) corresponde al sector sur y oeste de la cantera, el cual exhibe una altura máxima de 5 metros y se compone de estratos lenticulares de arcillas y cuarcitas intercaladas. En el mismo se destaca un estrato lenticular de arcilla de 1 m de espesor medio, con continuidad lateral de varias decenas de metros. A nivel del piso de la cantera se observaron cuarcitas de granulometría mayor (conglomerado fino constituido por clastos de cuarzo redondeados y otros de sabulita con clastos de cuarzo más angulosos e irregulares, bien cementados). El cemento en las cuarcitas es silíceo y/o ferruginoso. En el frente este de la cantera se identificaron arenitas y arcillitas teñidas con óxidos e hidróxidos de hierro (ferruginosas), con niveles ocres de 2-3 cm, de alta dureza, desarrollados en el contacto entre las capas cuarcíticas y arcillosas (Figura 6.15a y b).





**Figura 6.14:** Perfil estratigráfico esquemático e imagen del frente relevado de la cantera La Cerámica (frente SW). En el perfil se detalla la litología, estructura y estratificación del frente. La imagen resalta la presencia de un nivel arcilloso de 1 m.



**Figura 6.15:** Frente E del sector S de la cantera. **(a)** Intercalación de estratos cuarcíticos y arcillosos, ambos de 30 a 50 cm de espesor. Niveles de ocre ferruginosos de pocos cm de espesor se encuentran entre los estratos (flecha). **(b)** Detalle de los niveles de (a).

En esta cantera sólo se tomaron muestras de mano del frente oeste relevado y del sector este en cuyo frente se observaron arcillas ferruginosas y niveles de ocre.

#### 6.2.1.4. Cantera Pétreá

Esta cantera, explotada desde mediados de 1940, se desarrolla en 3 niveles no muy bien definidos, presenta en uno de sus frentes (corte SE-NO) un desnivel total mayor a 30 m de altura (Figura 6.16, 6.17 y 6.18).



**Figura 6.16:** Imagen satelital de cantera Pétreá. El punto indica el dato GPS del frente relevado y lugar de muestreo.

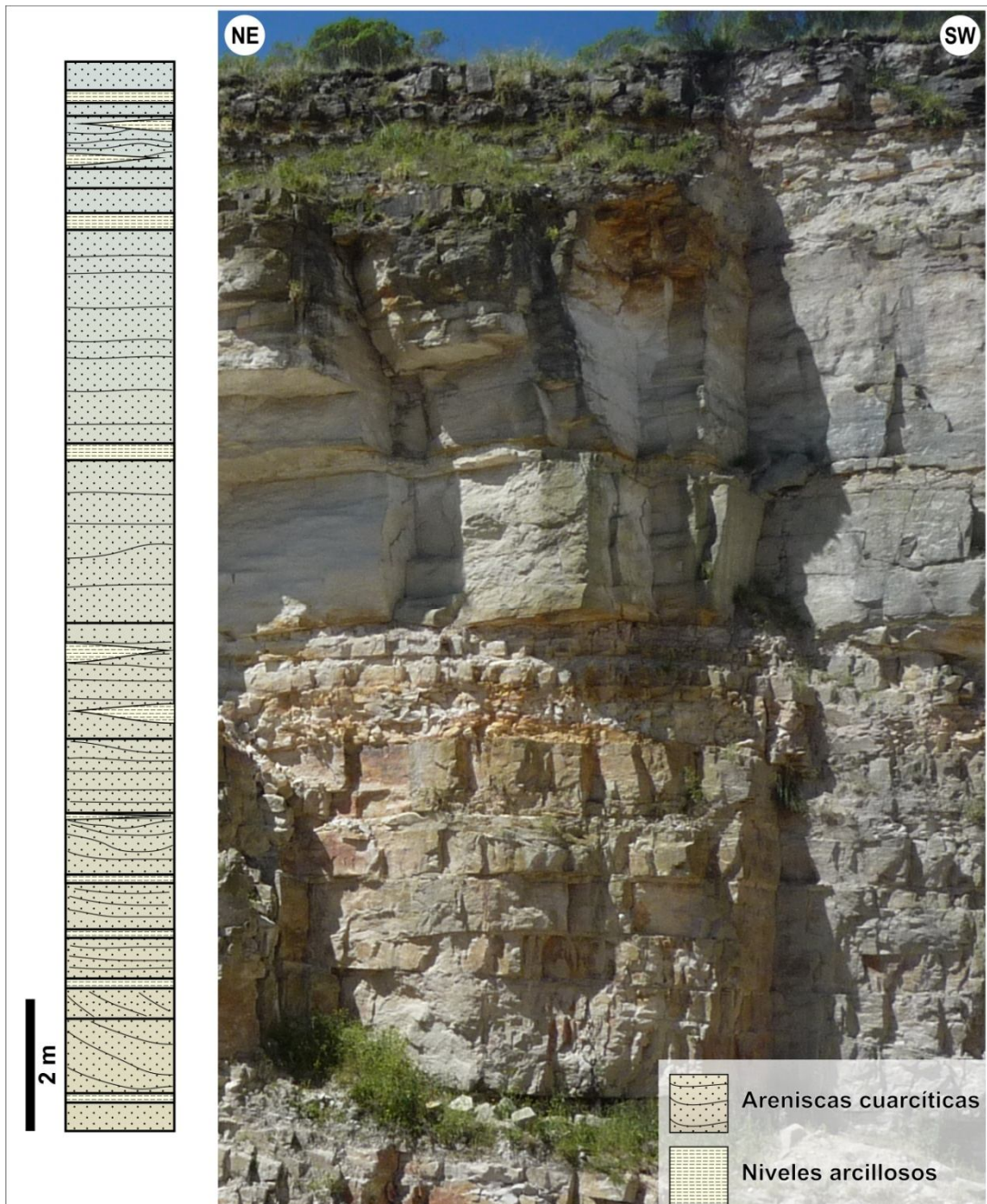


**Figura 6.17:** Vista hacia el sureste. Al fondo se puede observar el corte de mayor altura.

Como se observa en la imagen de la Figura 6.18, los estratos cuarcíticos son de espesor variable, entre 0,5 m y 2 m de potencia, masivos o con estratificación plano-



paralela, de mediana y gran escala o en cuña. La tonalidad de las capas varía de blanca grisácea y blanca amarillenta a pardo rojiza por la presencia de óxidos de hierro. Las arcillas están representadas por lentes de poco espesor o estratos más o menos continuos de 0,3 a 0,5 m de potencia y en ocasiones desarrollan lentes de varias decenas de centímetros dentro de un mismo estrato de cuarcitas.



**Figura 6.18:** Perfil estratigráfico esquemático e imagen del extremo SE del frente con mayor desarrollo vertical. En el perfil se detalla la litología, estructura y estratificación de las cuarcitas y arcillitas. Estas últimas se presentan en lentes de poco desarrollo lateral.

Las arcillas son de color blanco grisáceo, a verdosas y en algunos sectores de tonalidades amarillentas, rosadas y rojizas (Figura 6.19a); pueden ser masivas, o presentar una suave laminación.

Los frentes se encuentran diaclasados y además pueden estar afectados por pequeñas fallas. En el piso de la cantera del nivel medio de explotación se hallaron abundantes trazas fósiles, además de algunos niveles de conglomerados finos a gruesos matriz sostén, cuyos clastos mayores están representados por cuarcitas, arcillitas y clastos de origen piroclástico (Figura 6.19b y c).



**Figura 6.19:** (a) Nivel arcilloso entre estratos cuarcíticos pardo amarillentos y rojizos. (b) nivel conglomerádico fino, matriz sostén; y (c) nivel conglomerádico grueso, matriz sostén, con clastos de cuarcitas, arcillitas y posible material de origen piroclástico (retrabajado).

Actualmente la cantera se encuentra inactiva, como reserva potencial de áridos. En ella se tomaron muestras para el análisis petrográfico y bloques de material cuarcítico para el procesamiento y realización de ensayos físicos de RAS.

### 6.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos

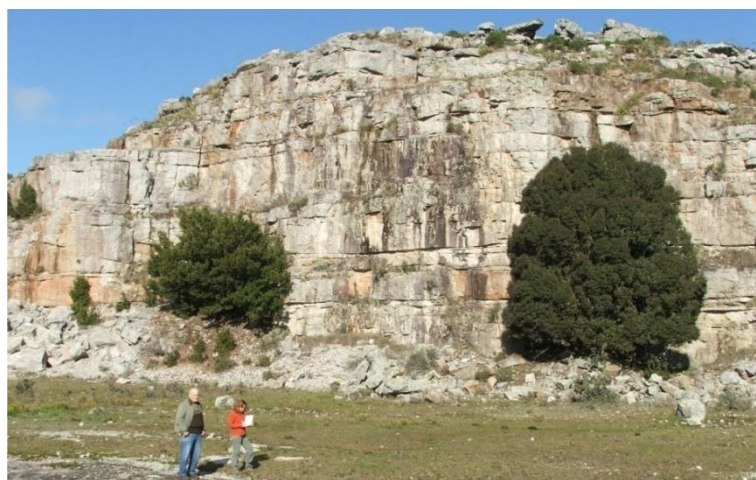
La cantera Los Pinos se encuentra ubicada en el extremo este del cerro San Agustín (Figura 6.20), en donde también se hallan otras canteras en el sector occidental del mismo (Sierras de Balcarce y Tea). Todas ellas se encuentran actualmente inactivas y poseen amplios y sólidos frentes cuarcíticos.



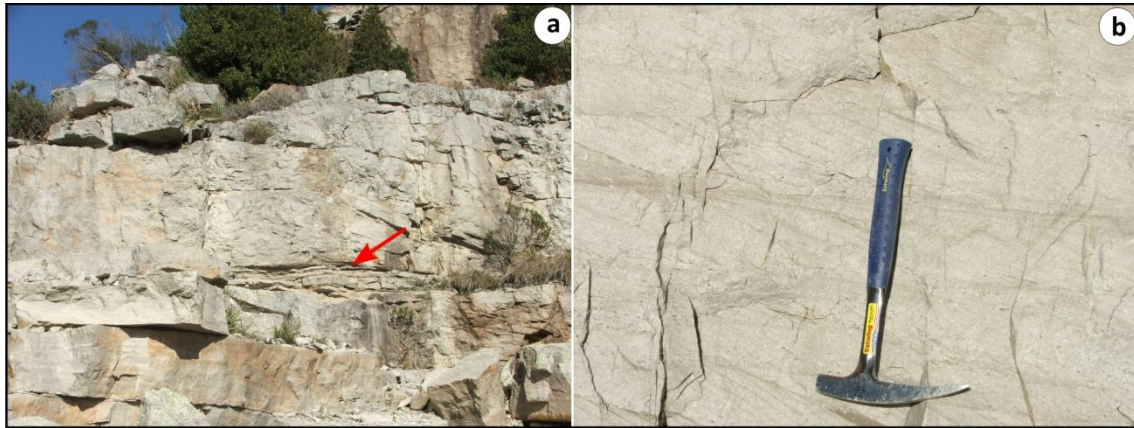


**Figura 6.20:** Imagen de satélite del Cerro San Agustín. El punto GPS muestra el único frente de cantera Los Pinos en el faldeo oriental del cerro.

En esta cantera se desarrolla un único frente de 100 m de largo y 25 m de altura con dirección NW-SE (Figura 6.21). El mismo presenta buen desarrollo vertical, con espesos estratos de cuarcitas hasta 3 m, de color blanco grisáceo, teñidos parcialmente con óxidos de hierro, e intercalan con niveles de arenas muy finas y lenticulares de arcilla de hasta 50 cm de espesor (Figura 6.22a, b y 6.23). En la base de algunos estratos se observaron icnofósiles de cruzianas. Diaclasas cortan perpendicularmente a los estratos de manera espaciada (Figura 6.23). Del frente se tomaron muestras de mano y bloques, tanto para los estudios petrográficos como para la realización de los ensayos físicos en el laboratorio.



**Figura 6.21:** Único frente de explotación de cantera Los Pinos de orientación SE-NW.



**Figura 6.22:** (a) Pequeño frente del sector SE. Se desarrollan bancos de cuarcitas de variado espesor, color gris, que intercalan con niveles de arcillitas de pocos centímetros. (b) detalle de una cuarcita fina, grisácea con estratificación entrecruzada plana.



**Figura 6.23:** Perfil estratigráfico esquemático e imagen del frente estudiado de cantera Los Pinos. La litología principal es cuarcita que desarrolla estratos de variado espesor (0,5 a 3 m) e intercalan con finos lentes de arcillas (5-30 cm).

### **6.3. PETROGRAFÍA**

Para el estudio petrográfico convencional (IRAM 1649), todas las muestras fueron estudiadas con estereomicroscopio o lupa binocular (Olympus SZ-61) y analizadas posteriormente con microscopio petrográfico (Olympus, BH-2 UMA).

Complementariamente se realizaron estudios mineralógicos por DRX sobre muestras de arcillas y polvos cuarcíticos, y MEB-EDS en muestras de cuarcitas con matriz y/o material intersticial de tamaño de grano muy fino.

#### **6.3.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**


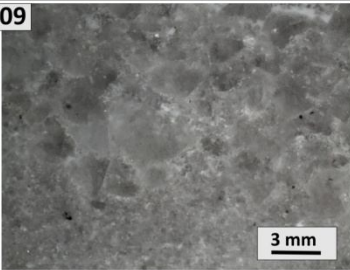

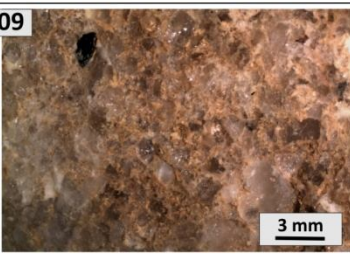

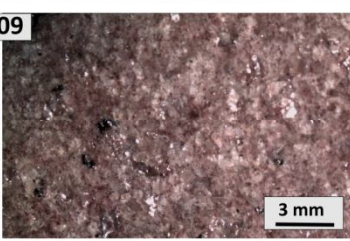

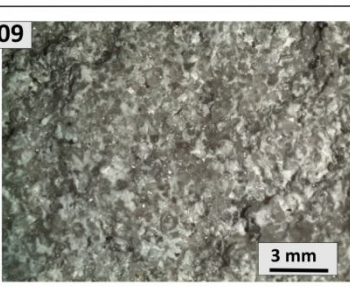

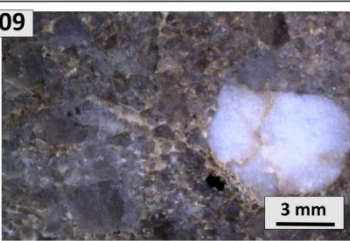
Sobre las muestras de esta cantera, se realizó el análisis petrográfico con estereomicroscopio y microscopía óptica. Pero además, en las muestras del segundo frente relevado se realizó MEB-EDS, ya que estas rocas poseen abundante matriz de granulometría muy fina y de difícil identificación con microscopía óptica.

##### **6.3.1.1. Cantera Minera Yaraví**


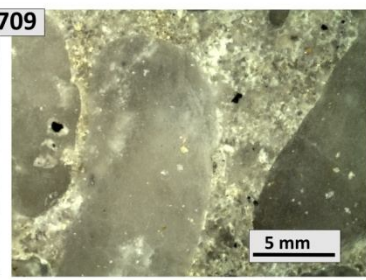

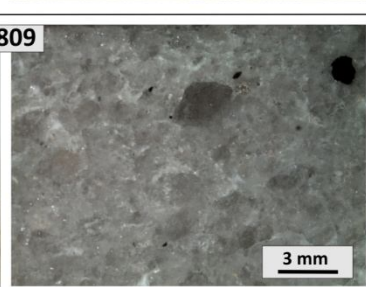
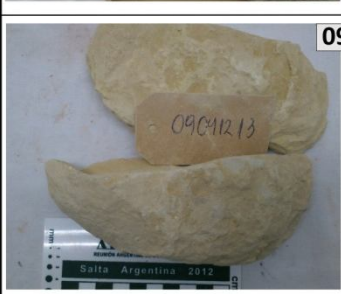
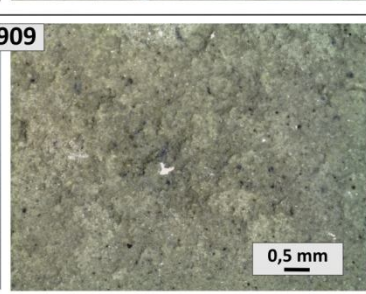

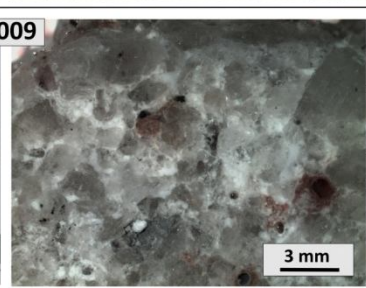
###### **6.3.1.1.1. Estereomicroscopía y microscopía óptica de polarización**

En primer lugar las muestras fueron observadas y descritas con estereomicroscopio (lupa binocular). En los Cuadros 6.1 y 6.2, se presentan los resultados obtenidos de este análisis. Las muestras corresponden principalmente a arenitas y sabulitas cuarzosas. En las descripciones se hace hincapié en la composición, color, textura y estructura de las muestras, además se señala, en algún caso, la respuesta del material al golpe de martillo, cuya característica influye en la respuesta de las rocas al ser trituradas, sobre todo en aquellas muestras con presencia de matriz.



		<p><b>0209</b> Sabulita cuarzosa con matriz de arena media a fina. Los clastos de cuarzo son subangulos a subredondeados, escasos de muscovita y turmalina. Posee en sectores cemento cuarzoso y arcilloso .</p>
		<p><b>0309</b> Arenita cuarzosa de tamaño arena gruesa hasta sabulítica (1-4mm); escasos granos mayores (&gt;4 mm) de líticos cuarcíticos. Los clastos son angulosos a subangulosos. Matriz de arena media-fina a arcillosa; algunos sectores son más porosos y están teñidos con óxidos de hierro. Turmalina esporádica.</p>
		<p><b>0409</b> Vaque fino compuesto por clastos de cuarzo tamaño arena fina, láminas de muscovita, accesorios de turmalina y minerales máficos. Posee una laminación marcada que le proporciona cierta fisilidad. Posee un fractura frágil al golpe de martillo.</p>
		<p><b>0509</b> Vaque cuarzoso de granulometría media-fina con matriz fina, micácea y arcillosa. Los granos de cuarzo son subangulosos a subredondeados. Es frágil a golpe de martillo y fácilmente desgranable debido a la presencia de matriz (10-20%).</p>
		<p><b>0609</b> Sabulita cuarzosa con matriz arenosa media-fina. Los clastos mayores de cuarzo son subangulosos a subredondeados. La matriz es cuarzosa pero también se observa una matriz fina arcillosa teñida con óxidos de hierro.</p>

**Cuadro 6.1:** Imágenes de las muestras del frente sur, nivel inferior. Izquierda: imágenes de la muestras de mano. Derecha: imágenes tomadas con esteromicroscopio.

		<p><b>0709</b> Conglomerado fino matriz sostén. Grada a una arenita media-fina con matriz muy fina. Clastos mayores de cuarcitas e ígneo-metamórficos redondeados a subredondeados, de hasta 2 cm. El espesor del nivel conglomerádico es de 3 cm. Se observa turmalina dentro de los clastos líticos y como clasto en la matriz arenosa.</p>
		<p><b>0809</b> Arenita cuarzosa de granulometría media a gruesa. Los clastos de cuarzo son angulosos a subangulosos y subredondeados. En sectores la roca es muy compacta, y en otros es más porosa y/o con matriz muy fina. Turmalina esporádica. En sectores intercala con arena gruesa-media y fina.</p>
		<p><b>0909</b> Fangolita pasamo-pélica de laminación poco marcada, color gris- amarillenta clara. Se observan concentraciones de micas, opacos y turmalinas. Las micas son muscovíticas. Se distinguen también granos de cuarzo angulosos tamaño arena fina.</p>
		<p><b>1009</b> Arenita cuarzosa de granulometría muy gruesa a gruesa y matriz fina a muy fina (en sectores matriz sostén). Clastos de cuarzo anguloso a subangulosos. Se destacan clastos líticos rojizos subredondeados a redondeados, y cuarzosos subangulosos. Escasos granos de turmalina.</p>

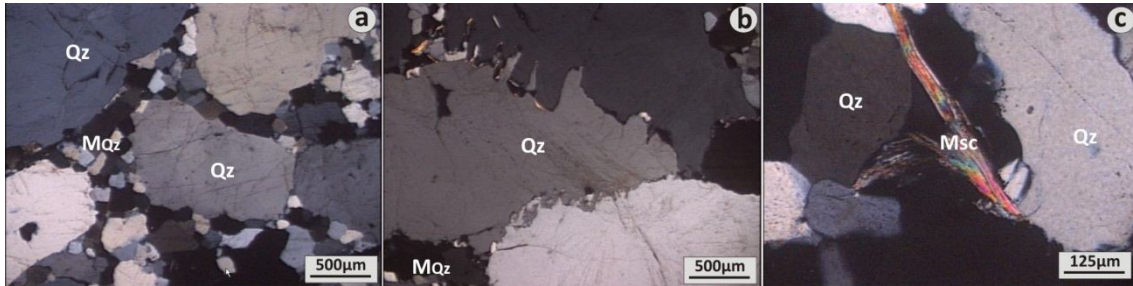
**Cuadro 6.2:** Muestras del frente sur, nivel superior. Izquierda: imágenes de la muestras de mano. Derecha: imágenes tomadas con esteromicroscopio.

A continuación se describen las mismas muestras con microscopio petrográfico:

Muestra 0209: Sabulita matriz sostén (Figura 6.24), compuesta por granos de cuarzo de tamaño sábulo (2-4 mm) y arena muy gruesa (1-2 mm) en una matriz de arena gruesa-media a fina (500-200  $\mu\text{m}$ ). El cuarzo mayor a 2 mm es subredondeado (Figura 6.24a), policristalino, correspondiente a líticos ígneos y metamórficos con trenes de inclusiones e indicios de disolución por presión (en el interior de los granos). Los clastos entre 1-2 mm son, en su mayoría, ígneos, subangulosos y sin deformación. La matriz arenosa está compuesta por clastos de cuarzo subangulosos a subredondeados, escasos redondeados con evidencia de crecimiento de cuarzo secundario. Los contactos entre



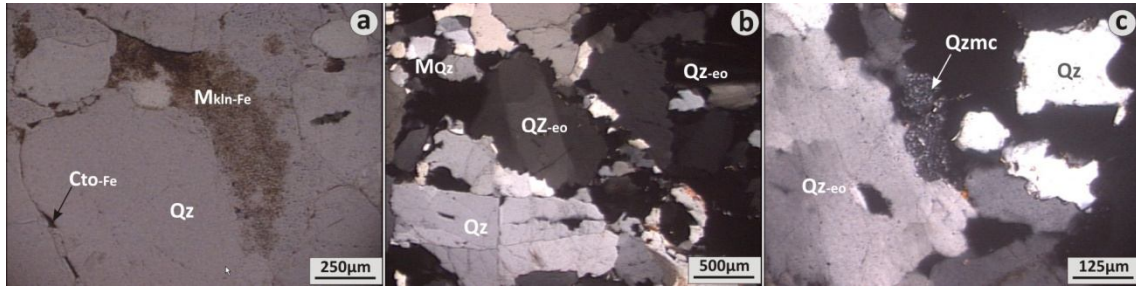
granos suelen ser netos, en algunos casos con intercrecimientos (Figura 6.24b). Otros minerales presentes son: muscovita detrítica de hasta 1 mm de largo, que se ajusta, en algunos casos, a los espacios entre los clastos de cuarzo (Figura 6.24c), turmalina (~100  $\mu\text{m}$ ) angulosa-subangulosa y otros minerales accesorios como circón, titanita, apatita (redondeados) y minerales opacos.



**Figura 6.24:** Sabulita. **(a)** clastos de cuarzo (Qz) tamaño sábulo; matriz arenosa cuarcítica (MQz). **(b)** Contactos netos e intercrecidos de cuarzo (Qz). **(c)** Láminas de muscovita (Msc) detrítica entre granos de cuarzo (Qz). Fotomicrografías tomadas con polarizadores cruzados (PC).

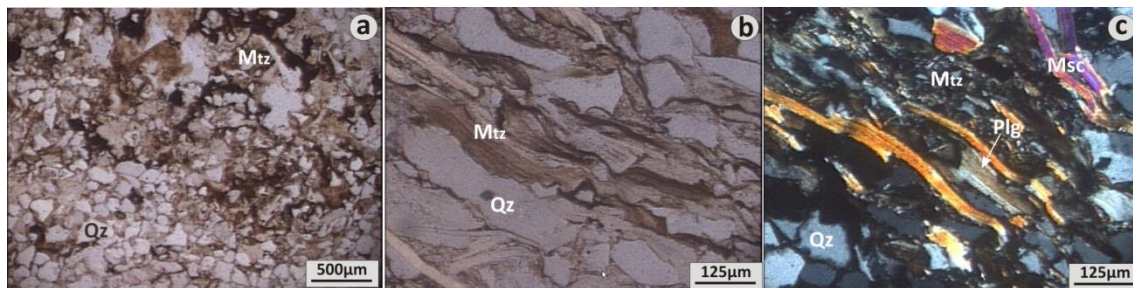
Muestra 0309: Arenita cuarzosa de tamaño de grano arena gruesa a media (Figura 6.25), en algunos sectores muy gruesa y con sábulos de líticos ígneo-metamórficos, algunos con extinción ondulante, muy fracturados. El cemento es silíceo y/o ferruginoso (Figura 6.25a) o está ausente, desarrollándose contactos netos entre los granos de cuarzo (Figura 6.25b). Posee poros irregularmente distribuidos, rellenos con pequeñas láminas de muscovita, caolinita y/o cuarzo microcristalino y óxidos de hierro. En general los clastos son de subangulosos a subredondeados, escasos redondeados con crecimientos secundario en sus bordes (100-200  $\mu\text{m}$ ), algunos (escasos) de los cuales son de chert o de cuarzo microcristalino (Figura 6.25c). La muscovita es detrítica e inferior a 1 mm, además aparecen pequeños granos esporádicos de turmalina.





**Figura 6.25:** Arenita cuarzosa. **(a)** Granos subredondeados de cuarzo (Qz) con cemento ferruginoso (Cto-Fe) y/o matriz caolinítica con impurezas de óxidos de hierro (Mkln-Fe). **(b)** y **(c)** Cuarzo (Qz) tamaño sábulo en matriz cuarzosa (MQz); cuarzo con extinción ondulante (Qz-*eo*). Fotomicrografías tomadas con polarizadores paralelos (PP) en (a) y con polarizadores cruzados (PC) en (b) y (c).

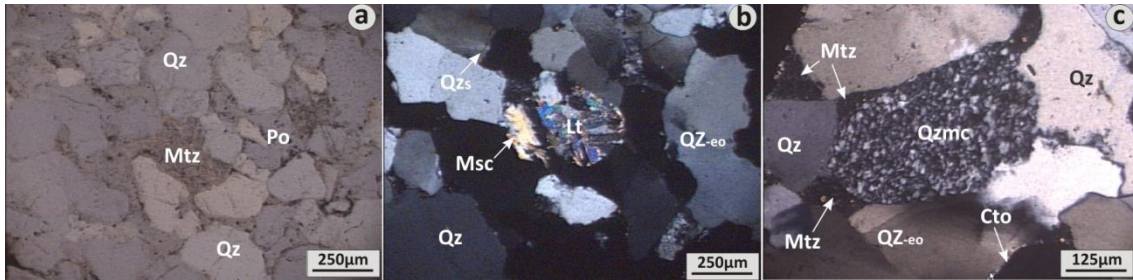
Muestra 0409: Vaque cuarzo-micáceo (Figura 6.26) de granulometría arena fina con matriz limo-arcillosa (Figura 6.26a). Está compuesto por cuarzo anguloso a subanguloso, feldespatos alterados a illita y caolinita, muscovita detrítica en láminas desde 100 µm a mayores a 1 mm (Figura 6.26b y c). Esta muscovita se halla distribuida en toda la muestra, aunque en sectores se concentra formando bandas. Además se identifica biotita alterada (Figura 6.26b) y desferrizada junto a concentraciones de minerales opacos y algunas plagioclasas parcialmente alteradas donde aún se pueden distinguir las maclas (Figura 6.26c). En algunas áreas la matriz es más abundante y está relacionada a sectores más micáceos y con mayor alteración (micas y feldespatos alterados).



**Figura 6.26:** Vaque cuarzo-micáceo. **(a)** Se observa granos angulosos de cuarzo (Qz) en una matriz arcillosa (Mtz). **(b)** Granos de cuarzo (Qz) angulosos e inequigranulares en una matriz (Mtz) producto de la alteración de minerales primarios. **(c)** Cuarzo (Qz), muscovita (Msc) y clastos de plagioclasa (Plg). Fotomicrografías tomadas con PP en (a) y (b) y PC en (c).

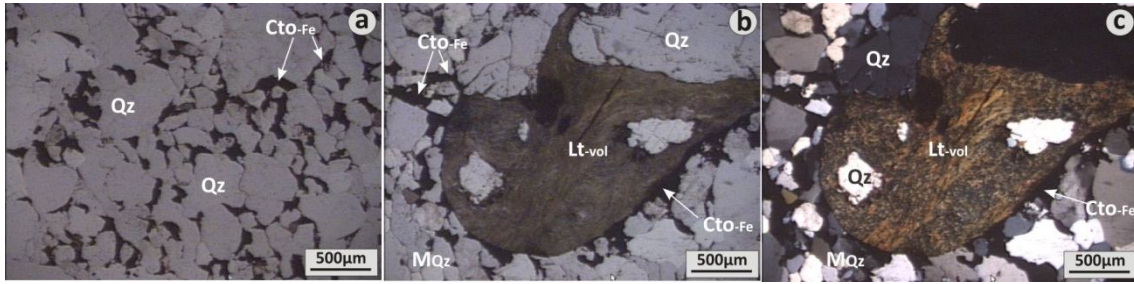
Muestra 0509: Arenita cuarzosa de granulometría media a fina, homogénea (120-500 µm), que en sectores presenta algo de matriz de composición arcillosa, o poros vacíos por pérdida del material fino (Figura 6.27a). También se identifican clastos líticos,

láminas de muscovita (Figura 6.27b) y granos de turmalina detrítica, de tamaño similar al cuarzo, además de feldespato y biotita alterados a arcillas. Los clastos de cuarzo son subangulosos a subredondeados con extinción normal a levemente ondulante (Figura 6.27b y c); escasos redondeados de chert, cuarzo policristalino y microcristalino, además posee cemento (y en algunos casos matriz) micáceo y arcilloso, que rodea parcial o totalmente los granos de cuarzo (Figura 6.27c).



**Figura 6.27:** Arenita cuarzosa. **(a)** Cuarzo (Qz) subanguloso-subredondeado; matriz (Mtz) arcillosa y poros (Po) con o sin material de relleno. **(b)** Granos líticos (Lt), cuarzo con extinción ondulante (Qz-wo) y crecimiento secundario (Qzs); **(c)** clasto redondeado de cuarzo microcristalino (Qzmc), matriz (Mtz) y cemento (Cto) intersticial. (a) Tomada con PP, (b) y (c) con PC.

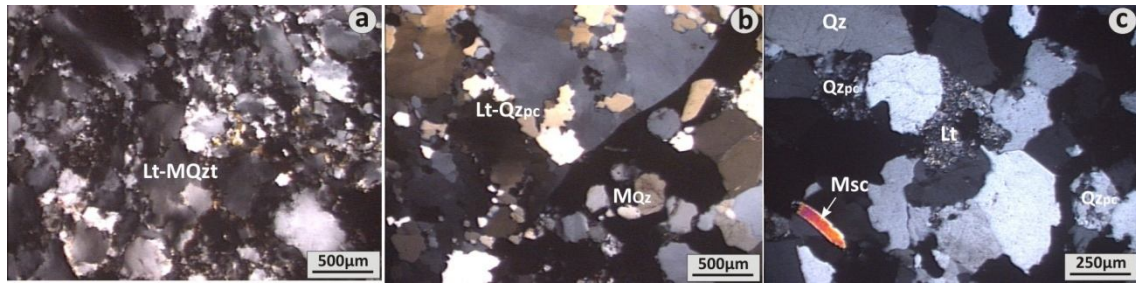
Muestra 0609: Sabulita cuarzosa matriz sostén. Los clastos mayores de cuarzo son subangulosos a subredondeados y corresponden a una gravilla fina (6-4 mm) y sábulo (3-4 mm), en una matriz de arena muy gruesa-gruesa (2-1 mm) gruesa a media (800-250  $\mu\text{m}$ ) y fina (200-100  $\mu\text{m}$ ). En sectores los granos de cuarzo son más redondeados, con un cemento ferruginoso, opaco, que además de cementar a los granos de cuarzo invade el interior de los granos a través de fisuras, y en los poros suele estar presente junto a caolinita e illita (Figura 6.28a-c). Los clastos mayores son ígneos, metamórficos (milonitas), metacuarcitas con pátinas ferruginosas, clastos piroclásticos de pómez (alterados a arcillas) redondeados, levemente deformados (Figura 28b y c).



**Figura 6.28:** (a) Sabulita en el sector más arenoso; granos de cuarzo (Qz), cemento ferruginoso (Cto-Fe). (b)-(c) Lítico volcánico (Lt-vol) illitizado-caolinizado y fragmentos de cuarzo límpido (Qz); matriz cuarzosa (MQz) y cemento ferruginoso (Cto-Fe). (a-b) Con PP, y (c) con PC.

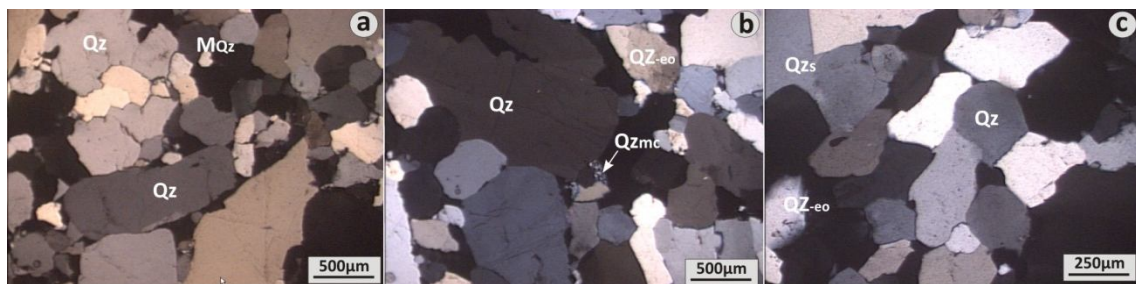
Muestra 0709: Conglomerado de fino a medio matriz sostén. Los clastos son de grava fina (hasta 20 mm), redondeados, de origen ígneo-metamórfico (Figura 6.29a y b). Las rocas metamórficas son milonitas (Figura 6.29b) constituidas por subgranos de cuarzo tamaño variable (2000  $\mu\text{m}$  - <50  $\mu\text{m}$ ) y metacuarcitas con impurezas de óxidos de hierro (Figura 6.29a), muy deformadas, con extinción ondulante elevada y microgranulación de los bordes de grano. Es destacable la presencia de granos de turmalina angulosos, de tamaño arena gruesa y muy gruesa (0,5-1,5 mm). La matriz está compuesta por cuarzo tamaño arena media a fina, anguloso a sub-anguloso, en algunos casos con contactos netos y rectos (algunos poligonales) o irregulares. Los granos de cuarzo redondeados son escasos, algunos con crecimiento secundario de sus bordes, y otros pertenecen a chert y cuarzo policristalino (Figura 6.29c). En algunos sectores la matriz arenosa presenta mayor cantidad de poros, los cuales pueden estar ocupados por caolinita e illita. Como minerales accesorios se observa muscovita detrítica, minerales opacos, turmalina y circón de tamaño inferior a los 200  $\mu\text{m}$ .





**Figura 6.29:** Conglomerado. **(a)** Lítico de metacuarcita con alta deformación (Lt-MQzt). **(b)** Lítico de cuarzo policristalino (Lt-Qzpc) de milonita en una matriz cuarzosa (MQz) de granulometría media a fina. **(c)** Sector de la matriz: granos de cuarzo de extinción normal (Qz); cuarzo policristalino (Qzpc), líticos (Lt) de grano fino y muscovita (Msc). Fotomicrografías tomadas con PC.

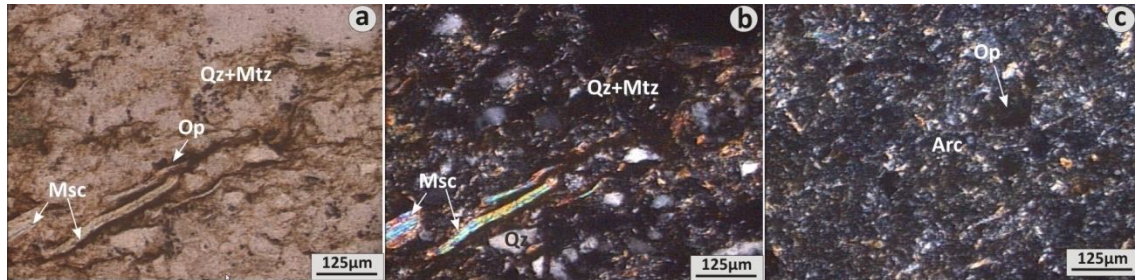
Muestra 0809: Arenita cuarzosa que granulométricamente varía de muy gruesa (2,5 – 1 mm) a gruesa y media (1000 - 250 µm) hasta fina y escasa matriz tamaño arena fina a muy fina (< 100 µm), también se observa muscovita detrítica en láminas de varios cientos de micrones. El cuarzo es anguloso - subanguloso a subredondeado y escasos redondeados, la mayoría de ellos con extinción normal (Figura 6.30a), escasos con extinción ondulante (Figura 6.30b y c). Los contactos entre los granos de cuarzo son netos en algunos casos con desarrollo de crecimiento secundario. También se observan granos redondeados de chert y cuarzo microcristalino esporádicos (Figura 6.30c) y clastos de metacuarcitas con alta deformación.



**Figura 6.30:** Arenita cuarzosa. **(a)-(b)** Granos mayores de cuarzo (Qz) subangulosos; matriz de arena media a fina (MQz); clastos de cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo) y microcristalino (Qzmc). **(c)** Detalle de la matriz cuarzosa (media a fina); contactos netos entre los granos de cuarzo (Qz), predomina el crecimiento secundario de cuarzo (Qzs). Fotomicrografías tomadas con PC.

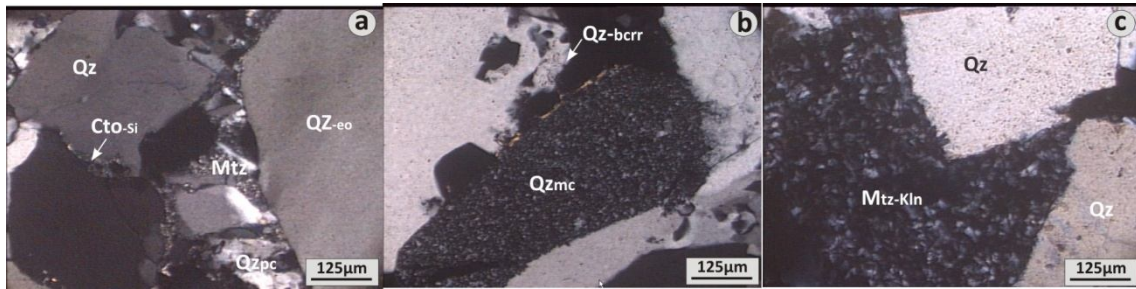
Muestra 0909: Fangolita, compuesta por intercalaciones groseras de arena muy fina, limo y arcilla, compuesta por cuarzo, muscovita y otros accesorios como minerales opacos y turmalina. El cuarzo es anguloso y el tamaño varía entre granulometrías limo-

arcillosas y arena muy fina, al igual que la muscovita detrítica (Figura 6.31a y b). La laminación es más marcada en las zonas donde se concentran las micas. Los sectores de granulometría arcillosa más fina están compuestos principalmente por caolinita e illita (Figura 6.31c).



**6.31:** Fangolita. **(a)-(b)** Sector areno-limo-arcilloso; muscovita (Msc) y granos de cuarzo (Qz) en una matriz fina (Qz+Mtz). **(c)** Sector arcilloso (Ar) caolinitico-illítico; minerales opacos (Op), que se concentran en los sectores más muscovíticos. (a) Con PP, (b) y (c) con PC.

Muestra 1009: Arenita cuarzosa de granulometría gruesa con matriz areno-arcillosa siendo en algunos sectores matriz sostén (Figura 6.32a). La matriz es caolinita-illita-cuarzo, distribuida muy irregularmente, en forma de parches entre granos de líticos cuarzosos de origen ígneo, angulosos a subangulosos, los cuales pueden tener trenes de inclusiones (rutilo, turmalina o minerales opacos), y líticos metamórficos deformados o líticos de cuarzo microcristalino (Figura 6.32b). También se observan escasos clastos subredondeados de cuarzo policristalino de tamaño de grano inferior a los 60 µm. Los clastos mayores de cuarzo más angulosos se observan fracturados. El cemento de la roca es micáceo o arcilloso y/o silíceo microcristalino (Figura 6.32c), o puede estar ausente con desarrollo de contactos netos entre los granos. Por lo general el tamaño varía entre 1 mm y 500 µm, aunque hay clastos mayores a 1 mm. Algunos granos de cuarzo presentan disolución de sus bordes o bordes corroídos, acompañado por la redepositación de microcuarzo en bordes de granos próximos y/o poros adyacentes.




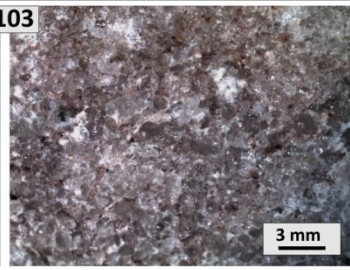

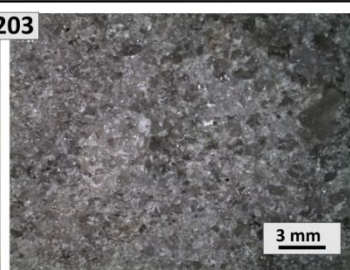

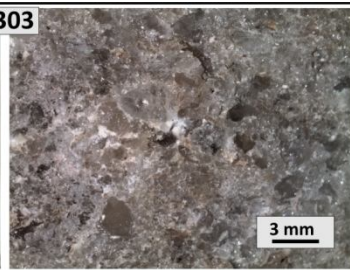

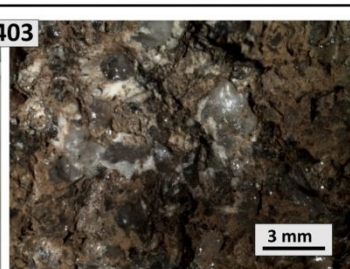

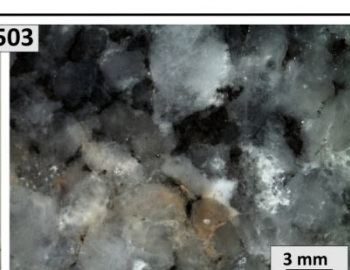

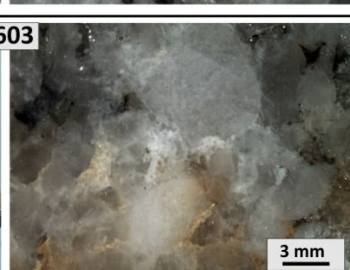
**Figura 6.32:** Arenita cuarzosa. **(a)** Se destacan clastos de cuarzo (Qz) angulosos a subangulosos, cuarzo con extinción ondulante (QZ-ao) y cuarzo policristalino (Qzpc); matriz areno-arcillosa (Mtz); cemento silíceo (Cto-Si). **(b)** Cuarzo microcristalino (Qzmc); cuarzo con bordes corroídos (Qz-bcrr). **(c)** Granos de cuarzo anguloso (Qz); matriz cuarzo-caolinítica (Mtz-Kln). Fotomicrografías tomadas con PC.

En el Cuadro 6.3 se detallan las observaciones realizadas con estereomicroscopio de las muestras de mano del frente 2.

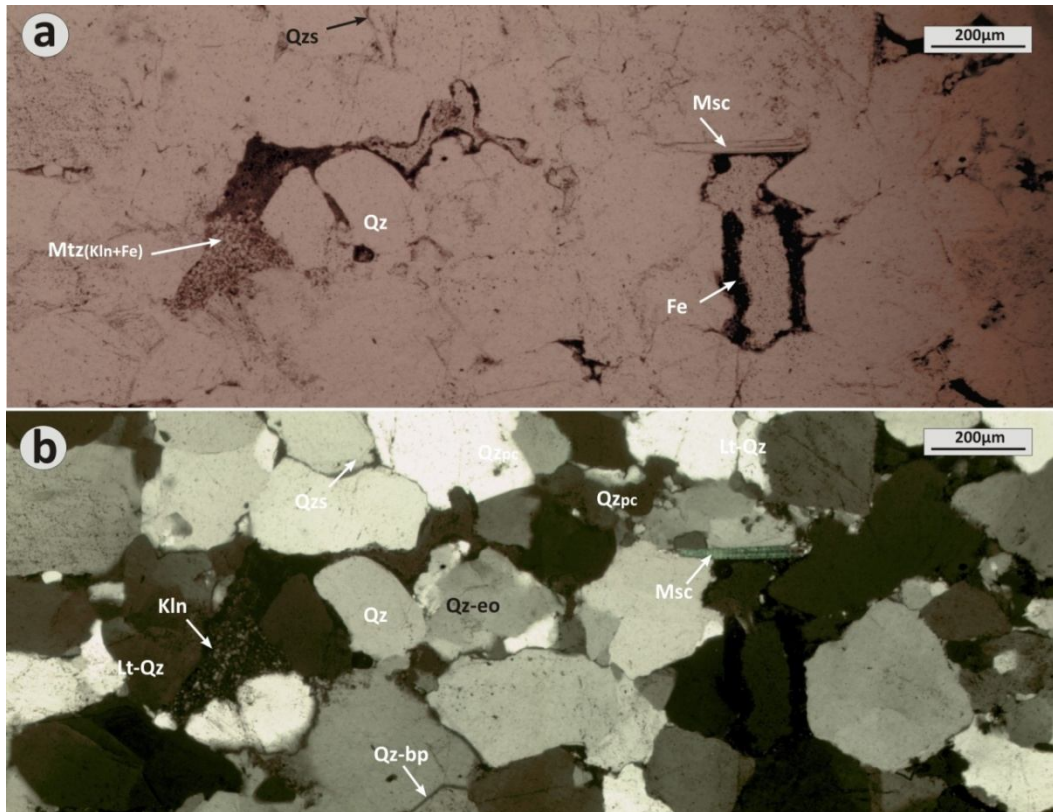
Las muestras son arenitas con un cierto contenido de matriz y vaques de granulometría arena gruesa a muy gruesa y sabulítica. A continuación se analizan las secciones delgadas de las muestras mediante microscopio petrográfico.

Muestra 0103: Sub-vaque cuarzoso de granulometría media (200  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ ) a gruesa (600  $\mu\text{m}$  a 1 mm) y muy gruesa, con clastos de hasta 1,5 mm. Los clastos de cuarzo son subangulosos a subredondeados, escasos redondeados abundantes de origen ígneo, algunos metamórficos, policristalinos o con extinción ondulante de alto ángulo ( $> 25^\circ$ ). Los contactos suelen ser netos, con crecimiento secundario de cuarzo y con poligonización de los bordes. Los intersticios están ocupados por material fino identificado como caolinita, cuarzo microcristalino y/o concentraciones de óxidos de hierro (opacos). También se observan esporádicos clastos de turmalina, feldespato potásico y muscovita detrítica (Figura 6.33a y b).



		<p><b>0103</b></p> <p>Sub-vaque cuarzoso de granulometría media a fina, rojizo. El cuarzo es subanguloso a subredondeado. Óxidos de hierro se hallan en los poros, en la matriz y también como cementante de los granos de cuarzo. La matriz muy fina, blanquecina (arcillosa); en sectores se halla parcilmente teñida por óxidos de hierro.</p>
		<p><b>0203</b></p> <p>Arenita cuarzosa de granulometría fina, con una suave laminación, de color gris claro. En algunos sectores es de tamaño de grano más grueso. Clastos de cuarzo angulosos a subredondeados, cementados por un material muy fino (silíceo-arcilloso). También se observan clastos de turmalina y láminas micáceas.</p>
		<p><b>0303</b></p> <p>Sub-vaque cuarzoso de tamaño de grano arena media a gruesa, tonalidad blanca grisácea a amarillenta y rosada por la presencia de óxidos de hierro. En sectores se observa matriz y cemento cuarzo-arcilloso. Los clastos de cuarzo son de muy angulosos a subredondeados; se distinguen líticos cuarzosos.</p>
		<p><b>0403</b></p> <p>Vaque de granulometría arena gruesa a muy gruesa con matriz de arena media a fina, arcillosa-ferruginosa. el cuarzo es anguloso a subanguloso. En la matriz hay arcillas, óxidos, y en sectores sílice de color blanco-lechoso (ópalo-calcedonia). Los óxidos de hierro también están presentes como cementante de los clastos.</p>
		<p><b>0503</b></p> <p>Sabulita cuarzosa que grada a arena gruesa y media. En sectores se observan minerales oscuros (óxidos) rellando poros o como cementante. Los clastos de cuarzo son angulosos a subredondeados. En sectores matriz de arena fina (cuarzo anguloso) a muy fina (arcillosa). También hay venillas rellenas por carbonatos.</p>
		<p><b>0603</b></p> <p>Conglomerado fino a sabulita cuarzosa, blanca amarillenta, matriz cuarzo-arcillosa, con óxidos de hierro. Son abundantes los clastos líticos subredondeados de cuarcitas, granitos y metamorfitas. Crecimiento secundario de cuarzo, algunos desarrollan caras piramidales.</p>

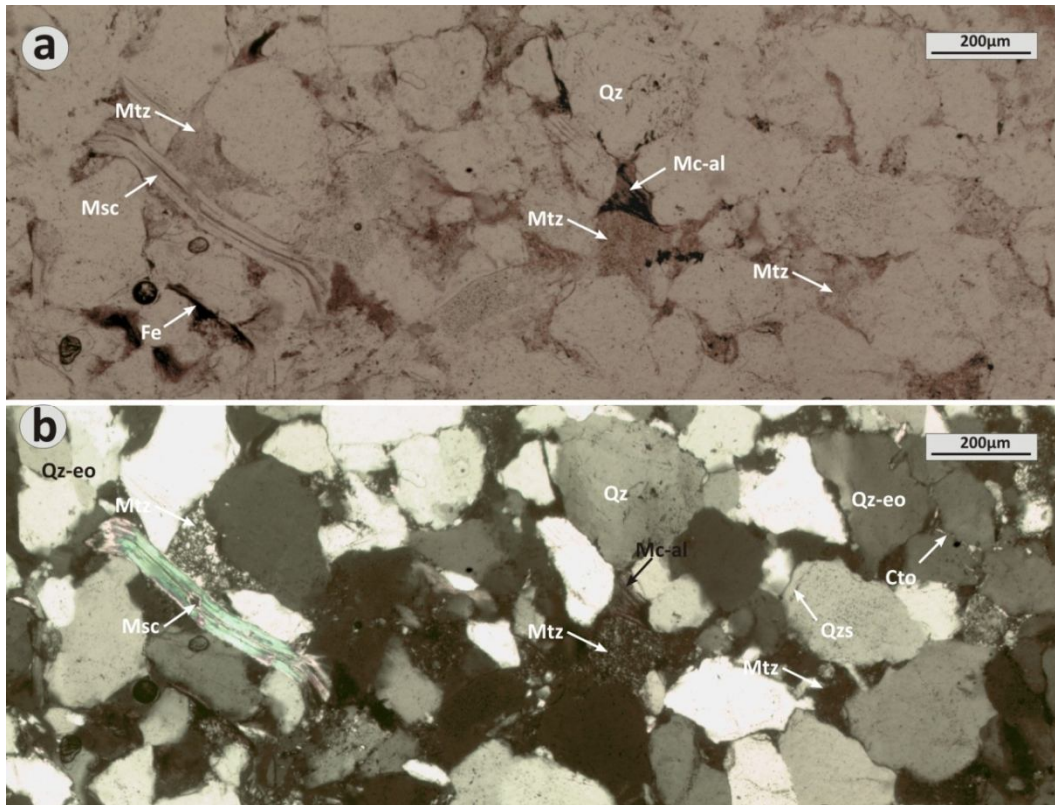
**Cuadro 6.3:** Muestras del frente norte. Izquierda: Imágenes de la muestras de mano. Derecha: imágenes tomadas con esteromicroscopio.



**Figura 6.33:** Sub-vaque. **(a)** Con PP y **(b)** con PC. En ambas se observa cuarzo (Qz) subredondeado, cuarzo con crecimiento secundario (Qzs), muscovita (Msc), poros con matriz de caolinita y óxidos de hierro (Mtz-Kln+Fe); cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo); cuarzo policristalino (Qzpc); clasto lítico cuarzoso (Lt-Qz); cuarzo con bordes poligonales (Qz-bp).

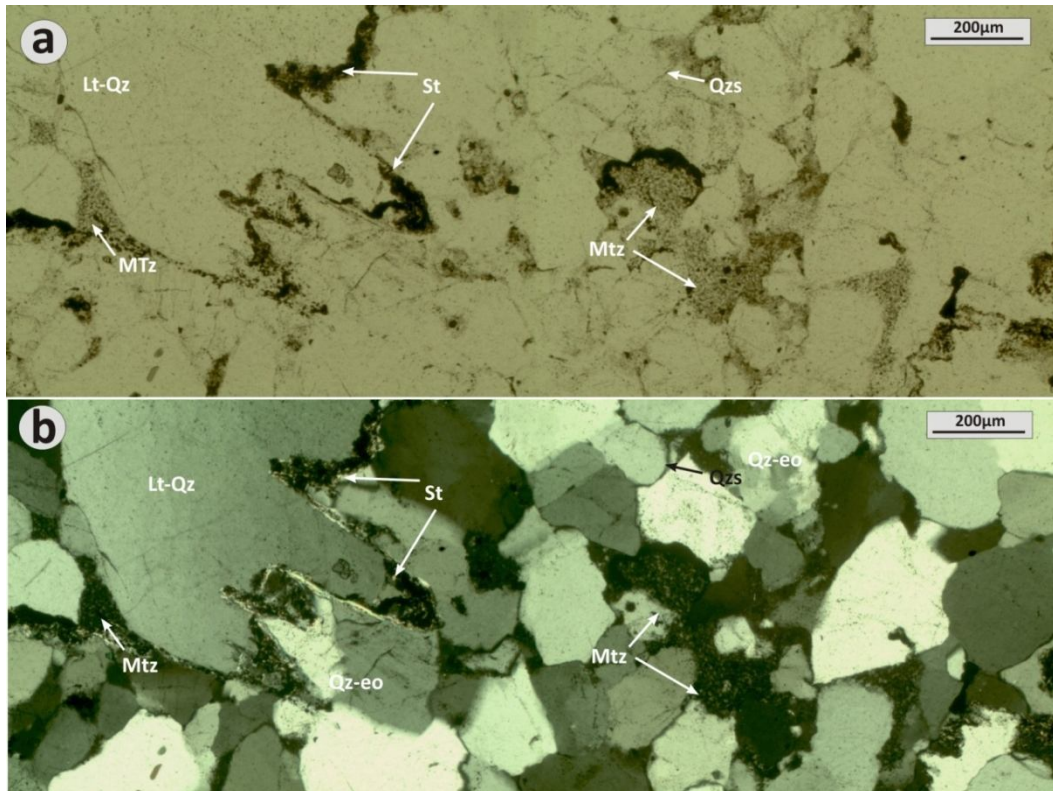
Muestra 0203: Arenita cuarzosa (sub-vaque cuarzoso) de granulometría fina a media (100  $\mu\text{m}$  - 300  $\mu\text{m}$ ). La roca posee matriz fina a muy fina, con concentraciones de óxidos de hierro en torno a micas alteradas a illita-caolinita. También se observa, muscovita detrítica en láminas de hasta 500  $\mu\text{m}$ , y accesorios de turmalina con buen desarrollo de caras (angulosa), circón, y apatita en su mayoría redondeados. Los clastos de cuarzo son subangulosos, algunos subredondeados, de origen ígneo-metamórfico (algunos policristalinos), con crecimiento secundario del cuarzo. La matriz está compuesta por caolinita, illita y cuarzo muy fino, con concentraciones de óxidos de hierro. Se observó escaso cemento silíceo o arcilloso (Figura 6.34a y b).





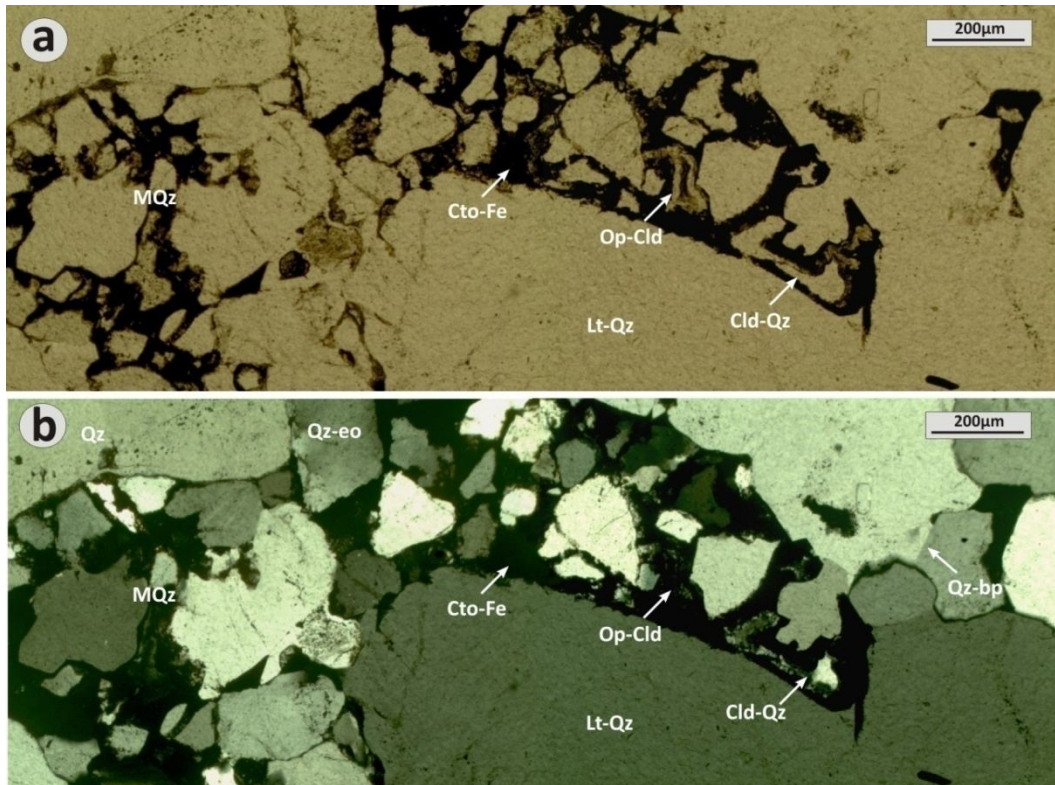
**Figura 6.34:** Arenita cuarzosa **(a)** Con PP y **(b)** con PC. En ambas se observa cuarzo (Qz) subanguloso, cuarzo con crecimiento secundario (Qzs), cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo); muscovita (Msc), micas alteradas (Mc-al); matriz (Mtz) con concentraciones ferruginosas; cemento (cto).

Muestra 0303: Sub-vaque cuarzoso de granulometría muy gruesa (1-2 mm) a gruesa (500-900  $\mu\text{m}$ ) con matriz cuarzosa media a fina (100-500  $\mu\text{m}$ ) hasta arcillosa. Los clastos de cuarzo son angulosos, subangulosos a subredondeados y los de mayor granulometría pertenecen a líticos ígneos y metamórficos (policristalinos, con extinción ondulante o algunos con alta deformación), hay algunos clastos redondeados de areniscas. Además de cuarzo, se identifican plagioclasas alteradas a minerales arcillosos, donde aún se preserva el maclado, turmalina y circón (angulosos). La matriz arcillosa es caolinítica-illítica y cuarzosa, en algunos sectores se observa caolinita conformando la típica textura en “libro”. En algunos sectores de la muestra se desarrollan estructuras que indican deformación intensa (a nivel local), como son las estilolitas donde se concentran micas minerales arcillosos y opacos. (Figura 6.35a y b).



**Figura 6.35:** Sub-vaque cuarzoso. **(a)** Con PP y **(b)** con PC. En ambas se observan líticos cuarzosos (Lt-Qz), cuarzo con crecimiento secundario (Qzs), cuarzo con extinción ondulante (QZ-eo); estilolitas (st); matriz (Mtz) con concentraciones ferruginosas.

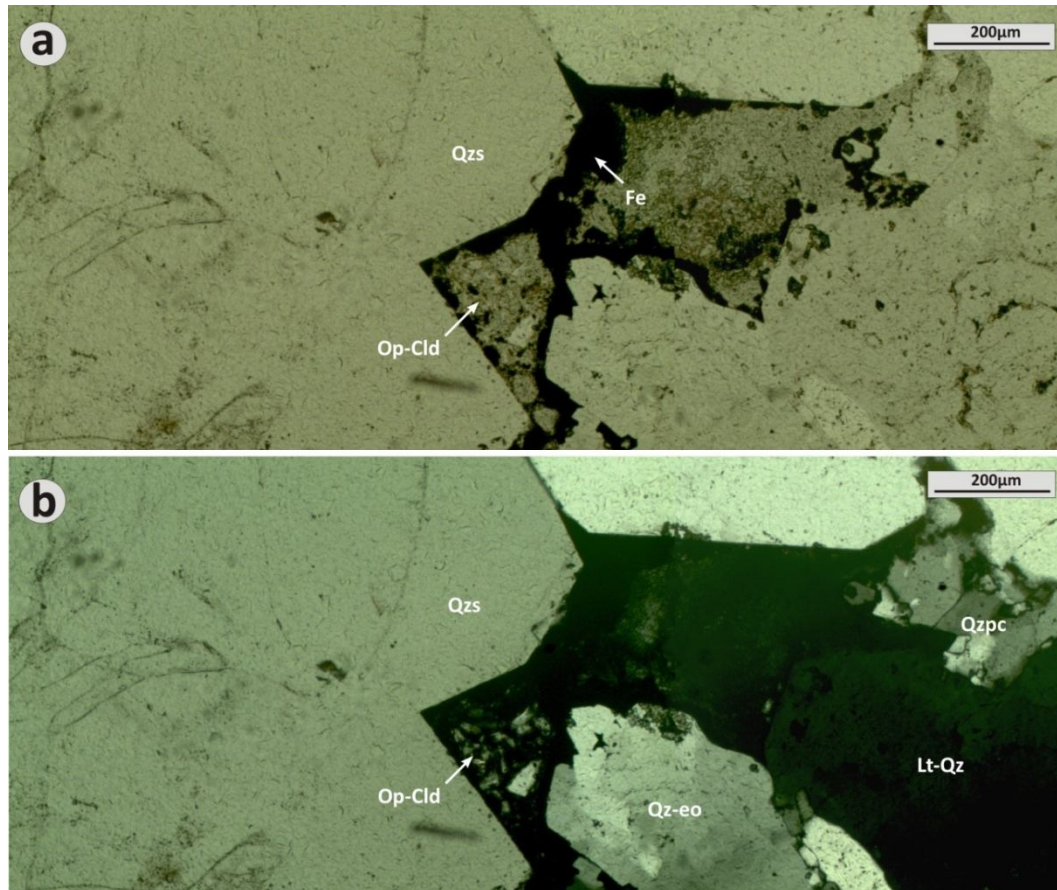
Muestra 0403: Vaque cuarzoso de granulometría muy gruesa (1 mm a 1,8 mm) a gruesa (500  $\mu\text{m}$  a 900  $\mu\text{m}$ ) con matriz de arena media a fina (100  $\mu\text{m}$  - 500  $\mu\text{m}$ ), con cemento ferruginoso y/o silíceo identificado como ópalo-calcedonia y calcedonia-cuarzo. Los clastos de cuarzo mayores son subangulosos a redondeados, los de la matriz arenosa son angulosos y subangulosos, escasos subredondeados, y algunos con crecimiento secundario. También se hallan turmalina, apatita y titanita (Figura 6.36a y b).



**Figura 6.36:** Vaque. **(a)** Con PP y **(b)** con PC. En ambas se observa cuarzo (Qz) subredondeado con extinción normal; líticos cuarzosos redondeados (Lt-Qz), cuarzo con bordes poligonales (Qz-bp); cuarzo con extinción ondulante (QZ-eo); matriz cuarzosa (MQz); cemento ferruginoso (Cto-Fe) y relleno de poros junto a ópalo-calcedonia (Op-Cld) y calcedonia-cuarzo (Cld-Qz).

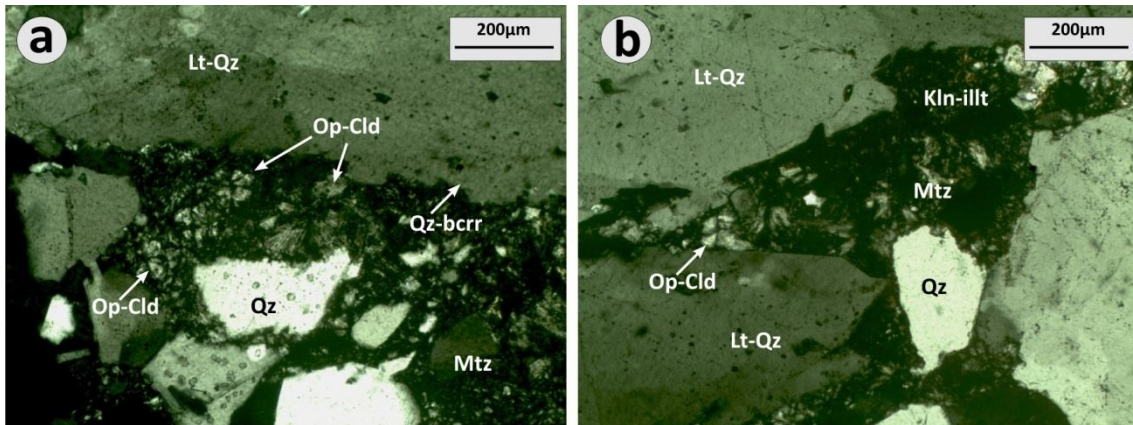
Muestra 0503: Sabulita cuarzosa. Compuesta por clastos mayores de sábulo (4 mm - 2 mm) a arena muy gruesa (2 mm - 1 mm), en algunos sectores con matriz arenosa principalmente de granulometría media a fina (600  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ ). Escasos clastos de cuarzo tamaño grava fina (5 mm - 4,5 mm). Los clastos pertenecen a cuarzo o líticos cuarzosos de origen ígneo y metamórfico, muchos de ellos con crecimiento secundario, desarrollando caras hexagonales o piramidales. En poros y como material cementante se identifican óxidos de hierro y ópalo-calcedonia (Figura 6.37a y b). Algunos granos de cuarzo presentan disolución de sus bordes. En los poros puede haber además material arcilloso, calcita y minerales opacos. En la muestra también se observan zonas de fracturas, rellenas con minerales opacos, calcita y micas.





**Figura 6.37:** Sabulita. **(a)** Con PP y **(b)** con PC. En ambas se observan líticos cuarzosos (Lt-Qz), con crecimiento secundario (Qzs) desarrollando caras hexagonales; cuarzo policristalino (Qzpc); cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo); concentraciones ferruginosas (Fe) y ópalo-calcedonia (Op-Cld) en poros.

Muestra 0603: Es una muestra que grada de conglomerado fino (7-4 mm) a sabulita cuarzosa (4-2 mm), con algo de matriz areno-arcillosa. Los clastos líticos son ígneos y metamórficos (cuarzosos), subangulosos a subredondeados, algunos de los cuales son policristalinos formados por granos poligonales de cuarzo de  $\sim 100 \mu\text{m}$ , o de menor tamaño (60-20  $\mu\text{m}$  o menores). La turmalina y muscovita son escasas, de tamaño arena media a fina. En sectores se desarrolla una matriz de cuarzo anguloso, tamaño arena media a fina (400-150  $\mu\text{m}$ ) y arcillosa (illita-caolinita) con depositación de ópalo y calcedonia en pequeñas esferas fibro-radiadas de contornos irregulares (Figura 6.38a-b). En algunos sectores (esporádicos) se observan poros ocupados por "libros" de caolinita y concentraciones ferruginosas.

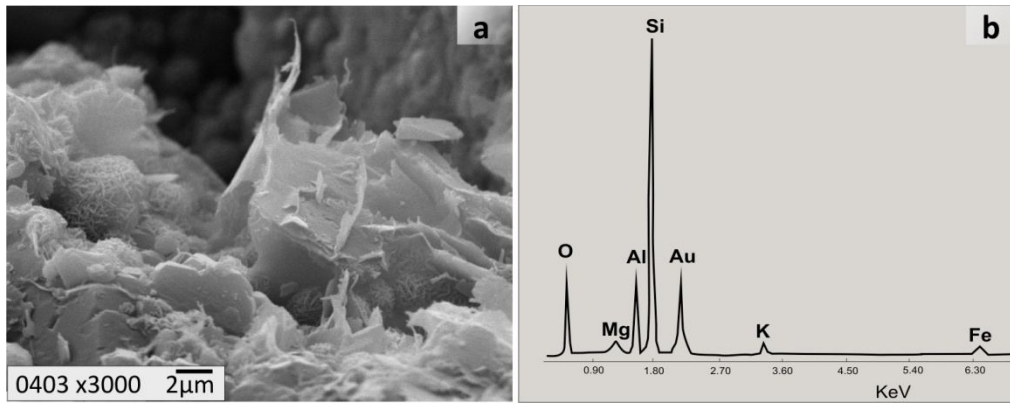


**Figura 6.38:** Sabulita. (a-b) Con PC. Se identifica líticos cuarzosos (Lt-Qz) con bordes corroídos (Qz-bcrr), cuarzo anguloso (Qz) tamaño arena; matriz (Mtz) cuarzo arcillosa (Kln-illt) con ópalo-calcedonia (Op-Cld) de textura fibro-radiada.

### 6.3.1.1.2. MEB-EDS

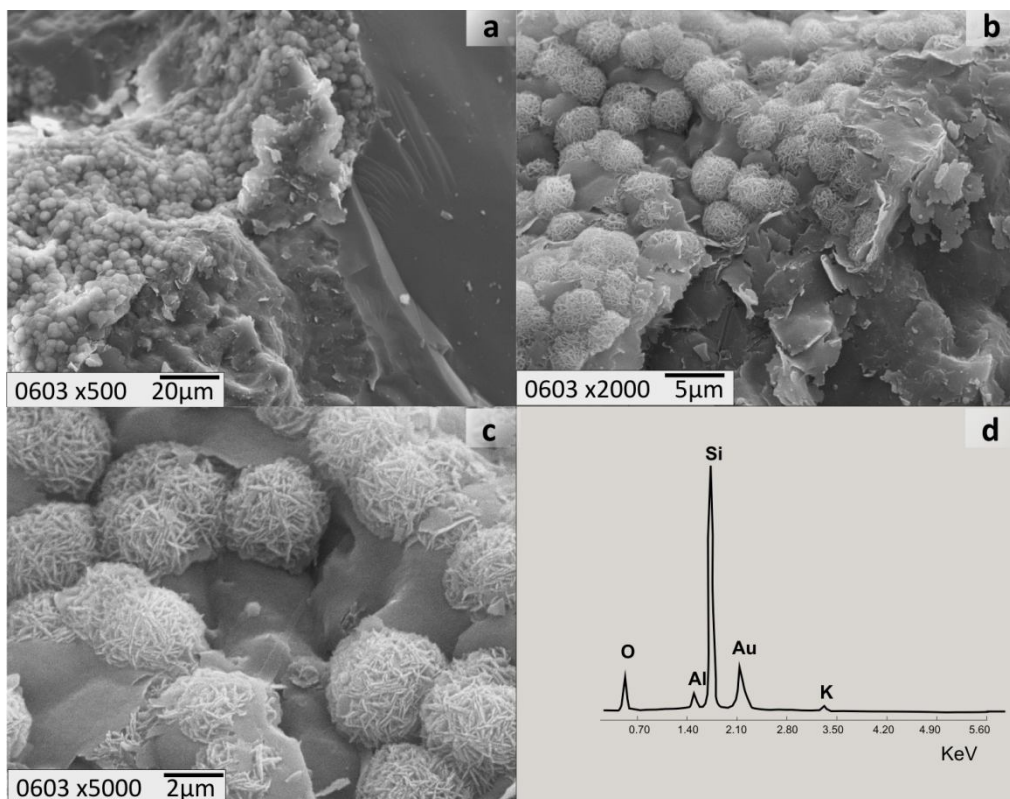
Debido a la variación composicional y proporción de componentes presentes en la matriz y en los poros de las muestras tomadas en el segundo frente de cantera Minera se analizaron estos materiales mediante MEB-EDS con el fin de determinar la presencia de materiales perjudiciales y/o potencialmente reactivos en estos tipos litológicos. Para esto, previamente se seleccionaron dos muestras con lupa binocular, las cuales tienen una relativa abundancia en el perfil relevado:

Muestra 0403: En la Figura 6.39a se observa el material intersticial presente en la roca, el cual corresponde a lepiesferas de ópalo C-T, que intercalan con láminas de arcilla tipo illita. El EDS (Figura 6.39b) muestra la presencia de magnesio (Mg) y potasio (K) asumiendo que se trata de un interestratificado illita-esmectita.



**Figura 6.39:** Muestra (0403) de arenita gruesa. **(a)** Imagen MEB sobre un poro de la cuarcita donde se observan lepiesferas de ópalo C-T e illita. **(b)** Espectro EDS de (a).

Muestra 0603: En la figura 6.40a-c se muestra un detalle de la superficie de un grano de cuarzo con material intersticial identificado como lepiesferas de ópalo C-T, asociado a láminas de arcilla tipo illita. El EDS (Figura 6.40d) fue realizado sobre el área correspondiente a la Figura 6.40c. El pico de potasio (K) y la ausencia de otros elementos confirman la composición illítica de la arcilla.



**Figura 6.40:** Muestra de sabulita (0603). **(a-c)** Imágenes de MEB de la superficie de un intersticio revestido con ópalo C-T e illita y **(d)** EDS de (c).

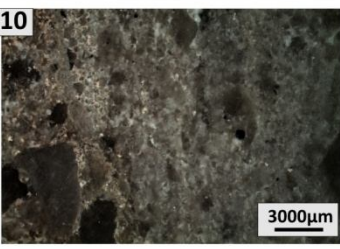
### 6.3.1.1.3. Discusión

Mediante los estudios petrográficos con estereomicroscopio y microscopio óptico se observaron importantes variaciones texturales dentro de un mismo perfil tanto en sentido vertical como lateral a lo largo de los frentes de explotación. Existen diferencias significativas con las muestras del primer frente. Los cambios registrados entre los dos frentes son: variabilidad en el tamaño de grano, coloración, presencia de matriz en distintas proporciones, tipo de cemento y grado de alteración asociada a procesos que tuvieron lugar en sectores localizados. En forma minoritaria, se identificó turmalina, calcita (reconocida en una sola muestra del frente inactivo) y minerales accesorios (titanita, circón). Aunque cabe desatacar que los componentes de la matriz, al ser de granulometría fina y muy fina, no pueden ser determinados con precisión mediante microscopio petrográfico, por lo que se recurrió a MEB-EDS a fin de confirmar su composición e identificar componentes amorfos o de baja cristalinidad. En los intersticios o como parte de la matriz de muestras del frente 2 se hallaron arcillas, óxidos de hierro, ópalo C-T y cuarzo (Figura 6.39 y 6.40).

### 6.3.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)

En el Cuadro 6.4 se describen con estereomicroscopio las muestras de mano tomadas en el frente de cantera estudiado. La granulometría es variable al igual que el contenido de matriz y óxidos de hierro. Además de muestras de mano para petrografía se tomaron bloques del pie de los frentes para la realización de los ensayos de RAS.



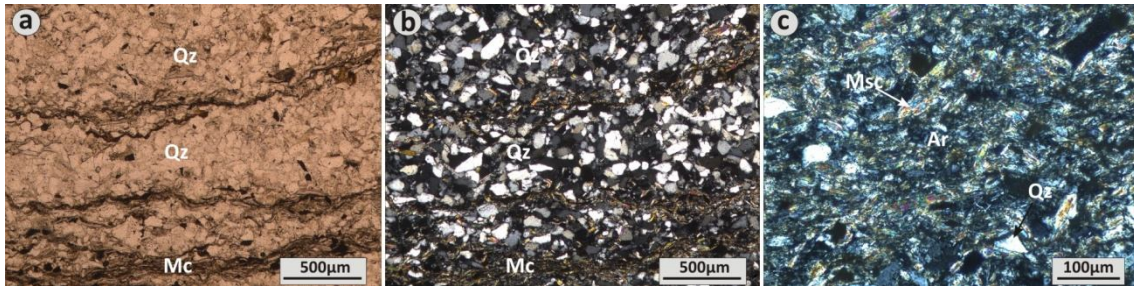
		<p><b>0110</b></p> <p>Fangolita compuesta por intercalaciones de arena muy fina, limo y arcilla que se disponen en lentes de coloración gris oscuro y gris-amarillento.</p>
		<p><b>0210</b></p> <p>Sabulita cuarzosa que grada a conglomerado fino, matriz sostén (arena muy gruesa a media). Clastos mayores de cuarzo angulosos a subangulosos, escasos redondeados. Líticos cuarzosos ígenos y metamórficos. Turmalina esporádica. En sectores aparece matriz arcillosa teñida parcialmente con óxidos de hierro.</p>
		<p><b>0310</b></p> <p>Arenita cuarzosa de granulometría media a fina y coloración blanca-grisácea. El contacto entre los granos de cuarzo es neto; en sectores poros rellenos por material muy fino (arcilloso). Turmalinas y otros accesorios son escasos. La roca es compacta.</p>
		<p><b>0410</b></p> <p>Sub-vaque cuarzoso de granulometría media a fina, de coloración gris-amarillenta a rojiza clara. La roca presenta un cemento y/o matriz muy fina, parcialmente teñida de óxidos. Se identifican pequeños clastos de turmalina.</p>
		<p><b>0510</b></p> <p>Arenita cuarzosa de tamaño de grano arena gruesa a media que grada a muy gruesa y sabulítica, color blanco grisácea. Sectores teñidos con óxidos de hierro. Posee algo de matriz fina, arcillosa. Los granos mayores de cuarzo son subangulosos a subredondeados. Turmalina esporádica.</p>

**Cuadro 6.4:** Izquierda: muestras de mano. Derecha: imágenes tomadas con estereomicroscopio.

Las secciones delgadas de las mismas muestras fueron analizadas y descritas mediante microscopio petrográfico.

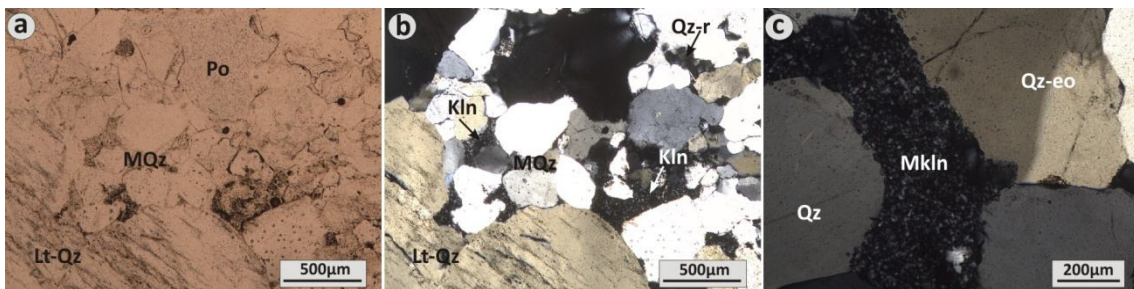
Muestra 0110: Fangolita constituida por una intercalación de capas de cuarzo anguloso tamaño arena muy fina a limo (< a 100  $\mu\text{m}$ ) y capas constituidas por láminas de muscovita detrítica de similar granulometría (Figura 6.41a y b), aunque algunas láminas pueden superar los 100  $\mu\text{m}$  de longitud. Además se observan minerales opacos junto

con biotita alterada, turmalina y circón. Hay sectores más finos de granulometría limo-arcillosa donde se identifican granos de cuarzo anguloso y muscovita (Figura 6.41c).



**Figura 6.41:** Fangolita. (a-b) Capas de cuarzo (Qz) y micas (Mc). En (c) detalle de un sector micáceo de granulometría limo-arcillosa; clastos de cuarzo anguloso (Qz) y muscovita (Msc) en matriz arcillosa (Ar). (a) Con PP; (b) y (c) con PC.

Muestra 0210: Sabulita cuarzosa matriz sostén. Los clastos mayores son de tamaño sábulo (4-2 mm) rodeados por una matriz de arena gruesa (1 mm - 500 µm) a media (500-250 µm), algunos inferiores a 200 µm (Figura 6.42a y b). El cuarzo de mayor tamaño es de origen ígneo-metamórfico. Presenta crecimiento secundario de granos de cuarzo que reducen la porosidad. Son comunes los contactos netos e irregulares. En sectores muy localizados se observa matriz caolinítica o poros con caolinita (Figura 6.42c). También hay turmalina y muscovita esporádicas.

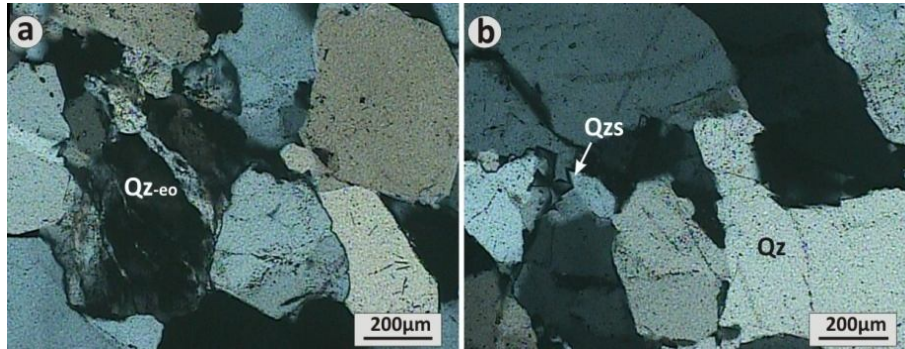


**Figura 6.42:** Sabulita. (a)-(b) Lítico cuarzoso (Lt-Qz); cuarzo con bordes recristalizados (Qz-r); matriz cuarzo arenosa (MQz) y caolinita en poros (Kln). (c) Detalle de un sector con matriz caolinítica (MKln). (a) Con PP; (b) y (c) con PC.

Muestra 0310: Arenita cuarzosa de tamaño de grano medio (500 µm - 250 µm) a grueso (1 mm - 600 µm) (Figura 6.43a y b), en sectores muy grueso (> a 1 mm). El cuarzo es subanguloso, escaso subredondeado y redondeado. Algunos clastos de cuarzo presentan deformación previa, con extinción ondulante en cintas (Figura 6.43a). Los

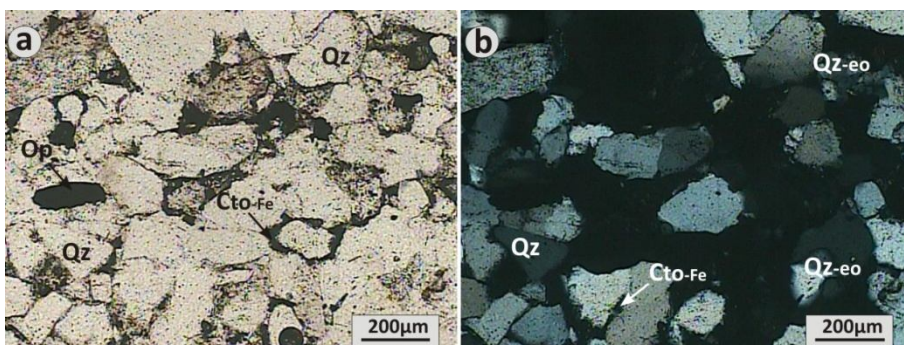


contactos entre granos son netos, rectos o irregulares, algunos poseen crecimiento de cuarzo secundario (Figura 6.43b). También se identifican escasas láminas de muscovita, rutilo y otros accesorios.



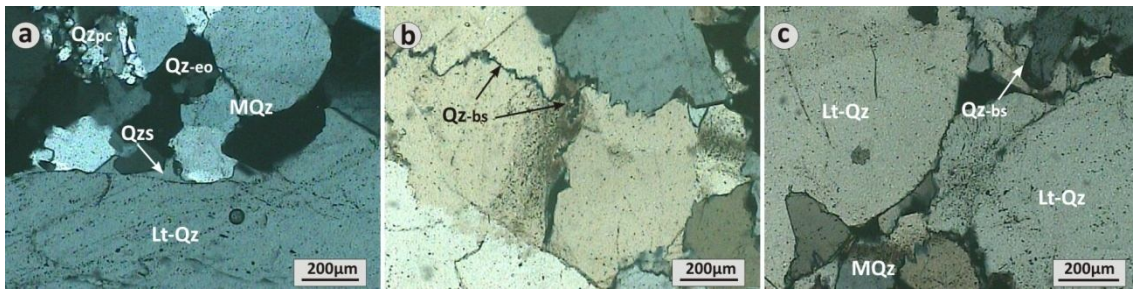
**Figura 6.43:** Arenita. (a-b) Sectores de la roca de granulometría media; (a) cuarzo en contacto neto, algunos con extinción ondulante (Qz-eo); en (b) cuarzo con extinción normal (Qz) y bordes de grano con crecimiento secundario (Qzs). Imágenes tomadas con PC.

Muestra O410: Arenita cuarzosa de grano medio-fino (500 µm - 100 µm), con sectores de arena fina (200 µm - 100 µm). Intersticialmente, puede hallarse caolinita y óxidos e hidróxidos de hierro que actúan en ocasiones como material cementante de los granos de cuarzo (Figura 6.44a y b). Se identifican minerales opacos y escasas láminas de muscovita (hasta 1,2 mm), que se ajustan a los bordes de clastos, algunas con los extremos alterados a illita. También se observan esporádicos clastos angulosos de turmalina y circón.



**Figura 6.44:** Arenita. (a)-(b) Cuarzo anguloso (Qz), minerales opacos (Op); cemento ferruginoso (Cto-Fe); cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo). (a) Con PP y (b) con PC.

Muestra 0510: Sabulita cuarzosa, cuyos clastos mayores varían entre 4 mm-2mm, incluso algunos son de grava fina (< a 5mm) con matriz arenosa de tamaño de grano grueso a medio (1000  $\mu\text{m}$  - 500  $\mu\text{m}$ ) e incluso más finas (200-100  $\mu\text{m}$ ) (Figura 6.45a). Los clastos mayores corresponden a líticos cuarzosos, ígneos o metamórficos, algunos redondeados a subredondeados con crecimiento secundario (Figura 6.45b). Los contactos entre los granos de cuarzo de la matriz arenosa, en general son netos e irregulares. Algunos clastos líticos pertenecen a metamorfitas cuarzosas con contactos entre granos formados por fenómenos de disolución por presión y bordes suturados (Figura 6.45c). También se identifica crecimiento secundario de los granos. Se observan también algunos granos policristalinos de origen metamórfico.



**Figura 6.45:** Sabulita. **(a)** Lítico cuarzoso (Lt-Qz) con crecimiento secundario (Qzs); matriz cuarzosa (MQz); cuarzo policristalino (Qzpc) y con extinción ondulante (Qz-eo). **(b)** Lítico compuesto por cuarzo con bordes suturados (Qz-bs); **(c)** líticos cuarzosos (Lt-Qz) en matriz cuarzosa (MQz) de bordes suturados (Qz-bs). Fotomicrografías tomadas con PC.

### 6.3.1.3. Cantera La Cerámica (ex – Cerámica del Plata)

En la Cuadro 6.5 se muestran las descripciones realizadas con esteromicroscopio de las muestras de mano de esta cantera.

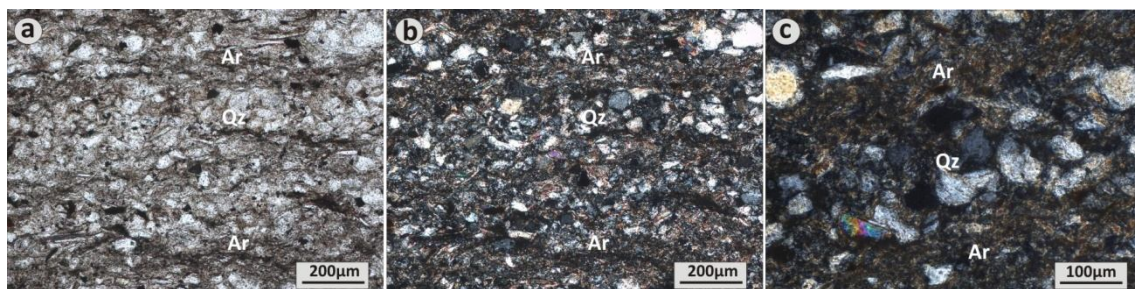
		<p>0710</p> <p>Arcillita gris-amarillenta clara, muy fina, con laminación poco marcada. Sedosa al tacto.</p>
		<p>0810</p> <p>Arenita cuarzosa, de granulometría media, coloración rojiza, sin matriz. Escasos clastos líticos conglomerádicos finos. Los granos de cuarzo se observan en contacto neto. El cemento de la roca es silíceo y/o ferruginoso.</p>
		<p>0910</p> <p>Fangolita ferruginosa, de color ocre, estructura masiva y textura terrosa, fácilmente desgranable. Compuesta por material arcilloso muy fino, cuarzo y óxidos e hidróxidos de hierro.</p>
		<p>1010</p> <p>Arcillita rosada clara, muy fina, sedosa al tacto, masiva, sin laminación aparente, brillo perlado por la presencia de mica blanca.</p>
		<p>1110</p> <p>Arenita cuarzosa de granulometría media a fina, coloración amarillenta rojiza a ocre; pátinas y costras ferruginosas. El cemento es silíceo y ferruginoso.</p>

**Cuadro 6.5:** Izquierda: muestras de mano; derecha: imágenes tomadas con esteromicroscopio.



A continuación se describen con microscopio petrográfico las secciones delgadas de las mismas muestras.

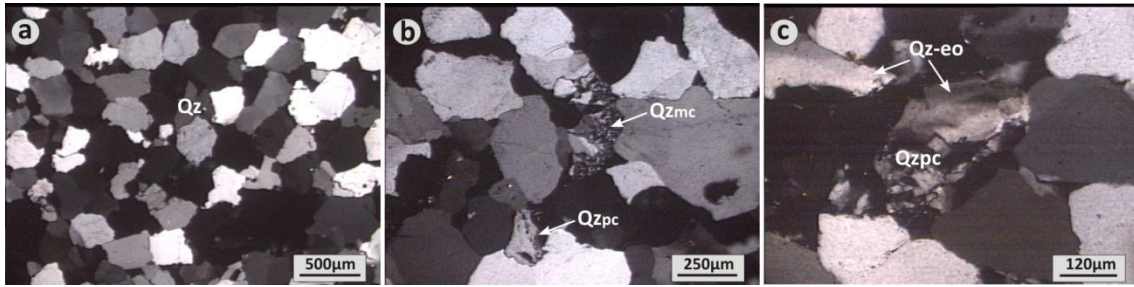
Muestra 0710: Fangolita cuarzo-arcillosa. Presenta una intercalación no muy marcada entre sectores cuarzosos y micáceos y arcillosos (Figura 6.46a y b). El cuarzo es anguloso y presenta un tamaño de grano de arena fina ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) a limo ( $< 60 \mu\text{m}$ ). Los sectores más micáceos corresponden a muscovita detrítica cuyas láminas se orientan entre sí. Además se observan clastos de feldespatos alterados y minerales accesorios como circón. Hay sectores de granulometría más fina, arcillosa (Figura 6.46.c).



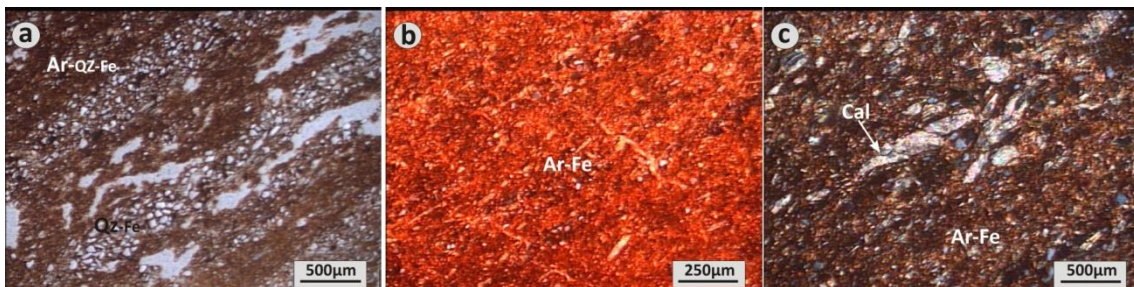
**Figura 6.46:** Fangolita. (a)-(b) Intercalación de bandas micáceas-arcillosas (Ar) y cuarzo (Qz) tamaño arena fina-limo. (c) Detalles del sector cuarzoso (Qz) tamaño limo y sector arcilloso (Ar). (a) Con PP, (b) y (c) con PC.

Muestra 0810: Arenita cuarzosa de granulometría arena media ( $500\text{-}200 \mu\text{m}$ ). El cuarzo es subanguloso y subredondeado (Figura 6.47a) que en general presenta extinción normal a suavemente ondulante. Además se identifican líticos metamórficos policristalinos (Figura 6.47b y c). Los bordes de los granos de cuarzo poseen pátinas color castaño rojizo; los poros son de pequeño tamaño y se encuentran vacíos o en ocasiones rellenos por caolinita y/o muscovita (esporádica).

Muestra 0910: Fangolita ferruginosa compuesta por sectores cuarzosos de tamaño limo ( $< 60 \mu\text{m}$ ) (Figura 6.48a). Cuarzo anguloso y muscovita se hallan en una matriz arcillosa-ferruginosa de color castaño rojizo intenso (Figura 6.48b). En sectores hay reemplazo de la matriz arcillosa por carbonatos incluso también en reemplazo pseudomórfico de micas por calcita (Figura 6.48c).



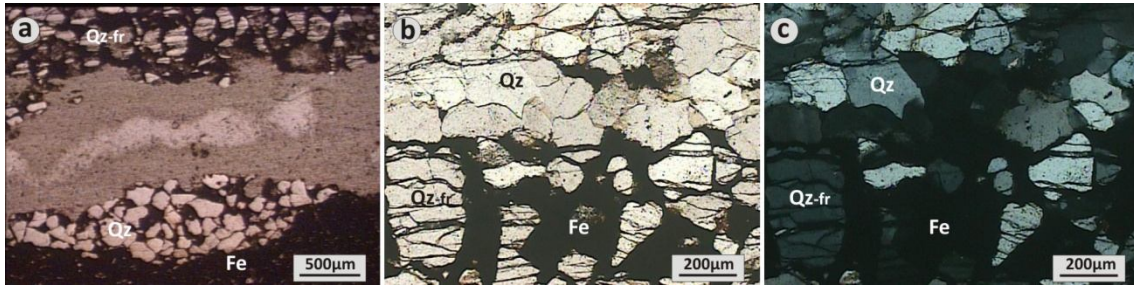
**Figura 6.47:** Arenita cuarzosa. **(a)** Clastos de cuarzo (Qz) que conforman un mosaico de granulometría homogénea. **(b)** Granos de cuarzo microcristalino (Qzmc) y policristalino (Qzpc) y **(c)** clastos de cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo) y policristalino (Qzpc). Imágenes tomadas con PC.



**Figura 6.48:** Fangolita. **(a)** sector limoso (Qz-Fe) y arcilloso (Ar-Qz-Fe) y de cuarzo (Qz) tamaño arena fina-limo. **(b)** Arcilla ferruginosa (Ar-Fe). **(c)** Arcilla ferruginosa (Ar-Fe); micas reemplazadas por calcita (Cal). (a)-(b) Con PP, y (c) con PC.

Muestra 1110: Arenita cuarzosa invadida parcialmente por óxidos de hierro. El tamaño de grano es arena media a fina (300-100  $\mu\text{m}$ ). En sectores de la arenita los clastos de cuarzo poseen una pátina color pardo amarillento a rojizo, y en otras áreas está conformada por cuarzo de bordes poligonales con crecimiento secundario. Las zonas donde el cuarzo se halla fracturado han sido invadidas por óxidos de hierro color pardo rojizo oscuro. Las fracturas son paralelas entre sí y están rellenas por este mismo material (Figura 6.49a-c). Un sector de la muestra está compuesto totalmente por un matriz ferruginosa castaño oscura a rojiza que envuelve a los granos de cuarzo y pequeñas micas tamaño limo (Figura 6.49a). En otras partes se observan parches de una matriz o pseudomatriz cuarzo-micácea-arcillosa constituida por clastos de muscovita (láminas de hasta 500  $\mu\text{m}$ ) y/o sectores caoliníticos.





**Figura 6.49:** Arenita ferruginosa. **(a)** Imagen donde se visualizan los tres sectores descriptos: ferruginoso puro (Fe), de cuarzo (Qz) con matriz ferruginosa y sector de granos de cuarzo fracturado invadidos (Qz-fr) por óxidos de hierro. **(b)-(c)** Detalle del sector afectado por óxidos de hierro; cuarzo (Qz), cuarzo fracturado (Qz-fr) invadido por óxidos. (a-b) Con PP, y (c) con PC.

### 6.3.1.4. Cantera Pétre

De esta cantera se tomaron muestras de mano y bloques del pie de los frentes. Las muestras de roca resultaron muy similares a las de la cantera La Florida. En el Cuadro 6.6 se describen mediante esteromicroscopio dos muestras representativas de un nivel de cuarcita de granulometría gruesa y de arcillita.

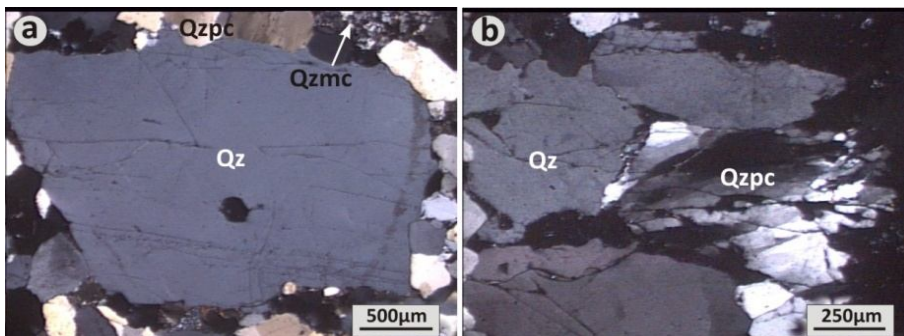
		<p><b>1210</b></p> <p>Vaque cuarzoso de granulometría muy gruesa a gruesa con matriz muy fina, blanquecina. Se observan clastos de líticos cuarzosos, sabulíticos. En sectores posee cemento silíceo.</p>
		<p><b>1310</b></p> <p>Arcillita masiva o de laminación poco marcada, coloración gris verdosa a gris amarillenta clara. Se identifican pequeñas y abundantes láminas de mica blanca.</p>

**Cuadro 6.6:** Izquierda: muestras de mano; derecha: imágenes tomadas con esteromicroscopio.

La descripción de las muestras con microscopio petrográfico se detalla a continuación.

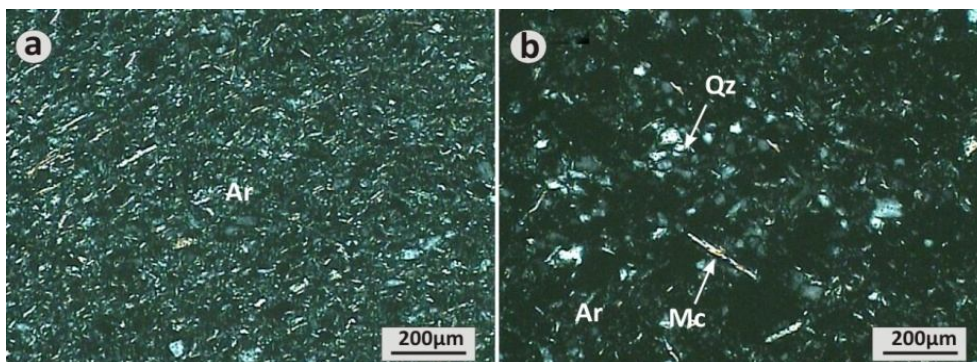
Muestra 1210: Vaque cuarzoso. El cuarzo de mayor tamaño es grava fina (6-4 mm) y sábulo (4-2 mm), subanguloso, escasos clastos subredondeados. Son abundantes los

líticos metamórficos (milonitas y migmatitas). La matriz es de granulometría arena gruesa a media de 1 mm a 250  $\mu\text{m}$  (Figura 6.50a). En algunos sectores se identifica abundante matriz caolinítica. También se observan láminas de muscovita detritica levemente alteradas en los bordes. Son escasos los clastos de cuarzo policristalino de grano fino y microcristalino. En algunos sectores el cuarzo desarrolla bordes poligonales formados por crecimiento secundario. Los granos mayores se hallan también fracturados (Figura 6.50b).



**Figura 6.50:** (a) Cuarzo (Qz) tamaño sábulo, rodeado por un matriz arenosa más fina; cuarzo policristalino (Qzpc) y microcristalino (Qzmc). (b) Cuarzo de extinción normal (Qz) y policristalino (Qzpc), fracturado. Fotomicrografías tomadas con PC.

Muestra 1310: Arcillita compuesta por un sectores muy finos cuarzo-caoliníticos (Figura 6.51a) y por sectores tamaño limo mas cuarzosos (Figura 6.51b) y pequeñas láminas de muscovita-illita de hasta 200  $\mu\text{m}$  de longitud. Los granos de cuarzo de mayor alcanzan los 100  $\mu\text{m}$ . También se observan granos de circón y apatita (<30  $\mu\text{m}$ ).



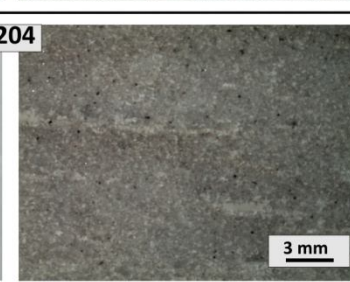

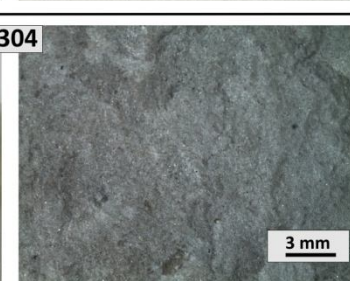

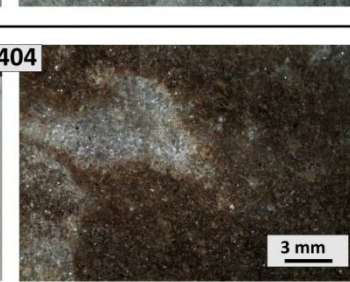



**Figura 6.51:** (a) Sector de la matriz arcillosa (Ar). (b) Sector cuarzoso, con granos de cuarzo angulosos (Qz) y láminas de mica (Mc). Fotomicrografías tomadas con PC.



6.3.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos

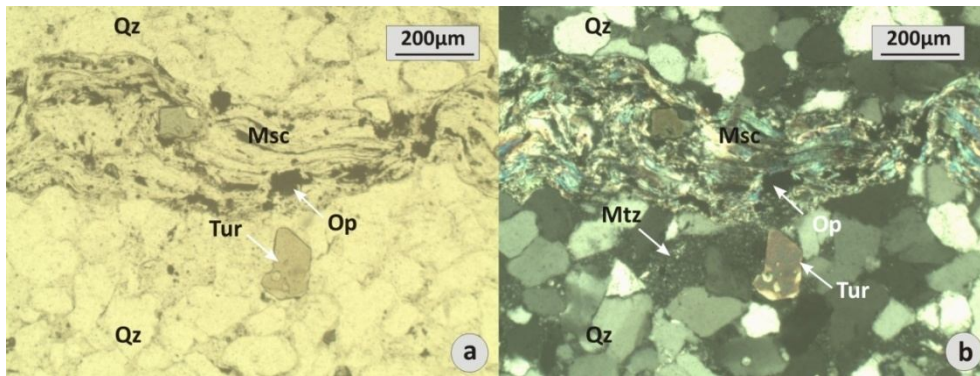
En el Cuadro 6.7 se describen con esteromicroscopio las muestras colectadas en el frente de cantera. Se trata de arenitas cuarzosas de grano medio a fino, y en menor proporción vaques cuarzo-micáceos y arcillitas.

		<p><b>0104</b></p> <p>Vaque cuarzo-micáceo, gris verdoso claro de granulometría arena fina a muy fina. Las láminas de micas se concentran formando finos niveles que intercalan con otros más arenosos.</p> <p>3 mm</p>
		<p><b>0204</b></p> <p>Arenita cuarzosa, gris clara, tamaño arena fina con lentes o láminas arcillosas de escasos milímetros e intraclastos pelíticos y cuarcíticos. También se identifican granos de turmalina.</p> <p>3 mm</p>
		<p><b>0304</b></p> <p>Arcillita de color gris verdoso claro, sedosa al tacto. Laminación poco marcada, con superficie de rotura irregular.</p> <p>3 mm</p>
		<p><b>0404</b></p> <p>Arenita cuarzosa de grano medio a fino, color blanca grisácea, parcialmente teñida por óxidos de hierro (amarillo-naranja). Los granos de cuarzo son angulosos a subangulosos, de contactos netos, en sectores se observa una matriz muy fina, arcillosa.</p> <p>3 mm</p>
		<p><b>0504</b></p> <p>Arenita cuarzosa de tamaño de grano fino, blanca grisácea, con una suave laminación marcada por sectores teñidos por óxidos de hierro. Los granos de cuarzo son angulosos-subangulosos a subredondeados. Se observa material fino arcilloso en los intersticios.</p> <p>3 mm</p>

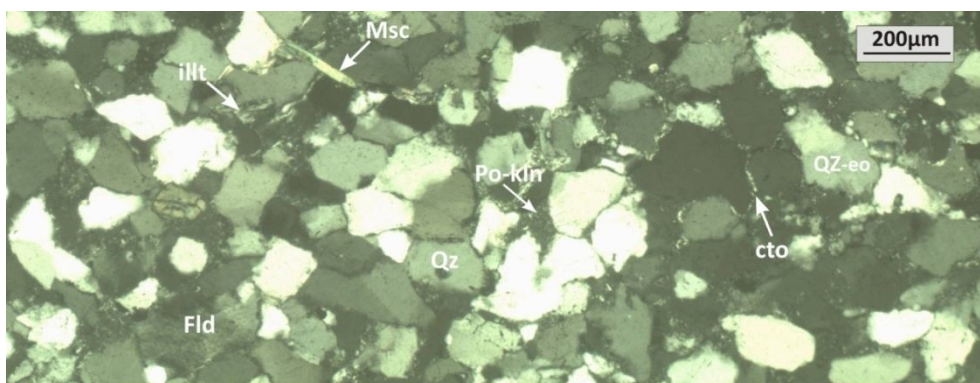
Cuadro 6.7: Izquierda: muestras de mano; derecha: imágenes tomadas con esteromicroscopio.

Las observaciones con microscopio petrográfico se detallan a continuación.

Muestra 0104: Vaque cuarzo-micáceo de granulometría arena fina a muy fina (200-65  $\mu\text{m}$ ), cuarzo subanguloso a subredondeado, escasos redondeados; además se identifican esporádicos clastos de feldespatos alterados a arcilla, principalmente a caolinita e illita constituyendo una matriz (o pseudo-matriz) arcillosa en los intersticios. Se observan muscovitas que se concentran formando capas de hasta 300  $\mu\text{m}$  de espesor, y la longitud de las láminas varía entre 200-400  $\mu\text{m}$ . Además se identifican, granos de turmalina, minerales opacos y epidoto (Figura 6.52a y b). En el sector cuarcítico, el cuarzo esta cementado por sílice, mica e incluso arcillas o por crecimiento secundario de cuarzo (Figura 6.53a y b).

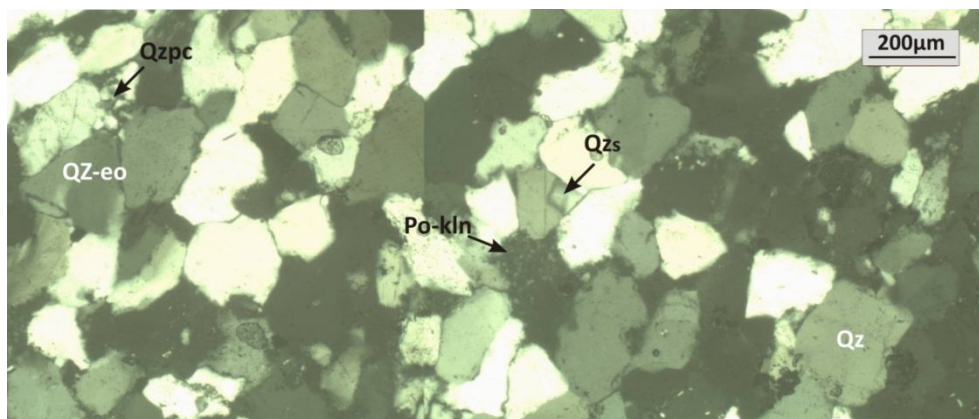


**Figura 6.52:** Vaque; sector cuarzo-micáceo. (a-b) Se destacan granos de cuarzo (Qz), muscovita (Msc), turmalina (Tur), minerales opacos (Op) y matriz (Mtz) caolinítica. (a) Con PP y (b) con PC.



**Figura 6.53:** Vaque; sector cuarzoso. Granos de cuarzo (Qz) con cemento (Cto) silíceo, micáceo o arcilloso; cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo), poros con caolinita (Po-klr) y feldespatos (Fld), en algunos sectores alterados a illita (illt). Fotomicrografía tomada con PC.

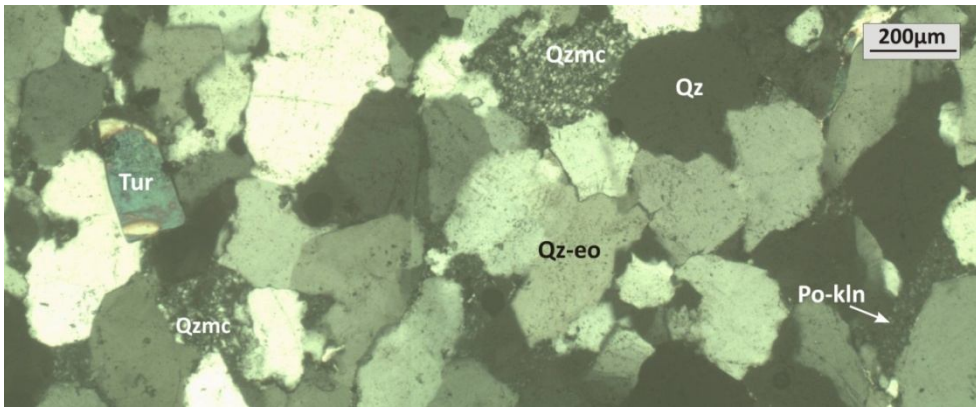
Muestra 0204: Arenita cuarzosa, de granulometría arena media fina a fina (300-100  $\mu\text{m}$ ). El cuarzo es anguloso a subanguloso, en algunos casos con bordes poligonales y crecimiento secundario. Se identifica muscovita detrítica en láminas pequeñas (hasta 200  $\mu\text{m}$ ) algunas de las cuales están alteradas a illita en sus extremos, también se observan poros rellenos con caolinita. Otros minerales presentes son granos de turmalina y circón de manera esporádica (Figura 6.54).



**Figura 6.54:** Arenita. Se destacan, clastos de cuarzo con extinción normal (Qz), algunos con crecimiento secundario (Qzs), cuarzo policristalino (Qzpc), cuarzo con extinción ondulante (Qz-eo) y poros rellenos con caolinita (Po-kln). Fotomicrografía tomada con PC.

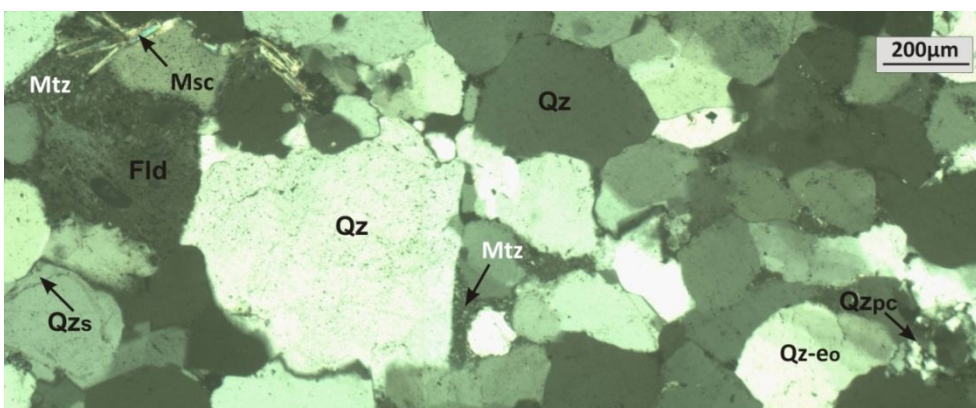
Muestra 0404: Arenita cuarzosa de granulometría media (350-200  $\mu\text{m}$ ). El cuarzo es anguloso a subanguloso, escasos subredondeados y redondeados. Se pueden observar contactos netos (irregulares a rectos o poligonales), en algunos casos difusos, conformando sectores de textura muy compacta, sin poros. En otras zonas se observan poros con caolinita producto de la alteración de feldespatos. También es común la presencia de turmalina, muscovita, titanita y circón. En algunos sectores los minerales opacos se disponen según los bordes de los clastos de cuarzo, donde también se hace presente muscovita y arcillas. Son escasos los granos de cuarzo microcristalino aunque la mayoría de ellos poseen extinción ondulante con un ángulo mayor a 25° (Figura 6.55).





**Figura 6.55:** Arenita. Cuarzo con extinción normal (Qz) y ondulante (Qz-eo), clastos de cuarzo microcristalino (Qzmc), turmalina (Tur) y poros con caolinita (Po-Kln). Fotomicrografía tomada con PC.

Muestra 0504: Arenita cuarzosa de granulometría media a fina (350-150  $\mu\text{m}$ ) con escasos clastos de arena gruesa (> a 500  $\mu\text{m}$ ). Posee algo más de matriz que las anteriores, compuesta por caolinita, caolinita-illita y clorita en menor proporción. En sectores, los granos de cuarzo presentan bordes rectos, con poligonización y/o con evidencias de crecimiento secundario. También se observa turmalina de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  y muscovita de varios cientos de micrones de largo con bordes flexurados y alterados a illita, además de feldespato alcalino parcialmente alterados a arcillas y minerales opacos distribuidos en toda la muestra (Figura 6.56).



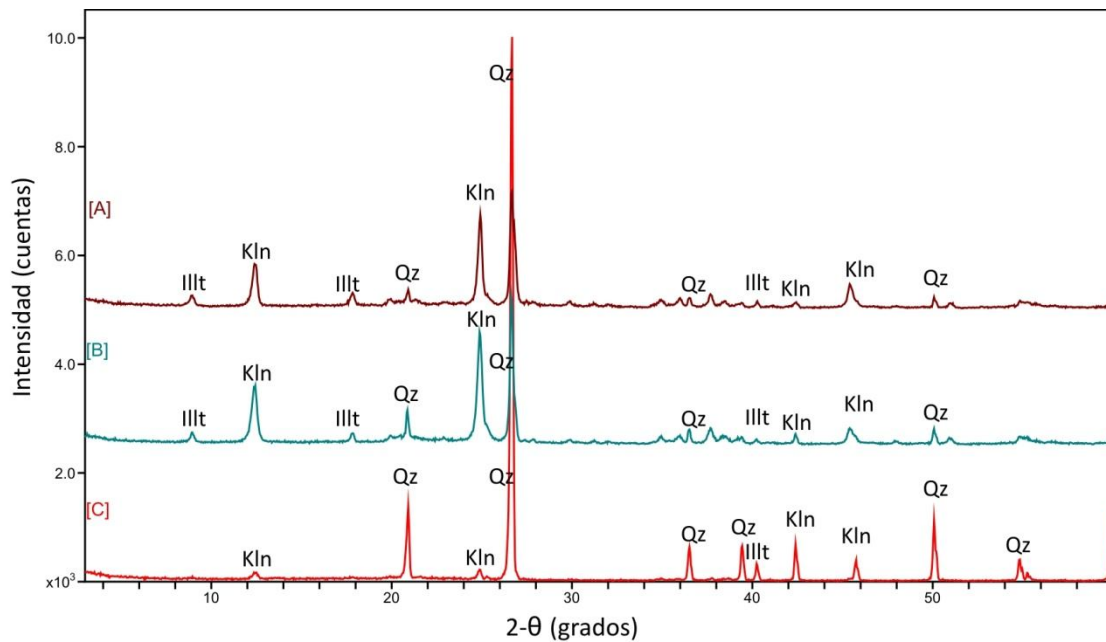
**Figura 6.56:** Arenita. Cuarzo de extinción normal (Qz), con crecimiento secundario (Qzs), extinción ondulante (Qz-eo) y policristalino (Qzpc); feldespato alcalino (Fld) alterado, muscovita (Msc) illitizada y matriz (Mtz). Fotomicrografía tomada con PC.

#### 6.4. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Se realizaron estudios por difracción de rayos X sobre muestras de los niveles arcillosos de todas las canteras estudiadas y del pasante tamiz 100 (150  $\mu\text{m}$ ) producto del tamizado de las cuarcitas trituradas y procesadas de cada cantera. Estos estudios se realizaron con el fin de determinar si existen sustancias perjudiciales en el hormigón (arcillas esmectíticas, sulfatos, entre otras) dentro de la roca o en los finos (< 150  $\mu\text{m}$ ).

Se analizaron las muestras de arcillitas (o fangolitas) de las canteras Minera, La Florida, Pétreo y La Cerámica del área de Batán y Los Pinos de la zona de Balcarce. También se estudiaron mediante DRX los finos de trituración (pasante tamiz 100) de las tres primeras canteras citadas, comparando los materiales en un gráfico integrado (Figura 6.57, 6.58 y 6.59). De cantera La Cerámica (Batán) y de cantera Los Pinos (Balcarce), sólo se muestran los difractogramas de las muestras de arcillas tomadas en los frentes estudiados (Figura 6.60 y 6.61).

Cantera Minera: Las muestras de arcillas y del pasante tamiz 100, tienen una composición similar, aunque el fino de trituración posee un mayor contenido relativo de cuarzo (Figura 6.57).

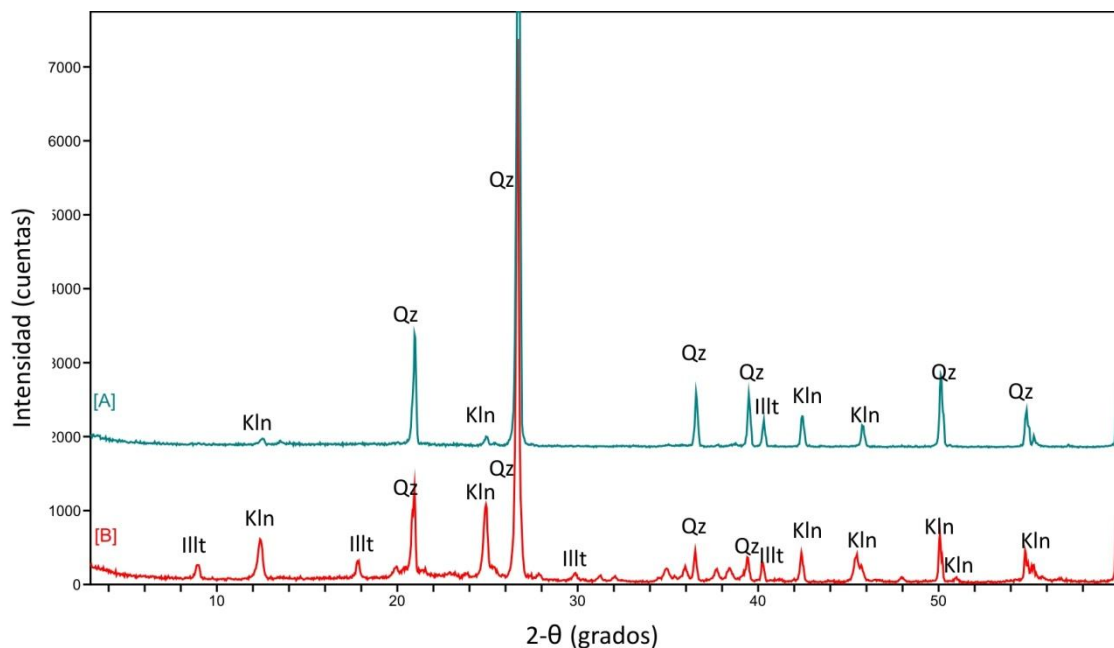


**Figura 6.57:** Difractogramas de dos muestras de arcillita [A] y [B] y del material cuarcítico pasante T 100 [C]. En todas las muestras se detecta cuarzo-caolinita-illita, siendo menor la proporción de arcilla en fino de trituración.

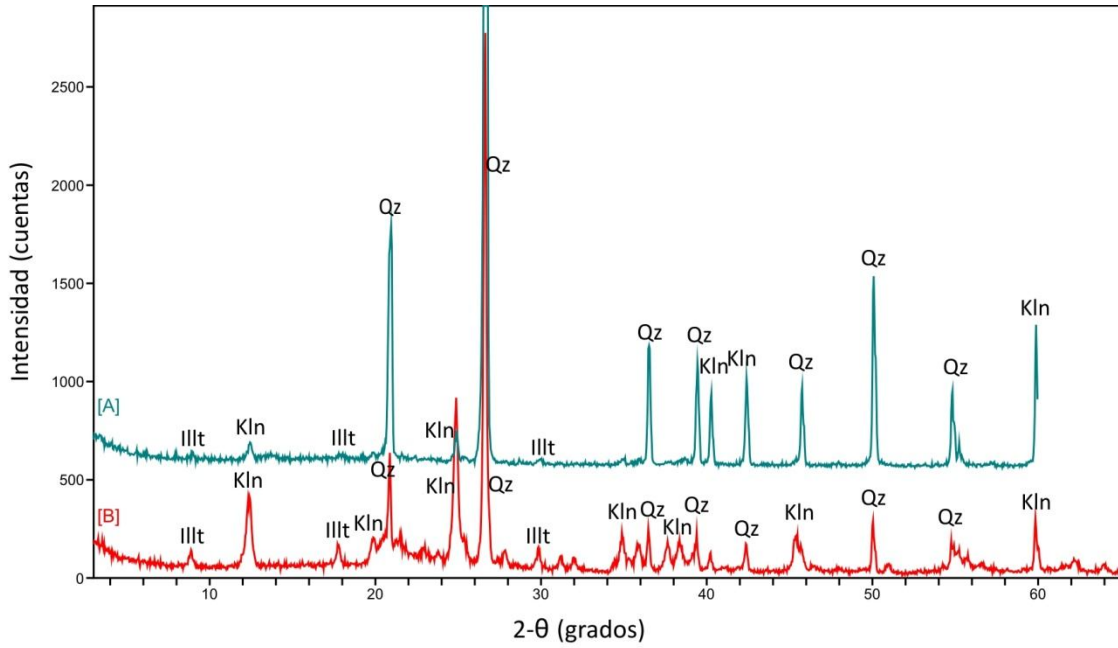


Cantera La Florida: La muestra analizada corresponde a una fangolita debido a su contenido relativamente alto de cuarzo tamaño limo. La misma se compara con el fino de trituración (pasante tamiz 100) siendo cuarzo y caolinita los constituyentes principales (Figura 6.58).

Cantera Pétreá: La muestra analizada corresponde a una arcillita compuesta por caolinita-cuarzo y muy baja proporción de illita. La muestra del fino de trituración pasa tamiz 100 tiene composición similar, aunque con un contenido de cuarzo más elevado (Figura 6.59).

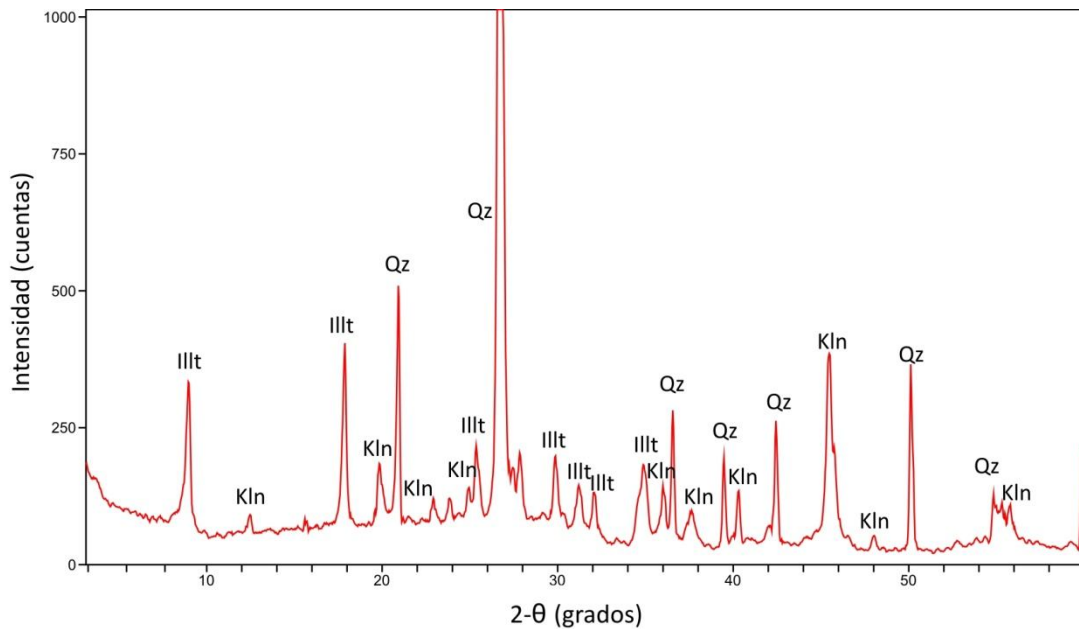


**Figura 6.58:** Difractogramas del fino de trituración pasa tamiz 100 ( $< 150 \mu\text{m}$ ) [A] y de una muestra de fangolita [B] de cantera La Florida. La composición es de cuarzo-caolinita-illita, siendo la proporción de illita-caolinita mayor en la muestra [B].



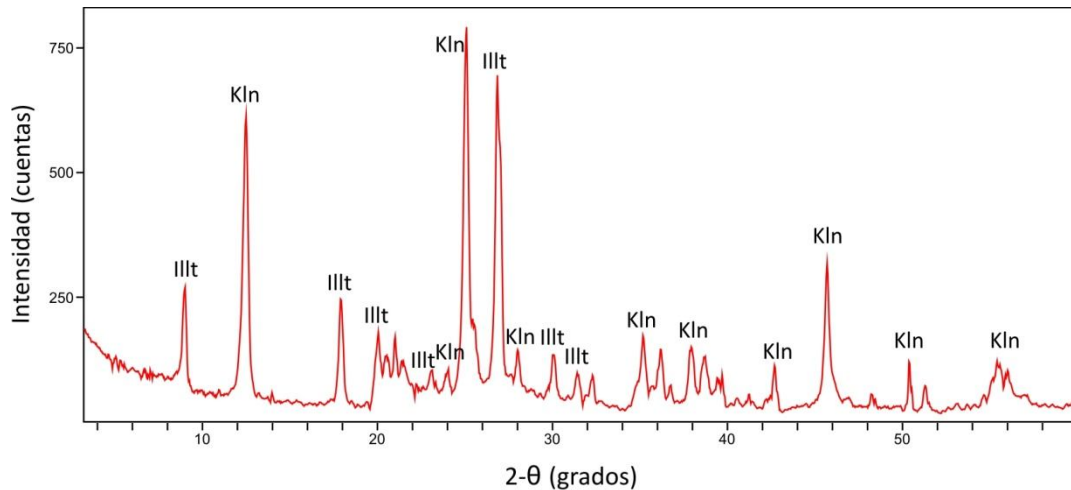
**Figura 6.59:** Difractogramas del fino de trituración < 150  $\mu\text{m}$  [A] y de una muestra de arcillita [B] de cantera Pétrea. La composición es cuarzo-caolinita-illita, aunque en el fino la illita es muy escasa.

Cantera La Cerámica: de esta cantera sólo se analiza una muestra de arcillita, destacándose caolinita e illita además de cuarzo (Figura 6.60).



**Figura 6.60:** Difractograma de muestra de arcillita de cantera La Cerámica. La composición es caolinita-illita-cuarzo.

Cantera Los Pinos (Balcarce): La arcillita muestreada en esta cantera está compuesta únicamente por caolinita-illita (Figura 6.61), no se identificó cuarzo. Esta es una diferencia sustancial con las muestras de las canteras de Batán-Chapadmalal.



**Figura 6.61:** Difractograma de cantera Los Pinos, de la localidad de Balcarce. La composición es caolinita e illita.

## 6.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las variaciones texturales son notorias entre una cantera y otra e incluso dentro de una misma cantera. Del relevamiento de las canteras del área de Batán-Estación Chapadmalal se puede decir que existen diferencias en lo que respecta a coloración y diaclasamiento de los estratos, porcentaje y composición de matriz de las arenitas, presencia y espesor de los niveles arcillosos, etc. Esto es importante ya que algunas de estas variantes pueden influir en el grado de reactividad de estas rocas, es decir en su comportamiento frente a la RAS.

Como se discutió en el inciso 6.3.1.1.3., existen diferencias significativas entre áreas dentro de cantera Minera, donde se evidenciaron cambios laterales importantes en la coloración, abundancia de diaclasas afectando los frentes, así como también a nivel textural y mineralógico, registrándose en el frente 2 mayor abundancia de arenitas con elevado porcentaje de matriz y vaques (hasta un 20%). Las texturas de las arenitas en este último frente son más gruesas (arenitas media a gruesas y sabulíticas) y la matriz está compuesta por arcillas, cuarzo micro y criptocristalino y por ópalo C-T, todos ellos

identificados tanto con microscopio petrográfico como mediante MEB-EDS. Es de destacar que con esta última técnica también se hallaron fases minerales como óxidos de hierro, calcita y fosfatos. La presencia de ópalo C-T hace que se califique a las rocas de este frente como potencialmente reactivas frente a la RAS, y respecto de la cinética de la reacción como agregados de reacción rápida, a diferencia de las muestras relevadas en el frente 1 y de los acopios las cuales son calificadas como agregados de reacción lenta por poseer cuarzo fuertemente tensionado y microcristalino.

Respecto de las arenitas de La Florida se puede decir que los estratos son de hasta 3 m y de coloración más clara y más homogéneos que los de Minera, poseen además menor contenido de óxidos de hierro, texturas más finas, presentando granulometrías de arena media y con bajo contenido de matriz. Bajo microscopio petrográfico las mismas califican como agregados de reacción lenta debido a la presencia de cuarzo microcristalino en los intersticios de la roca y a clastos de cuarzo fuertemente tensionado. Los niveles arcillosos en esta cantera están prácticamente ausentes.

De cantera Pétreá se puede decir que el espesor de los estratos es muy variable (0,5-3 m) y que en algunos sectores los frentes se observan muy diaclasados y fallados. Intercalando con los bancos de cuarcitas se observan lentes arcillosos de poco espesor (< 0,5 m). La coloración de las arenitas es blanco grisácea a blanca a blanco amarillenta y las texturas son de arena media pero con contenido de matriz variable. Al igual que La Florida estas rocas califican mediante las técnicas aplicadas en este capítulo como agregados de reacción lenta.

Respecto de las arenitas de cantera La Cerámica, la presencia de abundante óxidos e hidróxidos de hierro, los cuales forman parte de la matriz y el cemento de estas rocas hace que no hayan sido evaluadas como agregados para hormigón. Similarmente a las demás canteras, están compuestas por granos de cuarzo anguloso y subanguloso, identificándose granos con extinción ondulante, clastos de cuarzo microcristalino y fuertemente tensionado. Aquí se destacan las mayores potencias de los niveles arcillosos, de hasta 1 m y la presencia de costras ferruginosas en el contacto de las arenitas con los lentes de arcilla, los cuales están compuestos por caolinita-cuarzo-illita y también pueden contener oxi-hidróxidos de hierro.

Las rocas estudiadas en el área de Balcarce son granulométrica y composicionalmente más homogéneas que las del área de Batán-Estación Chapadmalal.

Puntalmente en la cantera Los Pinos, las arenitas poseen un tamaño de grano fino a medio y el contenido de óxidos de hierro es menor, también son menos abundantes las intercalaciones con niveles arcillosos que en la zona de Batán donde es variable para cada cantera.

El análisis petrográfico presentado en este capítulo es enteramente cualitativo. Los valores porcentuales de cada componente reactivo son presentados en el siguiente capítulo, calificando normativamente a los agregados.

## **CAPÍTULO 7. RESULTADOS: MÉTODO PETROGRÁFICO Y ENSAYOS FÍSICOS**

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

### **7.2. CALIFICACIÓN DE LA CUARCITA MAR DEL PLATA MEDIANTE PETROGRAFÍA**

#### **7.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

##### **7.2.1.1. Cantera Minera Yaraví**

##### **7.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)**

##### **7.2.1.3. Cantera Pétreo**

#### **7.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos**

### **7.3. DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE EXTINCIÓN ONDULANTE (AEO)**

#### **7.3.1. Introducción**

#### **7.3.2. Medición del AEO**

#### **7.3.3. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

##### **7.3.3.1. Cantera Minera Yaraví**

##### **7.3.3.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)**

##### **7.3.3.3. Cantera Pétreo**

#### **7.3.4. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos**

### **7.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS FÍSICOS**

#### **7.4.1. Ensayos físicos de RAS. Norma IRAM 1674 e IRAM 1700**

##### **7.4.1.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

###### **7.4.1.1.1. Cantera Minera Yaraví**

###### **7.4.1.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)**

###### **7.4.1.1.3. Cantera Pétreo**

##### **7.4.1.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos**

#### **7.4.2. Ensayos físicos de desgaste, densidad y absorción. Norma IRAM 1532 e IRAM 1533**

### **7.5. DISCUSIÓN**



## 7.1. INTRODUCCIÓN

Para la clasificación de los agregados en cuanto a su reactividad frente a la RAS, se procedió a la toma de muestras representativas de bloques de más de 0,5 kg en los frentes de explotación y de los acopios de granulometría 6 mm - 20 mm listas para su comercialización (en las canteras productivas). Estas últimas tienen la ventaja de ser representativas de los frentes de explotación.

Las muestras tomadas tanto de los frentes de cantera como de los materiales acopiados fueron trituradas y tamizadas en laboratorio en fracciones granulométricas de agregado grueso para ser estudiadas desde el punto de vista de la RAS y calificadas según la norma IRAM 1531 (2016) para agregado grueso. Se procedió al cuarteo de cada fracción, y sobre esta muestra reducida se contaron 500 partículas. Los porcentajes obtenidos fueron ponderados por el peso de cada fracción obteniendo un porcentaje en peso de los constituyentes. Este procedimiento se realizó utilizando esteromicroscopio, según lo especificado en el Anexo A de la norma 1649 (capítulo 5, inciso 5.2.1). Luego, de acuerdo a lo establecido en la norma IRAM 1531 (2016), se determinaron los componentes deletéreos y los porcentajes de cada litotipo identificado mediante microscopio petrográfico y por el método de conteo de puntos (capítulo 5, inciso 5.2.2). Además de los estudios especificados por esta norma se determinó el tamaño y el ángulo de extinción ondulante (AEO) de los granos de cuarzo, estimando el grado de deformación. Existen varios métodos para la determinación de los mismos (Andersen y Thaulow 1989; Ramos *et al.* 2016).

Por último las mismas muestras fueron trituradas, tamizadas en fracciones granulométricas, lavadas y secadas en estufa para la realización de los ensayos físicos. Para el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1647, 1997) se requiere el material del pasante tamiz 4,75 mm y para el método del prisma de hormigón la fracción granulométrica gruesa (retenida en el tamiz 4,75 mm), aunque en ambos casos los ensayos se orientan al estudio del material como agregado grueso.

## 7.2. CALIFICACIÓN DE LA CUARCITA MAR DEL PLATA MEDIANTE PETROGRAFÍA

A partir del análisis petrográfico, IRAM 1649 (2008), se determinaron los porcentajes de componentes potencialmente reactivos especificados por la norma IRAM 1531 (2016) de agregado grueso para hormigón, tanto en las muestras tomadas de material al pie de los frentes de cantera (activos o inactivos) como de las muestras de granulometría 6 mm-20mm. Estas últimas corresponden a agregados de trituración por lo que para su análisis se aplica lo especificado en la norma IRAM 1649, inciso 10.1, mientras que las muestras tomadas de material acopiado en los frentes fueron estudiadas como se indica para frentes de explotación (IRAM 1649, inciso 9), y similar al que se realiza para testigos de roca (IRAM 1649, inciso 8) de frentes o afloramientos poco estudiados. Todas las muestras fueron procesadas en laboratorio, siendo trituradas y tamizadas en fracciones granulométricas para su análisis y clasificación petrográfica a fin de terminar la presencia y proporción de componentes potencialmente reactivos en cada una de las muestras.

Para el cálculo de la composición del agregado grueso se procedió al conteo de partículas por fracción granulométrica y a la elaboración de tablas tal como se especifica en el anexo A de la norma IRAM 1649. Como la granulometría del agregado de trituración es artificialmente preparada para la realización de los ensayos del prisma de hormigón, el cálculo ponderado se realizó tomando un porcentaje equivalente a 1/3 del porcentaje en peso de cada una de las tres fracciones granulométricas utilizadas, y luego para el cálculo del total de los componentes potencialmente reactivos se procedió a la suma ponderada de los constituyentes de cada fracción.

Para la determinación del porcentaje total de cuarzo microcristalino y/o tensionado se toma en cuenta tanto el cuarzo microcristalino que forma parte de la matriz como los clastos de cuarzo microcristalino y de cuarzo fuertemente tensionado. El porcentaje de cuarzo microcristalino en la matriz se estima sobre el porcentaje de matriz de cada grano analizado, tomando en cuenta que este componente se encuentra mezclado con otros constituyentes de la matriz, y por tanto se toma un valor fijo de cuarzo microcristalino del 50% del total de la matriz en cada punto observado. La matriz analizada mediante DRX y MEB-EDS, como se mostró en el capítulo 6 está, compuesta principalmente por caolinita, illita y cuarzo, este último puede ser micro y/o criptocristalino, además es común la presencia de óxidos de hierro e incluso de ópalo C-T y calcedonia. También se

procedió a contar clastos de cuarzo microcristalino y fuertemente deformados y/o con microgranulación de bordes, a fin de estimar la proporción de los mismos.

## 7.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal

### 7.2.1.1. Cantera Minera Yaraví

Como se vio en el capítulo 6 se estudiaron dos frentes y se tomaron muestras del material cuarcítico de granulometría 6 mm-20mm acopiado en planta. En las Tablas 7.1 y 7.2 se diferencian 3 litotipos (según de Dott 1964; Pettijohn *et al.* 1972, 1987): arenitas cuarzosas (A), vaques (B) y fangolitas-arcillitas (C). A su vez, las arenitas cuarzosas se dividen en 2 sub-litotipos: aquellas con menos del 5% de matriz (A1) y con 5-15% de matriz (A2); los vaques poseen hasta un 20% de material intersticial.

Cantera Minera-muestra de acopio (M1): Porcentaje individual retenido en tamiz IRAM		Retenido 12,5 mm		Retenido 9,5 mm		Retenido 4,75 mm	
		33,30%		33,30%		33,30%	
Constituyentes		Nº de partículas	%	Nº de partículas	%	Nº de partículas	%
A1	Arenita cuarzosa (matriz < 5%)	302	60	220	44	170	34
A2	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	57	11	140	28	195	39
B	Vaque	139	28	135	27	110	22
C	Fangolita/arcillita	4	1	5	1	25	5
Total		500	100	500	100	500	100

Tabla 7.1: Cuantificación de constituyentes por fracción granulométrica.

Cantera Minera-muestra de acopio (M1): Constituyentes		% de constituyente ponderados en cada fracción tamiz IRAM			Composición Ponderada (%)
		12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	
A1	Arenita cuarzosa (matriz < 5%)	20,1	14,7	11,3	46,1
A2	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	3,8	9,3	13	26,1
Total A	Arenitas	23,8	24	24,3	72,1
B	Vaque	9,2	9	7,3	25,5
C	Fangolita/arcillita	0,2	0,3	1,7	2,2
Total		33	33	33	100

Tabla 7.2: Cálculo ponderado por fracción granulométrica.

Del análisis granulométrico se determinó que alrededor del 50% de las partículas analizadas poseen entre un 5% y 20% de matriz. La proporción de arenitas cuarzosas con

5-15% de matriz aumenta al disminuir el tamaño granulométrico. Esto se debe a que estas rocas son menos resistentes y por lo tanto son trituradas con mayor facilidad que las arenitas cuarzosas con contenido de matriz bajo o nulo como se puede observar en los resultados del ensayo de desgaste "Los Ángeles" (capítulo 6). En las Tablas 7.3 a 7.6 se muestran los porcentajes de componentes potencialmente reactivos calculados para cada fracción granulométrica de agregado grueso y en la muestra total como lo especifica la norma IRAM 1531 (2016). Según lo desarrollado en el capítulo 5 (inciso 5.2.2, Tabla 5.3) respecto de los componentes potencialmente reactivos frente a la RAS y sus respectivos porcentajes, particularmente para esta muestra el valor porcentual de cuarzo fuertemente tensionado más cuarzo microcristalino no excede el 5% establecido (Tabla 7.6) por la norma IRAM 1531 (2016) para considerar la muestra como potencialmente reactiva; pero así mismo se debe tener en cuenta que en la muestra analizada también se reconoce un porcentaje de ópalo del 0,1% que también es inferior al porcentaje establecido por la norma para este componente, el cual es 0,5%. A pesar de que los dos valores calculados no exceden los límites estipulados, la norma IRAM 1531 (2016) considera que existiendo más de un componente reactivo, independientemente de sus porcentajes la muestra debe ser considerada potencialmente reactiva.

Muestra M1. Tamiz pasa 19,00 mm – retenido 12,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	1,1	1,2
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,2	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0,04	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.3:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 12,5 mm.

Muestra M1. Tamiz pasa 12,5 mm – retenido 9,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	0,8	0,9
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,1	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0,04	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.4:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 9,5 mm.

Muestra M1. Tamiz pasa 9,5 mm – retenido 4,75 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	0,9	1
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,1	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0,03	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.5:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 4,75 mm.

Total de la muestra M1 (ponderada)			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	2,8	3,2
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,4	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0,1	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.6:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos sobre la muestra total (ponderado) de la muestra (IRAM 1531).

En las Tablas 7.7 y 7.8 se muestran los resultados del conteo de partículas de cada fracción granulométrica de agregado grueso cuarcítico de la muestra M2 del frente 2. En el capítulo 6 se mencionó que algunas de las muestras colectadas tienen en su composición ópalo (C-T) y calcedonia, tanto en la matriz como en el cemento. Se identificaron tres litotipos (arenitas, vaques y fangolitas), pero diferenciándose de la muestra del acopio (M1) en que las arenitas poseen en general un porcentaje de matriz elevado (5% - 20%) y que los vaques poseen, en algunos casos, porcentajes de matriz superiores al 20%.

Cantera Minera-muestra de frente (M2): Porcentaje individual retenido en tamiz IRAM		Retenido 12,5 mm		Retenido 9,5 mm		Retenido 4,75 mm	
		33,30%		33,30%		33,30%	
Constituyentes		Nº de partículas	%	Nº de partículas	%	Nº de partículas	%
A	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	285	57	280	56	225	45
B	Vaque	215	43	215	43	225	45
C	Fangolita/arcillita	0	0	5	1	50	10
Total		500	100	500	100	500	100

**Tabla 7.7:** Cuantificación de constituyentes por fracción granulométrica.

Cantera Minera-muestra de acopio (M2): Constituyentes		% de constituyente ponderados en cada fracción tamiz IRAM			Composición Ponderada (%)
		12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	
A	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	19	18,6	15	52,6
B	Vaque	14,3	14,3	15	43,6
C	Fangolita/arcillita	0	0,3	3,3	3,66
Total		33	33	33	100

**Tabla 7.8:** Cálculo ponderado por fracción granulométrica.

En las Tablas 7.9 a 7.12 se observan los porcentajes de los componentes potencialmente reactivos según IRAM 1531 (2016), para cada fracción granulométrica (Tablas 7.9 a 7.11) y para el total de la muestra (Tabla 7.12). En esta muestra el porcentaje de ópalo y calcedonia se consideran juntos y se aproxima a 1,5%, excediendo el límite 0,5% en el total de la muestra. El cuarzo microcristalino y fuertemente tensionado también supera el límite de 5% establecido por la normativa (Tabla 5.12). La existencia de ópalo y calcedonia en un valor superior al de la norma, así como también de cuarzo fuertemente tensionado y microcristalino hace que el agregado en este frente califique como potencialmente reactivo frente a la RAS. Si solamente se contemplara al cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino la muestra sería calificada como de reacción lenta, pero la presencia de ópalo y calcedonia en valores superiores al límite establecido por la norma IRAM 1531 hace que sea calificada como de reacción rápida.

Muestra M2. Tamiz pasa 19,00 mm – retenido 12,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	1,59	1,86
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)	0,27	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0,48	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.9:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 12,5 mm.



Muestra M2. Tamiz pasa 12,5 mm – retenido 9,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	1,56	1,84
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,27	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0,47	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.10:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 9,5 mm.

Muestra M2. Tamiz pasa 9,5 mm – retenido 4,75 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	1,3	1,57
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,27	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0,42	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.11:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 4,75 mm.

Total de la muestra M2 (ponderada)			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	4,45	5,3
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,82	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	1,4	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.12:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos del total de la muestra (IRAM 1531).

### 7.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)

Se muestrearon bloques acopiados al pie de los frentes, los cuales fueron triturados y separados en fracciones mediante tamizado para la realización del análisis petrográfico IRAM 1649 y para la determinación de los componentes potencialmente reactivos según IRAM 1531 (2016). Las Tablas 7.13 y 7.14 representan la cuantificación de los componentes del agregado por fracción granulométrica y el ponderado en peso.

Al igual que en la cantera anterior se distinguen tres tipos litológicos principales: arenitas cuarzosas, vaques cuarzosos y fangolitas, estas dos últimas se hallan en menor porcentaje que en cantera Minera. Las arenitas cuarzosas con bajo contenido de matriz representan alrededor del 67% de la composición ponderada. Los componentes principales de la matriz son caolinita, illita y cuarzo, además de óxidos de hierro en proporciones variables (Capítulo 6).

Cantera La Florida-muestra de acopio: Porcentaje individual retenido en tamiz IRAM		Retenido 12,5 mm		Retenido 9,5 mm		Retenido 4,75 mm	
		33,30%		33,30%		33,30%	
Constituyentes		Nº de partículas	%	Nº de partículas	%	Nº de partículas	%
A1	Arenita cuarzosa (matriz < 5%)	325	65	340	68	340	68
A2	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	125	25	120	24	110	22
B	Vaque	50	10	40	8	48	9
C	Fangolita/arcillita					2	1
<b>Total</b>		500	100	500	100	500	100

Tabla 7.13: Cuantificación de constituyentes por fracción granulométrica.

Cantera La Florida-muestra de acopio		% de constituyente ponderados en cada fracción tamiz IRAM			Composición Ponderada (%)
		12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	
A1	Arenita cuarzosa (matriz < 5%)	21,6	22,6	22,3	66,6
A2	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	8,3	8	7,3	23,6
<b>Total A</b>	<b>Arenitas</b>	<b>30</b>	<b>30,6</b>	<b>29,6</b>	<b>90,2</b>
B	Vaque	3,3	2,7	3,3	9,3
C	Fangolita/arcillita			0,3	0,3
<b>Total</b>		<b>33</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>100</b>

Tabla 7.14: Cálculo ponderado por fracción granulométrica.

En las Tablas 7.15 a 7.18 se presentan los resultados en porcentajes ponderados de los componentes potencialmente reactivos presentes en la muestra por fracción granulométrica y en el total de la muestra. Como componente reactivo se identificó cuarzo fuertemente tensionado y cuarzo microcristalino. Como se analizó en el capítulo 6 respecto de esta muestra, el cuarzo microcristalino está presente en la matriz o formando parte de algunos clastos líticos, y el cuarzo fuertemente tensionado corresponde a líticos cuarzosos de origen metamórfico (migmatitas). En el cálculo ponderado de la muestra total (Tabla 7.18) el porcentaje obtenido es inferior al 5% establecido por la norma IRAM 1531 (2016), por tanto esta muestra se califica como no reactiva frente a la RAS.

Muestra La Florida. Tamiz pasa 19,00 mm – retenido 12,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	1,16	1,28
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,12	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.15:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 12,5 mm.

Muestra La Florida. Tamiz pasa 12,5 mm – retenido 9,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	1,16	1,27
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,11	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.16:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 9,5 mm.

Muestra La Florida. Tamiz pasa 9,5 mm – retenido 4,75 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	1,09	1,23
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)	0,14	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.17:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 4,75 mm.

Total de la muestra La Florida (ponderada)			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	3,41	3,78
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)	0,37	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.18:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la muestra total (IRAM 1531).

### 7.2.1.3. Cantera Pétreá

El procedimiento de muestreo y procesamiento de las muestras de esta cantera fue similar a los anteriormente descritos. En las Tablas 7.19 y 7.20 se observa que los litotipos más representativos son arenitas cuarzosas con hasta un 15% de matriz, siendo menos representativos los vaques. El porcentaje total de vaques es menor que en las anteriores canteras, siendo más abundantes las arenitas cuarzosas con contenido de matriz menor al 5%. No se registraron arcillitas en el conteo.

Cantera Pétreo-muestra de frente: Porcentaje individual retenido en tamiz IRAM		Retenido 12,5 mm		Retenido 9,5 mm		Retenido 4,75 mm	
		33,30%		33,30%		33,30%	
Constituyentes		Nº de partículas	%	Nº de partículas	%	Nº de partículas	%
A1	Arenita cuarzosa (matriz < 5%)	333	67	322	64	320	64
A2	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	143	29	138	28	113	23
B	Vaque	24	5	40	8	68	14
<b>Total</b>		500	100	500	100	500	100

Tabla 7.19: Cuantificación de constituyentes por fracción granulométrica.

Cantera Pétreo-muestra de frente		% de constituyente ponderados en cada fracción tamiz IRAM			Composición Ponderada (%)
		12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	
A1	Arenita cuarzosa (matriz < 5%)	22	21	21	65
A2	Arenita cuarzosa (matriz 5-15%)	10	9	7	26
<b>Total A</b>	<b>Arenitas</b>	<b>32</b>	<b>31</b>	<b>29</b>	<b>91</b>
B	Vaque	2	3	4	9
<b>Total</b>		<b>33</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>100</b>

Tabla 7.20: Cálculo ponderado por fracción granulométrica.

En las Tablas 7.21 a 7.24 se muestran los porcentajes de componentes potencialmente reactivos para cada fracción granulométrica y en la Tabla 7.24 para la muestra total ponderada.

Muestra Pétreo. Tamiz pasa 19,00 mm – retenido 12,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	0,74	0,89
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)	0,15	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

Tabla 7.21: Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 12,5 mm.

Muestra Pétreo. Tamiz pasa 12,5 mm – retenido 9,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	0,74	0,9
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,16	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.22:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 9,5 mm.

Muestra Pétreo. Tamiz pasa 9,5 mm – retenido 4,75 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	0,74	0,91
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,17	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.23:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 4,75 mm.



Total de la muestra Pétreo (ponderada)			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	2,21	2,68
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)	0,47	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.24:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la muestra total (IRAM 1531).

Como se observa en la Tabla 7.24, la muestra total ponderada posee cuarzo microcristalino y fuertemente tensionado en un contenido inferior al límite de 5% establecido por la norma IRAM 1531 (2016). El mayor porcentaje de cuarzo microcristalino está presente en la matriz de las arenitas junto a caolinita, illita y en algunos casos óxidos de hierro.

### 7.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos

En esta cantera se procedió a coleccionar muestras de rocas de más de 0,5 kg de peso en varios sectores del frente. Estas muestras fueron procesadas en laboratorio para el análisis granulométrico según IRAM 1649 (Tablas 7.25 y 7.26) y para el cálculo de porcentajes de componentes potencialmente reactivos según IRAM 1531 (Tablas 7.27 a 7.30). La mayoría de las rocas cuarcíticas que componen este frente son arenitas cuarzosas de grano fino a medio, con esporádicas apariciones de fangolitas/arcillitas de composición caolinita-illita, determinada por DRX (capítulo 6). Las granulometrías sabulíticas-conglomerádicas están ausentes. Composicionalmente algunas muestras tienen tendencia a ser litoarenitas feldespáticas por presencia de líticos con feldespatos y micas, aunque los feldespatos están alterados a arcillas. No se identifican arenitas con matriz superior al 15%.

Cantera Los Pinos-muestra de frente: Porcentaje individual retenido en tamiz IRAM:		Retenido 12,5 mm		Retenido 9,5 mm		Retenido 4,75 mm	
		33,30%		33,30%		33,30%	
Constituyentes		Nº de partículas	%	Nº de partículas	%	Nº de partículas	%
A1	Arenita cuarzosa Arenita cuarzosa (< 5% de matriz)	280	56	260	52	235	47
A2	Arenita cuarzosa (5-15% de matriz)	220	44	235	47	240	48
C	Fangolita/arcillita	0	0	5	1	25	5
Total		500	100	500	100	500	100

Tabla 7.25: Cuantificación de constituyentes por fracción granulométrica.

Cantera Los Pinos-muestra de frente		% de constituyente ponderados en cada fracción tamiz IRAM			Composición Ponderada (%)
		12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	
A1	Arenita cuarzosa (matriz < 5%)	18,6	17,3	15,7	51,6
A2	Arenita cuarzosa (matriz 5-10%)	14,7	15,7	16	46,3
C	Fangolita/arcillita	0	0,3	1,7	2
Total		33	33	33	100

Tabla 7.26: Cálculo ponderado por fracción granulométrica.

A continuación se muestran los porcentajes de componentes reactivos calculados para esta cantera según IRAM 1531, por fracción granulométrica (Tablas 7.27 a 7.29) y sobre la muestra total (Tabla 7.30).

Muestra Los Pinos. Tamiz pasa 19,00 mm – retenido 12,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	0,99	1,14
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)	0,15	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

Tabla 7.27: Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 12,5 mm.

Muestra Los Pinos. Tamiz pasa 12,5 mm – retenido 9,5 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	0,97	1,13
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,16	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.28:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 9,5 mm.

Muestra Los Pinos. Tamiz pasa 9,5 mm – retenido 4,75 mm			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	0,92	1,08
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,16	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.29:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la fracción retenida por el tamiz IRAM 4,75 mm.

Total de la muestra Los Pinos (ponderada)			
Reacción	Minerales / Rocas	Porcentaje (%)	
Álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado,microfracturado	2,88	3,35
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 $\mu\text{m}$ )	0,47	
	Ftanita, chert	0	
	Calcedonia		
	Tridimita	0	
	Cristobalita		
	Ópalo	0	
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	0	

**Tabla 7.30:** Porcentaje de componentes potencialmente reactivos en la muestra total (IRAM 1531).

Los componentes potencialmente reactivos presentes corresponden a cuarzo microcristalino que forma parte de la matriz (cuando la hay) y clastos de cuarzo microcristalino y fuertemente tensionado. La suma de ambos componentes en la muestra total no supera el límite de 5% establecido por la norma IRAM 1531 (2016).

### 7.3. DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE EXTINCIÓN ONDULANTE (AEO)

#### 7.3.1. Introducción

La determinación del AEO no está especificada en ninguna de las normas petrográficas de agregados para hormigón, pero la mayoría de ellas menciona que un agregado con cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino debe considerarse como potencialmente reactivo frente a los álcalis del cemento pórtland (IRAM 1531, ASTM-C-295, RILEM AAR-1.1, etc.). Apelando al conocimiento petrográfico de las rocas metamórficas, podemos reconocer granos de cuarzo deformados en base a su microestructura, pero la evidencia más representativa de deformación es la extinción ondulante en los granos de cuarzo, por esto es que en actualmente por más que muchos autores cuestionan su real relación con el grado de reactividad de los agregados (Grattan-Bellew 1986, Wenk *et al.* 2008), es la determinación del AEO un método que continua siendo aplicado actualmente para tratar de cuantificar a través de esta valor, la

reactividad de las rocas que contienen cuarzo tensionado (Alaejos y Lanza 2012; Ramos et al. 2016).

De Hills y Corvalán (1964) en rocas graníticas de Chile encontraron que era posible correlacionar el valor del ángulo de extinción ondulatorio u ondulante (AEO) de los cristales de cuarzo con el grado de deformación de sus redes y la intensidad de los procesos de deformación. Gogte (1973) demostró que la potencial reactividad alcalina de algunas rocas cristalinas estaba relacionada con el contenido y los efectos de tensión en el cuarzo y, por lo tanto con un mayor número de dislocaciones en la red cristalina que causa una mayor reactividad debido al debilitamiento de los enlaces silicio-oxígeno. Esto crea regiones de pequeña desorientación dentro de un grano individual, conocidas como subgranos, que ópticamente aparecen como diferencias en la extinción (Vernon 2004). Cortelezzi *et al.* (1990) y Grattan-Bellew (1992), demostraron que existe una correlación positiva entre la cantidad de cuarzo con extinción ondulante con presencia de subgranos y la expansión en morteros y hormigones de laboratorio confeccionados condichos agregados. Kerrick y Hooton (1992) y Shayan (1993) atribuyeron la expansión en morteros a la presencia de cuarzo microcristalino junto al cuarzo deformado, y afirmaron que la reacción tuvo lugar en límites de grano y zonas que contienen cuarzo finamente dividido con mayor área superficial.

La medida del ángulo de extinción ondulante (AEO) con microscopio petrográfico para determinar la potencial reactividad del cuarzo tensionado fue establecida por Dólar-Mantuani (1981, 1983). Similarmente a lo propuesto por Hills y Corvalán (1964), el grano de cuarzo a medir se coloca en posición de máxima iluminación (alta birrefringencia) y luego se gira la platina midiendo dos posiciones de extinción, la primera donde una parte del grano presenta extinción total y la segunda posición cuando el cristal ha pasado por distintas áreas de extinción y se ilumina nuevamente excepto por algunas áreas con un suave color de gris (última extinción). Para este autor, un agregado califica como potencialmente reactivo cuando el contenido de cuarzo con AEO superior a  $15^\circ$  es de 20% o mayor, pero no especifica si se refiere al 20% de todo el agregado analizado o al 20% de los granos medidos, y tampoco relaciona al tamaño del grano medido con el AEO (Andersen y Thaulow 1989). Por otro lado Dólar-Mantuani (1983) señaló que un valor inferior a  $15^\circ$  posee un comportamiento no reactivo

Por otra parte, Grattan-Bellew (2001) explica que cuando un grano de cuarzo deformado se observa con polarizadores cruzados, una banda oscura de extinción comienza a formarse y se mueve a través del cristal a medida que la platina del microscopio se rota desde la posición de máxima iluminación. El ángulo de rotación entre la primera y la última aparición de la banda de extinción que se mueve a través del cristal, se denomina ángulo de extinción ondulante (AEO). El valor umbral de AEO de  $25^\circ$  se propuso para considerar una roca como reactiva. West (1991, 1994) lo señaló como un indicador ya que el cuarzo con alto AEO está asociado con la presencia de cuarzo microcristalino (Grattan-Bellew 2001; Fernandes 2005).

Respecto del valor del AEO y su porcentaje existen diferentes criterios. Buck (1983) sugirió que, un agregado que contiene más del 20% de cuarzo con un valor de AEO superior a  $15^\circ$  era indicativo de potencial reactividad. Por otra parte la Concrete Society (1987) recomendó que un agregado que presente más del 30% de cuarzo altamente deformado, es decir, con un AEO medio de  $25^\circ$  después del conteo de al menos veinte mediciones de grano, se considere potencialmente reactivo.

En asociación al tamaño de grano Alaejos y Lanza (2012) analizaron cuarcitas, cuarzo arenitas y calizas, estableciendo cuatro clases de reactividad potencial de acuerdo con los siguientes tamaños de cristal:  $>130 \mu\text{m}$  - cuarzo inocuo;  $60\text{-}130 \mu\text{m}$  - cuarzo dudoso;  $10\text{-}60 \mu\text{m}$  - cuarzo reactivo; y  $<10 \mu\text{m}$  - cuarzo altamente reactivo. Ramos *et al.* (2016) utilizando esta clasificación, junto a lo establecido por la reglamentación portuguesa, LNEC E 415 (1993) respecto del AEO como aquellos  $< 15^\circ$  débilmente tensionado,  $15^\circ$  y  $24^\circ$  moderadamente tensionado y  $\geq 25^\circ$  fuertemente tensionado, estudiaron agregados graníticos de Portugal (considerados de reacción lenta) y concluyeron que existe un correlación positiva entre el porcentaje de cuarzo microcristalino  $< 62 \mu\text{m}$  y la expansión en prismas de hormigón según RILEM AAR-4.1 y RILEM AAR-3.1 (2016). Por otra parte, estos autores no hallaron una relación concreta entre el AEO y el desarrollo de RAS, pero sugieren que no sea descartado y que sea siempre informado en las evaluaciones petrográficas de agregados para hormigón, ya que es un indicador de la deformación del cuarzo en el sentido más general.

Recientemente el reglamento RILEM AAR 1.1 (2016) y la norma IRAM 1531 (2016) establecen que sólo los tamaños de grano inferiores a  $62 \mu\text{m}$  son considerados

potencialmente reactivos, aunque no hacen referencia a la relación que pueda existir entre el tamaño de grano del cuarzo y su AEO.

### 7.3.2. Medición del AEO

Tomando como referencia al trabajo más reciente de Ramos *et al.* (2016) se procedió a la medida del AEO ondulante en los granos de cuarzo que componen las arenitas aquí estudiadas, a fin de estimar un porcentaje de cuarzo fuertemente tensionado mencionado en la norma IRAM 1531 (2016), considerando a este como aquel con un AEO mayor de 25°, al cual debemos sumar el porcentaje de cuarzo microcristalino.

Para realizar el promedio de las medidas del ángulo de extinción ondulante (AEO) con microscopio petrográfico se tomó el criterio de Grattan-Bellew (2001) explicado en el inciso anterior. En el grano a medir, con polarizadores cruzados, se comienza la lectura del ángulo sobre la platina graduada cuando una banda oscura de extinción comienza a formarse y se mueve a través del cristal a medida que la platina se rota desde la posición de máxima iluminación. El ángulo de rotación entre la primera y la última aparición de la banda de extinción es el que se toma como valor del AEO para ese grano.

Las medición del AEO se realizó sobre secciones delgadas de grano suelto de las muestras trituradas de granulometría 2,36-1,18 mm siguiendo el método de conteo de puntos (RILEM AAR-1.1, 2016). Para establecer una correlación entre el tamaño de grano y el AEO se construyeron gráficos de dispersión de los tres (o en algunos casos dos) litotipos (o sublitotipos) identificados. También se estimaron los porcentajes de granos que poseen AEO en rangos de 0°-4°, 5°-14°, 15°-24° y mayores de 25°.

Los criterios aquí utilizados para considerar al agregado como potencialmente reactivo según lo especificado por la norma IRAM 1531 (2016) se estableció como medida de reactividad un tamaño de grano límite de 62  $\mu\text{m}$  (cuarzo microcristalino) similarmente a lo establecido por Alaejos y Lanza (2012), y por el reglamento RILEM AAR-1.1 (2016). Por otra parte, se considero un valor de cuarzo con AEO  $\geq 25^\circ$  (cuarzo fuertemente tensionado) mayor al 20% puede determinar un mayor riesgo de reactividad en el agregado siempre y cuando esté acompañado por cuarzo microcristalino.



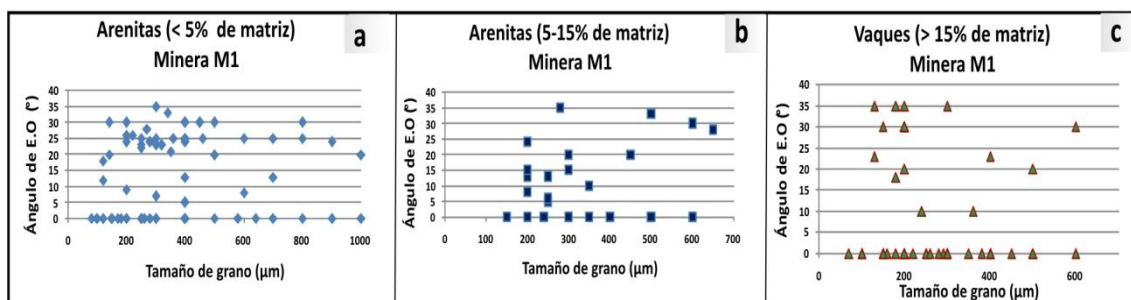
### 7.3.3. Área de Batán-Estación Chapadmalal

#### 7.3.3.1. Cantera Minera Yaraví

Los gráficos representados en las Figuras 7.1 y 7.2 corresponden a los granos medidos en la muestra M1 (acopio) y los gráficos de las Figuras 7.3 y 7.4 a los granos medidos de la muestra M2 (frente inactivo). La muestra M1 posee los tres litotipos de granulometría arena, que corresponden a arenitas cuarzosas con menos del 5% de matriz, entre 5% y 10% de matriz y a vaques, con más del 15% de matriz. La muestra M2 está representada en sólo dos tipos litológicos, arenitas con 5-15% de matriz y vaques con más del 15% de matriz.

Los gráficos de dispersión (Figura 7.1), evidencian la falta de correlación entre el AEO y el tamaño de grano, aunque se puede observar una mayor variación granulométrica en las arenitas con menos del 5% de matriz (arenitas de granulometría fina a gruesa). En cambio en las arenitas con mayor porcentaje de matriz y en los vaques, el rango granulométrico se concentra en el tamaño arena fina a media. En general tanto las granulometrías finas como las gruesas poseen AEO variables no asociados a una granulometría particular.

En la Figura 7.2 se puede observar que todos los litotipos poseen un alto porcentaje con ángulos de extinción normal o bajos ( $0^{\circ}$ - $4^{\circ}$ ), aunque el valor promedio de granos con un AEO superior a  $25^{\circ}$  entre los tres tipos litológicos es de 21%, los cuales se asocian a granulometrías de arena fina a media y gruesa ( $125\ \mu\text{m}$  –  $1000\ \mu\text{m}$ ).



**Figura 7.1:** Muestra M1. Tamaño de grano vs. AEO en arenitas con (a) < del 5% de matriz, (b) entre 5-15% y (c) vaques.

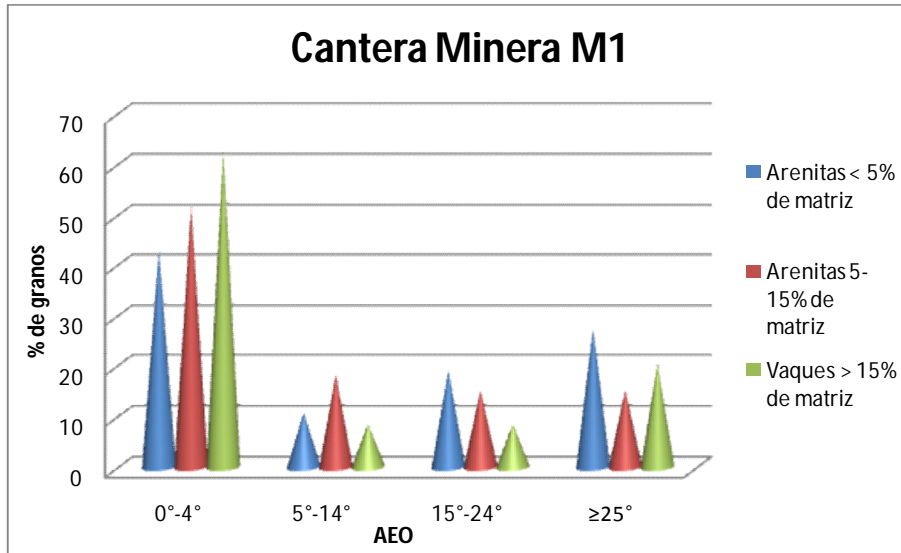


Figura 7.2: Muestra M1. Porcentaje de granos de los diferentes litotipos vs. AEO.

En la muestra M2, representada por arenitas con más del 5% de matriz y por vaques (Figura 7.3), los clastos medidos poseen una dispersión similar a la anterior muestra. Aquí la media de los tamaños de grano aumenta ya que la granulometría de las rocas de este frente está representada por arena media a gruesa. Al igual que para la muestra M1, se puede decir que el tamaño de grano no se correlaciona con el AEO de los clastos, aunque en ambos casos (M1 y M2) se puede ver una tendencia de mayor número de clastos con ángulo de extinción normal y un segundo grupo con ángulos entre 20° y 35°. En la Figura 7.4 se observa una gran proporción de clastos con un rango de ángulo de extinción entre 0° (normal) e inferior a 5°, menor cantidad de granos con AEO entre 5° y 24°, pero en promedio hay un 25% de clastos con ángulos mayores a 25°. Esto es coincidente con el porcentaje ponderado de cuarzo fuertemente tensionado que supera el 5% (Tabla 7.12).

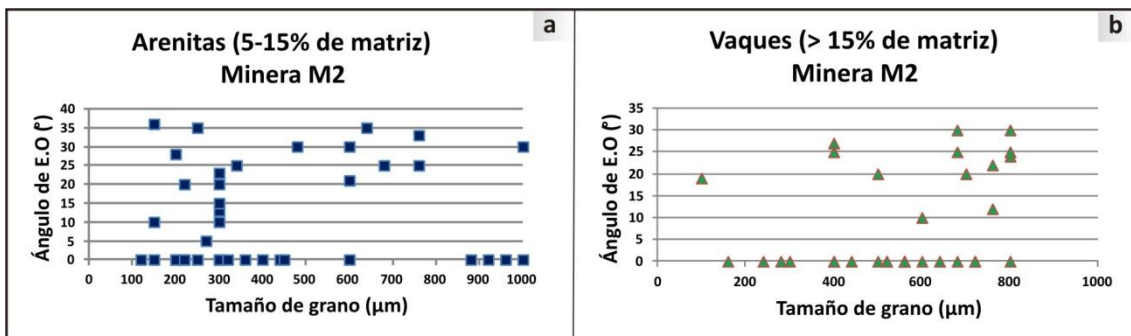


Figura 7.3: Muestra M2. Tamaño de grano vs. AEO en arenitas con (a) 5-15% de matriz y (b) vaques.

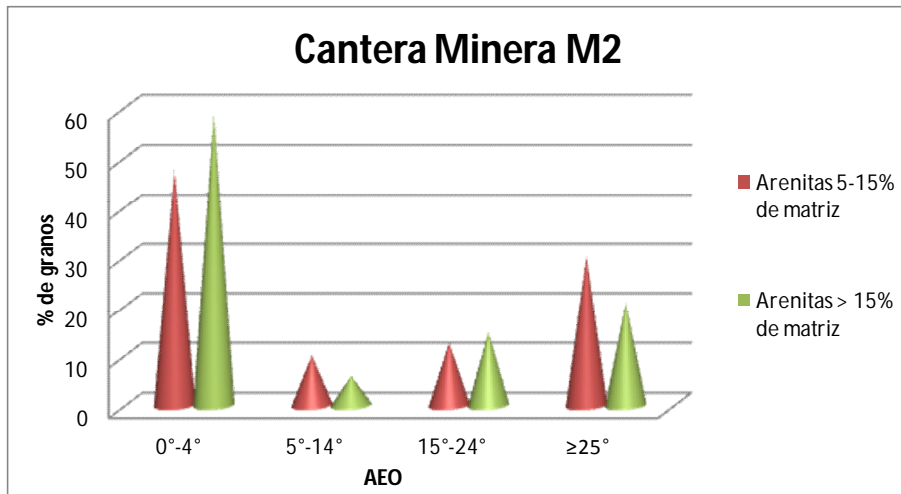


Figura 7.4: Muestra M2. Porcentaje de granos de los diferentes litotipos vs. AEO.

### 7.3.3.2. Cantera La Florida (ex – Los Curros)

Respecto de la muestra de cantera La Florida, se observa en la Figura 7.5 que en los tres litotipos existe una mayor concentración de clastos con valores de AEO menores a 15°, representado también gráfico de la Figura 7.6. Es de destacar que los porcentajes de granos con AEO entre 0° y 4° presentan similar valor que en las muestras de cantera Minera, pero en general se observan mayores porcentajes de clastos con AEO entre 5° y 14°, siendo sólo de un 10% el porcentaje de granos con ángulo de extinción ondulante mayor a 25°.

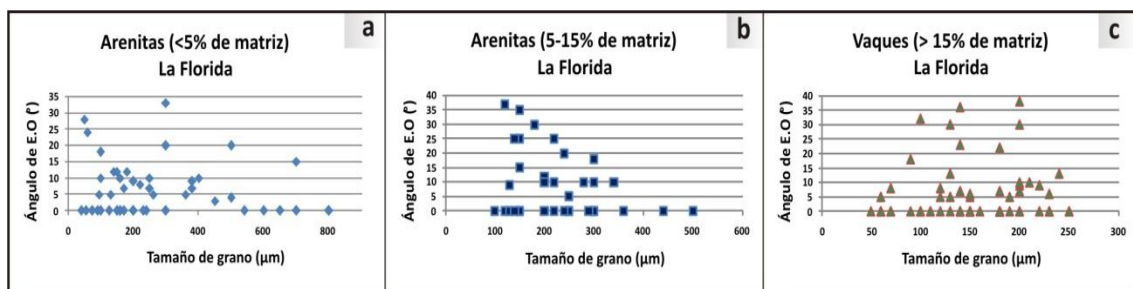


Figura 7.5: Cantera La Florida. Tamaño de grano vs. AEO en arenitas (a) con < del 5% de matriz, (b) entre 5-15% de matriz y (c) vaques con del 15% de matriz.

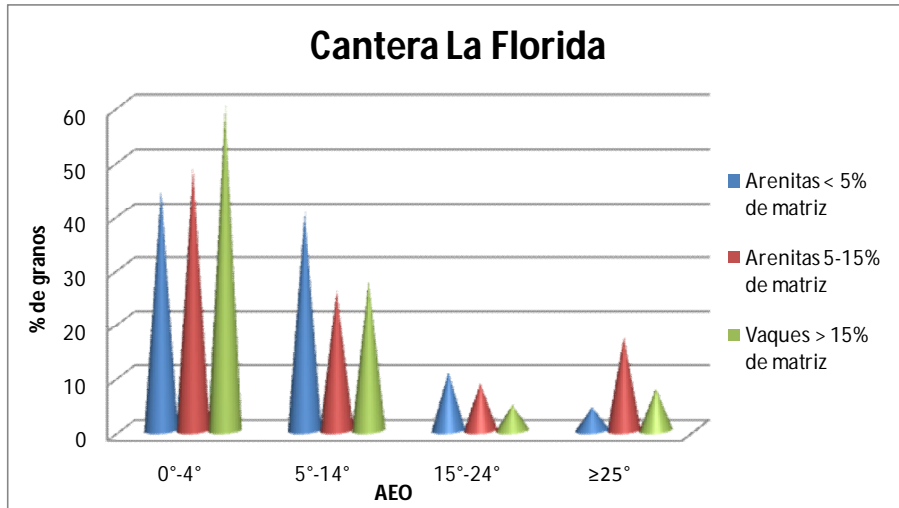


Figura 7.6: Cantera La Florida. Porcentaje de granos de los diferentes litotipos vs. AEO.

### 7.3.3.3. Cantera Pétreá

Por el contrario, en cantera Pétreá se observa una mayor concentración de clastos con valores de AEO superiores a 15° (Figura 7.7). En la Figura 7.8 se puede ver que los valores de extinción cercanos a 0° se mantienen coherentes con los porcentajes determinados en las canteras antes mencionadas, pero el porcentaje promedio de granos con AEO superior a 25° entre los tres litotipos es del 17%, mayor que en cantera La Florida. De todas formas los tamaños de grano medidos para clastos con AEO elevados presentan un tamaño de grano superior a 150 µm.

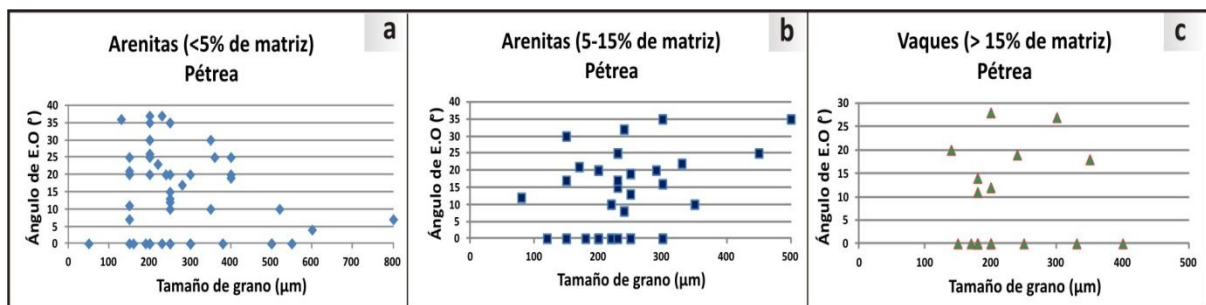


Figura 7.7: Cantera Pétreá. Tamaño de grano vs. AEO en arenitas (a) con < del 5% de matriz, (b) entre 5-15% de matriz y (c) vaques.

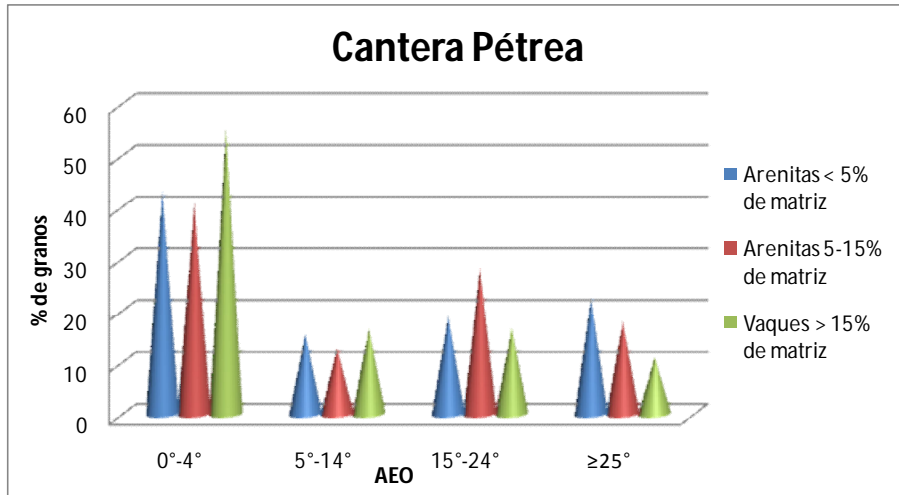


Figura 7.8: Cantera Pétreá. Porcentaje de granos de los diferentes litotipos vs. AEO.

### 7.3.4. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos

En cantera Los Pinos de la localidad de Balcarce los litotipos predominantes son arenitas con escasa matriz y con 5-15% de matriz. Ambos tipos litológicos poseen un tamaño granulométrico inferior y más homogéneo que las arenitas de la zona de Batán, principalmente de arena muy fina a media (Figura 7.9). Al igual que las demás canteras el AEO no presenta relación con el tamaño de grano, existiendo una mayor concentración de granos en el rango de extinción ondulante entre 5° y 25°. En promedio el porcentaje de granos con un AEO superior a 25° es de 14% (Figura 7.10), pero en general la granulometría de los granos medidos es superior a los 100 μm al igual que en el resto de las canteras.

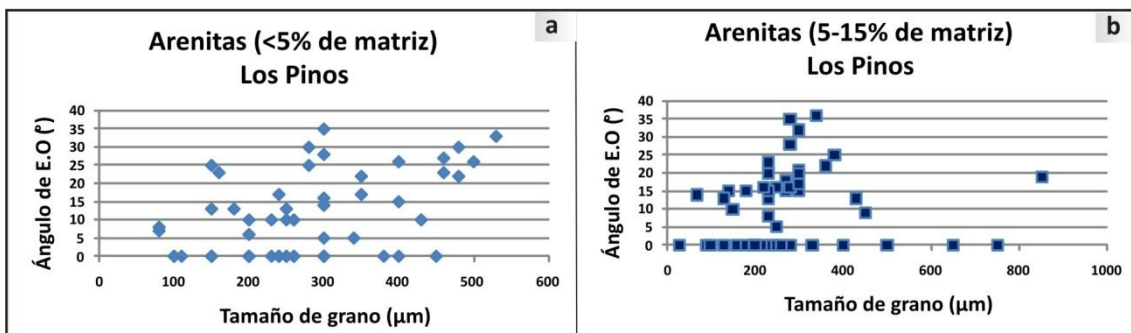


Figura 7.9: Cantera Los Pinos. Gráficos tamaño de grano vs. AEO en arenitas (a) entre 5-15% de matriz y (b) vaques.

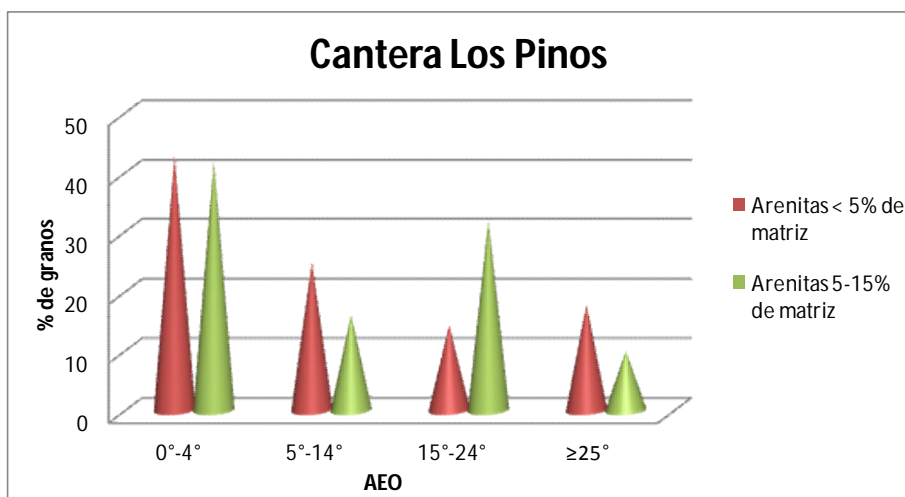


Figura 7.10: Cantera Los Pinos. Porcentaje de granos de los diferentes litotipos vs. AEO.

## 7.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS FÍSICOS

### 7.4.1. Ensayos físicos de RAS. Norma IRAM 1674 e IRAM 1700

Para la realización de los ensayos físicos de RAS de laboratorio se procedió al procesamiento del material cuarcítico muestreado en todas las canteras, tanto de aquellas tomadas del acopio de granulometría 6-20 mm, como de las tomadas de frentes de explotación o frentes inactivos. Las mismas fueron trituradas, tamizadas en las fracciones granulométricas especificadas por cada método, lavadas y secadas en estufa durante 24 hs previas a la realización de los ensayos.

Se realizó el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) y el método del prisma de hormigón convencional y acelerado (IRAM 1700, 2013), los cuales fueron descritos en el capítulo 5.

La dosificación de los morteros se realizó según lo especificado en la norma IRAM 1674 (1997) y la de los hormigones según lo recomendado en la norma IRAM 1700 (2013).

En el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) la dosificación de las mezclas es siempre la misma, siendo la proporción de los materiales secos usados una parte de cemento por cada 2,25 partes en masa de agregado graduado. En este caso la mezcla se ajusta a las siguientes proporciones: 400 gr de cemento y 900 gr del agregado cuarcítico graduado (Tabla 7.31). El contenido de agua en peso es de 188 g, y la relación agua/cemento de 0,47. Este ensayo fue realizado con el material cuarcítico triturado pasante tamiz 4 (4,75 mm) tamizado en fracciones según lo especificado en la norma.

Abertura del tamiz (mm)		Masa del agregado
Pasa por	Retiene en	%
IRAM 4,75	IRAM 2,36	10
IRAM 2,36	IRAM 1,18	25
IRAM 1,18	IRAM 0,6	25
IRAM 0,6	IRAM 0,3	25
IRAM 0,3	IRAM 0,15	15

**Tabla 7.31:** Granulometría y proporciones del agregado utilizadas en la elaboración de los morteros.

La norma IRAM 1674 considera que el porcentaje de álcali presente en el cemento tiene un efecto despreciable o menor sobre la expansión de las probetas, ya que las mismas son sumergidas en una solución fuertemente alcalina a temperatura elevada (80°C), siendo en sí mismo un ambiente altamente agresivo. En este método la evaluación de la expansión se realiza a los 16 días tomando un límite de 0,100%, para considerar al agregado como potencialmente reactivo.

La dosificación de los hormigones, para la realización del método del prisma de hormigón convencional y acelerado (IRAM 1700), se ajusta a la densidad y absorción de los agregados de cada cantera. La Tabla 7.32 muestra las proporciones de agregado grueso graduado que se utilizaron en la mezcla de acuerdo al tamaño máximo.

Abertura del tamiz IRAM (mm)		Fracción de masa
Pasa por	Retenido en	Tamaño máximo del AG mayor o igual a:
19	13,2	1/3
13,2	9,5	1/3
9,5	4,75	1/3

**Tabla 7.32:** Granulometría y proporciones del agregado grueso (AG) utilizado en las mezclas de hormigón (IRAM 1700, 2013).

El cemento a utilizar un CPN40 con un contenido de álcali de  $0,9 \pm 0,1$  %. El contenido de cemento en el hormigón debe ser igual a  $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ . El álcali del cemento incrementado a 1,25% de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente, por hidróxido de sodio (NaOH) al agua de mezclado en cantidad necesaria (IRAM 1700, inciso 6.5). Este valor ha sido seleccionado



para acelerar el proceso de expansión más que para reproducir las condiciones reales de obra.

La relación agua cemento de la mezclas es de 0,45, la máxima que se especifica, a fin de obtener una trabajabilidad adecuada, considerando un asentamiento de  $8 \pm 2$  cm para alcanzar una llenado y compactación satisfactoria de la mezcla de hormigón en los moldes.

Las dosificaciones de las mezclas de hormigón para la realización del método del prisma de hormigón, IRAM 1700, convencional (38°) y acelerado (60°) de todas las canteras estudiadas se muestran en la Tabla 7.33.

MATERIALES		Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	Volumen del pastón en Kg (en 1000 dm <sup>3</sup> )
<b>Cantera Minera 1 (Batán)</b>				
Cemento		3,15	133	420
Agua		1	189	189
Álcali agregado = NaOH				2,12
Agregado Grueso (mm)	4,75-9,5	2,55	395	333
	9,5-13,2			333
	13,2-19,0			333
Agregado fino (arena oriental)		2,64	263	694
Aire			20	
<b>Cantera Minera 2 (Batán)</b>				
Cemento		3,15	133	420
Agua		1	189	189
Álcali agregado = NaOH				1,03
Agregado Grueso (mm)	4,75-9,5	2,5	395	329,3
	9,5-13,2			329,3
	13,2-19,0			329,3
Agregado fino (arena oriental)		2,64	263	695
Aire			20	
<b>Cantera La Florida (Batán)</b>				
Cemento		3,15	133	420
Agua		1	189	189
Álcali agregado = NaOH				2,12
Agregado Grueso (mm)	4,75-9,5	2,53	395	333
	9,5-13,2			333
	13,2-19,0			333
Agregado fino (arena oriental)		2,64	263	694
Aire			20	
<b>Cantera Pétreo (Batán)</b>				
Cemento		3,15	133	420
Agua		1	189	189
Álcali agregado = NaOH				2,12
Agregado Grueso (mm)	4,75-9,5	2,55	395	333
	9,5-13,2			333
	13,2-19,0			333
Agregado fino (arena oriental)		2,64	263	694
Aire			20	
<b>Cantera Los Pinos (Balcarce)</b>				
Cemento		3,15	133	420
Agua		1	189	189
Álcali agregado = NaOH				1,03
Agregado Grueso (mm)	4,75-9,5	2,53	395	333
	9,5-13,2			333
	13,2-19,0			333
Agregado fino (arena oriental)		2,64	263	694
Aire			20	

**Tabla 7.33:** Dosificaciones de las mezclas de hormigón de cada cantera para la realización del método del prisma de hormigón (IRAM 1700 2016). La relación agua cemento en todas las mezclas fue de 0,45.

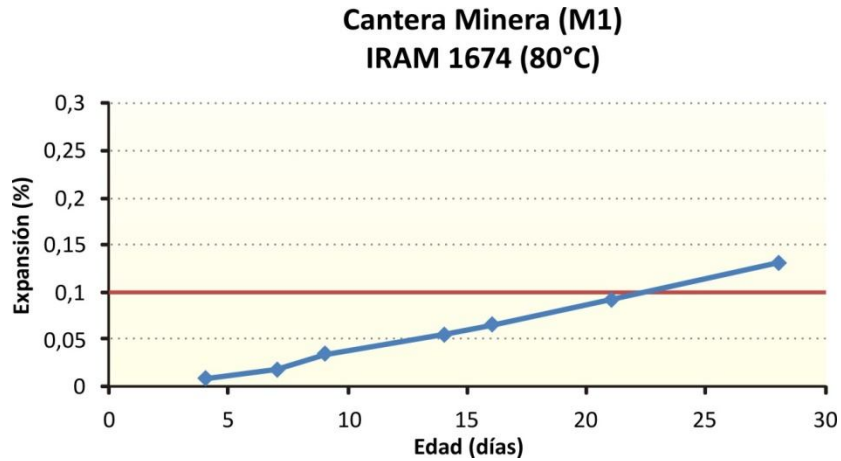
Para el moldeo de tres probetas, la dosificación de las mezclas se lleva a un pastón de un volumen de 12 litros utilizando una relación agua cemento de 0,45. El asentamiento medido en cada una de las mezclas realizadas con el agregado cuarcítico de cada cantera varía entre 3 cm y 5 cm.

De acuerdo a la norma IRAM 1700 (2013) la expansión del prisma de hormigón se evalúa a las 13 semanas en los prismas a 60°C y a un año a 38°C. En el método del prisma acelerado existen dos valores límites, 0,04% para agregados de reacción rápida (que contengan ópalo, calcedonia o vidrio volcánico) y 0,08% para aquellos de reacción lenta (que contengan cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino), mientras que para el ensayo del prisma a un año existe un único límite de 0,04% para calificar a un agregado como potencialmente reactivo frente a la RAS.

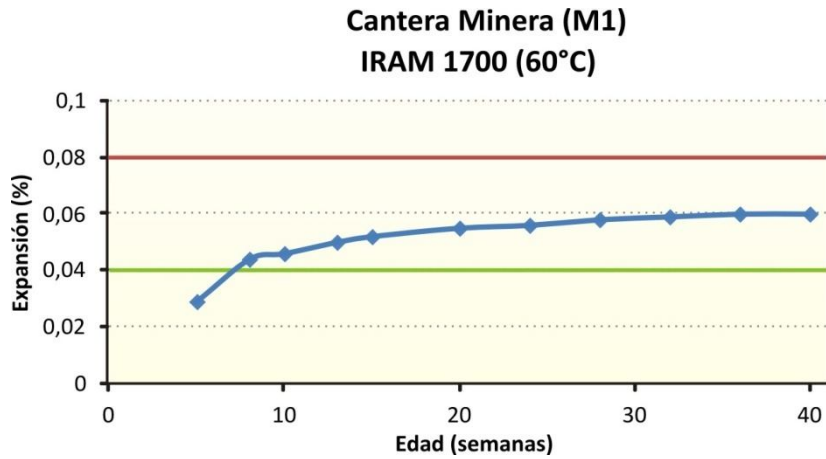
#### **7.4.1.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

##### **7.4.1.1.1. Cantera Minera Yaraví**

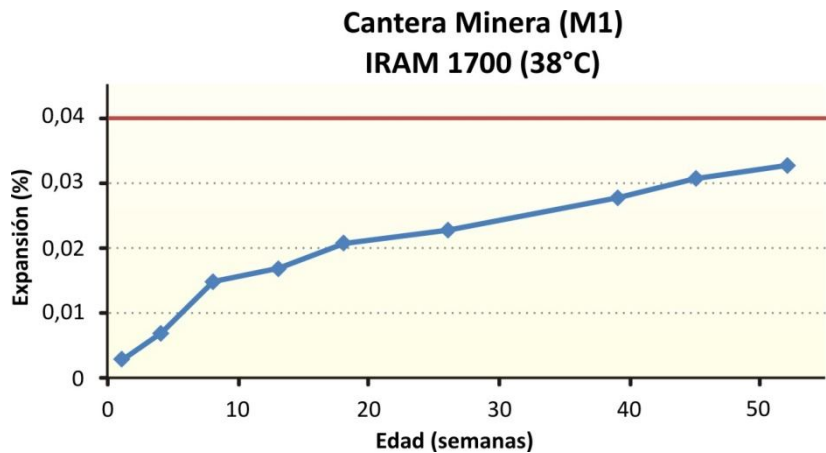
En la Figura 7.11 se muestra el gráfico de expansión-edad del ensayo acelerado de la barra de mortero para la muestra de acopio M1, donde se observa que a los 16 días el valor de expansión de las barras es menor al límite de 0,100 %. Las figuras 7.12 y 7.13 corresponden al ensayo del prisma de hormigón acelerado (60°C) y convencional (38°C) respectivamente. En el prisma convencional el valor a 1 año es inferior al límite de 0,04%, mientras que en el método acelerado el valor a las 13 semanas es superior a 0,04% pero inferior a 0,08%.



**Figura 7.11:** Curva de expansión-edad de la muestra M1. La expansión a los 16 días es inferior al límite establecido en la norma.

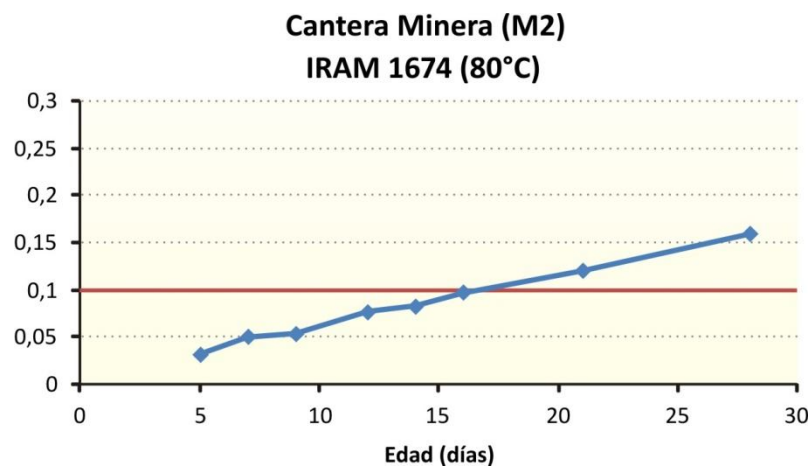


**Figura 7.12:** Curva de expansión-edad de la muestra M1 para el ensayo del prisma acelerado. La expansión a las 13 semanas es inferior al límite de 0,08% pero superior al de 0,04% establecido por la norma.

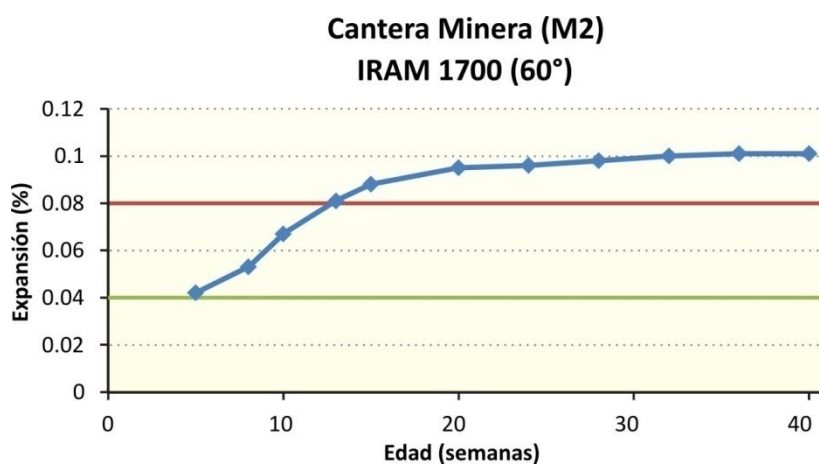


**Figura 7.13:** Curva de expansión-edad de la muestra M1 para el prisma convencional. La expansión a 1 año es inferior al límite de 0,04% establecido por la norma.

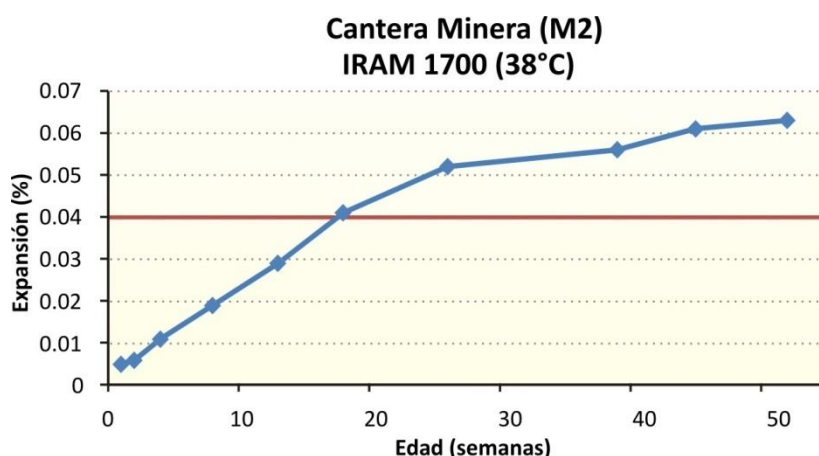
La segunda muestra ensayada (muestra 2) corresponde al frente 2, inactivo. En la Figura 7.14 se observa la curva expansión-edad para la barra de mortero, en la cual la curva atraviesa el límite del 0,100% a los 16 días. En el método del prisma de hormigón a 60°C (Figura 7.15) el valor de expansión de 0,04% es superado a las 5 semanas y el de 0,08% a las 13 semanas. El prisma de hormigón convencional supera el límite de 0,04% antes de las 20 semanas, alcanzando un valor superior a 0,06% a 1 año (Figura 7.16).



**Figura 7.14:** Curva de expansión-edad de la muestra M2. La expansión alcanza el límite establecido en la norma a los 16 días.



**Figura 7.15:** Curva de expansión-edad de M2 para el ensayo del prisma acelerado. La expansión a las 13 semanas es superior a los dos límites establecidos por la norma.

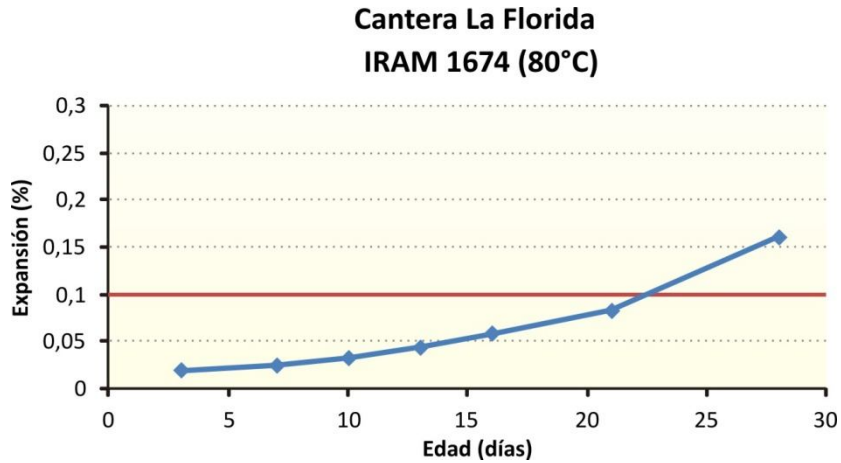


**Figura 7.16:** Curva de expansión-edad de M2 para el prisma convencional. La expansión a 1 año es superior al límite de 0,04% establecido por la norma.

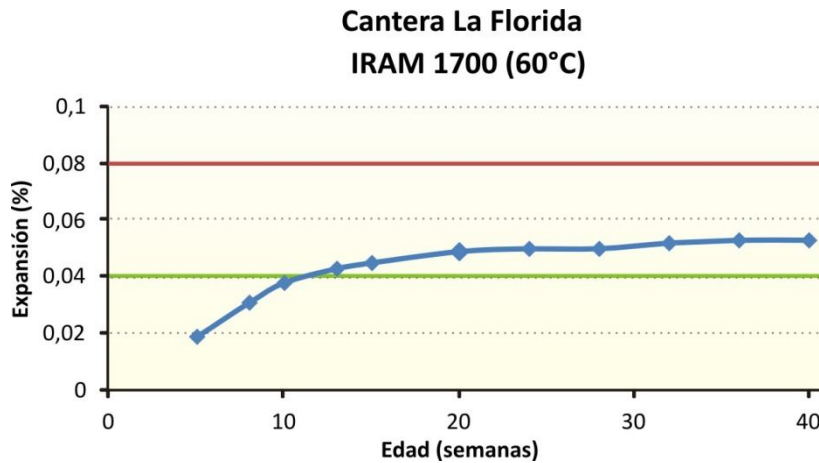
Las muestras procedentes de los acopios del material de planta, de granulometría 6-20 mm, mostraron resultados de expansión, tanto en barras de mortero como en prismas de hormigón, coherentes con el análisis petrográfico, determinándose que estos materiales no son potencialmente reactivos (Figuras 7.11 a 7.13). Por el contrario en el estudio de un frente inactivo, los ensayos físicos de RAS realizados sobre muestras del mismo, calificaron a estos materiales como potencialmente reactivos (Figuras 7.14 a 7.16) y se corresponde con los resultados del análisis petrográfico realizado en muestras de este perfil, el cual posee como constituyente potencialmente reactivo, además de cuarzo microcristalino, ópalo y calcedonia como parte de la matriz y del cemento de las rocas, cuyo porcentaje supera el límite establecido por la norma de agregado grueso, IRAM 1531 (2016).

#### 7.4.1.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)

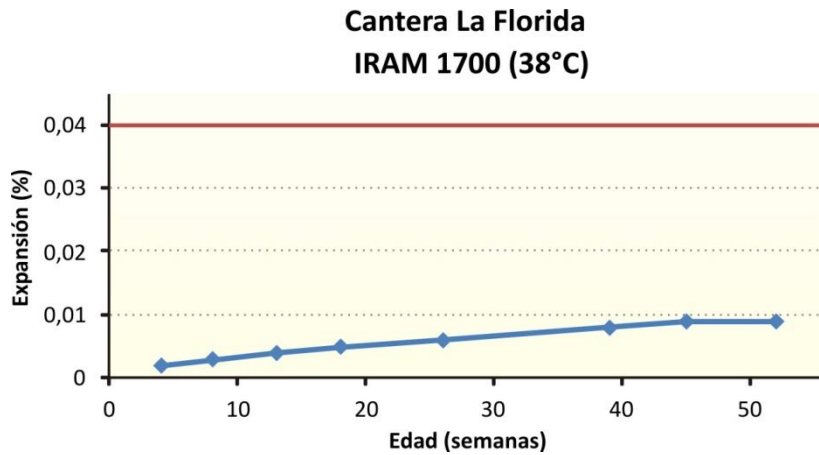
En la Figura 7.17 se observa el gráfico expansión-edad del método acelerado de la barra de mortero, en el cual el límite de 0,100% a 16 días no es superado. En las Figuras 7.18 y 7.19 se observan las curvas expansión-edad del prisma de hormigón a 60° y a 38° respectivamente. Para el ensayo a 1 año las probetas no superan el límite de 0,04%, mientras que en el prisma acelerado, este valor se supera a las 13 semanas, pero se mantiene por debajo de 0,08% al finalizar el ensayo.



**Figura 7.17:** Curva expansión-edad. La expansión a los 16 días es inferior al límite de 0,100% establecido por la norma.



**Figura 7.18:** Curva de expansión-edad del prisma acelerado. La expansión a las 13 semanas es superior al límite de 0,04% pero inferior al de 0,08% establecido por la norma.

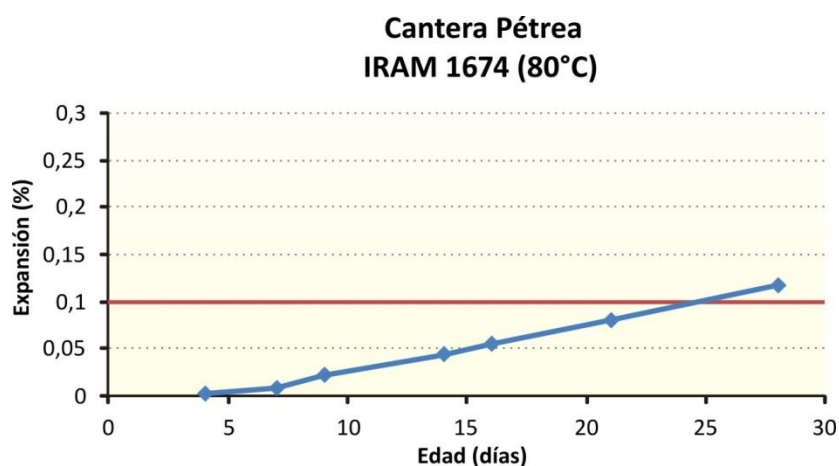


**Figura 7.19:** Curva de expansión-edad para el prisma convencional. La expansión a 1 año es muy inferior al límite de 0,04% establecido por la norma.

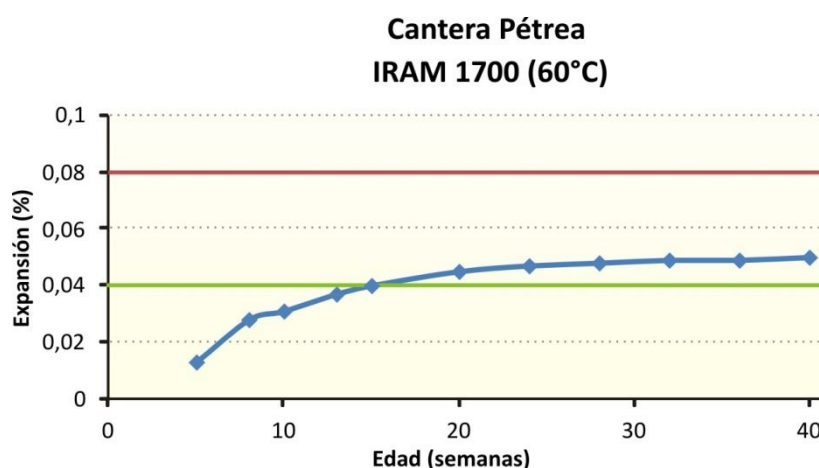


### 7.4.1.1.3. Cantera Pétrea

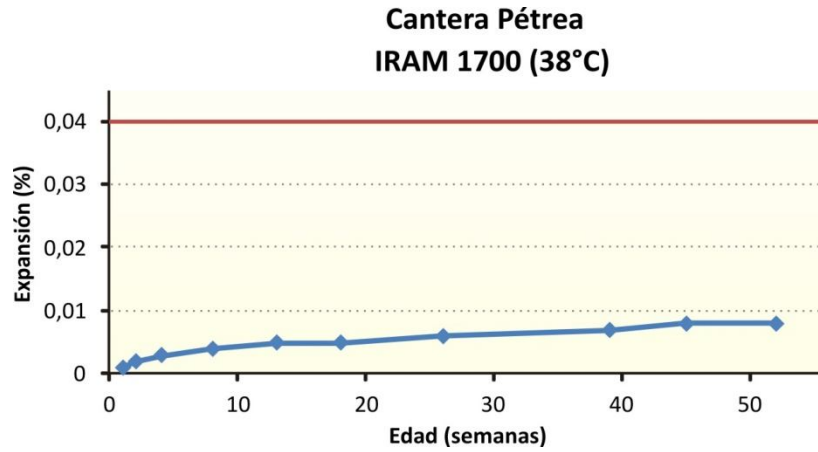
En la Figura 7.20 en el gráfico expansión-edad del método acelerado de la barra de mortero, se observa que el límite de 0,100% a 16 días no es superado. En las Figuras 7.21 y 7.22 se muestran las curvas expansión-edad del prisma de hormigón a 60° y a 38° respectivamente. En el ensayo a 1 año las probetas no superan el límite de 0,04%, con valores muy similares a cantera La Florida, mientras que en el prisma acelerado, el límite de 0,04% es superado posteriormente a las 13 semanas, pero se mantiene por debajo de 0,08% al finalizar el ensayo.



**Figura 7.20:** Curva expansión-edad. La expansión a los 16 días es inferior al límite de 0,100% establecido por la norma.



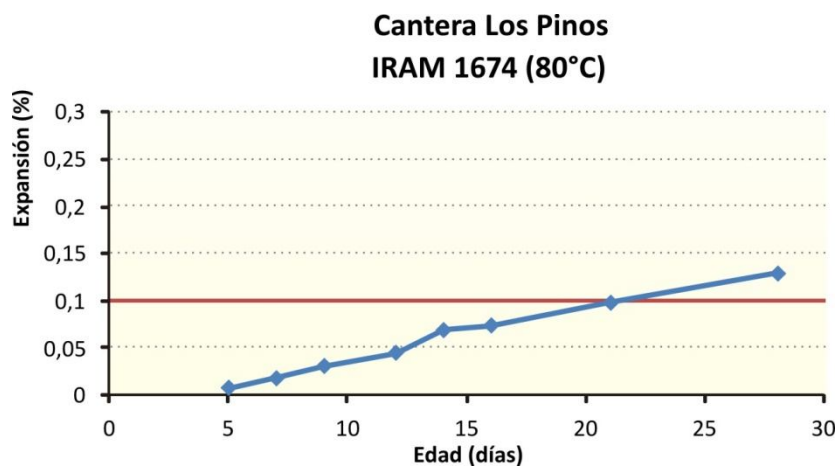
**Figura 7.21:** Curva de expansión-edad del prisma acelerado. La expansión a las 13 semanas es inferior a ambos límites (0,04% y 0,08%) establecidos por la norma.



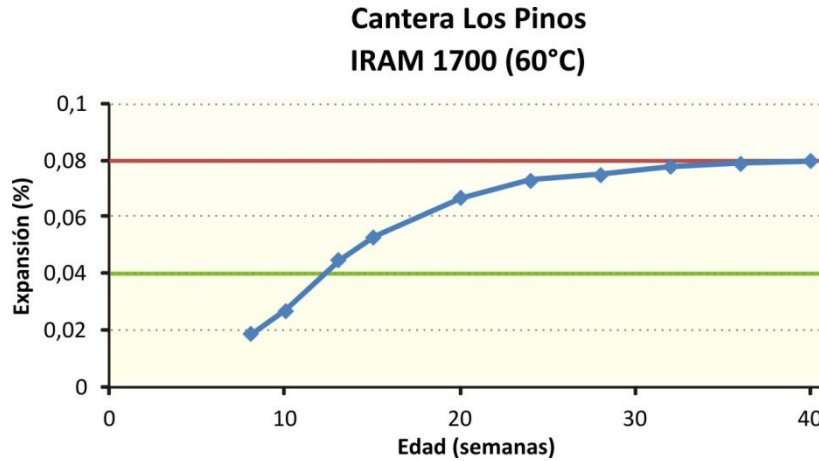
**Figura 7.22:** Curva de expansión-edad para el prisma convencional. La expansión a 1 año es muy inferior al límite de 0,04% establecido por la norma.

#### 7.4.1.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos

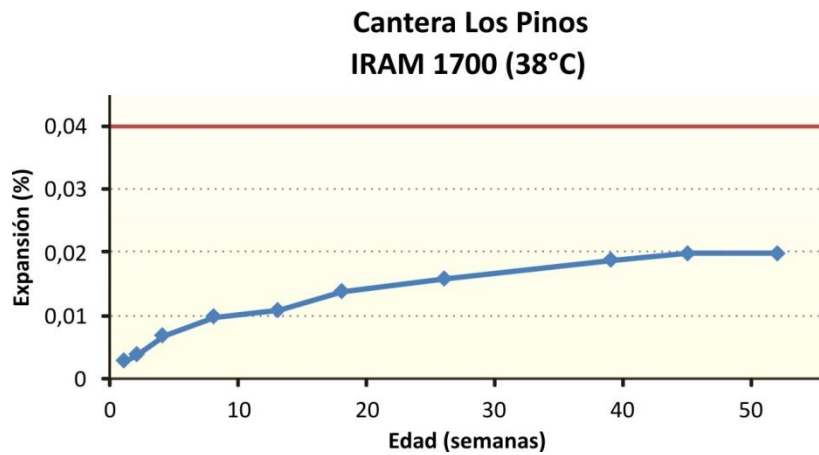
En esta cantera se colectaron muestras de roca representativas del único frente que posee este yacimiento. La Figura 7.23 corresponde al gráfico del método de la barra de mortero donde se observa que el valor de expansión a 16 días es inferior al límite de 0,100%. Las Figuras 7.24 y 7.25 representan los gráficos expansión-edad del ensayo del prisma de hormigón acelerado y convencional respectivamente. En la Figura 7.24 se observa que la expansión supera el límite de 0,04% a las 13 semanas pero se mantiene inferior al 0,08%, aunque ese valor es alcanzado al finalizar el ensayo.



**Figura 7.13:** Curva expansión-edad. La expansión a los 16 días es inferior al límite de 0,100% establecido por la norma.



**Figura 7.14:** Curva de expansión-edad del prisma acelerado. La expansión a las 13 semanas es inferior a ambos límites (0,04% y 0,08%) establecidos por la norma.



**Figura 7.15:** Curva de expansión-edad para el prisma convencional. La expansión a 1 año es inferior al límite de 0,04% establecido por la norma.

#### 7.4.2. Ensayos físicos de desgaste, densidad y absorción. Norma IRAM 1532 e IRAM 1533

Para la realización de las dosificaciones de las probetas de hormigón IRAM 1700, es necesario conocer las propiedades físicas de absorción y densidad (IRAM 1533 2002) de los agregados cuarcíticos muestreados en todas las canteras, es decir, que en base a los resultados obtenidos se establecieron las proporciones de agregado grueso y fino, cantidad cemento y agua. Para completar la caracterización física del material se determinó el desgaste Los Ángeles en muestras de las canteras del área productiva del Partido de General Pueyrredón (Minera Yaraví, La Florida y Pétrea).

En la Tabla 7.34 se muestran los valores de densidad aparente del agregado saturado superficie seca, absorción y desgaste (%) determinados sobre los agregados cuarcíticos de las distintas canteras. Los métodos de ensayo fueron descritos en el capítulo 5.

Localidad	Cantera		Densidad aparente promedio (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción promedio %	Desgaste Los Angeles
Batán- Est. Chapadmalal	Minera Yaraví	Acopio	2,53	1,55	49
		Frente 2	2,49	1,80	
	La Florida		2,52	1,80	37
	Pétrea		2,52	1,50	49,5
Balcarce	Los Pinos		2,54	1,10	----

**Tabla 7.34:** Resultados de la densidad aparente saturada superficie seca y absorción según IRAM 1533 (2002) y desgaste Los Angeles según IRAM 1532 (2000).

Los valores de densidad determinados en las muestras de cuarcita de las distintas canteras son similares entre sí, excepto para la muestra del frente 2 de cantera Minera de densidad menor al resto lo cual es coherente con el elevado contenido de matriz de composición caolinítica de las rocas de este frente.

La absorción es elevada en todas las muestras y superior a 1,5%, excepto para la muestra de cantera Los Pinos de la localidad de Balcarce cuya absorción es 1,1% probablemente debido a su textura más fina y menor contenido de matriz que las cuarcitas de la localidad de Batán.

## 7.5. DISCUSIÓN

Las rocas cuarcíticas del área de Batán son similares entre sí, distinguiéndose 3 litotipos principales: arenitas cuarzosas (con menos del 5% y entre 5-15% de matriz), vaques (> del 15% de matriz) y fangolitas, estas últimas fundamentalmente caoliníticas, con proporciones variables de illita y cuarzo. En la cantera Minera la proporción de vaques es algo mayor que en La Florida y Pétrea. Por otra parte, sólo el material muestreado en el frente inactivo de Minera fue calificado como potencialmente reactivo mediante el ensayo petrográfico y ensayos físicos de la barra de mortero y del prisma de hormigón, atribuido a la presencia de ópalo y cuarzo fuertemente tensionado y microcristalino superior al límite normativo establecido por la norma IRAM 1531 (2016).

La presencia de ópalo en estas muestras hace que se califique, a diferencia de las demás, como un agregado de reacción rápida.

Comparando los materiales del área de Batán con la única cantera estudiada en Balcarce, se puede decir que las cuarcitas de esta última zona son de granulometría más fina y poseen un porcentaje inferior de matriz siendo los vaques un litotipo prácticamente inexistente, y los niveles de arcillas son menos abundantes y de menor espesor.

En cuanto a la determinación del ángulo de extinción ondulante (AEO), a través del conteo de puntos, se determinó que sólo el material del frente reactivo de cantera Minera (frente 2) posee en promedio un 25% de clastos con AEO mayores a 25° y en la muestra de acopio de la misma cantera un 21% de los granos posee un AEO mayor a este valor. En las muestras del resto de las canteras el porcentaje promedio de granos contados con AEO superior a 25° es menor al 20%.

En cuanto el tamaño de grano, los clastos de las cuarcitas poseen un tamaño granulométrico promedio de arena media entre 250  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$ , por lo tanto sólo las que poseen alto contenido de matriz como la del frente 2 de Minera poseen una granulometría de cuarzo inferior a arena fina (125  $\mu\text{m}$ ) llegando incluso a tamaños inferiores a 62  $\mu\text{m}$ . La presencia de estas granulometrías también puede contribuir a la reactividad de la muestra tomada en este frente.

## **CAPÍTULO 8. RESULTADOS: PETROGRAFÍA Y ENSAYOS FÍSICOS EN HORMIGONES CON CUARCITA MAR DEL PLATA.**

### **8.1. INTRODUCCIÓN**

### **8.2. PRISMAS DE HORMIGÓN POST-ENSAYO. ESTEREOMICROSCOPIA, MICROSCOPIA ÓPTICA Y MEB-EDS. ASTM C 856**

#### **8.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

##### **8.2.1.1. Cantera Minera Yaraví**

##### **8.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)**

##### **8.2.1.3. Cantera Pétreo**

#### **8.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos**

### **8.3. CASOS DE ESTUDIO**

#### **8.3.1. Introducción**

#### **8.3.2. Estereomicroscopía, microscopía óptica, MEB-EDS. Norma ASTM C 856**

##### **8.3.2.1. Pavimento de hormigón: Avenida 122, ciudad de La Plata**

##### **8.3.2.2. Pavimento de hormigón: Ruta RP88, partido de General Pueyrredón**

##### **8.3.2.3. Pavimento de hormigón: Avenida Libertad, ciudad de Mar del Plata**

#### **8.3.3. Densidad y absorción de los hormigones. Norma ASTM C 642**

#### **8.3.4. Determinación de la densidad de fisuras mediante microscopía UV**

#### **8.3.5. Relación entre densidad de fisuras y absorción y densidad de los hormigones de obra**

## 8.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se centra en la petrografía del hormigón siguiendo los lineamientos de la norma de Estados Unidos ASTM C 856 (2017). En el capítulo 5 se explicó el desarrollo del método.

Se procedió al estudio de prismas de hormigón de laboratorio confeccionados con los agregados cuarcíticos de las canteras estudiadas, los cuales corresponden a las probetas ensayadas según la norma IRAM 1700 a 38°C y 60°C, analizadas en el capítulo 7 y de hormigones de obra, específicamente de pavimentos de la ciudad de La Plata y Mar del Plata confeccionados también con dicho material.

La norma ASTM C 856 establece que el hormigón debe ser analizado en primer lugar mediante estereomicroscopio y luego con microscopio óptico de polarización o petrográfico sobre secciones delgadas. Además, para complementar los estudios de microscopía óptica se recomienda la utilización de otras técnicas complementarias como microscopio de fluorescencia (luz UV), microscopio electrónico de barrido con un espectrómetro de energía dispersiva acoplado (MEB-EDS), y difracción de rayos X (DRX) para identificar los productos de neoformación. Los detalles de la aplicación de la norma se desarrollaron de forma completa en el capítulo 5.

Para el reconocimiento de materiales de neoformación en el hormigón, y de microtexturas en la pasta de cemento, relacionadas a afectaciones diversas (RAS, ataque por sulfatos, carbonatación), se utilizaron complementariamente las descripciones realizadas por St. John *et al.* (1998).

En esta norma (ASTM C 856) se establece un orden descriptivo de los elementos constituyentes del hormigón; agregado grueso y fino, interfase pasta-agregado, pasta de cemento y vacíos, cavidades de aire accidental, poros y fisuras presentes en la misma, además de sus rellenos (si los hay). La descripción de la interfase y de la pasta involucra que el petrógrafo deba conocer e identificar las fases cristalinas y amorfas que constituyen el hormigón en estado endurecido producto de la hidratación del cemento (silicatos de calcio hidratados, portlandita, entre otros) o sin hidratar (alita, belita, ferrita), u otros como ettringita y portlandita, que pueden aparecer en zonas de interfase, o relleno de los poros y huecos de la pasta (yeso, ettringita y thaumasita, productos del ataque por sulfatos, portlandita, carbonatos de calcio como calcita y



vaterita, productos de la RAS cristalinos y/o amorfos, etc.). Los productos de reacción que pueden aparecer relleno de poros y fisuras a veces se presentan en combinación con otras fases cristalinas formadas por agresiones externas, como el ataque por sulfatos (St. John *et al.*, 1998), lo que compleja el estudio de la RAS en sí misma.

En la petrografía del hormigón es fundamental el análisis de las zonas de interfase ya que éstas repercuten en la resistencia y durabilidad del hormigón. Es importante la relación del agregado con la pasta y la generación de buena interfase, que presente buena adherencia, lo cual le otorga al hormigón mayor resistencia (Giaccio y Zerbino 1994).

El reconocimiento de las partes integrales del hormigón (agregados, pasta de cemento e interfase, poros y sus rellenos) y los procesos que lo afectan dependen en gran medida de la experiencia del petrógrafo. Con estereomicroscopio se pueden describir cambios en la coloración de la pasta de cemento, característica que puede variar según los distintos sectores como en zonas de interfase o en áreas más porosas. También el color de la pasta de cemento varía según la composición del cemento portland, dependiendo si es un cemento con adiciones minerales o no y también del tipo de adición. Además, entre los procesos que afectan la pasta el más común es la carbonatación. Este proceso le otorga a la pasta de cemento una coloración más clara o incluso amarillenta. También la presencia de sulfatos produce cambios de color y coherencia de la pasta y se perciben sectores de mortero cuya pasta posee una coloración blanquecina y un brillo perlado. Los productos de la RAS se observan de distintas maneras, dependiendo si están en estado gel son incoloros o translúcidos y pueden estar fisurados o poseer superficies lisas; si están cristalizados se observan masivos, terrosos y/o poseer fisuras (St. John *et al.* 1998).

Con microscopio petrográfico la carbonatación se observa mejor con polarizadores cruzados, ya que los carbonatos tienen color de interferencia alto de tonos pastel. Los sulfatos como el yeso y la ettringita son fibrosos y con polarizadores cruzados poseen colores de interferencia de gris y blanco del primer orden, pero el yeso es más birrefringente; por otro lado la thaumasita se diferencia de la ettringita por poseer un color de interferencia amarillo-naranja de primer orden. Estos materiales pueden estar en la pasta o presentarse como relleno de poros y fisuras de la pasta de cemento y zonas de interfase. Los productos de neoformación de la RAS, con polarizadores paralelos, se

observan revistiendo poros y/o fisuras, en general en capas o bandas, aunque en ocasiones pueden rellenar los vacíos homogéneamente; son incoloros o castaños (claros u oscuros) y pueden estar fisurados o poseer hábitos fibrosos, pero con polarizadores cruzados se mantienen isótropos si son amorfos o poseer birrefringencia si son cristalinos de estructura zeolítica, con colores de interferencia gris y blanco de primer orden. Por otra parte también pueden estar carbonatados y en ese caso poseen color interferencia alto de tonos pastel característico de los carbonatos (St. John *et al.* 1998).

## **8.2. PRISMAS DE HORMIGÓN POST-ENSAYO. ESTEREOMICROSCOPIA, MICROSCOPIA ÓPTICA Y MEB-EDS. Norma ASTM C 856**

En este punto se analizan mediante estas técnicas los prismas de hormigón post-ensayo, a 60°C (ensayo acelerado) y a 38°C (ensayo convencional). Para esto, las probetas de hormigón de 7 cm x 7 cm fueron cortadas dejando superficies rugosas para ser observadas con lupa, y además se confeccionaron secciones delgadas para su estudio con microscopio petrográfico. Bajo lupa se seleccionaron pequeñas muestras para observar con MEB la morfología cristalina del material presente en los poros y determinar de manera cualitativa su composición química mediante EDS.

### **8.2.1. Área de Batán-Estación Chapadmalal**

De esta zona se realizaron barras de mortero y prismas de hormigón con los materiales de tres de las cuatro canteras relevadas (capítulos 6 y 7). De las barras de mortero (IRAM 1674 1997) sólo expandieron por encima del límite establecido (0,100%) las muestras del frente 2 (M2) de Cantera Minera, al igual que en el prisma de hormigón acelerado superando el valor de expansión de 0,08% a las 13 semanas de ensayo y de 0,04% al año en el ensayo convencional (IRAM 1700 2013). Por lo tanto, como las cuarcitas del resto de las canteras dieron valores por debajo del límite, solo se realizaron secciones delgadas de los prismas de hormigón ensayados según IRAM 1700 a 60°C y a 38°C.

El hormigón de los prismas está constituido por el agregado grueso cuarcítico que corresponde a arenitas y vaques cuarzosos de coloración rosada y rojiza, de secciones

equidimensionales cuadradas y triangulares, escasas lajas. El mortero está compuesto por arena de río (denominada arena oriental o del río Uruguay), cuarzo-feldespática, redondeada, calificada como no reactiva.

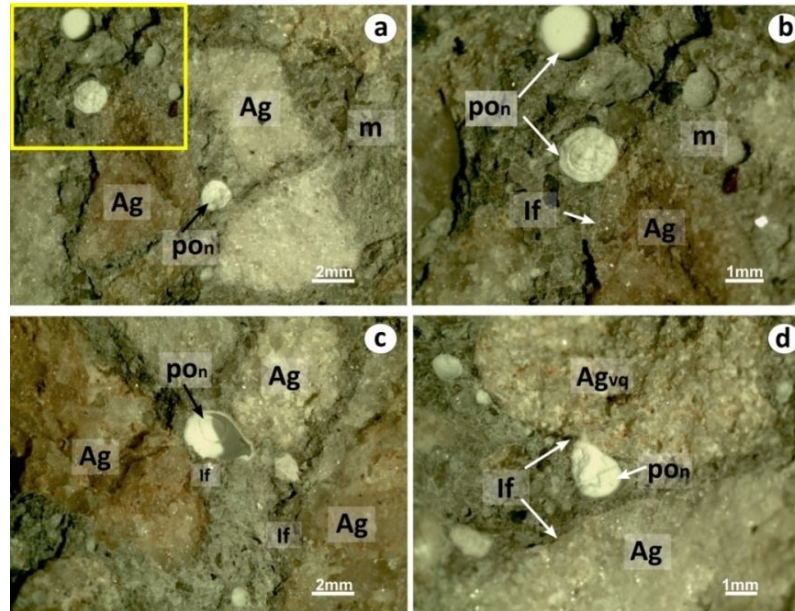
#### **8.2.1.1. Cantera Minera Yaraví**

Se analizaron petrográficamente los prismas de hormigón post-ensayo (norma IRAM 1700). Como se determinó en el capítulo 7, la muestra M1 del acopio 6-20 mm, corresponde aproximadamente a un 70% de arenitas cuarzosas con cantidades variables de matriz, 25% a vaques (más del 15% de matriz) y un 2% a fangolitas. Todas las rocas poseen un porcentaje de cuarzo tensionado inferior al límite establecido por la norma IRAM 1531. Esta muestra es calificada como no reactiva por el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674 1997) y por el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700 2013).

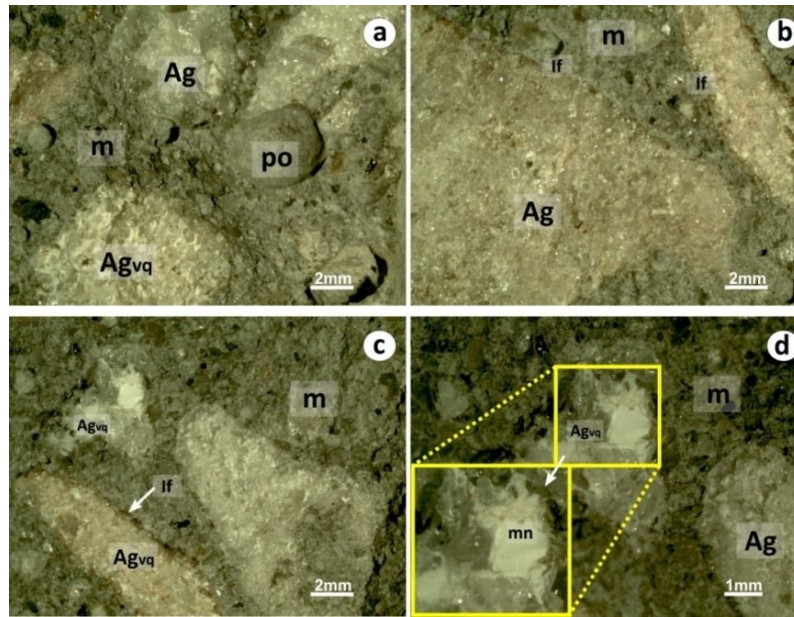
La muestra M2 (frente reactivo), está compuesta por arenitas cuarzosas con más del 5% de matriz en un 53%, 44 % de vaques y 3% de fangolitas. Se identificó ópalo cementando a los granos de cuarzo, con un contenido mayor al 1%, y el porcentaje de cuarzo tensionado supera el límite de 5% establecido por la norma IRAM 1531. Esta muestra fue calificada como potencialmente reactiva por la norma IRAM 1674 y por la norma IRAM 1700. En prismas (38°C y 60°C) confeccionados con las muestras 1 y 2 se realizaron observaciones con estereomicroscopio que se muestran en el Cuadro 8.1.

ESTEREOMICROSCOPIO					
ÁREA BATÁN-ESTACIÓN CHAPADMALAL					
CANTERA MINERA YARAVÍ					
PRISMA	AGREGADO CUARCÍTICO	INTERFASE		MORTERO (AF+PC)	
		ESTADO	POROS	ESTADO	POROS
M1 60°C (Figura 8.1)	Arenitas y vaques de secciones cuadradas y triangulares, escasas lajas	Sin fisuras, buena adherencia, carbonatada	Mayores a 1 mm con materiales de neoformación abundantes	En general en buen estado, de color gris claro, sin fisuras	Con o sin relleno, de tamaño mayor o menor a 1 mm
M1 38°C (Figura 8.2)	IDEM. Reemplazo parcial de la matriz por materiales de neoformación	Sin fisuras, buena adherencia, carbonatada	Menores a 1 mm con materiales de neoformación menos abundantes		Sin relleno, de tamaño mayor o menor a 1 mm
M2 60°C (Figura 8.3)	Arenitas con matriz y vaques rosados y rojizos. Localmente reemplazo de la matriz por productos de neoformación de color blanquecino	Sin fisuras, buena adherencia	Menores y mayores a 1 mm rellenos con productos de neoformación (abundantes)		Con o sin material de neoformación en general de tamaño menor a 1 mm
M2 38°C (Figura 8.4)			Similar, pero con materiales de neoformación menos abundantes		Con o sin relleno, de tamaño en general menor a 1 mm

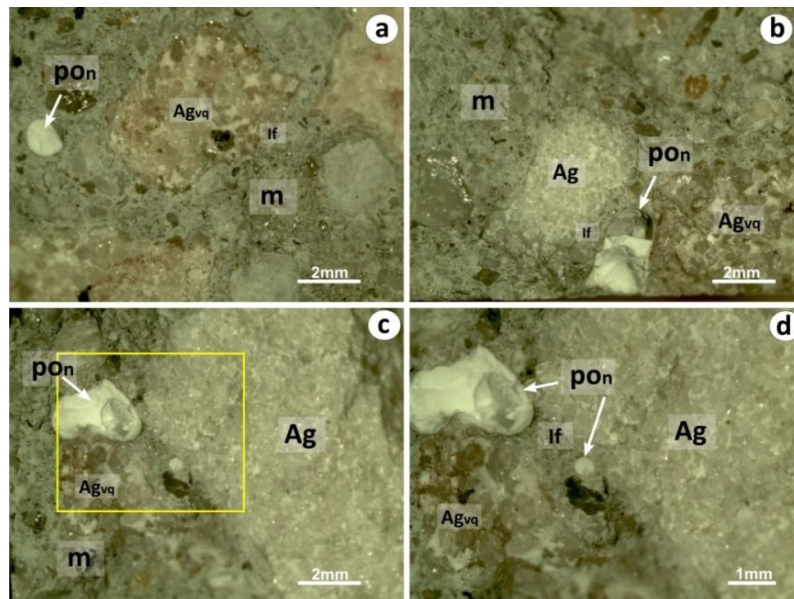
**Cuadro 8.1:** Observaciones con estereomicroscopio sobre prismas de hormigón post-ensayo. Muestra M1 y M2 de cantera Minera Yaraví. AF: agregado fino y PC: pasta de cemento.



**Figura 8.1:** Prismas curados a 60°C, M1, Cantera Minera. Cavidades de aire accidental asociadas a interfases pasta-agregado, rellenas con materiales de neoformación. **(a)** Agregado grueso cuarcítico (Ag) y poros con material de neoformación (pon) en el mortero (m). **(b)** Detalle de (a). **(b)**, **(c)** y **(d)** Interfase (If) pasta-agregado asociadas a poros con materiales de neoformación (pon). **(d)** Agregado grueso vaque (Agvq) con abundante matriz.

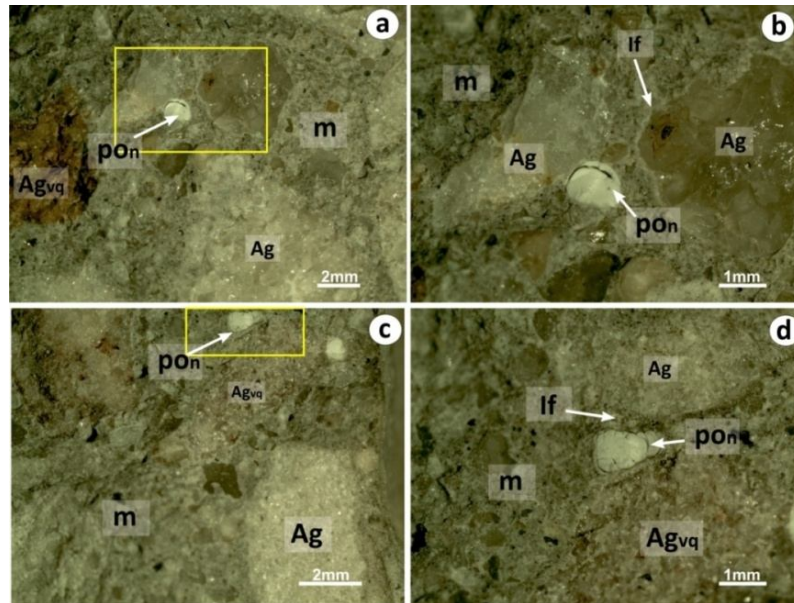


**Figura 8.2:** Prismas curados a 38°C, M1, Cantera Minera. **(a)** Agregado grueso cuarcítico sin matriz (Ag) y vaques (Agvq). Mortero (m) con poros (po) vacíos, mayores a 1 mm. **(b)** Agregado grueso (Ag), mortero e interfase (If) con buena adherencia. **(c)** y **(d)** Vaque del agregado grueso (Agvq) con matriz reemplazada por materiales de neoformación (mn).



**Figura 8.3:** Prismas curados a 60°C, M2, Cantera Minera. Poros en la interfase pasta-agregado con productos de neoformación. Agregado grueso cuarcítico (Ag) y váquico (Agvq). **(a)** y **(b)** Interfase (If) con buena adherencia; **(b)** cavidades con material de neoformación (pon) de coloración blanquecina, mortero (m). **(c)** y **(d)** Poro relleno con productos de neoformación (pon) en interfase (If); vaque de agregado grueso (Agvq); **(d)** es detalle de (c).





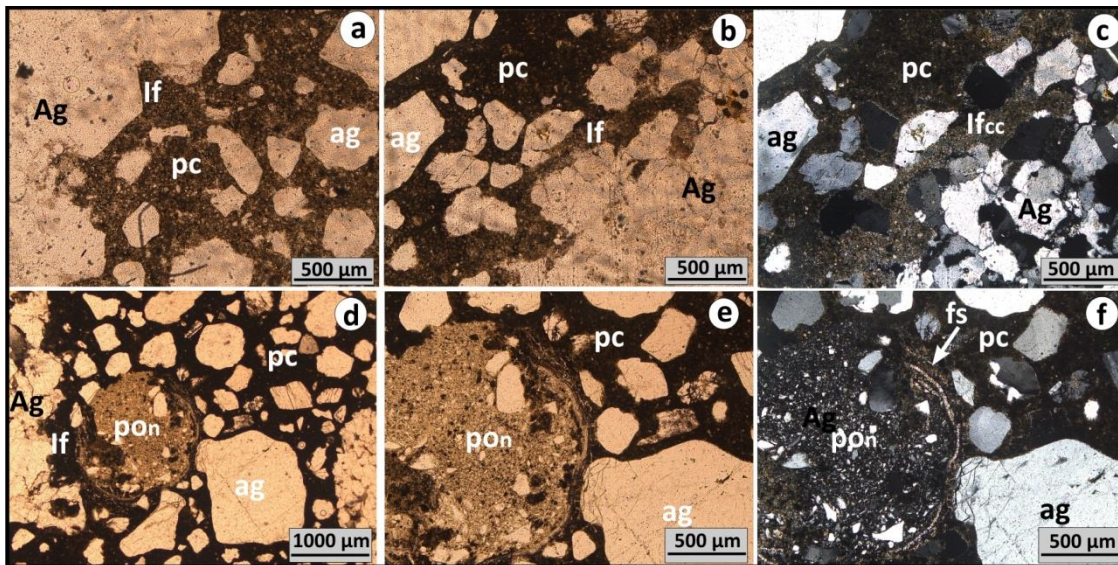
**Figura 8.4:** Prismas curados a 38°C, M2, Cantera Minera. Interfase pasta-agregado con buena adherencia, escasas cavidades rellenas con materiales de neoformación. **(a)** Agregado grueso cuarcítico (Ag) y váquico (Agvq), interfase mortero (m), poros con materiales de neoformación (pon). **(b)** Interfase (If) agregado grueso cuarcítico-pasta, poros con material de neoformación (pon). **(c)** y **(d)** Poro relleno con productos de neoformación en interfase pasta-agregado grueso váquico (Agvq).

Con microscopio petrográfico se observan con mayor detalle los cambios en el agregado, el estado de la interfase pasta-agregado y de la pasta de cemento. Además se identifican procesos de carbonatación en la interfase y pasta y las fases cristalinas y amorfas presentes en cavidades de aire accidental y en algunas interfases.

En el prisma de la muestra M1, curado a 60°C los agregados con matriz sufren una sustitución parcial por productos de reacción, que ocupan poros de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ . La interfase pasta-agregado grueso se observa en buen estado, sin fisuras, con buena adherencia y, en algunos casos, esta carbonatada (Figura 8.5a, b y c). En general la interfase que presenta mayor adherencia, se observa en cuarcitas de borde más irregular, donde la pasta penetra en los espacios intergranulares más superficiales de la roca, pero además, es común observar el desprendimiento de granos de cuarzo en contacto con la pasta y una invasión parcial de la misma hacia el interior del agregado (Figura 8.5b). En algunas zonas de interfase se observan poros de sección circular y tamaño variable (0,5-2 mm), revestidos por finas capas de material amorfo y carbonatado hacia el interior (Figura 8.5d, e y f). En la Figura 8.5e-f se aprecian microfisuras muy finas en la pasta de cemento alrededor del poro, además de partículas

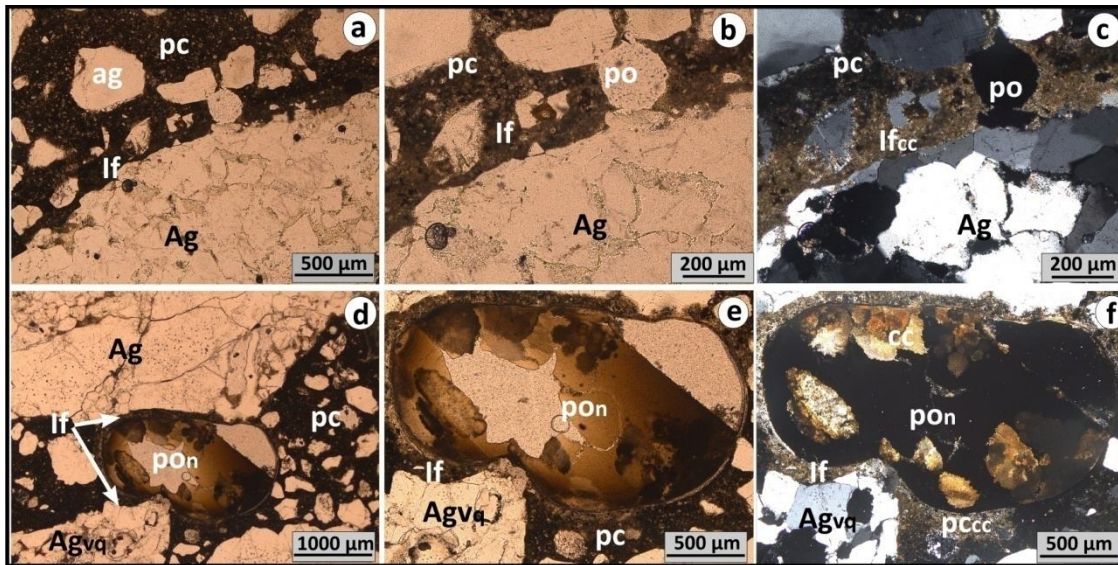
finas de cuarzo en su interior. Es de destacar que no se observan fisuras que afecten la interfase y el mortero del hormigón.

En el prisma curado a 38°C se observaron similares características que en el anterior. Muchos poros en la interfase pasta-agregado grueso se encuentran vacíos (Figura 8.6a-b) y la pasta en este sector está carbonatada (Figura 8.6c). La pasta de cemento se halla en buen estado y sin fisuras, se destacan partículas de cemento (alita) sin hidratar distribuidas uniformemente. En zonas de interfase pasta-agregado grueso se identifican cavidades de hasta 2 mm que, en algunos casos, involucran a más de una interfase (Figura 8.6d), las cuales pueden estar rellenas por productos de reacción color castaño cuando son vistos con polarizadores paralelos (Figura 8.6e) e isotropos, en parte carbonatados con colores de interferencia altos cuando es observado con polarizadores cruzados; en torno al poro, la pasta también puede estar carbonatada (Figura 8.6f). También se identificaron productos de reacción reemplazando la matriz en intersticios del agregado cuarcítico.



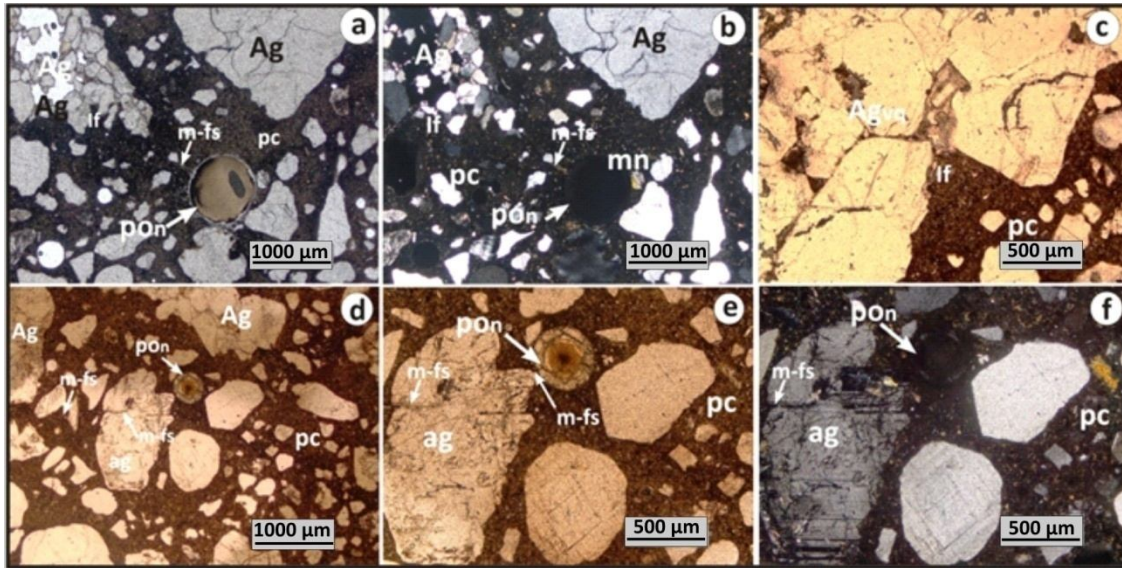
**Figura 8.5:** Prisma post-ensayo curado a 60°C (M1): Agregado grueso cuarcítico (Ag), fino (ag), interfase (If), carbonatada (Ifcc), pasta de cemento (pc), poro con material de neoformación (pon), fisuras (fs). **(a)** Interfase pasta-agregado. **(b)-(c)** Interfase pasta-agregado cuarcítico, parcialmente carbonatada. **(d)** Poro entre dos interfaces; **(e)-(f)** detalle del poro (1,5 mm) con productos de neoformación. Fotomicrografías (a)-(b) y (d)-(e) con polarizadores paralelos (PP); (c) y (f) con polarizadores cruzados (PC).





**Figura 8.6:** Prisma post-ensayo curado a 38°C (M1): Agregado grueso cuarcítico (Ag), váquico (Agvq) fino (ag), interfase (lf), carbonatada (lfcc), pasta de cemento (pc), poro sin relleno (po), con material de neoformación (pon). **(a)** Interfase pasta-agregado con buena adherencia y con un poro sin relleno. **(b)-(c)** Detalle de la interfase que con polarizadores cruzados se observa carbonatada. **(d)** Cavity (> 1 mm) con material de reacción castaño, entre dos agregados gruesos. **(e)-(f)** Detalle del mismo poro, que con polarizadores cruzados el material neoformado se observa parcialmente carbonatado. Fotomicrografías (a-b) y (d-e) con PP; (c) y (f) con PC.

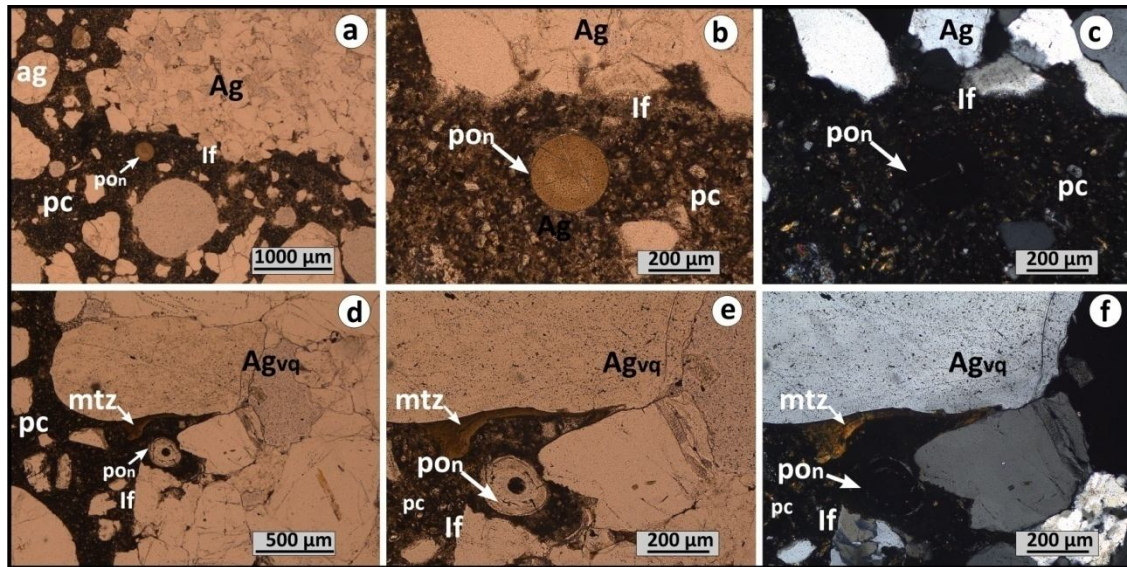
Con microscopio petrográfico el prisma de hormigón de la muestra M2, curado a 60°C, se observa en buen estado. Es de destacar que en el mortero hay poros de sección circular menores en tamaño que en los anteriores prismas, por lo general inferiores a 1 mm. Estos poros se encuentran rellenos con productos de reacción castaños o incoloros vistos con polarizadores paralelos e isótropos con polarizadores cruzados (Figura 8.7a-b y d-f). En escasos sectores se identifican microfisuras que se originan en un agregado grueso cuarcítico, por lo general con abundante matriz, y culminan en un poro con productos de reacción. Estas fisuras son apenas visibles en la pasta de cemento, ya que poseen un espesor inferior a los 10 μm y poco contraste con la misma (Figura 8.7d-f). La interfase pasta-agregado se observa en buen estado y con buena adherencia, sin carbonatación. La pasta de cemento penetra hacia el interior del agregado grueso por la superficie de los poros en contacto con el mortero (Figura 8.7c).



**Figura 8.7:** Prisma post-ensayo curado a 60°C (M2): Agregado grueso cuarcítico (Ag), váquico (Agvq), fino (ag), interfase (If), pasta de cemento (pc), poro con material de neoformación (pon), microfisura (m-fs). **(a)-(b)** Poro relleno por material de reacción; presenta una microfisura que atraviesa la pasta y que proviene de un agregado cuarcítico. Con PC el material del poro es isótropo. **(c)** Interfase con buena adherencia. **(d)** Micro poro con material de reacción incoloro con fisuras y similar a (a); microfisura que atraviesa el mortero. **(e)-(f)** Detalle del poro que con PC el producto de reacción se mantiene isótropo. Fotomicrografías (a), (c), (d)-(e) con PP; (b) y (f) con PC.

En el prisma curado a 38° C, la interfase pasta-agregado grueso, presenta buena adherencia y las cavidades están rellenas con productos de reacción, pero no son tan abundantes como en el prisma anterior. Estos poros son de sección circular e inferiores a 500 μm (Figura 8.8a-c). Es común encontrar productos de reacción reemplazando el material de la matriz del agregado grueso (cuarcitas con más del 5% de matriz y vaques) y parte de la pasta de cemento rellorando intersticios del mismo, junto a los productos de neoformación, o en los sectores más superficiales del agregado, propiciando una mayor adherencia con la pasta (Figura 8.8d-f). En general la pasta de cemento, es de color castaño oscuro, con áreas más claras y abundantes partículas de alita (cemento sin hidratar); no presenta microfisuras de relevancia ni en espesor ni en extensión (Figura 8.8a).





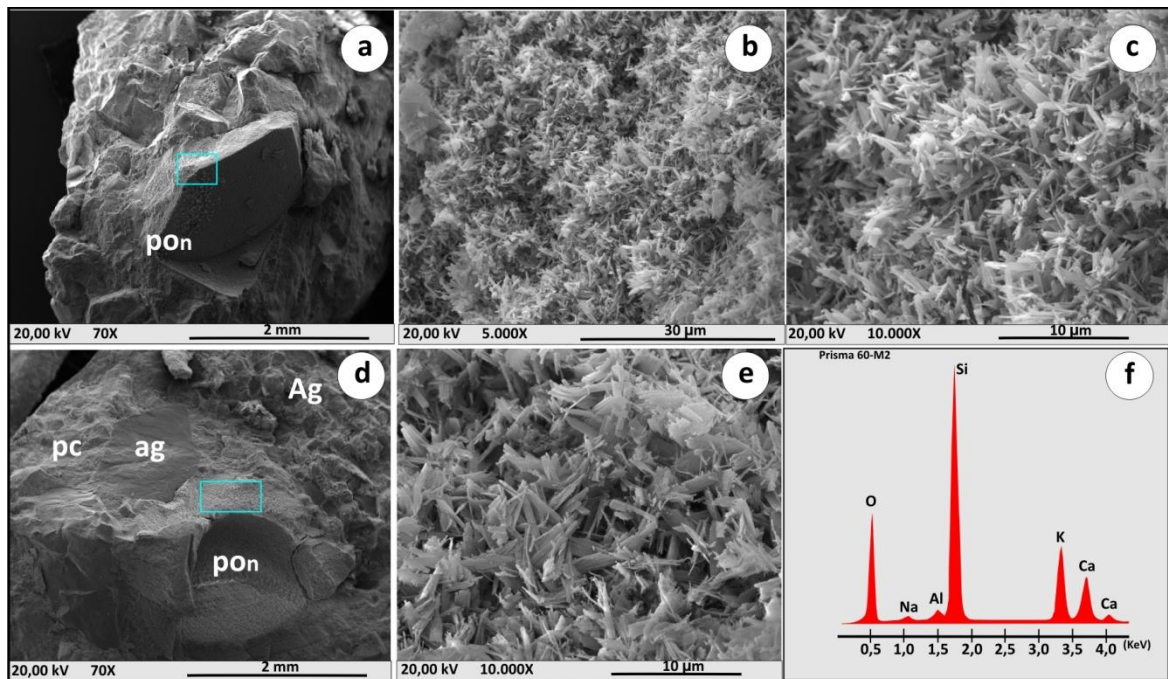
**Figura 8.8:** Prisma post-ensayo curado a 38°C (M2): Agregado grueso cuarcítico (Ag), váquico (Agvq), fino (ag), interfase (If), pasta de cemento (pc), poro con material de neoformación (pon). **(a)** Agregado y mortero con buena adherencia, poro relleno con productos de reacción. **(b)-(c)** Detalle de la interfase y del poro cuyo material es color castaño y con pequeñas fisuras. Con PC el producto de reacción se mantiene isótropo. **(d)-(f)** Poro con material de reacción en el intersticio de un agregado, en la zona de interfase. **(e)** Detalle del poro; el producto de reacción es incoloro, con fisuras y se mantiene isótropo en con PC. Fotomicrografías (a)-(b), (d)-(e) con PP; (c) y (f) con PC.

Los hormigones confeccionados con la M2 del frente reactivo se analizaron mediante (MEB-EDS).

En general, en los prismas ensayados mediante el método acelerado (IRAM 1700 a 60°C) se identifica un mayor número de poros con productos de neoformación que los prismas ensayados a 38°C. Además, los confeccionados con la muestra M2 del frente reactivo, poseen mayor cantidad de materiales de neoformación en poros de las zonas de interfase, probablemente se ubique en estas zonas porque los productos de reacción generados en los sectores de la roca que contienen ópalo se transportan muy poca distancia desde su lugar de origen, ya sea quedando dentro del agregado, en sus poros o en los poros más próximos, en la zona de interfase. A su vez, en esta muestra los poros son de menor tamaño (< 500 µm) que en los hormigones confeccionados con la muestra M1 (> a 1mm), esto es atribuido a la incorporación de un aditivo químico (superplastificante) a la mezcla. Es de destacar que los productos de reacción se ubican solo en sectores de interacción del agregado cuarcítico con la pasta de cemento y/o

incluso en el interior del agregado cuarcítico con mayor porosidad, sin generar fisuras en el mortero.

Para el estudio con MEB, se seleccionaron bajo lupa binocular pequeñas muestras de hormigón de un prisma ensayado a 60°C. Como se observa en la Figura 8.9a y d se identifican poros con materiales de reacción que desarrollan fibras que se agrupan formando prismas cortos o estructuras laminares (Figura 9.8b, c y e). El análisis composicional de estas fibras muestra un pico elevado de Si, acompañado por picos de K y Ca, y en menor medida de Al y Na; esta composición coincide con la de los productos de la RAS mencionados en la bibliografía (Helmuth *et al.* 1993; Maiza *et al.* 1992; Marfil y Maiza 2001). En este caso el pico de K podría estar relacionado a la composición del cemento utilizado (de alto álcali, principalmente con elevado contenido de K).



**Figura 8.9:** Muestras de hormigón post-ensayo curado a 60°C vistas con MEB y analizadas con EDS. **(a)** Parte de una cavidad de aire accidental rellena por productos de neoformación ( $po_n$ ). **(b)** Morfología fibrosa del material de neoformación. **(c)** Mismo sector que (b) con más detalle. **(d)** Cavidad de aire accidental situada en la interfase pasta-agregado grueso cuarcítico (Ag), relleno por material de neoformación; también se identifica un agregado fino (ag) y la pasta de cemento (pc). **(e)** Detalle de (d): Morfología del producto de neoformación y **(f)** análisis composicional (EDS) del mismo.

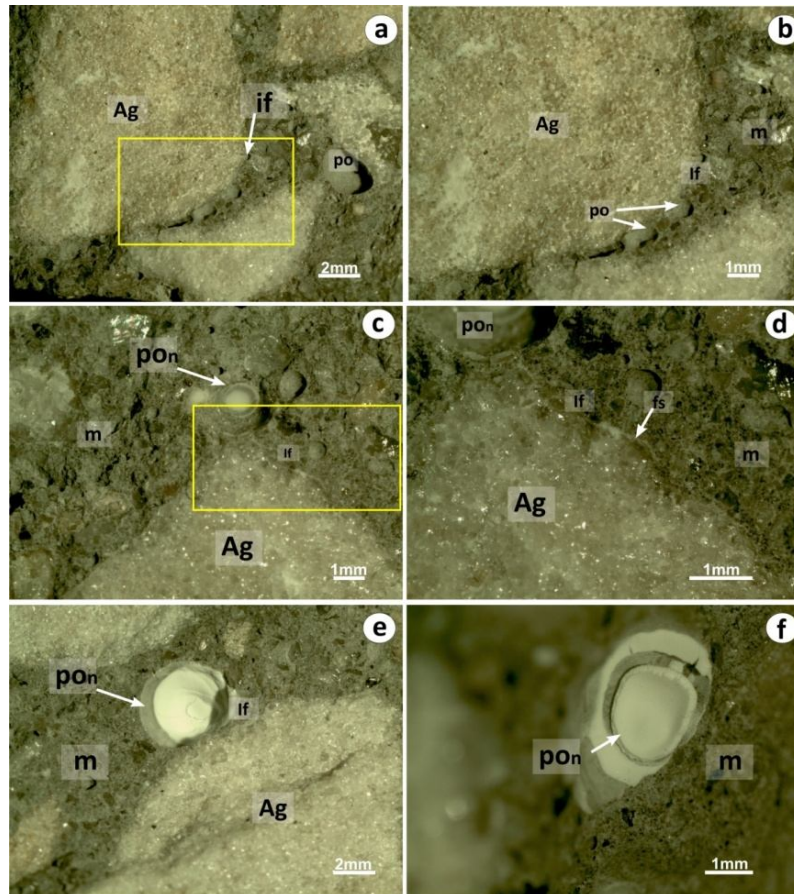
### 8.2.1.2. Cantera La Florida (ex - Los Curros)

Como se detalló en el capítulo 7, la muestra de esta cantera está compuesta aproximadamente por 90% de arenitas cuarzosas con contenido variable de matriz y 10% de vaques, calificada como no reactiva por las normas IRAM 1674 (1997) y 1700 (2013). Los prismas fueron analizados con estereomicroscopio y microscopio petrográfico. En el Cuadro 8.2 se detallan las observaciones realizadas con estereomicroscopio sobre los prismas de hormigón ensayados a 60°C y 38°C (prismas post-ensayo).

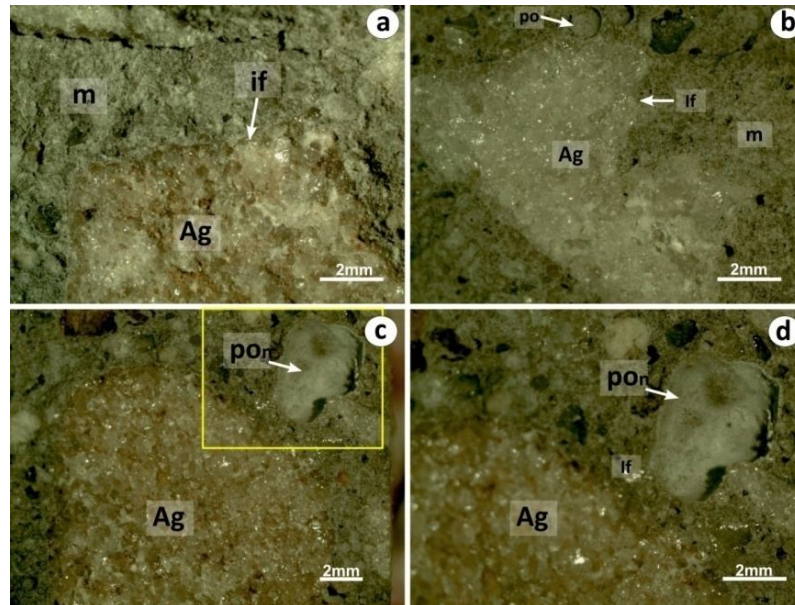
ESTEREOMICROSCOPIO					
ÁREA BATÁN-ESTACIÓN CHAPADMALAL					
CANTERA LA FLORIDA					
PRISMA	AGREGADO CUARCÍTICO	INTERFASE		MORTERO (AF+PC)	
		ESTADO	POROS	ESTADO	POROS
60° C (Figura 8.10)	Arenitas y vaques de bordes irregulares, rugosos, secciones cuadradas y triangulares, escasas lajosas	Con buena adherencia, escasas fisuras con relleno	En general vacíos, escasos con productos de neoformación (mayor y menor a 1 mm)	En buen estado, color gris claro, sin fisuras	Vacíos, escasos con productos de neoformación (mayor y menor a 1 mm)
38° C (Figura 8.11)		Con buena adherencia, sin fisuras	Sin relleno o con una fina película de materiales de neoformación (mayor y menor a 1 mm)		En general sin relleno (mayor y menor a 1 mm)

**Cuadro 8.2:** Observaciones con estereomicroscopio sobre prismas de hormigón post-ensayo confeccionados con la muestra de cantera La Florida. AF: agregado fino y PC: pasta de cemento.





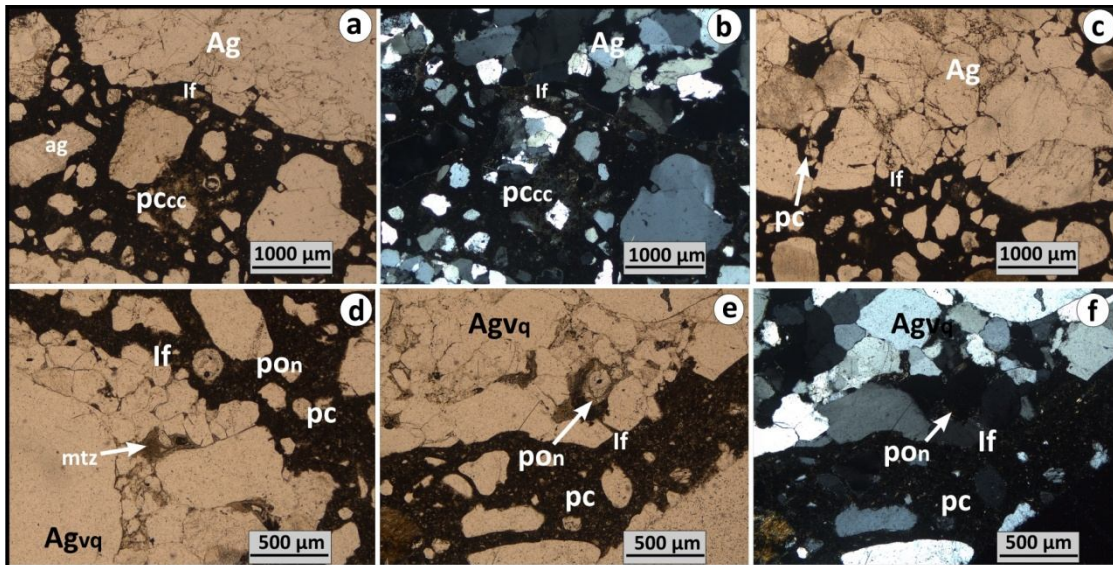
**Figura 8.10:** Hormigones de prismas ensayados a 60°C de cantera La Florida vistos con estereomicroscopio. Agregado grueso cuarcítico (Ag), interfase (If), mortero (m), cavidades de aire accidental (po), o con materiales de neoformación (pon), fisuras (fs). **(a-b)** Interfase y mortero con abundantes poros sin relleno. **(c-d)** Interfase con una fisura rellena por material de neoformación translúcido y/o blanquecino que culmina en un poro parcialmente relleno por el mismo material. **(e)** Cavidades en zona de interfase y **(f)** aisladas en el mortero, ambas rellenas por productos de neoformación.



**Figura 8.11:** Hormigones de prismas curados a 38°C de Cantera La Florida visto con estereomicroscopio. Agregado grueso cuarcítico (Ag), interfase (If), mortero (m), poros o cavidades con materiales de neoformación (pon). **(a-b)** Interfase pasta-agregado con buena adherencia. **(c-d)** Cavidad de aire accidental revestido con materiales de neoformación.

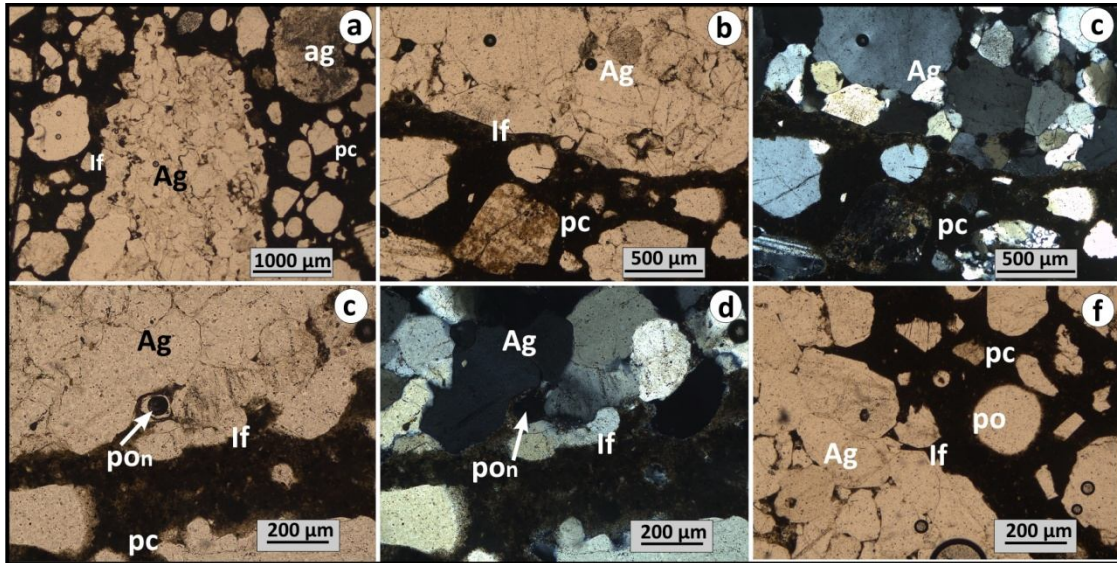
Con microscopio petrográfico se observa que las zonas de interfase pasta-agregado del prisma ensayado a 60°C confeccionado con la muestra de cantera La Florida, presentan buena adherencia y están parcialmente carbonatadas, al igual que algunos sectores del mortero (Figura 8.12a-b). En agregados de mayor tamaño de grano y más porosos la pasta de cemento ocupa los espacios intersticiales superficiales (Figura 8.12c) y, en algunos agregados cuarcíticos con matriz (vaques), el material se encuentra reemplazado por productos de reacción en zonas próximas a la interfase (Figura 8.12d-f).





**Figura 8.12:** Prisma post-ensayo curado a 60°C (LF): Agregado grueso cuarcítico (Ag), váquico (Agvq), fino (ag), interfase (lf), pasta de cemento (pc), carbonatada (pccc), poro con material de neoformación (pon). **(a)-(b)** Mortero e interfase con buena adherencia; con PC la pasta de cemento se observa parcialmente carbonatada. **(c)** Agregado grueso con pasta de cemento relleno de los intersticios de la misma roca. **(d)** y **(e)** Agregado grueso váquico con material intersticial reemplazado por productos de reacción; interfase de buena adherencia. Fotomicrografías (a), (c), (d)-(e) con PP; (b) y (f) con PC.

En el prisma de hormigón ensayado a 38°C se observa la pasta de cemento con una coloración oscura, compacta y la interfase pasta-agregado presenta muy buena adherencia (Figura 8.13a-f), donde se identifican poros de sección circular, de tamaño muy pequeño (50 μm -200 μm), que por lo general se encuentran revestidos por una fina película de material incoloro con polarizadores paralelos y con baja birrefringencia observado con polarizadores cruzados. A veces estos poros están asociados a la zona de interfase, donde la pasta invade los intersticios del agregado cuarcítico (Figura 8.13d-e).



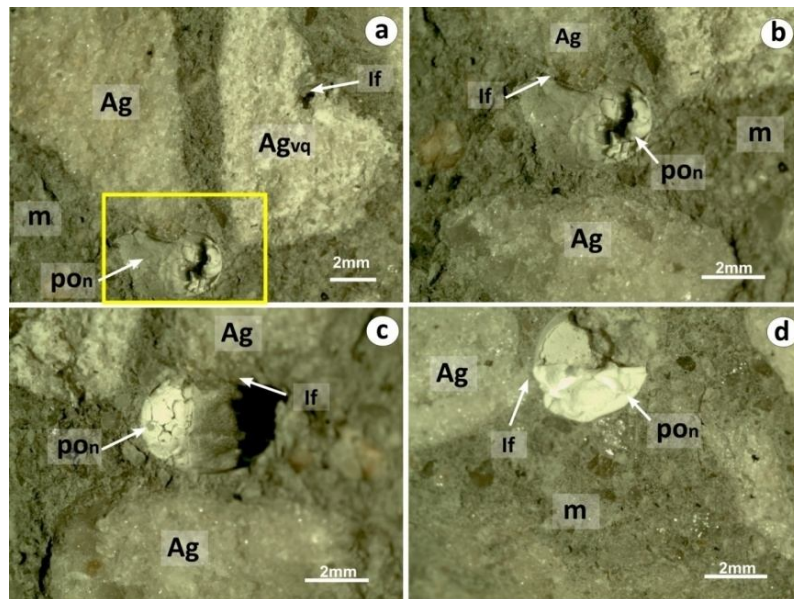
**Figura 8.13:** Fotomicrografías de las secciones delgadas del prisma curado a 38°C (LF): Agregado grueso cuarcítico (Ag), fino (ag), interfase pasta-agregado (If), pasta de cemento (pc), poro con material de neoformación (pon). (a) Agregado cuarcítico de tamaño de grano fino, interfase con buena adherencia y pasta de cemento oscura. (b) Agregado cuarcítico de mayor tamaño de grano, zona de interfase con buena adherencia. (c)-(d) Interfase pasta-agregado grueso, donde la pasta de cemento penetra en los poros del agregado y se identifica además un micro poro con material de neoformación. Fotomicrografías (a) y (c) con PP; (b) y (d) con PC.

### 8.2.1.3. Cantera Pétreá

Como se analizó en el capítulo 7 la muestra de esta cantera está constituida por un 90% de arenitas cuarzosas con cantidades variables de matriz y 10 % de vaques. El porcentaje de cuarzo tensionado y/o microcristalino es menor al límite establecido por la norma IRAM 1531 (2013), y se califica como no reactiva en el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) y en el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2016). Los prismas fueron analizados con lupa binocular y microscopio petrográfico. Las observaciones realizadas con lupa binocular sobre los prismas post-ensayo se muestran en el Cuadro 8.3.

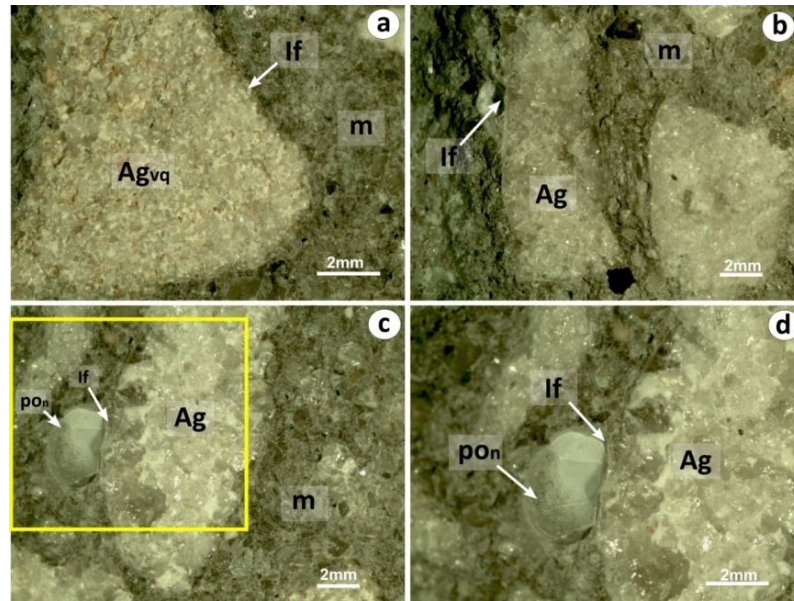
ESTEREOMICROSCOPIO					
ÁREA BATÁN-ESTACIÓN CHAPADMALAL					
CANTERA PÉTREA					
PRISMA	AGREGADO CUARCÍTICO	INTERFASE		MORTERO (AF+PC)	
		ESTADO	POROS	ESTADO	POROS
60°C (Figura 8.14)	Arenitas y vaques de bordes irregulares, rugosos, secciones cuadradas y triangulares, escasas lajosas. Reemplazo de la matriz de la roca por productos de neoformación	En buen estado, sin fisuras y con buena adherencia. La interfase con los vaques es más irregular; hay desperndimientos de granos de cuarzo	Vacios o con productos de neoformación fisurados (mayor y menor a 1 mm)	En buen estado, color gris oscuro, sin fisuras	Sin rellenos, de tamaño mayor y menor a 1 mm
38°C (Figura 8.15)			Los productos de relleno son menos abundantes y aparecen como finos revestimientos (mayor y menor a 1 mm)		Vacios de tamaño mayor y menor a 1 mm

**Cuadro 8.3.** Observaciones con estereomicroscopio sobre prismas de hormigón post-ensayo confeccionados con la muestra de cantera PétreA. AF: agregado fino y PC: pasta de cemento.



**Figura 8.14:** Hormigones de prismas 1700, curados a 60°C de Cantera PétreA vistos con estereomicroscopio. Interfase pasta-agregado con buena adherencia. Agregado grueso cuarcítico (Ag) y váquico (Agvq), interfase (If), mortero (m), cavidades de aire accidental con materiales de neoformación (pon). **(a)** Poro relleno parcialmente con material de reacción. **(b)** Detalle de (a) donde el producto de neoformación se presenta con fisuras. **(c-d)** Cavidades de aire accidental con productos de neoformación.

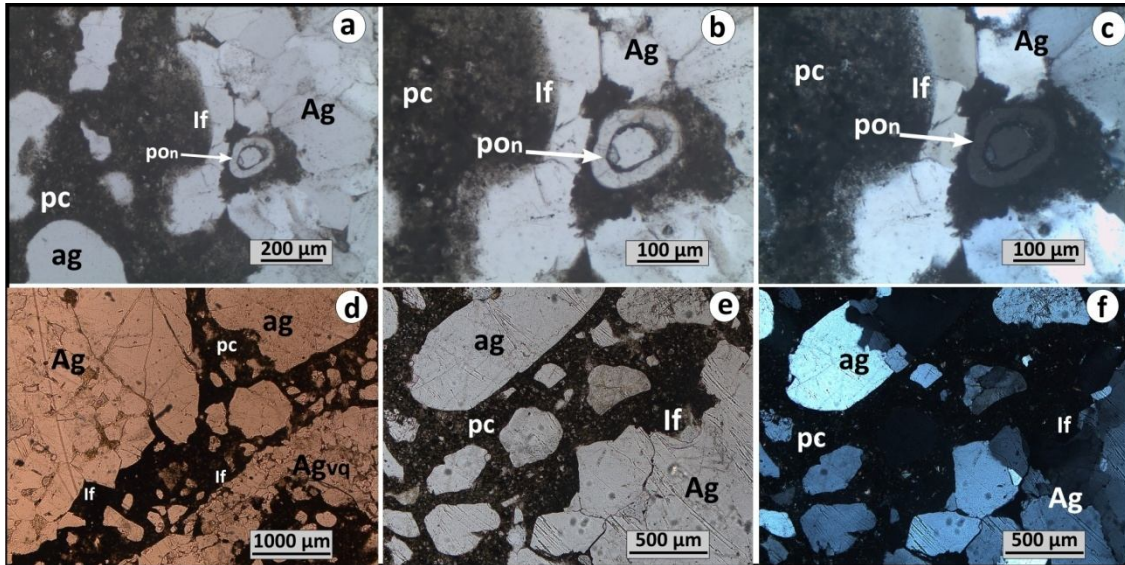




**Figura 8.15:** Hormigones de prismas IRAM 1700 curados a 38°C de Cantera Petra vistos con estereomicroscopio. Interfase pasta-agregado con buena adherencia. Agregado grueso cuarcítico (Ag) y váquico (Agvq), interfase (If), mortero (m), cavidades con materiales de neoformación (pon). **(a-b)** Agregado grueso váquico y cuarcítico con buena adherencia con el mortero. **(c-d)** Agregados cuarcíticos en cuya interfase se observa una cavidad recubierta por una fina capa de producto de neoformación.

Con microscopio petrográfico, el hormigón curado a 60°C se observa en buen estado. Las zonas de interfase tienen buena adherencia, sin fisuras al igual que la pasta de cemento. La pasta invade los intersticios expuestos de la roca, donde también se identifican microporos con material de neoformación, incoloros y con pequeñas fisuras (observado con polarizadores paralelos), e isótropos (con polarizadores cruzados) (Figura 8.16a-c).

El hormigón del prisma curado a 38°C se observa en buen estado, sin carbonatación ni fisuras. La interfase presenta buena adherencia, con coloración más oscura que el resto de la pasta. Se observan partículas de cemento sin hidratar (alita) homogéneamente distribuidas en la pasta (Figura 8.16e-f).



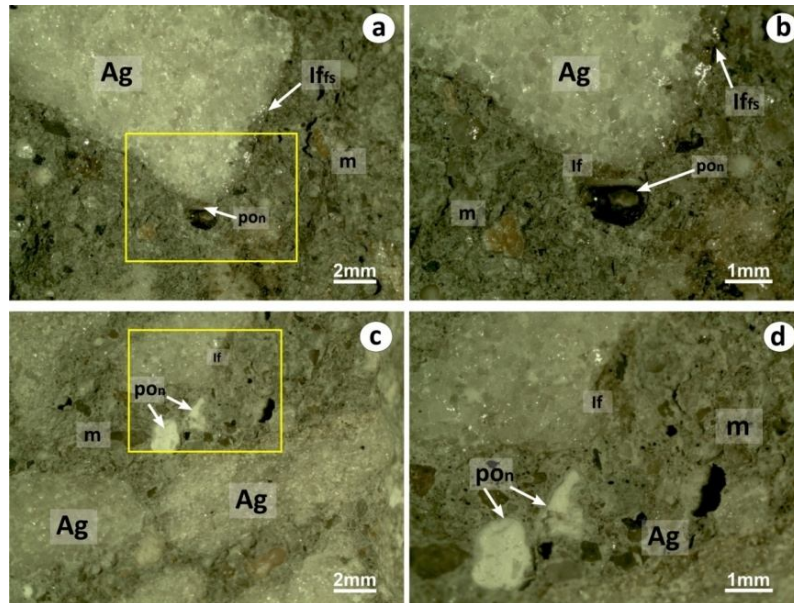
**Figura 8.16:** Fotomicrografías de las secciones delgadas del prisma curado a 60°C (a-c) y a 38°C (d-f), (CP): Agregado grueso cuarcítico (Ag), fino (ag), interfase pasta agregado (If), pasta de cemento (pc), poro con material de neoformación (pon). **(a-b)** Pasta de cemento que invade los intersticios del agregado; poro relleno con productos de reacción incoloro y con fisuras. **(c)** Misma imagen que (b). El material de reacción es isótropo. **(d-f)** Interfase y pasta de cemento con buena adherencia y en buen estado. Fotomicrografías (a) (b), (d) y (e) con PP; (c) y (f) con PC.

### 8.2.2. Área de Balcarce. Cantera Los Pinos

En el capítulo 7 se determinó que el agregado proveniente de esta cantera no es reactivo, ya que no posee ópalo-calcedonia y el porcentaje de cuarzo fuertemente tensionado y microcristalino es inferior al límite establecido por la norma IRAM 1531. Sin embargo, cabe destacar que en el método del prisma (IRAM 1700 a 60°C) la expansión no sobrepasa el valor máximo de 0,08% establecido por la norma IRAM 1700 (2016) para agregados con cuarzo tensionado pero si presenta mayores valores de expansión que los prismas confeccionados con M1 de cantera Minera y con las muestras de cantera La Florida y Pétreo. A continuación se describen las características de los hormigones observados con estereomicroscopio (Cuadro 8.4) y microscopio petrográfico.

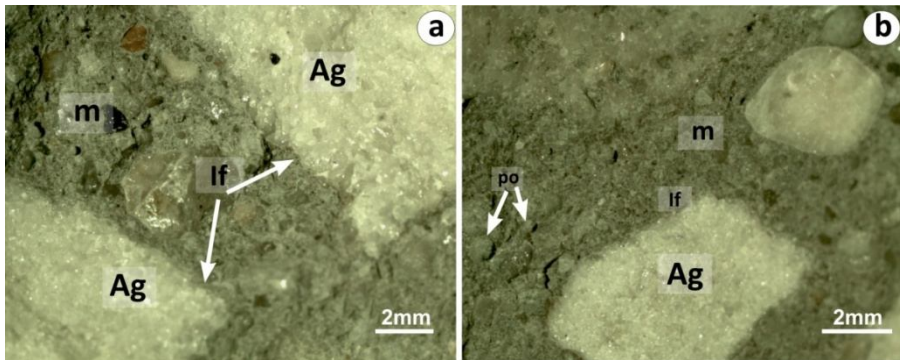
ESTEREOMICROSCOPIO					
ÁREA DE BALCARCE					
CANTERA LOS PINOS					
PRISMA	AGREGADO CUARCÍTICO	INTERFASE		MORTERO (AF+PC)	
		ESTADO	POROS	ESTADO	POROS
60°C (Figura 8.17)	Arenitas con escasa matriz, secciones cuadradas y triangulares, escasas lajas	En buen estado, con buena adherencia. Escasas fisuras rellenas por un material incoloro con aspecto de gel	Sin relleno o con productos de neoformación incoloros y/o blanquecinos (mayor y menor a 1 mm)	En buen estado, color gris claro, sin fisuras	Sin rellenos, de tamaño mayor y menor a 1 mm
38°C (Figura 8.18)		Con buena adherencia, sin fisuras	Los productos de relleno son menos abundantes, aparecen en finos revestimientos (mayor y menor a 1 mm)		Sin relleno, de tamaño mayor y menor a 1 mm

**Cuadro 8.4:** Observaciones con estereomicroscopio de los prismas de hormigón post-ensayo confeccionados con la muestra de cantera Los Pinos. AF: agregado fino y PC: pasta de cemento.



**Figura 8.17:** Hormigón de prismas IRAM 1700 a 60°C de cantera Los Pinos vistos con estereomicroscopio. Interfase pasta-agregado con muy buena adherencia. Agregado grueso cuarcítico (Ag), interfase (If), mortero (m), cavidades con materiales de neoformación (pon). **(a)** Poro relleno parcialmente con material de neoformación incoloro, translúcido en la zona de interfase. **(b)** Detalle de (a) donde el producto de neoformación tiene aspecto de gel. **(c)** Poros con productos de reacción en zonas de interfase. **(d)** Detalle de (c).





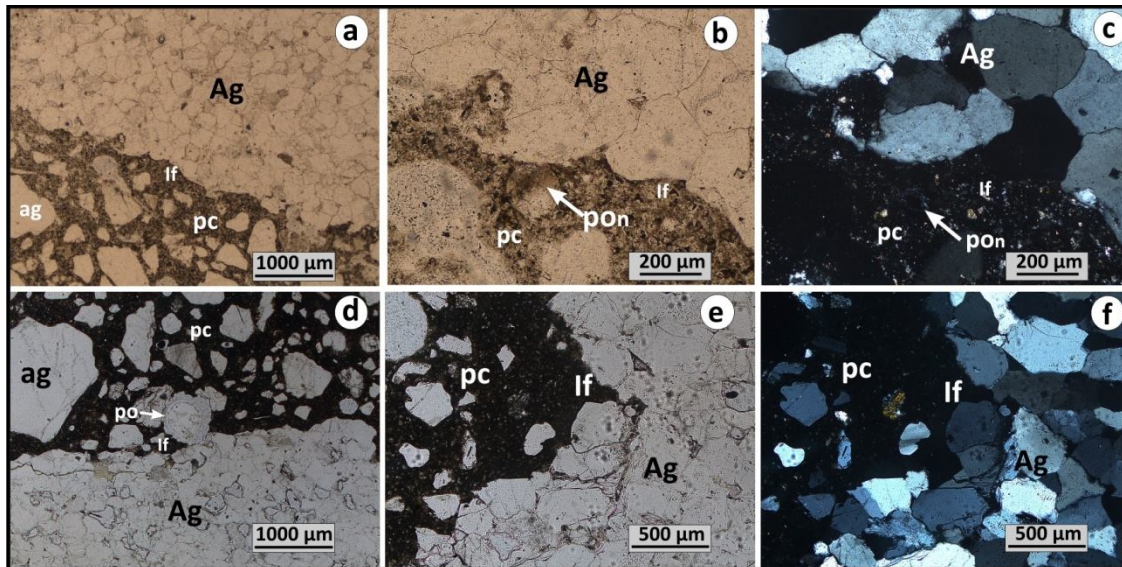
**Figura 8.18:** Hormigones de prismas IRAM 1700 a 38°C de cantera Los Pinos vistos con estereomicroscopio. Agregado grueso cuarcítico (Ag), interfase (If), mortero (m) y poros (po). **(a)** Interfase pasta-agregado con muy buena adherencia, mortero en buen estado. **(b)** Poros en mortero e interfase sin relleno. El agregado cuarcítico de tamaño de grano fino se mantiene en buen estado, sin reemplazos.

Con microscopio petrográfico en general los hormigones de los prismas se observan en buen estado. El agregado grueso cuarcítico, de grano medio a fino, no presenta modificaciones texturales.

En el hormigón de los prismas curados a 60°C la interfase posee buena adherencia y la pasta de cemento se observa en buen estado, sin fisuras, con abundantes partículas de cemento sin hidratar (alita), de coloración castaño claro (Figura 8.19a). Los poros de la pasta poseen sección circular y son de pequeño tamaño (50-200  $\mu\text{m}$ ). En la zona de interfase se observan escasos poros rellenos con material de neoformación de color castaño con polarizadores paralelos e isotrópico visto con polarizadores cruzados (Figura 8.19b-c).

El hormigón del prisma curado a 38°C se presenta en buen estado con las zonas de interfase y la pasta de cemento está sin carbonatar y sin microfisuras. Las primeras poseen buena adherencia y las cavidades de aire accidental se encuentran vacías (Figura 8.19d-f).





**Figura 8.19:** Fotomicrografías de las secciones delgadas del prisma curado a 60°C (a-c) y a 38°C (d-f), (LP): Agregado grueso cuarcítico (Ag), fino (ag), interfase pasta - agregado (lf), pasta de cemento (pc), poro con material de neoformación (pon). **(a)** Interfase con agregado cuarcítico de grano fino, pasta de cemento de color castaño claro. **(b)** Detalle de interfase; microporo relleno con material de reacción. En **(c)** se observa que el material isótropo (amorfo). **(d)** Interfase y pasta de cemento en buen estado; cavidad de aire accidental (po) sin relleno. **(e-f)** Interfase pasta-agregado con buena adherencia, sin fisuras. La interfase y la pasta no presentan carbonatación. Fotomicrografías (a) (b), (d) y (e) con PP; (c) y (f) con PC.

### 8.3. CASOS DE ESTUDIO

#### 8.3.1. Introducción

En este trabajo de Tesis se estudian tres pavimentos de hormigón elaborados con rocas cuarcíticas de Mar del Plata como agregado grueso, uno de la ciudad de La Plata y dos del partido de General Pueyrredón.

Las principales causas de fisuración de los pavimentos son falta de mantenimiento de las juntas, problemas de carga, de base o sub-base, pérdida de soporte por erosión y/o asentamientos diferenciales. Las reacciones deletéreas internas (RAS) y externas (ataque por sulfatos, cloruros, etc.) también pueden causar fisuración importante. La erosión por bombeo y el escalonamiento se producen por el movimiento del agua (con material en suspensión) ubicada debajo de la losa y su eliminación hacia la superficie como resultado de la presión generada por la acción de las cargas. La presencia de una base/sub-base de hormigón es necesaria cuando existe este riesgo y se presentan en forma simultánea

diferentes condiciones, tales como la repetición reiterada de cargas pesadas que generen deflexiones en juntas entre otras (Calo 2012).

Es necesario tener en cuenta todas las características antes mencionadas de los pavimentos y relacionarlas con las observaciones petrográficas y microestructurales del hormigón para poder evaluar y justificar cuales hicieron que mantuvieran su prestación en servicio y que factores determinaron la finalización. Para ello se procedió al estudio de los hormigones mediante estereomicroscopio, microscopio petrográfico con luz transmitida y UV sobre muestras impregnadas con resina fluorescente (fluoresceína). El material presente en los poros y las zonas de interfase se analizó por MEB-EDS a fin de determinar sus características morfológicas y composicionales y relacionarlas las causas de deterioro en las estructuras (St. John *et al.* 1998, Walker *et al.* 2006).

### **8.3.2. Estereomicroscopía, microscopía óptica, MEB-EDS. Norma ASTM C 856**

#### **8.3.2.1. Pavimento de hormigón: Avenida 122, ciudad de La Plata**

En este caso el pavimento pertenece a dos losas que conformaban la base y capa de rodamiento de la Avenida 122 de la ciudad de La Plata, el cual fue puesto fuera de servicio por culminación de su vida útil (mayor a 50 años). Algunos de los resultados obtenidos fueron publicados previamente (Coelho dos Santos *et al.* 2015).

La avenida constituye el acceso a la ciudad de La Plata y al área portuaria, y posee excesiva circulación de tránsito pesado (camiones), además de conectar con una ruta provincial costera (RN11). El pavimento consiste de dos componentes: una base y una capa de rodamiento o calzada de hormigón. Antes de su desafectación, la capa de rodamiento presentaba fisuras transversales y longitudinales, erosión en juntas y bordes, y escalonamientos (Figura 8.20a). Como se observa en la Figura 8.20b, el pavimento fue puesto fuera de servicio.

Se procedió al estudio de la losa de hormigón de la base y de la capa de rodamiento, teniendo en cuenta las diferencias entre ambas, ya que estuvieron sometidas a diferentes tipos de cargas y condiciones micro-ambientales. La base está en contacto con el suelo, y la capa de rodamiento en contacto con el tránsito y expuesta a las condiciones climáticas del medio.



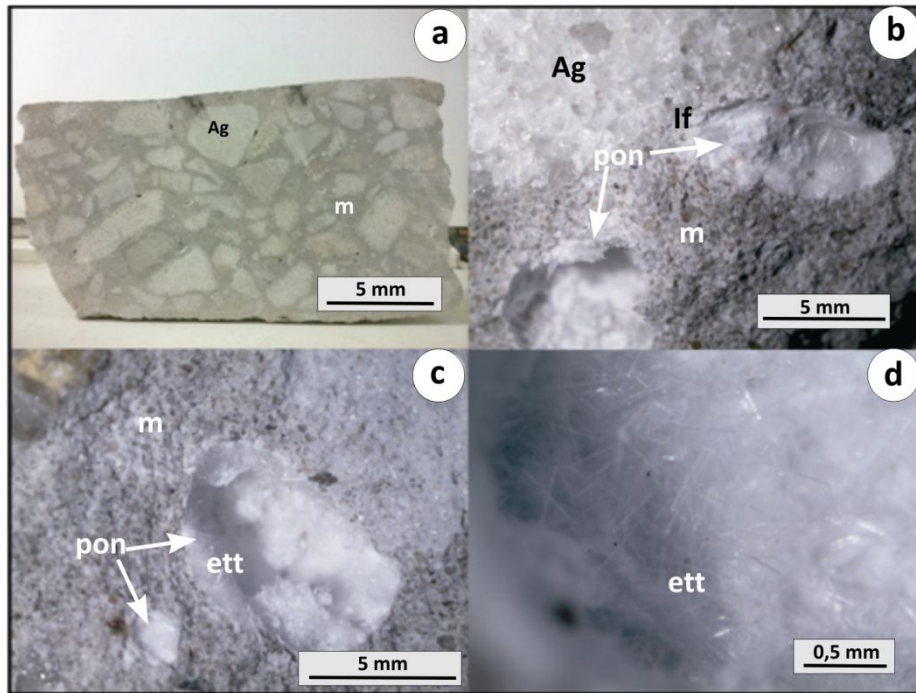
**Figura 8.20:** (a) Pavimento afectado por fisuras longitudinales y transversales, hundimiento de losa y escalonamiento de juntas. (b) Trabajos de remoción de las losas de hormigón.

La base posee un espesor aproximado de 15 centímetros y no presenta armadura. (Figura 8.21a). El hormigón de la capa de rodamiento presenta restos de pasadores y barras de unión y su espesor es de 20 centímetros (Figura 8.22a). El hormigón se halla compuesto por un agregado grueso de trituración cuarcítica que reúne todas las características de las cuarcitas de la Formación Balcarce (cuarcita Mar del Plata), de tamaño comprendido entre 2 cm y 5 cm, y un mortero conformado por abundante agregado fino natural, rico en cuarzo. La pasta de cemento es gris clara con sectores amarillentos. Los poros presentes en el mortero son de tamaño y morfología variable, en su mayoría están rellenos por masas cristalinas fibrosas e irregulares de coloración blanquecina y brillo perlado (Figura 8.21b-d).

Los agregados de cuarcita son inequidimensionales y presentan formas alargadas, triangulares o lajosas, de color blanco-grisáceo, algunos con tonos amarillentos y rojizos. La cuarcita está constituida por más de 95% de cuarzo anguloso a subanguloso, el tamaño de grano varía de grueso (mayor a 2 mm) a fino, y pueden tener una matriz compuesta por arcillas, cuarzo microcristalino y/o óxi-hidróxidos de hierro. Además se observaron, en porcentajes bajos, granos de turmalina, micas y otros minerales máficos. Otros fragmentos de agregado son de vaques cuarzo-micáceos y arcillas (en porcentaje menor).

El mortero presenta muy buenas características, aunque puede verse aisladamente afectado por fisuras, que en algún caso involucran algunas zonas de interfase con el agregado grueso. A pesar que éstas se observan cohesivas y en buen estado, es común hallar vacíos o poros irregulares de varios milímetros y poros circulares de diámetro inferior a 1 mm, en su mayoría rellenos por material o productos de neoformación de

color blanquecino (Figura 8.21b y 8.21c). Dichos productos se presentan en masas o como cristales fibrosos de brillo perlado que corresponderían a ettringita (Figura 8.21d).

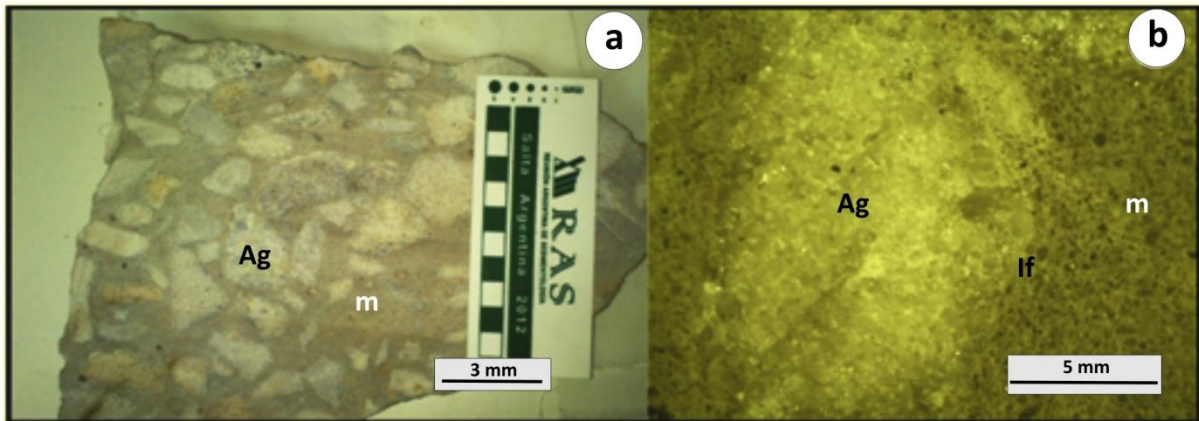


**Figura 8.21:** Losa de hormigón de la base del pavimento de Av. 122. **(a)** Corte mostrando el espesor total donde se aprecia el agregado grueso cuarcítico (Ag) y el mortero (m) con cavidades de aire accidental. Imágenes (b), (c) y (d) tomadas con lupa binocular. **(b-c)** Poros con materiales de neoformación (pon) en el mortero (m) próximos a la interfase pasta-agregado grueso (lf). **(d)** Detalle del material de neoformación, cristalino, fibras aciculares (ettringita).

El hormigón de la capa de rodamiento posee similares características al de la base en cuanto al agregado grueso cuarcítico y mortero. Las diferencias detectadas a esta escala de observación son mínimas, una de ellas es que la pasta de cemento es de color gris amarillenta casi en su totalidad, debido probablemente al proceso de carbonatación por exposición a las condiciones atmosféricas (Figura 8.22a). La interfase agregado grueso – pasta, presenta buena cohesión y no se detectan fisuras. Por otra parte, los poros y cavidades de aire accidental están desprovistos de relleno o con un conspicuo recubrimiento de sus paredes.

En general, el estado de conservación de los hormigones analizados mediante esta técnica, es bueno, como se muestra en las Figura 8.21 y 8.22.



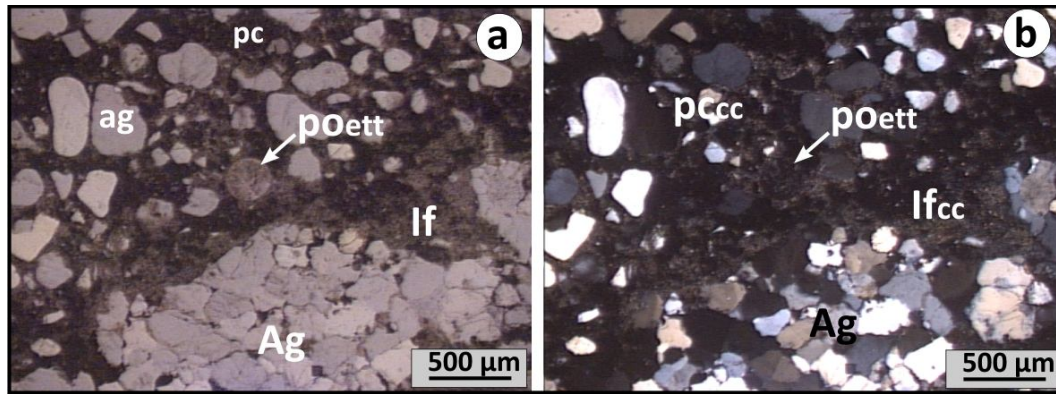


**Figura 8.22:** Hormigón de la capa de rodamiento. **(a)** Corte de hormigón. No se aprecia el espesor total. Agregado grueso (Ag) y mortero (m). **(b)** Con lupa binocular se destaca un agregado grueso cuarcítico (Ag) blanquecino y un mortero (m) gris amarillento e interfase (If) con buena adherencia.

Visto con microscopio petrográfico, el hormigón de la base se encuentra preservado. En la Figura 8.23a y b se muestra (con luz paralela y polarizadores cruzados respectivamente) al agregado grueso que corresponde a una arenita cuarzosa, constituida por granos angulosos a subangulosos de cuarzo, algunos policristalinos o con extinción ondulante. El tamaño de los granos es variable, de sábulo (mayores a 2 mm) a arena fina (menor a 200  $\mu\text{m}$ ). En algunos casos se observa matriz escasa y en otras es abundante (vaque). Está compuesta por minerales arcillosos (caolinita e illita) y/o cuarzo microcristalino, además de material ferruginoso que, en algunos casos, actúa como cementante de los granos de cuarzo. Como cemento de la roca también se destaca cuarzo microcristalino o el crecimiento secundario de los mismos granos. Estas características corresponden a las de la cuarcita de Mar del Plata, y por lo tanto el agregado grueso se atribuye a la misma.

El agregado fino es una arena natural en cuya composición predomina el cuarzo, con muy escasa cantidad de feldespato y minerales máficos.

La interfase agregado grueso-pasta se halla en buen estado, en general sin fisuras, carbonatada y con cavidades de aire accidental rellenas con ettringita (Figura 8.23a y b). La pasta de cemento se observa sin fisuras y parcialmente carbonatada (8.23b).

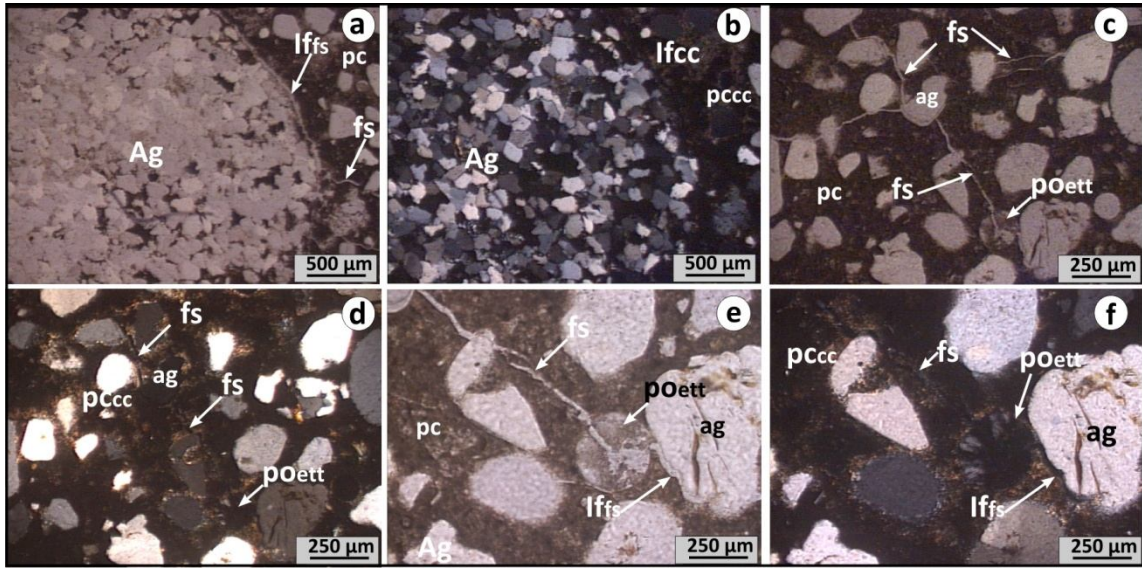


**Figura 8.23:** Fotomicrografías tomadas con microscopio petrográfico del hormigón de la base (Av. 122). **(a)** Con PP se observa agregado grueso cuarcítico (Ag), agregado fino (ag), interfase (If) de ettringita coloración más clara que la pasta de cemento (pc); poro o cavidad de aire accidental con ettringita (poett). **(b)** Misma imagen con PC: interfase carbonatada (Ifcc) y pasta de cemento parcialmente carbonatada (pccc).

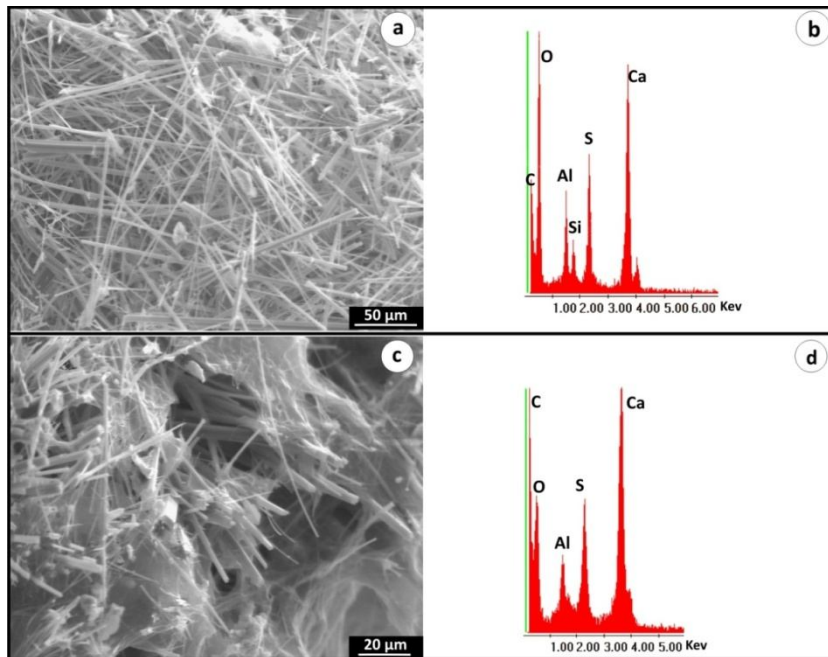
El hormigón de la capa de rodamiento es similar al de la base. La interfase agregado grueso-pasta cementícea se muestra en buen estado, con buena adherencia, pero en algunos casos se observa microfisuramiento (Figura 8.24a-b) y carbonatación. En el mortero, la pasta de cemento se encuentra fisurada así como también la interfase agregado fino - pasta de cemento. Las cavidades de aire accidental están parcialmente rellenas con calcita, portlandita y/o ettringita, esta última se presenta en masas fibrosas que, con polarizadores cruzados, posee un color de interferencia gris y blanco del primer orden (Figura 8.24c-f). En sectores con microfisuras y poros, la pasta de cemento se encuentra parcialmente carbonatada (Figura 8.24d y f).

Los productos de neoformación fueron separados bajo estereomicroscopio para su análisis morfológico y composicional con MEB - EDS. Del hormigón de la base se obtuvo mayor cantidad de material para los análisis. En la Figura 8.25a se observan cristales de hábito fibroso característicos de ettringita primaria, y en 8.25b el análisis composicional EDS del material observado, en el cual se identificó S, Al, O y Ca adjudicado a ettringita. La Figura 8.25c muestra el crecimiento de los cristales de ettringita en el interior de una cavidad de aire accidental y en 8.25d, el espectro composicional respectivo en el cual el pico de Si es de baja intensidad y se adjudicó al cuarzo del agregado. Si bien los picos de carbono observados en ambos espectros corresponden, en parte, al material utilizado en la metalización de las muestras, debido a la elevada intensidad (sobre todo en la figura 8.25b) del pico de Ca se atribuye además a la presencia de calcita y/o portlandita.





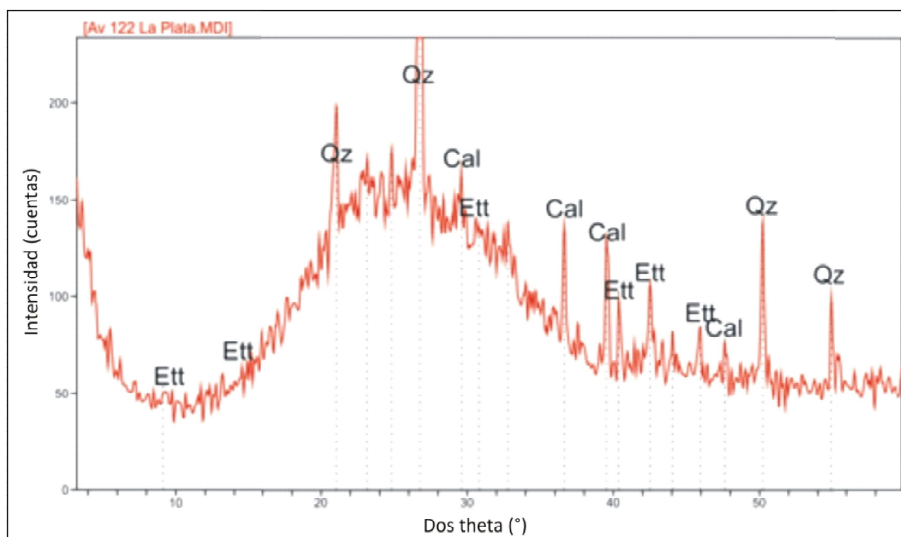
**Figura 8.24:** Fotomicrografías de la capa de rodamiento. **(a-b)** Agregado grueso (Ag) con interfase y mortero con microfisuras (lf fs); pasta de cemento parcialmente carbonatada (pcc). **(c-d)** Pasta de cemento e interfase pasta-agregado fino (ag) fisurada, poro con ettringita (poett); pasta parcialmente carbonatada (pcc). **(e-f)** Detalle de las microfisuras en la pasta e interfase y del poro relleno con ettringita (poett); se observa la fisura (fs) rellena con ettringita y la pasta de cemento parcialmente carbonatada (pcc). (a), (c) y (e) con PP; (b), (d) y (f) con PC.



**Figura 8.25:** Fotomicrografías tomadas con MEB del hormigón de la capa de rodamiento. **(a)** Cristales fibrosos de ettringita primaria en poro. **(b)** EDS del material de la imagen (a). Se identificó S, Si, Al, O y Ca. **(c)** Crecimiento de cristales de ettringita en el interior de una cavidad de aire accidental. **(d)** Espectro EDS del material observado en la imagen (c). Se identificó Al, S y Ca.

Por otra parte, el material colectado de la capa de rodamiento es escaso, aunque se ha podido identificar también ettringita fibrosa, además de cristales bien desarrollados de calcita.

El análisis por DRX fue realizado sobre los productos de neoformación colectados bajo estereomicroscopio en cavidades del hormigón de la base y en la superficie del mortero a fin de determinar las especies presentes. El escaso material desarrollado dificultó la concentración de cantidad suficiente para su análisis, a lo que debe sumarse la baja cristalinidad de los productos respecto del cuarzo de los agregados (finos y gruesos). En la Figura 8.26 se muestra los resultados obtenidos donde puede observarse que las principales reflexiones corresponden a cuarzo, con calcita subordinada. Se identificó una reflexión de muy baja intensidad en 9,70 Å adjudicada a ettringita.



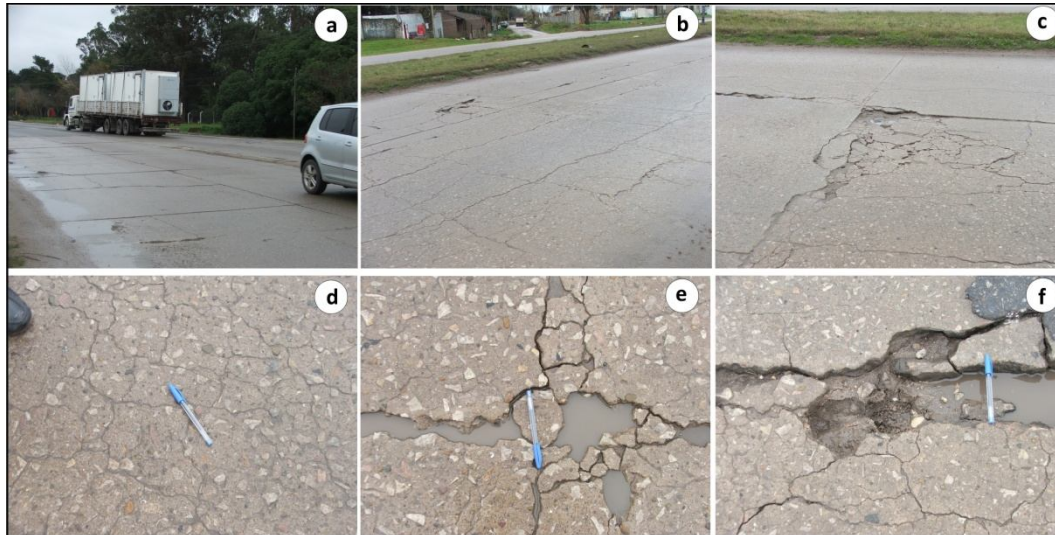
**Figura 8.26:** DRX del material de neoformación desarrollado en el interior de cavidades de aire accidental y sobre el mortero. Ett: ettringita, Qz: cuarzo, Cal: calcita.

En resumen, la microestructura de los hormigones analizados no presenta fenómenos de reacción ni procesos de deterioro que afecten al agregado grueso. Los contactos agregado mortero son netos, no hay desarrollo de coronas de reacción, fisuras, ni excesiva porosidad que ocasione falta de coherencia. En la pasta cementícea se observó escasa fisuración y moderada porosidad. El principal material de relleno de cavidades es ettringita, también presente en la superficie del mismo.

La presencia de ettringita en poros del hormigón de la base, estaría relacionada a la mayor circulación de agua de lluvia que infiltra a través de juntas y fisuras presentes en la capa de rodamiento y del agua capilar proveniente de las capas inferiores (sub-rasante y sub-base granular). La capa de rodamiento presenta mayor carbonatación de la pasta de cemento, además de poros rellenos parcialmente por calcita, debido probablemente a una mayor exposición del hormigón al agua de lluvia y a los gases emanados por el tránsito. Las microfisuras presentes en el mortero son escasas y de poco espesor. Las características de las mismas no corresponden a una reacción deletérea interna como la RAS o al ataque externo producido por sulfatos. Los análisis por MEB-EDS y DRX confirman lo establecido.

### **8.3.2.2. Pavimento de hormigón: RP88, partido de General Pueyrredón**

Este caso de estudio se centra en un tramo de la ruta provincial (RP) 88 que conecta a la ciudad de Mar del Plata con la localidad de Batán (Figura 8.27a). Se trata de un pavimento de hormigón que presenta avanzado estado de deterioro, con presencia de fisuras transversales y longitudinales en las losas (Figura 8.27b), erosión en juntas y bordes de losas, además de hundimientos en esquinas con un patrón de fisuras en “mapa” (Figura 8.27c-d) y deprendimientos que generan fisuras de gran apertura y baches con acumulación de agua (Figura 8.27e-f). En la Figura 8.27d, e y f se observa la superficie de la capa de rodamiento identificando el agregado cuarcítico de tonalidad gris amarillenta.



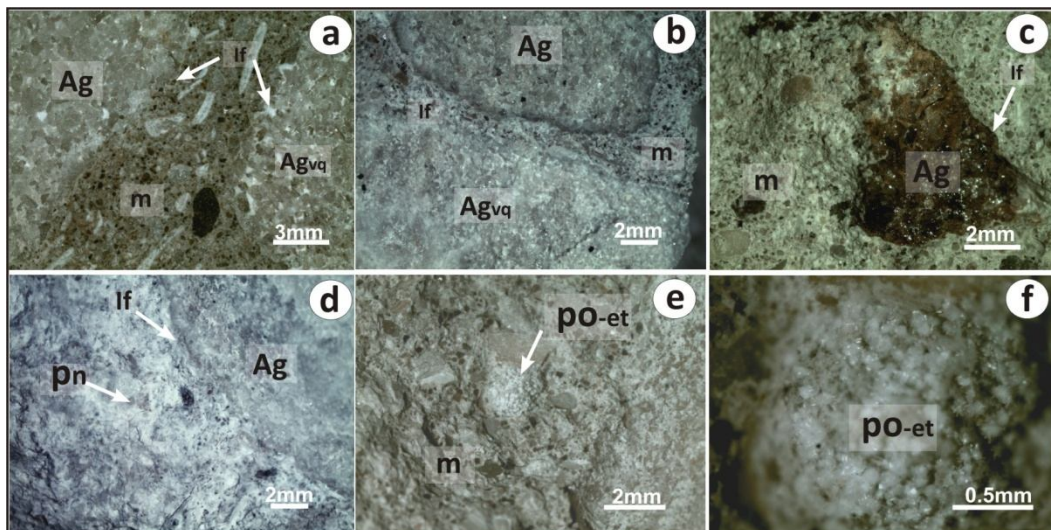
**Figura 8.27:** Imágenes de la RP88. **(a)** Vista general de las losas deterioradas del pavimento que conectan hacia el fondo con un tramo asfaltado de ruta. **(b)** Losas del pavimento con patrón de fisuras transversales y longitudinales. **(c)** Patrón de fisuras en mapa hacia la esquina de una losa y erosión a lo largo de las juntas. **(d)** Patrón de fisuras en mapa. **(e)** y **(f)** Apertura de fisuras por dependimiento de material y acumulación de agua en las mismas.

Se tomaron muestras de las áreas desprendidas para el estudio petrográfico del hormigón. Con lupa binocular se observa que está compuesto por un agregado grueso cuarcítico de tamaño medio aproximado de 20 mm, coloración blanco-grisácea, blanco-amarillenta a rosada y rojiza por la presencia de óxidos de hierro, de granulometría arena fina a media y gruesa (Figura 8.28a-d). Algunos cuarcitas son arenitas con variable contenido de matriz, hasta vaques. El mortero está constituido por arena compuesta por clastos de cuarzo, calcedonia, chert, feldespatos, fragmentos de líticos volcánicos y bioclastos de conchillas (Figura 8.28a), y una pasta de cemento gris amarillenta, la cual puede presentar poros de sección irregular mayores a 1 mm correspondientes a cavidades de aire accidental y otros de entre 1 mm y menores a 0,5 mm, por lo general de sección circular, algunos de ellos rellenos con materiales de neoformación que pueden ser atribuidos a ettringita debido a su desarrollo fibro-radiado de brillo perlado (Figura 8.28e-f). La interfase con el mortero tiene buena adherencia (Figura 8.28a-c), en algunos casos con fisuras de escasos micrones de espesor rellenas por un material blanquecino (Figura 8.28b). En sectores que corresponden a superficies expuestas de fisuras del hormigón, se observan películas de un material blanquecino carbonatado, con

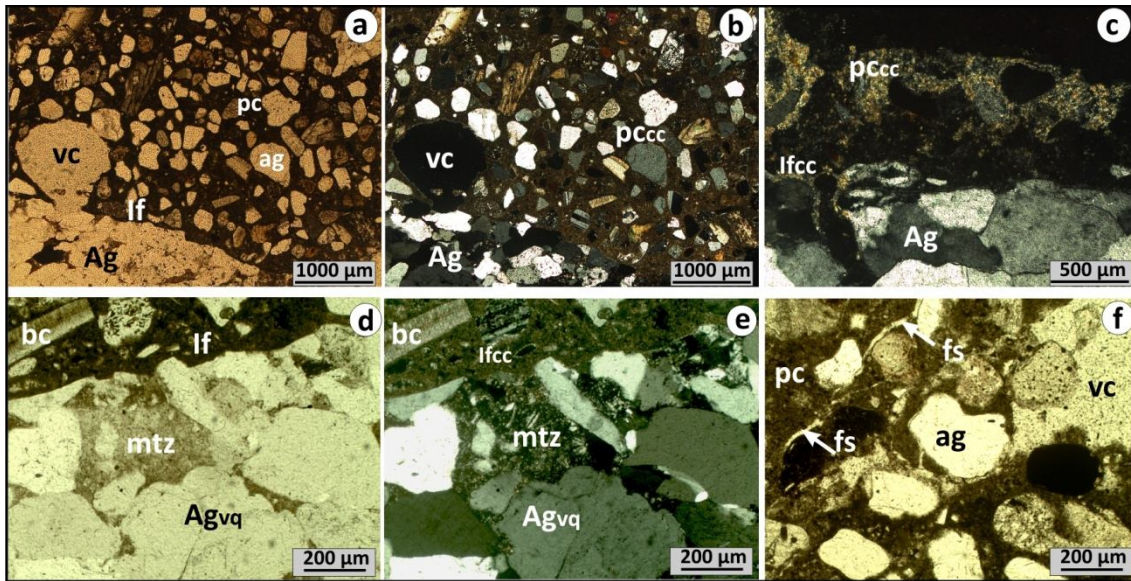


fisuras producto de la desecación o pérdida de agua del mismo y poros del mortero rellenos por el mismo material con aspecto masivo y/o terroso (Figura 8.28d).

Con microscopio petrográfico se corroboran los procesos y las patologías observadas con esteromicroscopio (Figura 8.29a-f). Petrográficamente las cuarcitas corresponden a arenitas cuarzosas, algunas son vaques con abundante matriz, identificándose arcillas, cuarzo microcristalino y ópalo-calcedonia como componentes de la misma (Figura 8.29d-e). La interfase pasta-agregado presenta buena adherencia, aunque se encuentra intensamente carbonatada al igual que la pasta de cemento (Figura 8.29b, c y e). También se observaron algunos poros o vacíos mayores al 1mm (Figura 8.29a- b). No se identificó ettringita, aunque algunos sectores del mortero presentan fisuras que afectan la zona de interfase pasta-agregado fino y a la pasta de cemento (Figura 8.29f).



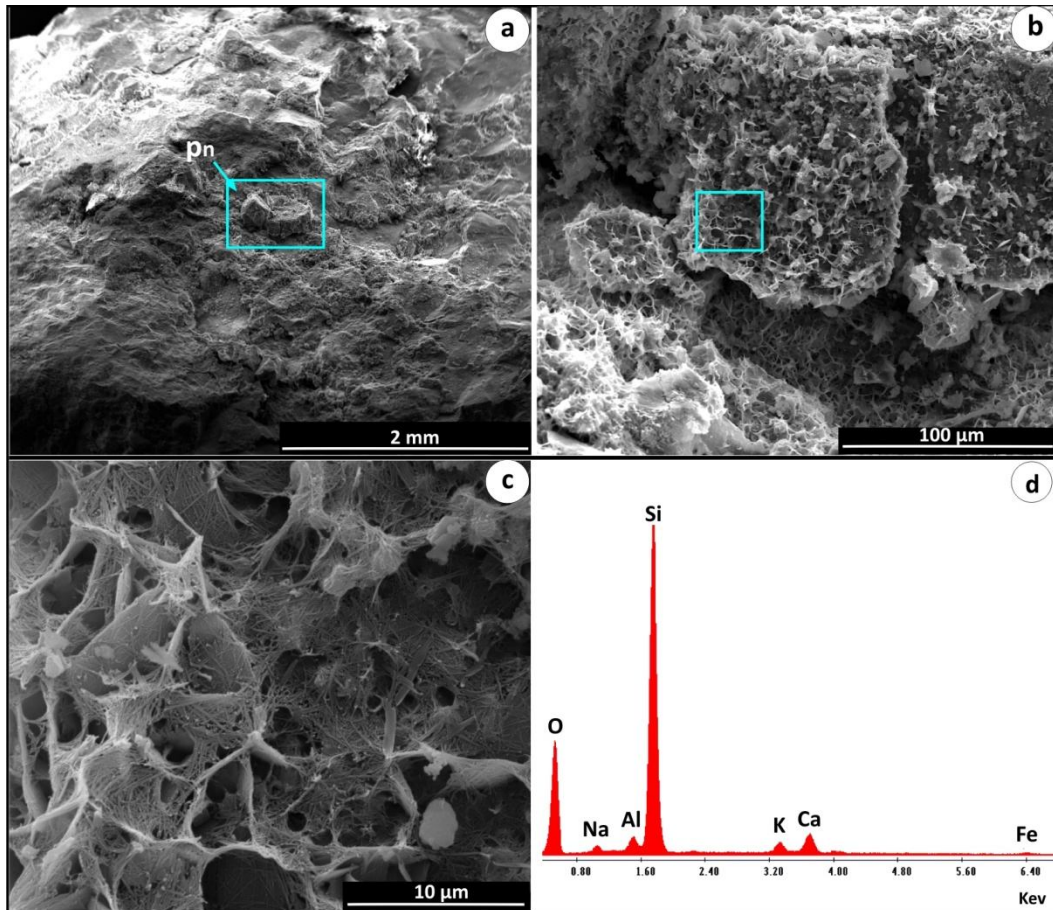
**Figura 8.28:** Imágenes de esteromicroscopio del hormigón de la RP88. Agregado grueso cuarcítico (Ag), váquico (Agvq), mortero (m), interfase pasta-agregado grueso (If), poro con ettringita (po-et) y productos de neoformación (pn) carbonatados. **(a)** Interfase agregado grueso-pasta en con buena adherencia; mortero con abundantes bioclastos como agregado fino. **(b), (c)** y **(d)** Zonas de interfase con buena adherencia; mortero con materiales blanquecinos. **(e)** Poro en el mortero con fibras de ettringita, reconocidas en **(f)**.



**Figura 8.29:** Fotomicrografías del hormigón del pavimento de la RP88. **(a)** Vacío (vc) en interfase (If) agregado cuarcítico (Ag)-pasta de cemento (pc); abundante agregado fino (ag) en el mortero. Polarizadores paralelos. **(b)** Misma imagen con polarizadores cruzados; pasta de cemento carbonatada (pccc). **(c)** Interfase carbonatada (Ifcc), al igual que sectores de la pasta de cemento (pccc). Polarizadores cruzados. **(d)** Interfase (If) del agregado váquico (Agvq) con matriz (mtz) abundante, bioclasto (bc) de agregado fino. Polarizadores paralelos. **(e)** Misma imagen con polarizadores cruzados; interfase carbonatada (Ifcc). **(f)** Pasta de cemento y zonas de interfase con fisuras (fs) y vacíos (vc) irregulares de varios milímetros, sin relleno.

Para el estudio con MEB se seleccionó, con esteromicroscopio, una pequeña muestra de hormigón en la que se identificó un material de neoformación de coloración blanquecina y aspecto terroso. En las imágenes con menor magnificación se observa un producto adherido a la superficie del mortero del hormigón (Figura 8.30a) que, con mayor detalle, muestra una textura superficial con aspecto de panal conformada por placas (Figura 8.30b). A mayor magnificación se observó que este material está constituido por placas revestidas parcialmente por masas de fibras, morfológicamente planas y adheridas a las placas las cuales cortan el plano de la imagen (Figura 8.30c). El análisis composicional con EDS (Figura 8.30d) muestra un pico de mayor intensidad de Si y picos menores de O, Al, Na, K, Ca y en menor medida Fe. Estas fibras reúnen características morfológicas y composicionales atribuidas a una zeolita del tipo erionita.





**Figura 8.30:** MEB-EDS. **(a)** Superficie de la muestra de hormigón donde se observan depositados productos de neoformación (pn). **(b)** Detalle del material de neoformación marcado con recuadro azul en (a). **(c)** Sector marcado en (b) visto con mayor magnificación, morfología fibrosa del producto de reacción. **(d)** Espectro EDS del material observado en la imagen (c). Se identificó principalmente Si, Al, O, K, Na y Ca. El producto es atribuido a erionita (zeolita).

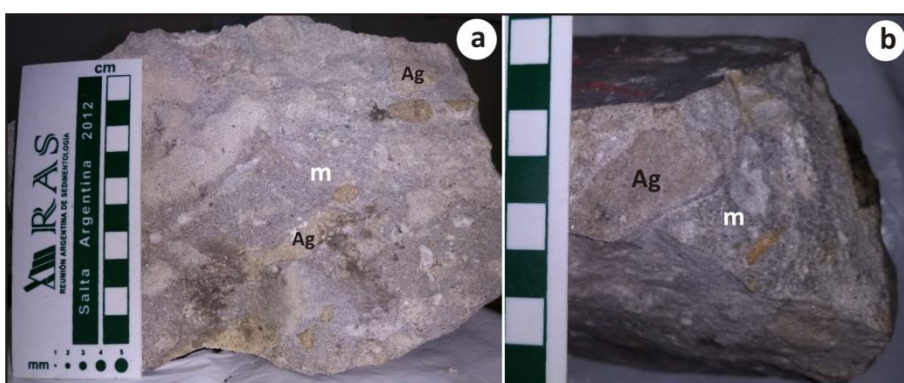
### 8.3.2.3. Pavimento de hormigón: Avenida Libertad, ciudad de Mar del Plata

Este caso se trata de un pavimento de hormigón de la Avenida Libertad de la ciudad de Mar del Plata (Figura 8.31a), paralela a la Avenida Pedro Luro (ruta nacional 226), seis calles al norte de la misma, y desemboca en la Avenida costanera Peralta Ramos a la altura de la playa La Perla. Se tomaron muestras de una losa que fue levantada para su reemplazo debido a que presentaba un patrón de fisuración importante, apertura de fisuras y bacheado (Figura 8.31b). La losa del tramo levantado (Figura 8.31c-d) está confeccionada con cuarcita de Mar del Plata (arenitas de la Formación Balcarce). No se observaron fisuras visibles sobre las secciones transversales de las losas de hormigón.



**Figura 8.31:** Avenida Libertad: **(a)** Vista del pavimento. **(b)** Detalle: fisuras mayores a 1 cm y erosión en bordes (bache) en tramo de la avenida en servicio. **(c)** Fragmentos de losa del tramo levantado. **(d)** Detalle de las losas donde se aprecian los agregados cuarcíticos.

Del sector levantado se tomaron muestras (Figura 8.32a-b) para el estudio petrográfico.

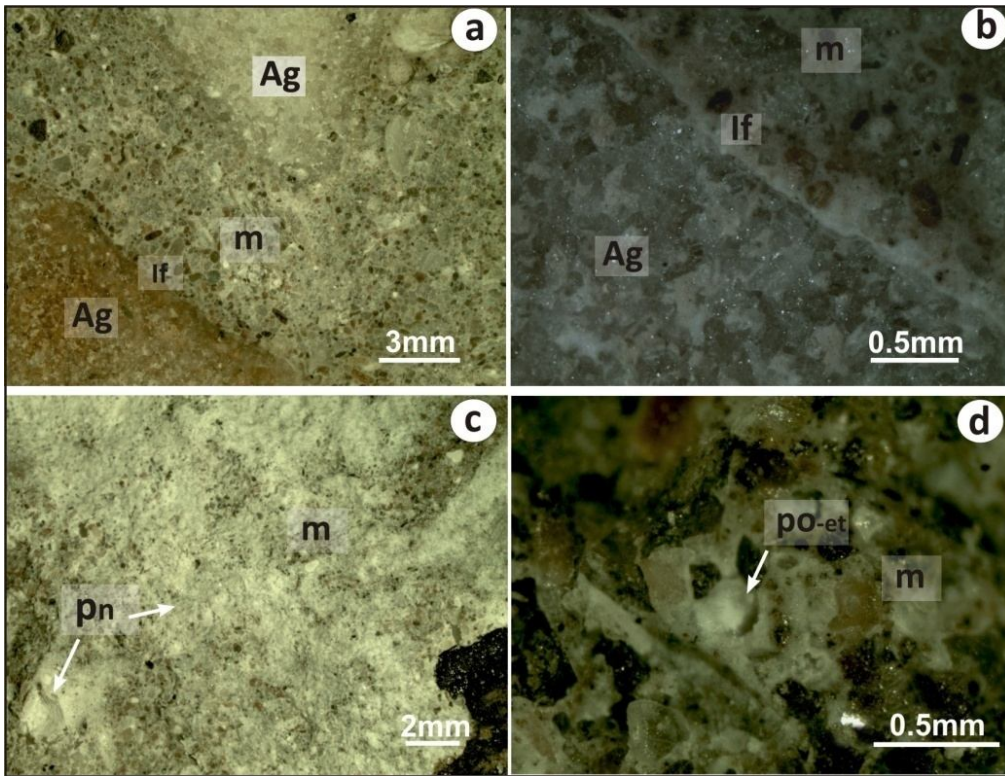


**Figura 8.32:** **(a)** Sector medio de la losa de hormigón. El agregado grueso es cuarcítico, de color blanco y blanco amarillento. Mortero de coloración gris clara. **(b)** Corte perpendicular a la superficie de rodamiento.

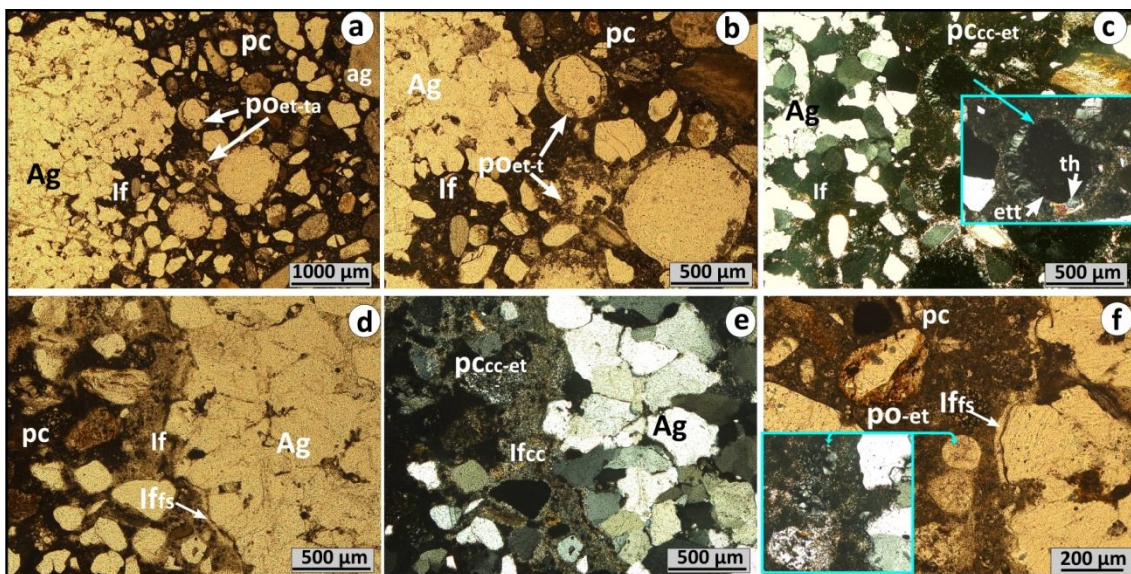
Con estereomicroscopio se observa al hormigón compuesto por un agregado grueso cuarcítico que corresponde a sabulitas y arenitas de tamaño de grano grueso a fino, de color blanco grisáceo, blanco amarillento a rosado y rojizo por la presencia de óxidos de hierro (Figura 8.33a). En la zona de interfase agregado grueso - pasta se observan microfisuras rellenas con un material blanquecino. La coloración de la interfase también es blanquecina y se extiende en un halo irregular hacia la pasta de cemento que gradúa de blanca a amarillenta al alejarse de la interfase, en el trayecto de 1-2 mm (Figura 8.33b). El mortero está compuesto por un agregado fino natural, subredondeado y redondeado, donde se identifica, cuarzo, feldespato, fragmentos líticos y bioclastos. Además en las muestras de hormigón tomadas para este estudio se pueden observar superficies de fisuración donde se ven depositados sobre el mortero materiales blanquecinos de hábito masivo y/o fibroso atribuidos a ettringita y productos de carbonatación (Figura 8.33c) y abundantes poros de sección circular, inferiores a 500  $\mu\text{m}$ , rellenos principalmente por ettringita (Figura 8.33d).

Con microscopio petrográfico se observan las zonas de interfase y la pasta de cemento afectadas por la presencia de sulfatos, principalmente ettringita y escasa thaumasita, además de carbonatación (Figura 8.34). Algunas zonas de interfase presentan fisuras rellenas con ettringita (Figura 8.34d-f). Los poros en el mortero son de sección circular, de tamaño entre 500  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  y están rellenos por ettringita o ettringita-thaumasita (Figura 8.34a-c). Con polarizadores paralelos estos materiales se reconocen por ser masas castañas de aspecto fibroso (Figura 8.34a-b y f); con polarizadores cruzados la ettringita posee color de interferencia gris-blanco de primer orden (Figura 8.4c y f) y la thaumasita (Figura 8.34c) de mayor birrefringencia, con color de interferencia amarillo-naranja de primer orden.





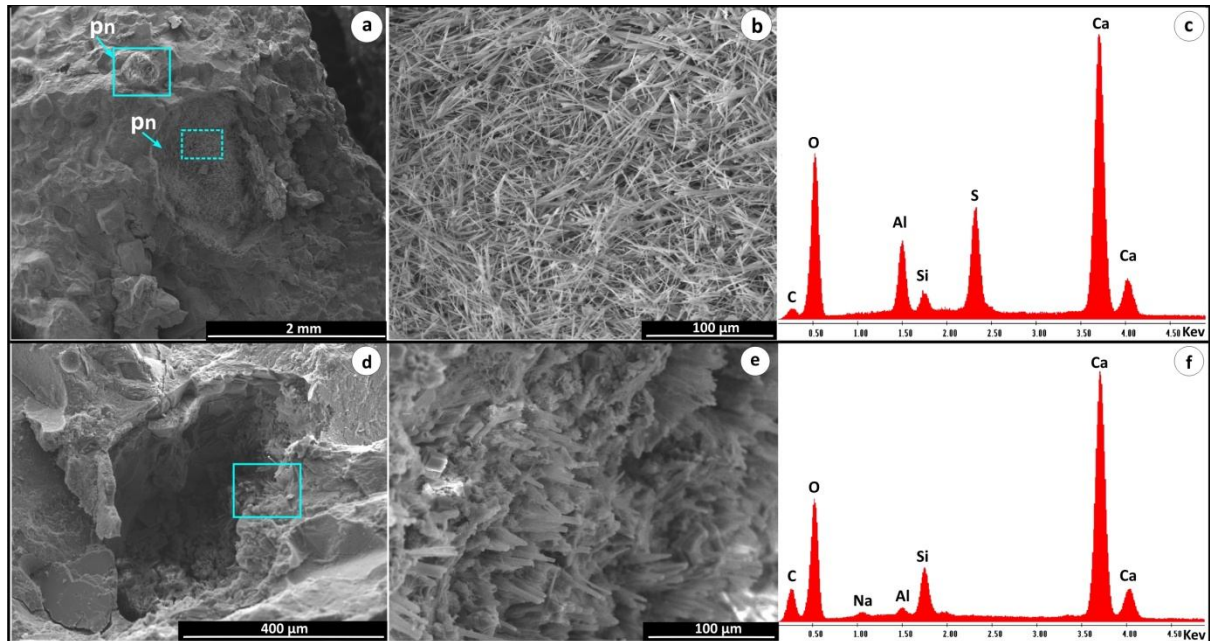
**Figura 8.33:** Imágenes con esteromicroscopio del hormigón de la Avenida Libertad. Agregado grueso cuarcítico (Ag), mortero (m), interfase pasta-agregado grueso (If), micro-poro con ettringita (po-et) y productos de neoformación (pn) atribuidos a ettringita y carbonatos. **(a)** Agregado grueso de distinta tonalidad, interfases con buena adherencia con el mortero. **(b)** Detalle de la interfase de coloración blanquecina, mortero más amarillento. **(c)** Materiales de neoformación depositados sobre el mortero del hormigón. **(d)** Microporo relleno con ettringita.



**Figura 8.34:** Fotomicrografías del hormigón del pavimento de la Avenida Libertad. **(a)** Interfase (If) agregado cuarcítico (Ag)- pasta de cemento (pc); abundante agregado fino (ag) en el mortero y poros rellenos con materiales de neoformación identificados en (c) como ettringita-thaumasita. Polarizadores

paralelos. **(b)**. Poros en el mortero vistos con polarizadores paralelos. **(c)** Misma imagen con polarizadores cruzados; rellenos con ettringita (ett) y thaumasita (th), pasta de cemento con masas de ettringita y carbonatación (pccc-ett). **(d)** Interfase (If) fisurada (Iffs). Polarizadores paralelos. **(e)** Misma imagen con polarizadores cruzados; interfase carbonatada (Ifcc) y pasta de cemento carbonatada y con ettringita (pccc-ett). **(f)** Interfase fisurada (Iffs) y poros rellenos con ettringita (po-et). Polarizadores paralelos y el detalle del recuadro con polarizadores cruzados.

Con esteromicroscopio se seleccionaron dos muestras de hormigón para ser estudiadas mediante MEB (Figura 8.35). En una se analizó el material presente en una cavidad de aire accidental confirmando la presencia de ettringita debido a su morfología cristalina fibrosa-acicular (Figura 8.35a-b), coherente con el análisis composicional de EDS (Figura 8.35 c). En el espectro se observa la elevada intensidad de los picos de Ca, S y Al propios de la ettringita. En cambio, en el segundo fragmento analizado se puntualizó el estudio en un poro relleno parcialmente por productos de neoformación donde la morfología del material es distinta de la anterior (Figura 8.35d). La mayor parte desarrolla fibras cortas con un hábito columnar (Figura 8.35e) y además se observa en menor medida cristales de formas rómbicas. Estas morfologías son similares a aragonita-calcita y es coincidente con el análisis composicional de EDS (Figura 8.35f) que muestra una elevada intensidad del pico de Ca y sobre-elevado el pico de C. Se descarta la presencia de ettringita por la ausencia del pico de S y por baja intensidad del pico de Al.



**Figura 8.35:** Fotomicrografías de MEB y EDS del hormigón de Avenida Libertad. **(a)** Superficie del hormigón donde se observan productos de neoformación (pn) relleno poros. **(b)** Masas fibrosas aciculares (sector del recuadro azul en la imagen a). **(c)** Espectro EDS del material observado en la imagen (b). Se identificó principalmente Ca, S, Al, O, Si atribuido a ettringita. **(d)** Cavity de aire accidental con productos de neoformación. **(e)** Detalle a mayor aumento de la zona marcada en el recuadro azul en (d). Se observan fibras cortas de hábito columnar y algunos cristales rómbicos. **(f)** Espectro EDS del material observado en la imagen (e). Se identificó principalmente C, Ca, O, Si, Al y Na en baja proporción. Material atribuido principalmente a carbonatos.

### 8.3.3. Densidad y absorción de los hormigones. Norma ASTM C 642

Se determinaron los parámetros físicos en pavimentos de hormigón aplicando la norma ASTM C 642 (2013) tal como se describió en el capítulo 5. La densidad calculada es la relativa aparente saturada superficie seca. Además de la absorción y la densidad de los hormigones también se determinó el volumen de poros permeables porcentual.

El procedimiento se llevó a cabo en todos los hormigones de obra (Av. 122 capa de rodamiento y base, Av. Libertad y RP88), ensayando tres muestras distintas de un mismo hormigón. Luego de obtenerse los valores de densidad, absorción y volumen de poros permeables de cada trozo analizado, se tomó valor el promedio de cada parámetro, calculando su desvío estándar. Los resultados se muestran en la Tabla 8.1.

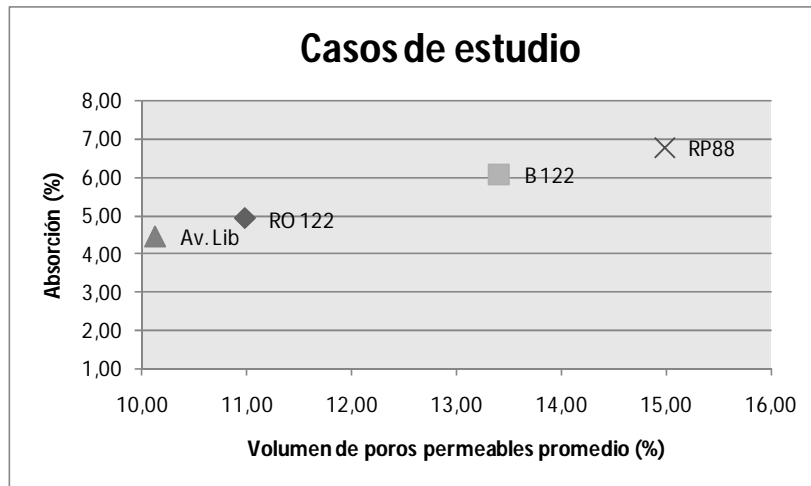


Hormigón	Densidad Promedio (gr/cm <sup>3</sup> )	Desvío estándar de la densidad promedio	Absorción Promedio (%)	Desvío estándar de la absorción promedio	Volumen de poros permeables promedio (%)	Desvío estándar del volumen de poros permeables promedio
Av. 122 (RO) La Plata	2,34	0,017	4,9	0,17	10,98	0,29
Av. 122 (B) La Plata	2,34	0,017	6,1	0,81	13,41	1,68
Av. Libertad Mar del Plata	2,37	0,015	4,5	0,66	10,13	1,44
RP88 Mar del Plata	2,37	0,024	6,8	0,61	14,98	1,4

**Tabla 8.1:** Valores promedio de absorción, densidad y volumen de poros permeables determinados sobre los hormigones de los pavimentos estudiados.

De los valores determinados se observa que el rango promedio de densidades es similar para todos los casos de estudio. La densidad promedio del hormigón tanto de la base como de la capa de rodamiento de la Avenida 122 de La Plata es la misma para ambos (2,34 gr/cm<sup>3</sup>), pero la absorción promedio en el hormigón de la base es mayor que para la capa de rodamiento y coincidente con un mayor volumen de poros interconectados o permeables. Por otra parte, la Avenida Libertad y la RP88 de Mar del Plata tienen una densidad promedio similar (2,37 g/cm<sup>3</sup>) pero el valor promedio de la absorción es mayor en el hormigón de la ruta 88, también en relación a un mayor volumen de poros permeables. Los desvíos estándar de las densidades muestran que en general presentan uniformidad en cuanto a esta propiedad, sin embargo los desvíos respecto de los valores de absorción y del volumen de poros permeables calculados se alejan más de la media, mostrando una cierta heterogeneidad en las propiedades de los hormigones respecto de estos parámetros.

Como se observa en el gráfico de la Figura 8.36 existe una relación lineal y directamente proporcional entre los valores de absorción (%) y el volumen de poros interconectados de los hormigones estudiados.



**Figura 8.36:** Gráfico absorción (%) Vs. volumen de poros permeables promedio (%) de los cuatro hormigones analizados.

#### 8.3.4. Determinación de la densidad de fisuras mediante microscopía UV

El estudio de microscopía con luz UV sobre secciones delgadas de hormigón es aplicado para determinar la porosidad, relación agua-cemento, grado de hidratación del cemento, fisuración carbonatación, etc. (St. John *et al.* 1998, Walker *et al.* 2006). En relación a esto se puede determinar mediante el procesamiento de imágenes el área fisurada y densidad de fisuras (Madsen *et al.* 2017). Como se explicó en el capítulo 5 la resina teñida crea fluorescencia en todas las grietas, incluso en aquellas de espesor inferior al detectado con la resolución del microscopio. También hay que tener en cuenta que las fisuras pueden identificarse, pero el ancho medido de las mismas resulta ser aparente, por lo que en grietas muy finas puede verse aumentado, esto se debe a que la luz UV no se encuentra colimada (Walker *et al.* 2006).

En los casos de estudio, los hormigones presentan microfisuras de extensión, con espesor y patrones de desarrollo variable. Algunas no fueron debidamente identificadas mediante microscopio óptico luz transmitida polarizada debido a su extrema finura ( $< 5 \mu\text{m}$ ), pero sí mediante microscopía UV. Estas fisuras se observan afectando a las interfases y a la pasta de cemento. Además se identifican zonas de mayor porosidad, representadas por poros de morfología irregular y extensión variable por lo general mayores a 1 mm y poros de sección circular, en muchos casos rellenos por productos de neoformación.

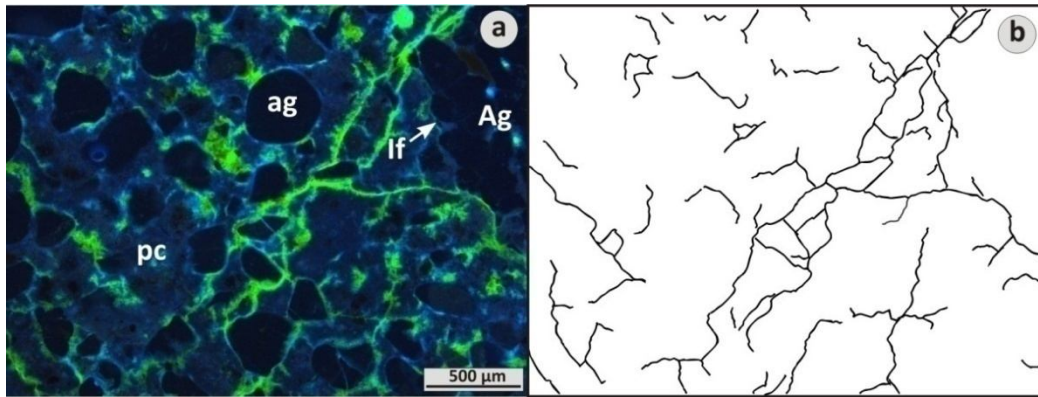
Secciones delgadas de los hormigones fueron realizadas con resina epoxi teñida con fluoresceína. Las mismas fueron estudiadas con un microscopio óptico Leica M4500 P LED con luz UV incidente (epifluorescencia) y aumento x100. Se realizó un barrido continuo del área ocupada por la sección delgada (25 mm x 35 mm) tomando un total de 10 imágenes por corte. Para discriminar las fisuras en las imágenes se realizó un mapeo en forma manual mediante el software ImageJ (Rasband 2017). Para ello se importaron las imágenes ajustando el umbral para resaltar las áreas de interés y convirtiéndolas en imágenes binarias a 8 bit. Sobre estas imágenes se realizó el calcado de las fisuras de forma manual. Finalmente con el mismo software se realizó la suma total de la longitud de todas las fisuras medidas sobre cada imagen y dividiendo ese total (unidad lineal) sobre la superficie analizada (área según valor calibrado, borde x borde =  $\text{unidad}^2$ ), obteniendo así la "densidad de fisuras" o "densidad de microfisuramiento" en  $\text{mm}/\text{mm}^2$ . Cada imagen posee una dimensión de 2,77 mm x 2,08 mm, lo cual da un área total por imagen de 5,76  $\text{mm}^2$  (Figura 8.37). Una medida estadística representativa de esa densidad se realiza mediante el análisis de las diez imágenes tomadas en la sección delgada obteniendo la densidad de fisuración promedio y su desvío estándar (Tabla 8.2).

Hormigón	Densidad de fisuras mínima ( $\text{mm}/\text{mm}^2$ )	Densidad de fisuras máxima ( $\text{mm}/\text{mm}^2$ )	(*) Densidad de fisuras promedio ( $\text{mm}/\text{mm}^2$ )	Desvío estándar de la densidad de fisuras promedio
Av. 122 (RO) La Plata	1,44	3,67	<b>2,57</b>	<b>0,64</b>
Av. 122 (B) La Plata	1,1	4,11	<b>2,45</b>	<b>1,06</b>
Av. Libertad Mar del Plata	1,65	4,91	<b>3,57</b>	<b>1,06</b>
RP88 Mar del Plata	1,07	4,73	<b>2,82</b>	<b>1,26</b>

**Tabla 8.2:** Para cada hormigón se muestra la densidad de fisuras mínima y máxima<sup>1</sup> obtenida sobre una imagen, la densidad promedio ( $\text{mm}/\text{mm}^2$ ) y su desvío estándar. (\*) Promedio de 10 imágenes.

En la Figura 8.37 a se observa la imagen de una sección delgada del hormigón de la base de la Av. 122 tomada con microscopio petrográfico bajo luz UV. Las fisuras y poros que afectan a la pasta de cemento e interfases pasta-agregado se observan iluminadas, con distinto grado de intensidad de la fluorescencia según el espesor de las fisuras, el tipo y grado de porosidad del relleno y de la porosidad de la pasta y de los agregados. En la Figura 8.37b se muestra el mapeo de las fisuras, cuya área es la de la imagen (5,76  $\text{mm}^2$ ).

Comparando la imagen de la Figura 8.37a tomada con luz UV con las imágenes del mismo hormigón tomadas con microscopio petrográfico luz polarizada (Figura 8.23), se observa que con luz UV se hacen visibles fisuras y poros de escasos micrones, difícilmente identificables con microscopía convencional.



**Figura 8.37:** (a) Fotomicrografía del hormigón de la base de la Av. 122 tomada con microscopio con luz UV. Las partículas de agregado fino (ag) y grueso (Ag) se mantienen oscuras, excepto en las regiones porosas. Las fisuras y poros se observan con fluorescencia. Las interfases (If) se hallan fisuradas y/o más porosas. Regiones de la pasta de cemento (pc) permanecen oscuras o con tenue fluorescencia. (b) Fisuras calcadas de la imagen (a) utilizadas para calcular la densidad de fisuración.

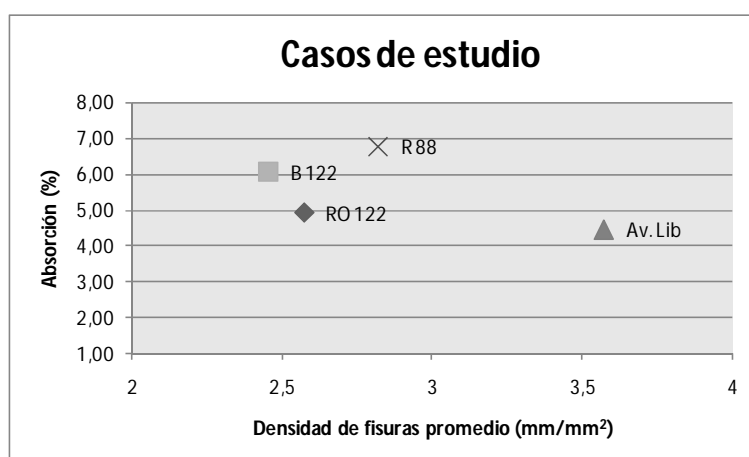
### 8.3.5. Relación entre densidad de fisuras, y densidad y absorción de los hormigones de obra

Para poder establecer una correlación entre la densidad de fisuración de los hormigones determinada por microscopía UV en secciones delgadas y sus parámetros físicos de densidad y absorción se toman los datos del inciso 8.4 los cuales fueron calculados según lo establecido en la norma ASTM C 642 (2013) descrita en el capítulo 5. En la Tabla 8.3 se muestran los valores promedio de densidad, absorción y densidad de fisuras. El gráfico de la Figura 8.38 relaciona la absorción y la densidad de fisuras promedio de los hormigones de obra. El valor de absorción promedio del hormigón de la Avenida Libertad es el menor obtenido, pero a su vez la densidad de fisuras promedio es la mayor calculada de todos los hormigones. El pavimento de la RP88 muestra una mejor correspondencia entre la absorción promedio, la cual es de 6,8% y la densidad de fisuras promedio cuyo valor es 2,64 mm/mm<sup>2</sup>. El hormigón de la capa de rodamiento de la Av.

122 posee menor absorción (4,9%) pero mayor densidad de fisuras (2,57 mm/mm<sup>2</sup>) que el hormigón de la base que, por el contrario, posee una mayor absorción promedio (6,1%) y menor densidad de fisuras (2,45 mm/mm<sup>2</sup>).

Hormigón	Densidad de fisuras promedio (gr/cm <sup>3</sup> )	Absorción promedio (%)	Desvío estándar de densidad de fisuras promedio (mm/mm <sup>2</sup> )
Av. 122 (RO) La Plata	2,34	4,9	2,57
Av. 122 (B) La Plata	2,34	6,1	2,45
Av. Libertad Mar del Plata	2,37	4,5	3,57
RP88 Mar del Plata	2,37	6,8	2,64

**Tabla 8.3:** Resultados de los ensayos físicos de densidad y absorción de los hormigones (ASTM C 642 2013) y de la densidad de fisuras calculadas sobre secciones delgadas de los mismos.



**Figura 8.38:** Gráfico absorción Vs. densidad de fisuras promedio (mm/mm<sup>2</sup>) de los cuatro hormigones analizados.

No existe una correspondencia lineal entre la densidad de fisuras calculada mediante microscopía UV y la absorción, pudiendo depender en gran medida de la dosificación inicial de cada hormigón en particular (relación agua/cemento, tipo de agregado, uso de adiciones o aditivos, contenido de finos del agregado, etc.) y de la patología o patologías que los afectan (RAS, sulfatos, carbonatación, etc.). Por otra parte las fisuras que afectan al hormigón pueden ser de escasos micrones, estar selladas por productos o simplemente no estar interconectadas.

## **CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES**

### **9.1. GENERALES**

### **9.2. DENSIDAD, ABSORCIÓN Y DESGASTE DE LOS AGREGADOS**

### **9.3. REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL DE LAS ROCAS CUARCÍICAS DE LAS SIERRAS SEPTENTRIONALES**

**9.3.1 Examen petrográfico de agregados para hormigón. Norma IRAM 1649**

**9.3.2. Agregado grueso para hormigón de cemento. Norma IRAM 1531.**

**9.3.3. Método acelerado de la barra de mortero. Norma IRAM 1674**

**9.3.4. Método del prisma de hormigón. Norma IRAM 1700**

### **9.4. PETROGRAFÍA DE LOS HORMIGONES (ASTM C 856)**

**9.4.1. Probetas de hormigón post-ensayo.**

**9.4.2. Casos de obra: Pavimentos hormigón**

### **9.5. CONSIDERACIONES FINALES**

### **9.6. RECOMENDACIONES**



## 9.1. GENERALES

El relevamiento y ensayos realizados en las canteras cuarcíticas del área de Batán y Balcarce, sobre todo en aquellas en producción, permitieron observar diferencias significativas en los frentes de las distintas canteras e incluso dentro de un mismo yacimiento. Estas diferencias radican en la textura, tamaño de grano, presencia y composición de la matriz y del cemento de la roca, así como también en aspectos macroscópicos como la presencia de diaclasas, coloración y espesor de los estratos cuarcíticos, intercalación con lentes o capas arcillosas, etc. Estas variaciones repercuten en las propiedades físicas como densidad, absorción y desgaste otorgándole características particulares relevantes para la extracción de las mismas.

## 9.2. DENSIDAD, ABSORCIÓN Y DESGASTE DE LOS AGREGADOS

De la realización de estos ensayos se concluye que las densidades (relativa aparente saturada superficie seca) son similares tanto para las canteras del área de Batán-Est. Chapadmalal como para el área de Balcarce, aproximadamente de  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . Por el contrario los valores de absorción son mayores para las canteras del área de Batán, entre 1,5% y 1,8%, siendo inferior en las cuarcitas de la cantera estudiada en Balcarce.

Los valores de desgaste en las rocas de cantera Minera Yaraví y Pétreo de Batán son elevados y similares entre sí (alrededor del 49%), mientras que en las de cantera La Florida el valor es mucho menor (37%).

Las propiedades físicas están ligadas íntimamente a la textura de las rocas, siendo relevante la presencia y composición de una matriz fina en las arenitas. La composición de esta matriz es principalmente cuarzo-arcillosa de granulometría fina y muy fina, la cual provoca un incremento importante en la absorción y el desgaste de los agregados.

### **9.3. REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL DE LAS ROCAS CUARCÍICAS DE LAS SIERRAS SEPTENTRIONALES**

#### **9.3.1. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Norma IRAM 1649**

A través del examen petrográfico (IRAM 1649) con estereomicroscopio, microscopio petrográfico y MEB-EDS de muestras de cuarcita de cada cantera, se identificaron como componentes potencialmente reactivos clastos de cuarzo fuertemente tensionado, con elevado ángulo de extinción ondulante ( $> 25^\circ$ ) y cuarzo microcristalino, el cual se encuentra principalmente formando parte del cemento y/o matriz de las rocas. Debido a la presencia de ambos componentes potencialmente reactivos se califica a estos agregados como de reacción lenta o diferida. Por otra parte, es de destacar la relevancia del hallazgo de ópalo como un componente importante en la matriz de las cuarcitas de uno de los frentes de cantera Minera. La presencia de este constituyente potencial y altamente reactivo, hace que las rocas de este sector en particular, sean calificadas como agregados de reacción rápida frente a la RAS.

También el análisis petrográfico y de DRX realizados sobre las arcillas de las canteras del área de Batán mostraron que su composición es principalmente caolinita-illita-cuarzo; las arcillas del área de Balcarce están compuestas esencialmente por caolinita-illita. En ambos casos se descarta la presencia de arcillas de tipo expansivas y de componentes deletéreos o nocivos para hormigones de cemento portland en estos componentes finos.

#### **9.3.2. Agregado grueso para hormigón de cemento. Norma IRAM 1531.**

A partir de la determinación de las proporciones de cada litotipo encontrado y de los valores porcentuales de cada componente reactivo se concluye que:

- Los agregados de las canteras Pétrea y La Florida del área de Batán y de la cantera Los Pinos del área de Balcarce califican como no reactivos ya que el contenido de cuarzo fuertemente tensionado (con AEO mayor a  $25^\circ$ ) y cuarzo microcristalino no superan el 5%.

- Los agregados cuarcíticos de cantera Minera Yaraví de Batán muestreados en de los acopios, 6-20 mm, se califican como no reactivos ya que los porcentajes de cuarzo fuertemente tensionado y cuarzo microcristalino no superan el valor máximo establecido por la norma. La presencia de ópalo identificado en estas muestras es inferior al 0,1% por lo cual se desprecia.
- Las muestras del frente actualmente inactivo de cantera Minera (frente norte) son las únicas que califican como potencialmente reactivas frente a la RAS. Estas arenitas poseen un contenido de cuarzo fuertemente tensionado y microcristalino superior al 5%, y contienen ópalo en una proporción mayor al 0,5% (máximo establecido por la norma). Por la presencia de ópalo altamente reactivo calificamos a estas rocas como agregados de reacción rápida.

### **9.3.3. Método acelerado de la barra de mortero. Norma IRAM 1674**

- Los agregados cuarcíticos de las canteras Pétrea, La Florida y del acopio 6-20 mm de cantera Minera Yaraví del área de Batán, y las muestras de la cantera Los Pinos de Balcarce califican como no reactivos ya que las expansiones registradas a la edad de 16 días no superan el límite de 0,100%.
- Las muestras tomadas del frente inactivo de Minera (frente norte) califican como potencialmente reactivas debido a que la expansión a la edad de 16 días alcanza el 0,100%.

### **9.3.4. Método del prisma de hormigón. Norma IRAM 1700**

Ensayo acelerado a 60°C:

- Los agregados cuarcíticos de cantera Pétrea, La Florida y del acopio 6-20 mm del área de Batán, y de la cantera Los Pinos de Balcarce se califican como no reactivos ya que las expansiones registradas a la edad de 13 semanas no superan el límite de 0,080%, estimado para agregados de reacción lenta.
- Las muestras tomadas en el frente inactivo de cantera Minera Yaraví (frente norte) califican como potencialmente reactivas ya que la expansión a la edad de 13

semanas supera el valor máximo de 0,040% estipulado para agregados de reacción rápida y de 0,08% para los de reacción lenta. En este caso el agregado de este sector de la cantera califica como de reacción rápida debido a la presencia de ópalo como componente potencialmente reactivo.

Ensayo del prisma de hormigón convencional (a 38°C):

- Los agregados cuarcíticos de cantera Pétreá, La Florida, de las muestras de acopio 6-20 mm de cantera Minera del área de Batán y de la cantera Los Pinos de Balcarce se califican como no reactivos ya que las expansiones registradas a la edad de 1 año no superan el valor límite de 0,040%.
- Las muestras tomadas del frente inactivo de cantera Minera Yaraví (frente norte), son las únicas que se califican como potencialmente reactivas ya que la expansión a la edad de 1 año supera el valor de 0,040% especificado por la norma IRAM 1531 tanto para agregados de reacción lenta como rápida.

#### **9.4. PETROGRAFÍA DE LOS HORMIGONES (ASTM C 856)**

##### **9.4.1. Probetas de hormigón post-ensayo.**

- Del estudio petrográfico de las probetas de hormigón (IRAM 1700) post-ensayo se concluye que en mayor o menor medida en todas ellas se identifica material de neoformación en poros del mortero e interfases pasta-agregado y, en algunas ocasiones, reemplazando a la matriz original de la roca y/o rellenando intersticios dentro del agregado mismo.
- En los hormigones confeccionados con las rocas que contienen ópalo como componente altamente reactivo y cuyos valores de expansión superaron los límites establecidos por las normativas, se identificaron productos de reacción en el interior de los agregados y en poros de la interfase pasta-agregado grueso.
- Es de destacar que en ninguna de las probetas se observan fisuras relevantes que afecten la microestructura del hormigón. Así mismo las zonas de interfase se hallan en buen estado y con adecuada adherencia.

#### 9.4.2. Casos de obra: Pavimentos de hormigón

- Los hormigones estudiados fueron elaborados con la cuarcita Mar del Plata como agregado grueso.
- Todos los hormigones presentan en mayor o menor grado evidencias de carbonatación y presencia de ettringita y/o thaumasita en poros, fisuras e incluso en la pasta de cemento.
- Sólo el hormigón de la RP88 muestra evidencias de RAS, confirmado con MEB-EDS. El desarrollo de la reacción se atribuye a la presencia de ópalo y calcedonia en la matriz del agregado grueso cuarcítico, similar a las rocas del frente reactivo de cantera Minera analizado en el presente trabajo de Tesis. Además este hormigón posee como agregado fino una arena compuesta por líticos volcánicos con vidrio y chert, cuarzo, feldespatos y bioclastos de conchillas. La reacción en el hormigón puede haber sido potenciada por la suma de todos los componentes deletéreos (ópalo y cuarzo tensionado y/o microcristalino del agregado grueso, y vidrio volcánico y chert de la arena).
- La densidad de fisuración calculada en los pavimentos de hormigón mediante microscopía UV es más elevada en los hormigones del área de Mar del Plata, siendo mayor en el pavimento de la Avenida Libertad en donde se observa además mayor cantidad de ettringita y/o thaumasita rellenando poros y fisuras.
- Los valores de densidad y absorción determinados en muestras de todos los hormigones estudiados, se hallan dentro de los parámetros esperados, no teniendo una correlación lineal con la densidad de fisuras.

#### 9.5. APORTES Y CONSIDERACIONES FINALES

- De los estudios petrográficos realizados sobre las arenitas de las canteras estudiadas se destacan variaciones texturales, granulométricas, y del contenido y composición de la matriz, tanto entre las canteras como así también en un mismo frente de cantera (en lo vertical y horizontal). En base a estas variaciones, podemos decir que la petrografía es fundamental en este tipo de rocas ya que se pueden identificar

claramente los cambios texturales y composicionales. Esto es útil para delimitar sectores de frentes con rocas que contienen componentes potencialmente reactivos, y con distintos grados de reactividad de zonas con rocas no reactivas. En las sedimentitas es común observar estas variaciones debido a que sufren a lo largo de su historia de deposición y litificación distintos procesos de alteración o hidrotermalismo lo cual conlleva a la aparición de minerales en reemplazo de la matriz o el cemento original de las rocas, en distintos niveles de la columna sedimentaria. Esto se ejemplifica claramente en el frente reactivo de cantera Minera en el área de Batán; la presencia de ópalo altamente reactivo presente en la matriz de las arenitas de este sector y que no aparece en otras zonas, hace que sean calificados a los agregados de este único frente como de reacción rápida, a diferencia del resto de las muestras estudiadas que por la presencia de cuarzo fuertemente tensionado y microcristalino califican como de reacción lenta.

- En los estudios y métodos aplicados en este trabajo de Tesis se concluye que los ensayos físicos de RAS, método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674), y los ensayos del prisma de hormigón acelerado y convencional (IRAM 1700) son coincidentes entre sí y se correlacionan muy bien con la petrografía del agregado según la norma IRAM 1649 e IRAM 1531.
- En las probetas post ensayo no se observaron fisuras afectando al agregado, a la interfase o al mortero. Además, la presencia de poros en la roca, más allá de que aumenten la absorción de agua de los agregados, ofrecen un espacio donde los materiales de neoformación pueden alojarse sin generar expansiones perjudiciales para el hormigón.
- El hormigón de obra que presenta mayor densidad de fisuración corresponde al de la Avenida Libertad (Mar del Plata) cuya patología observada es propia de ataque por sulfatos; el segundo hormigón más fisurado es el del pavimento de la RP88 (Mar del Plata). En este caso la fisuración se asocia a la patología de RAS; en el hormigón se halla agregado grueso cuarcítico que posee ópalo como componente de la matriz, confirmando lo establecido mediante petrografía y ensayos físicos en barras de mortero y prismas de hormigón. En el hormigón de la avenida 122 de La Plata solo se



halló presencia de ettringita en cavidades de aire accidenta y en poros, presentando la menor densidad de fisuras de los tres pavimentos examinados.

- Los valores de absorción y densidad de los hormigones caen dentro de los parámetros normales. La densidad de fisuración calculada no posee una correlación directa con estos valores.

## 9.6. RECOMENDACIONES

Debido a las variaciones que se observan en los frentes de las canteras cuarcíticas, tanto laterales como verticales en cuanto a su composición, textura, presencia de arcillas, contenido y composición del cemento y/o matriz de las rocas (presencia de ópalo y/o cuarzo microcristalino, arcillas, etc.), tal como sucede en el frente norte de cantera Minera Yaraví, se recomienda realizar estudios periódicos de tipo geológico sobre los frentes, petrográficos en muestras de mano y en acopios de cantera, además de controles de los agregados mediante ensayos físicos de RAS. Esto contribuye a la optimización de los recursos de explotación de las rocas manteniendo su calidad comercial para la construcción de obras de ingeniería.

Las rocas cuarcíticas de Mar del Plata se califican como agregados de reacción lenta frente a la RAS por la presencia de cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino, pero el hallazgo de ópalo en la matriz y poros de algunas cuarcitas hace modificar esta apreciación, ya que en ocasiones puede comportarse como un agregado de reacción rápida por la presencia de este componente. Esto hace necesario la realización de estudios periódicos y ensayos físicos con el fin de controlar la potencial reactividad de las cuarcitas frente a la reacción álcali-sílice.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE E. 1879. La Geología de la Sierra Baya. Anales de la Sociedad Científica Argentina VIII: 34- 45. Buenos Aires.
- ALAEJOS P., LANZA V. 2012. Influence of equivalent reactive quartz content on expansion due to alkali-silica reaction, Cem. Concr. Res. 42 (1): 99-104.
- AMOS A.J., QUARTINO B., ZARDINI R. 1972. El "Grupo La Tinta" (Provincia de Buenos Aires). Paleozoico y Precámbrico?. 25° Congreso Brasileiro de Geología. Sao Paulo: 211-221.
- ANDERSEN K.T., THAULOW N. 1989. The application of undulatory extinction angles (UEA) as an indicator of alkali-silica reactivity of concrete aggregates. In: Okada, K., Nishibayashi, S., Kawamura, M. (Eds), 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto: 489-494.
- ANDREIS R.R. 2003. The Tandilia System, province of Buenos Aires, Argentina: its sedimentary successions. In: Domínguez E, Mas G, Cravero F (Eds) 2001, Clay Odyssey, Elsevier: 15-22.
- ANGELELLI V., VILLA J.R., SURIANO J.M. 1973. Recursos minerales y rocas de aplicación de la provincia de Buenos Aires. LEMIT – ANALES 2, Serie II. (235):1-204.
- AÑÓN SUÁREZ H., MAURIÑO V., MASSACCESI D. 1969. Cualidades físico-mecánicas de las ortocuarcitas de la provincia de Buenos Aires. Su empleo en obras viales y civiles. La Sección "Chapadmalal". Rev. Carretera N° 51, Buenos Aires. 15 p.
- ARROUY M.J., POIRÉ D.G., GÓMEZ PERAL L.E., CANALICCHIO J.M. 2015. Sedimentología y estratigrafía del Grupo La Providencia (nom. nov.): cubierta Superior neoproterozoica, Sistema de Tandilia, Argentina. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 22(2):171-189.
- ARROUY M.J., WARREN L.V., QUAGLIO F., POIRÉ D.G., GUIMARÃES SIMÕES M., BOSELLI M.R., GÓMEZ PERAL L.E. 2016. Ediacaran discs from South America: probable soft-bodied macrofossils unlock the paleogeography of the Clymene Ocean. Sci. Rep. 6(30590):1-10.
- ASTM C 33. 2010. Especificación estándar para agregados para hormigón. Annual Books ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 15 p.
- ASTM C 227. 2010. Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar – bar method). Annual Books ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates.6 p.
- ASTM C 289. 2007. Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method). Annual Books of ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 7 p.
- ASTM C 294. 2012. Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates. Annual Books ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 11 p.
- ASTM C 295. 2018. Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. Annual Books ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 9 p.
- ASTM C 642. 2013. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. Annual Books ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 3 p.

- ASTM C 856. 2017. Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. Annual Books ASTM Standards. ASTM Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 15 p.
- ASTM C 1260. 2014. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Annual Books ASTM Standards. ASTM Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 5 p.
- ASTM C1293. 2018. Standard tests method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. Annual Books ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates. 7 p.
- BACKLUND H. 1913. Algunas observaciones sobre rocas notables procedentes de Olavarría (Provincia de Buenos Aires). Dirección General Minería, Geología e Hidrología. Bol. Serie B2. Buenos Aires: 25 p.
- BARRIO C., POIRÉ D.G., IÑÍGUEZ RODRÍGUEZ A.M. 1991. El contacto entre la Formación Loma Negra (Grupo Sierras Bayas) y la Formación Cerro Negro, un ejemplo de paleokarst, Olavarría, provincia de Buenos Aires. Rev. Asoc. Geol. Arg. 46: 69-76.
- BARNEYBACK R.S., DIAMOND S. 1981. Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research 11(2):279-285.
- BATIC O.R., SOTA J.D. 2001. Reacciones deletéreas internas. Durabilidad del Hormigón Estructural. En F. Irassar (Ed). AATH. Capítulo 4. 157 p.
- BATIC O., SOTA, J., FRANKS, L. 1987. Experiencias realizadas para identificar agregados reactivos con el método de la celda osmótica. VIII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba. 11 p.
- BATIC O.R., CORTELEZZI C.R., PAVLICEVIC R., TRAVERSA L.P. 1991. Geotecnología de las areniscas del noroeste de la Provincia del Chaco. 2da Reunión sobre temas de Geología Aplicada a la Ingeniería. ENGEOL, Córdoba. 2 p.
- BATIC O.R, CORTELEZZI C.R., PAVLICEVIC R., TRAVERSA L.P. 1995. Caracterización tecnológica de las areniscas cementadas con calcedonia y ópalo del noroeste de la provincia del Chaco, República Argentina. Memorias XII Reunión Técnica de la AATH: 191-197.
- BATIC, O.R., SOTA J. D., MILANESI C. A., CORTELEZZI R.C., PAVLICEVIC R. 1999. Estudio de rocas graníticas de la provincia de Buenos Aires desde el punto de vista de la reactividad con los álcalis del hormigón, Revista Hormigón. 33:11-40.
- BATIC O.R., SOTA J.D., FALCONE D.D. 2005. RAS: Contribución para identificar agregados reactivos, en particular los de reacción lenta. Revista Ciencia y Tecnología N°12. 13 p.
- BATIC O., MAIZA P., MARFIL S., GRECCO L., FALCONE D. 2010. Areniscas silíceas. Su reactividad potencial frente a la reacción álcali-silice (RAS). XII Congreso Iberoamericano del Hormigón Premezclado, IV Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón, Reunión Técnica de la AATH. 9 p.
- BAZĀNT Z.P., STEFFENS A. 2000. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete. Cem. Concr. Res. 30(3):419-428.
- BEGLARIGALE A., YAZICI H. 2014. Mitigation of the detrimental effects of ASR in cement based composites by combination of steel micro-fibers and ground-granulated blast-furnace slag. Journal of Materials in Civil Engineering. 26(12). 10 p.

- BENTIVEGNA A.F, IDEKER J.H. 2016. Application of prognosis and diagnosis techniques of ASR for a historic structure. 15th ICAAR Proceedings, São Paulo, SP, Brazil. 10 p.
- BEREZOSKY J.J, FALCONE D., LESCANO L., MADSEN L, MARFIL S.A, MAIZA P.J. 2016. 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, 21ª Reunión Técnica de la AATH, Salta, Argentina. 8 p.
- BÉRUBÉ M.A., FOURNIER B. 1986. Products of alkali-silica reaction in concrete: Study of a case of the Quebec region. *Canadian Mineralogist*. 24, Part 2: 271-288.
- BÉRUBÉ A., FOURNIER B. 1993. Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 15:27-47.
- BHATIA M.R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, 91:611-627.
- BONARELLI G. 1932. Geología de América Meridional. *Revista Minera Año 4(2)*. Traducción al español de E. Feruglio. Artículo de la Enciclopedia Treccani, Roma. 2:880-882.
- BONHOMME M.G., CINGOLANI C.A. 1980. Mineralogía y geocronología Rb/Sr y K/Ar de fracciones finas de la Formación La Tinta, provincia de Buenos Aires. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 35(4):519-538.
- BOOGS S. Jr. 1992. *Petrology of sedimentary rocks*. Maxwell Macmillan. 707 p.
- BORRELLO A.V. 1962. Formación Punta Mogotes (Eopaleozoico-provincia de Buenos Aires). *Notas Comisión de Investigación Científica Provincia de Buenos Aires 1(1):1-9*.
- BORRELLO A.V. 1966. Trazas, restos tubiformes y cuerpos fósiles problemáticos de la Formación La Tinta, Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires. *Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Paleontografía Bonaerense 5:1-42*.
- BOSSI J., CINGOLANI C.A. 2009. Extension and general evolution of the Río de la Plata Craton. In: Gaucher C., Sial A.N., Halverson G.P., Frimmel H.E. (Eds) *Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*. 16:73-85.
- BRAITHWAITE C., HEATH R. 2014. Alkali-carbonate reactions and dedolomitization in concrete: silica, the elephant in the corner. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 46:351-360.
- BROWN L.S. 1955. Some observations on the mechanics of alkali-aggregate reaction. *ASTM Bulletin*. 204:40-51.
- BROEKMANS M.A.T.M. 2004. Qualities of Quartz and the Alkali-Silica Reaction in Concrete. *Proceedings 8th International Congress on Applied Mineralogy, Brazil*. Pecchio, M, et al (eds). 4 p.
- BUCK A.D. 1983. Alkali reactivity of strained quartz as a constituent of concrete aggregate. *Cement Concrete and Aggregates*. The American Society for Testing Materials. Philadelphia. 5: 131-133.
- BUCK A.D, MATHER K. 1984. Reactivity of quartz at normal temperatures. *Technical Report SL-84-12*, US. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Miss. 28 p.
- BURLEY S.D., WORDEN R.H. 2003. Sandstones diagenesis from sand to stone. Burley S.D., Worden R.H. (Eds). *Clastic Diagenesis: Recent and Ancient*. *International Association of Sedimentologists*. 4:3-44.

- CALO D.H. 2012. Diseño de pavimentos rígidos. Jornadas de Actualización Técnica. Diseño y construcción de Pavimentos de Hormigón. ICPA, Instituto del Cemento Portland Argentino. Web site: <http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/files/01.pdf>.
- CEPPI CABRERA H. 1964. Estudio geológico-económico del área minera del partido de General Pueyrredón. Prov. de Buenos Aires. M.O.P. Provincia de Buenos Aires (Inédito). 26 p.
- CHATTERJI S. 1979. The Role of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in the breakdown of portland cement concrete due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 9: 185-188.
- CHATTERJI S. 1989. Mechanisms of alkali silica reaction and expansion. *Proceedings of 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*. Kyoto, Japan: 101-105.
- CHERNICOFF C.J., ZAPPETTINI E.O., PERONI J. 2014. The Rhyacian El Cortijo suture zone: Aeromagnetic signature and insights for the geodynamic evolution of the southwestern Río de la Plata craton, Argentina. *Geoscience Frontiers*, 5(1): 43-52.
- CHOQUETTE P.W., PRAY L. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 54:207-250.
- CINGOLANI C.A. 2005. Unidades morfoestructurales (y estructuras menores) de la provincia de Buenos Aires. En: de Barrio R.E, Etcheverry R.O., Caballé M.F., Llambías E. (Eds), *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires*. XVI Cong. Geol. Arg. La Plata. Relatorio, cap. II:21-30.
- CINGOLANI C.A. 2011. The Tandilia system of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: An overview *International Journal of Earth Sciences*. 100(2-3):221-242.
- CINGOLANI C.A., BONHOMME M.G. 1982. Geochronology of La Tinta Upper Proterozoic sedimentary rocks, Argentina. *Precambrian Research*, 18(1-2):119-132.
- CINGOLANI C.A., BONHOMME M.G. 1988. Resultados geocronológicos en niveles pelíticos intercalados en las dolomías de Sierras Bayas (Grupo La Tinta), provincia de Buenos Aires. *Segundas Jornadas Geológicas Bonaerenses*, Bahía Blanca: 283-289.
- CINGOLANI C.A., DALLA SALDA L. 2000. Buenos Aires cratonic region. In: Cordani U., Milani E., Thomaz Filho A., Campos D. (Eds) *Tectonic evolution of South America*. In: *Proceedings 31st International Geological Congress*, Río de Janeiro: 139-146.
- CINGOLANI C.A., RAUSCHER R., BONHOMME M. 1991. Grupo La Tinta (Precámbrico y Paleozoico Inferior), provincia de Buenos Aires, Argentina: Nuevos datos geocronológicos y micropaleontológicos en las sedimentitas de Villa Caciique, partido de Juárez. *Rev. Tec. YPFB, Bolivia*, 12(2):177-191.
- CINGOLANI C.A., BASEI M.A.S., URIZ N.J. 2010. U-Pb (ID-TIMS) Zircon ages on pyroclastic events from Balcarce Formation, Tandilia System, Argentina: unreworkeed or reworkeed origin?. *7th South American Symposium on Isotope Geology*, Brasilia. 2p.
- COELHO DOS SANTOS G. 2015. Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras septentrionales (Tandil) frente a la RAS. *Ciencia y Tecnología de los Materiales*. Revista LEMIT. (5):7-13.
- COELHO DOS SANTOS G., FALCONE D. 2012. Reacción álcali-agregado en areniscas cuarzosas de la Formación Las Piedritas (Chaco) y cuarcitas de la Formación Balcarce (Buenos Aires), utilizadas como agregados para hormigón. *XII Reunión Argentina de Sedimentología*, Salta, Argentina: 53-54.

- COELHO DOS SANTOS G., MARFIL S., MAIZA P. 2014a. influencia de las características texturales y mineralógicas de la cuarcita Mar del Plata en su comportamiento como agregado en hormigón. Argentina. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 2° Congreso Argentino de Áridos. Fontana Piatti J., Guerra R., Leggiero J., Patrón Costas E., Ruggiero M., Carabajal A. (Eds), Cámara de La Piedra de la Prov. de Bs. As: 367-378.
- COELHO DOS SANTOS G., FALCONE D., MARFIL S., MAIZA P. 2014b. Estudio de la reactividad alcalina potencial de rocas cuarcíticas de la Formación Balcarce. Relación entre los resultados de los ensayos físicos y los estudios petrográficos. XIX Congreso Geológico Argentino. Córdoba 2p.
- COELHO DOS SANTOS G., MARFIL S., MAIZA P. 2014c. Productos de reacción desarrollados en probetas de hormigón elaboradas con rocas cuarcíticas de la provincia de Buenos Aires. XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba. 2p.
- COELHO DOS SANTOS G., MARFIL S., MAIZA P. 2015. Petrographic evaluation of a 50-year-old concrete pavement made with quartzitic aggregate. International Conference on Sustainable Structural Concrete, La Plata, Argentina: 340-348.
- COELHO DOS SANTOS G. S., LOCATI F., MARFIL S., MAIZA P. 2016. Influencia de los procesos genéticos en la reactividad de cuarcitas. Evaluación mediante ensayos acelerados. VII Congreso Internacional, 21ª Reunión Técnica de la AATH. Salta: 381-388.
- COELHO DOS SANTOS G.S., MARFIL S., FALCONE D., MAIZA P. 2017a. Estudio petrográfico de rocas cuarcíticas del área de Balcarce (provincia de Buenos Aires). Factibilidad de uso como agregado para hormigón. 3er Congreso Argentino de Áridos. Córdoba: 104-109.
- COELHO DOS SANTOS G.S., BENITO D., MARFIL S., MAIZA P., DEL RÍO J.L. 2017b. Caracterización mineralógica de los materiales arcillosos procedentes de las canteras de piedra Mar del Plata. Potencial utilización como adición mineral. Argentina. XX Congreso Geológico Argentino. San Miguel de Tucumán: Sesión técnica 9, 20-25.
- COLINA F., WAINSZTEIN M., BATIC O. 1967. Durabilidad de hormigones de cemento portland. Revista Ingeniería del Centro de Ingenieros de la Prov. de Buenos Aires 57, 128 p.
- Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Árido. 1972. Investigación de la reactividad potencial con los álcalis de los cementos de los áridos utilizados normalmente en las obras del Gran Buenos Aires y en una parte del litoral del norte Argentino. VII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 58:273-280.
- CORDANI U.G., SATO K., TEIXEIRA W., TASSINARI C.C.G., BASEI M.A.S. 2000. Crustal evolution of the South American Platform. Tectonic Evolution of South America. Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz-Filho A. and Campos D.A. (Eds). Rio de Janeiro: 19-40.
- CORTELEZZI C.R., IÑIGUEZ RODRÍGUEZ A.M., GIAI S.B. 1971. Estudio mineralógico de algunas calcedonias argentinas. LEMIT, Serie II (173). 7 p.
- CORTELEZZI C.R., MAIZA P.J., PAVLICEVIC R. 1990. Strained quartz in relation to alkali-silica reaction. In Erlin/Stark (Ed) Petrography applied to concrete and concrete aggregates, ASTM STP 1061. American Society for Testing and Materials. Philadelphia: 145-158.



- COX R., LOWE D. 1995. A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover. *Journal of Sedimentary Research*, A65. 1:1-21.
- CRAVERO F., PONCE M.B., GOZALVEZ M.R., MARFIL S.A. 2015. Piedra Mar del Plata: An Argentine orthoquartzite worthy of being considered as a Global Heritage Stone Resource. *Geological Society, London, Special Publications*. 407(1):263-268.
- CSA A23.2-14A-00. 2004. Potential expansivity of aggregates. (Procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C), methods of testing for concrete. *Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada*: 246-256.
- D'ORBIGNY A. 1847. *Voyage dans l'Amérique Meridionale*. Paris. 5(3): Mollusques: I-XLIII: 1-85.
- DALLA SALDA L.H. 1999. Cratón del Río de la Plata, El Basamento granítico-metamórfico de Tandilia y Martín Gracia. En: Caminos R. (ed) *Geología Regional Argentina. Anales del Instituto de Geología y Recursos Minerales (SEGEMAR)*, 29:97-100.
- DALLA SALDA L., IÑÍGUEZ RODRÍGUEZ A.M. 1979. La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. *VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén*, 1: 539-550.
- DALLA SALDA L.H., BOSSI J., CINGOLANI C.A. 1988. The Rio de la Plata cratonic region of southwestern Gondwana. *Episodes*, 11(4):263-269.
- DALLA SALDA L.H., DE BARRIO R.E., ECHEVESTE H.J., FERNÁNDEZ R.R. 2005. El basamento de las Sierras de Tandilia. En: *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires*, de Barrio R.E., Etcheverry R., Caballé M.F., Llambías E.J. (Eds). 16° Congreso Geológico Argentino, La Plata, 3:31-50.
- DALLA SALDA L., SPALLETI L., POIRÉ D., DE BARRIO R., ECHEVESTE H., BENIALGO A. 2006. TANDILIA 17. *Temas de la Geología Argentina INSUGEO, Serie Correlación Geológica, Tucumán*, 21: 17-46.
- DARWIN CH. 1846. *Geological observations in South America. The geology of the voyage of the Beagle*, Londres. 280 p.
- DAVIES G., OBERHOLSTER R.E. 1986a. The alkali-silica reaction product: A mineralogical and an electron microscopic study. *Proceedings of the Eighth International Conference on Cement Microscopy*. Texas I.C.M.A. Duncanville: 303-326.
- DAVIES G., OBERHOLSTER R. E. 1986b. Chemical and swell properties of the alkali-silica reaction product. *8th International Congress on the Chemistry of Cement*. Rio de Janeiro: 8th CIQC. 5: 249-255.
- DAVIES G., OBERHOLSTER R.E. 1987. An interlaboratory test programme on the NBRI accelerated test to determine the alkali reactivity of aggregates. In: *National Building Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research, South Africa*. 16 p.
- DAVIES G., OBERHOLSTER R.E. 1988. Alkali-silica reaction products and their development. *Cement and Concrete Research*, 18:621-635.
- DEER W.A., HOWIE R.A., WISE W.S., ZUSSMAN J. 1967. *Rock-forming Minerals: Silica Minerals. An introduction to the rock-forming minerals*. Geological Society, Second Edition. 4B. 965 p.

- DEL RÍO J.L., BÓ M., GOYENECHÉ H., BURMEISTER M., MASTROPASQUA P., CAMINO M. 2015. Estrategias para la valorización y rehabilitación del patrimonio minero de Batán-Chapadmalal, Mar del Plata, Argentina. *Revista de Geológica Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (35):35-44.
- DEL VALLE A. 1987. Sedimentología de la Formación Balcarce en el sector oriental de Tandilia. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. 279 p.
- DENT GLASSER L.S. 1979. Osmotic pressure and the swelling of gels. *Cement and Concrete Research*. 9(4): 515-517.
- DENT GLASSER L.S., KATAOKA N. 1981. The chemistry of "alkali aggregate" reaction. *Cement and Concrete Research*, 11(1):1-9.
- DI MAIO A.A., SOTA J.D., TRAVERSA L.P. 1996. Patología de estructuras de hormigón: Análisis de algunos de los casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años. *Revista de Ciencia y Tecnología UTN Regional La Plata, Año 2, (2): 23-29.*
- DI PAOLA E., MARCHESE H.G. 1974. Relación entre la tecto-sedimentación, litología y mineralogía de arcillas del Complejo Buenos Aires y la Formación La Tinta (prov. de Buenos Aires). *Rev. Asoc. Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, 5(3-4):45-58.
- DIAMOND S.A. 1976. Review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 6:549-560.
- DIAMOND S. 1989. ASR - another look at mechanisms. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Okada K., Nishibayashi S., Kawamura M. (Eds). 8th ICAAR Local Organizing Committee. The Soc. of Mat. Science, Japan, Kyoto: 83-94.
- DICKINSON W.R., SUCZEK C.A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. *Am. Assoc. Pet. Geol.* 63: 2164-2182.
- DÓLAR-MANTUANI L.M.M. 1981. Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali-reactive rocks. En: Oberholster R.E. (Ed), 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/36, Cape Town, South Africa: 1-6.
- DÓLAR-MANTUANI. 1983. Handbook of concrete aggregates. A petrographic and technological evaluation. Noyes Publication New Jersey, USA. 345p.
- DOTT R.H. 1964. Wacke, graywacke and matrix-what approach to immature sandstone classification. *Journal of Sedimentary Petrology*. 34:625-632.
- DRISTAS J.A. 1983. Petrología de una metaríolita en la Sierra del Tigre, Tandilia. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 38(2):192-200.
- DRISTAS J.A., FRISICALE M.C. 1987. Rocas piroclásticas en el sector sudoeste de las Sierra Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. *Rev. Asoc. Min. Petrol. Sedim.* 18(1-4): 33-45.
- DRISTAS J., FRISICALE M. 1996. Geochemistry of an altered pyroclastic suite interbedded in the sedimentary cover of the Tandilia area, Buenos Aires Province, Argentina. *Zbl. Geol. Paleont., Stuttgart, Teil I, H. 7/8: 659-675.*

- DRISTAS J.A., FRISICALE M.C. 2003. Two types of hydrothermal clay deposit in the south-east area of Tandilia, Buenos Aires Province, Argentina. En Domínguez E.; Mas G., Cravero F. (Eds): A Clay Odyssey. 12th International Clay Conference, 2001, Bahía Blanca. Elsevier: 85-92.
- DRISTAS J.A., MARTÍNEZ J.C. 2007. Late Proterozoic unconformity-related hydrothermal iron deposits in the northern Barker area (Tandilia ranges, Argentina). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*. 246(3):267-281.
- DRISTAS J.A., FRISICALE M.C., MARTÍNEZ J.C. 2003. High-REE APS minerals associated with advanced argillic alteration in the Cerrito de la Cruz deposit, Barker, Buenos Aires province, Argentina. *Gottinger Arbeiten für Geologie und Palaontologie, Sb (Festschrift Behr)*: 1-6.
- DRON R., BRIVOT F. 1992. Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction. Part 1: concepts. *Cem. Concr. Res.* 22(5):941-948.
- DRON R., BRIVOT F. 1993. Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction. Part 2: concepts. *Cem. Concr. Res.* 23(1):93-103.
- DURAND B., BERNARD J. 1987. Use of gel composition as a criterion for diagnosis of alkali-aggregate reactivity in a concrete containing siliceous limestone aggregate. *Materials and Structures*. 20:39-42.
- ECHESTEVESTE H., MARCHIONNI D., CORIALE N. 2005. Rocas ornamentales de la provincia de Buenos Aires. En de Barrio, Etcheverry, Caballé, Llambías (Eds). *Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Cap. XXVI*: 409-416.
- FAIRBRIDGE R.W. 1967. Phases of diagenesis and authigenesis. Capítulo 2. En: Larsen G. y Chilingar G.V. (Ed) Elsevier, 2: 431-478.
- FALCONE D.D. 2013. Tesis de Maestría: Antecedentes y metodología de ensayo para evaluar la reacción álcali-silíce. UNCPBA, Olavarría, Buenos Aires (Argentina). 128 p.
- FALCONE D.D., BATIC O.R. 2012. Estudios y antecedentes sobre la reacción álcali-silíce (RAS) en el LEMIT. En: Traversa L.P. (Ed). *Durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Anales LEMIT Serie III, (2)*:62-80.
- FALCONE D.D., COELHO DOS SANTOS G.S. 2013. Influencia del tamaño de las partículas del agregado reactivo frente a los álcalis en las barras de mortero. *Revista de Geológica Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. (30): 23-30.
- FAVA A.S.C., MANUELE, R.J., COLINA, J.F., CORTELEZZI C.R. 1961. Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el hormigón de cemento pórtland. *Revista Técnica LEMIT Serie II N° 85*. 40 p.
- FERNANDES I. 2005. PhD thesis: Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões. Estudo de casos de obra. Universidade do Porto, Portugal, 334 p.
- FERNANDES I., BROEKMANS M.A.T.M. 2013. Alkali-silica reactions: An overview. Part I. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2(4):257-267.
- FERNANDES I., RIBEIRO M.A., BROEKMANS M.A.T.M., SIMS I. 2016. Petrographic Atlas: characterisation of aggregates regarding potential reactivity to alkalis. *RILEM TC 219-ACS*

- Recommended Guidance AAR-1.2 for use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method. Springer Verlag, Dordrecht/NL. 191 p.
- FETTES D., DESMONS J. 2007. Metamorphic rocks: a classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences (IUGS), Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. Cambridge University Press, Cambridge. 258 p.
- FORTE L., ETCHEVERRY R., GARRIDO L., DEL RÍO J.L., HURTADO M., COUYOUPETROU L., ROLNY, C. 2014. Evaluación de las propiedades cerámicas de sub-productos sólidos de explotaciones de rocas de aplicación. 2º Congreso Argentino de Áridos. Fontana Piatti J., Guerra R., Leggiero J., Patrón Costas E., Ruggiero M., Carabajal A. (Ed). 2: 535-545.
- FOURNIER M., BÉRUBÉ A. 2000. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. Canadian Journal of Civil Engineering. 27:167-191.
- FRONDEL C. 1962. The System of Mineralogy, Volumen III. Silica minerals. Ed. John Wiley and Sons. Inc. New York and London. 334 p.
- GAUCHER C., BOGGIANI P.C., SPRECHMANN P., SIAL A.N., FAIRCHILD T.R. 2003. Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corumbá Groups (Uruguay and Brazil): palaeogeographic, palaeoclimatic and palaeobiologic implications. Precambrian Research. 120:241–278.
- GAUCHER C., SIAL A.N., BLANCO G., SPRECHMANN P. 2004. Chemostratigraphy of the lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and palaeoclimatic implications. Gondwana Research. 7(3):715-730.
- GAUCHER C., POIRÉ D.G., GÓMEZ PERAL L., CHIGLINO L. 2005. Litoestratigrafía, bioestratigrafía y correlaciones de las sucesiones sedimentarias del Neoproterozoico-Cámbrico del Cratón del Río de la Plata (Uruguay y Argentina). Lat. Am. Sedimentology and Basin Analysis. 12(2):145-160.
- GAUCHER C., FINNEY S.C., POIRÉ D.G., VALENCIA V.A., GROVE M., BLANCO G., PAMOUCAGHLIÁN K., GÓMEZ PERAL L. 2008. Detrital zircon ages of Neoproterozoic sedimentary successions in Uruguay and Argentina: insights into the geological evolution of the Río de la Plata Craton. Precambrian Research. 167:150–170.
- GAUCHER C., BOSSI J., BLANCO G. 2009. Palaeogeography. Neoproterozoic-Cambrian evolution of the Río de la Plata Palaeocontinent. In: Gaucher C., Sial A.N., Halverson G.P., Frimmel H.E. (Eds) Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana. Developments in Precambrian Geology. 16(4-6):131-141.
- GEORGE E.M. 2015. Late Tertiary petrified wood from Nevada, USA: Evidence of multiple silicification pathways. Geosciences. 5: 286-309.
- GHOLIZADEH VAYGHAN A., RAJABIPOUR F., ROSENBERGER J. L. 2016. Composition-rheology relationships in alkali-silica reaction gels and the impact on the Gel's deleterious behavior. Cement and Concrete Research. 83:45-56.
- GIACCIO G., ZERBINO R. 1994. Hormigones de alta resistencia elaborados con piedra partida cuarcítica como agregado grueso. Revista Hormigón. 26:35-42.

- GIACCIO, G., ZERBINO, R. 1997. Interfases en el hormigón: Efecto de la textura del agregado. *Revista Hormigón*. 31:23-33.
- GIACCIO, G., ZERBINO, R., PONCE, J.M., BATIC, O.R. 2008. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.* 38:993-1004.
- GILLOTT J.E. 1975 Alkali-aggregate reactions in concrete. *Engineering Geology*. 9:303-32.
- GIOVAMBATTISTA A., BATIC O.R., TRAVERSA L.P. 1981. Durabilidad de hormigones de cemento pórtland. *Revista Hormigón, AATH*. (5): 5-20.
- GIOVAMBATTISTA A., BATIC O., TRAVERSA L.P. 1985. Reacción álcali-silice, implicancias tecnológicas, ecológicas y económicas en la optimización de las soluciones ingenieriles. *Colloquia'85, Bs. As.* 6 p.
- GIOVAMBATTISTA A., BATIC O., TRAVERSA L.P. 1986. Reactivity of alkalis and sandstones cemented with opal and chalcedony. 7eme Conference International sur la Reaction Alkali-Granulant, Ottawa, Canadá. 4 p.
- GIOVAMBATTISTA A., EPERJESI L., TRAVERSA L.P. 1997. Análisis de los criterios de diseño por durabilidad de las mezclas de hormigón. 7 Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones y 6 Congreso Iberoamericano de Control de Calidad. Porto Alegre, Brasil. T.1.
- GOGTE B.S. 1973. An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali aggregate reactions. *Engineering Geology*. 7: 135-153.
- GOLDICH S.S. 1938. A study in rock-weathering. *Journal of Geology*. 46:17-58.
- GÓMEZ PERAL L.E. 2008. Petrología y diagénesis de las unidades sedimentarias precámbricas de Olavarría, provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, FCNyM, UNLP. 619 p.
- GÓMEZ PERAL L.E., POIRÉ D.G., STRAUSS H., ZIMMERMANN, U. 2007. Chemostratigraphy and diagenetic constraints of the Neoproterozoic carbonate successions from Sierras Bayas Group, Tandilia System, Argentina. *Chemical Geology*. 237:127-146.
- GÓMEZ PERAL L., SIAL A.M., ARROUY M.J., RICHIANO S., FERREIRA V.P., KAUFMAN A.J., POIRÉ D.G. 2017. Paleo-climatic and paleo-environmental evolution of the Neoproterozoic basal sedimentary cover on the Río de La Plata Craton, Argentina: Insights from the  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy. *Sed. Geol* 353:139-157.
- GONZÁLEZ BONORINO F. 1954. Geología de las Sierras Bayas, partido de Olavarría, provincia de Buenos Aires. *LEMIT Serie II*. 55:5-37.
- GONZÁLEZ BONORINO F. 1972. Introducción a la geoquímica. Washington Ed OEA. 140 p.
- GRATTAN-BELLEW P.E. 1981. Canadian experience of alkali-expansivity in concrete. *Proc., 5th ICAAR, Cape Town (South Africa)*. 11 p.
- GRATTAN-BELLEW P.E. 1986. Is high undulatory extinction in quartz indicative of alkali expansivity of granitic aggregates?. 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ottawa, Canada: 434-439.
- GRATTAN-BELLEW P.E. 1989. Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates. *Proc., 8th ICAAR, Kyoto (Japan)*: 279-294

- GRATTAN-BELLEW P.E. 1992. Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali-silica reaction. En: Poole, A.B. (Ed.), 9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Conc. Soc. Publ. CS.104 1, London: 383-394.
- GRATTAN-BELLEW P.E. 2001. Petrographic and technological methods for evaluation of concrete aggregates. En: Ramachandran V.S., Beaudoin J.J. (Eds). Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. Principles, Techniques and Applications, Noyes Publications and William Andrew Publishing, LCC: 63-104.
- HAGELIA P., FERNANDES I. 2012. On the AAR susceptibility of granitic and quartzitic aggregates in view of petrographic characteristics and accelerated testing. Proceedings of the 14th Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Austin, USA. 10 p.
- HALLSWORTH CR, KNOX R.W. 1999. BGS rock classification scheme (3): Classification of sediments and sedimentary rocks. British Geological Survey Report (RR 99-03). 44 p.
- HANSEN W.C. 1944. Studies relating to the mechanism by which the alkali-silica reaction proceeds in concrete. J. Am. Concr. Inst. 15: 213-227.
- HAUTHAL R. 1896. Contribución al estudio de la geología de la provincia de Buenos Aires, I. Las Sierras entre Cabo Corrientes e Hinojo. Revista del Museo de La Plata, 7: 477-489.
- HELMUTH R., STARK D., DIAMOND S., MORANVILLE-REGOURD M. 1993. Alkali-silica reactivity: An overview of research. 105p.
- HEUSSER J, CLARAZ G. 1863. Ensayo de un conocimiento geognóstico físico de la Provincia de Buenos Aires 1. La cordillera entre Cabo Corrientes y Tapalqué, Buenos Aires. 20 p.
- DE HILLS S.M., CORVALÁN J. Undulatory extinction in quartz grains of some Chilean granitic rocks of different ages. Geol. Soc. Am. Bull. 75 (1964): 363-366.
- HOBBS D.W, GUTTERIDGE W.A. 1979. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. Mag. Concr. Res. 31:235-242.
- HOLM J., GEIKER M. 1992. Durability of concrete. G.M Idorn Interantional Symposium. SP-131, American Concrete Institute (aci), 425 p.
- HOLMBERG E. 1972. Tandilia. 1er Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Leanza (Ed):365-393.
- HOWARTH R.J. 1998. Improved estimators of uncertainty in proportions, point counting, and pass-fail test results. American Journal of Science (298): 594-607.
- ICHIKAWA T., MIURA M. 2007. Modified model of alkali-silica reaction. Cem. Concr. Res. 37: 1291-1297.
- IDORN G.M. 2001. A discussion of the paper "Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete". By Bažant Z.P. Steffens A. Cem. Concr. Res. 31: 1109-1110.
- ÍÑIGUEZ RODRÍGUEZ A.M. 1999. Cratón del Río de la Plata, 2: La cobertura sedimentaria de Tandilia. Anales del Instituto de Geología y Recursos Minerales (SEGEMAR). 29:101-106.
- ÍÑIGUEZ RODRÍGUEZ A.M, ZALBA P.E. 1974. Geología de arcillas refractarias de la provincia de Buenos Aires, República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 29(3): 304-310.



- IRAM 1501-1. 1978. Tamices de ensayo. Definiciones. 10 p.
- IRAM 1505 2003. Agregados. Análisis granulométrico. 12 p.
- IRAM 1512.2013. Agregado fino para hormigón de cemento. 25 p.
- IRAM 1531. 2016. Agregado grueso para hormigón de cemento. 27 p.
- IRAM 1532 2000. Agregados gruesos. Método de ensayo de resistencia al desgaste con la máquina "Los Ángeles". 12 p.
- IRAM 1533 2002. Agregados gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. 11 p.
- IRAM 1534. 1985. Hormigón de cemento pórtland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorios. 19 p.
- IRAM 1597. 1992. Morteros y hormigones de cemento pórtland. Método de ensayo de cambio de largo. 15 p.
- IRAM 1637. 1992. Reacción álcali-agregado. Método de la barra de mortero para la determinación de la reactividad alcalina potencial. 18 p.
- IRAM 1649. 2008. Examen petrográfico de agregados para hormigón. 14 p.
- IRAM 1650. 1968. Reactividad alcalina potencial en áridos. Método de ensayo químico. 15 p.
- IRAM 1674. 1997. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero. 14 p.
- IRAM 1700. 2013. Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado. 16 p.
- IRAM 50000. 2017. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. 28 p.
- ISHII E., SANADAB H., IWATSUKI T., SUGITA Y, KURIKAMI H. 2011. Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rock. *Engineering Geology* 122: 215-221.
- JAKOBSEN U.H. LAUGESEN P., THAULOW N. 2000. Determination of water-cement ratio in hardened concrete by optical fluorescence microscopy. *Water-Cement Ratio and Other Durability Parameters: Techniques for Determination*, Report No. ACI SP-191. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI: 27-41.
- KAGIMOTO H., KAWAMURA M. 2011. Measurements of strain and humidity within massive concrete cylinders related to the formation of ASR surface cracks. *J. Cem. Concr. Res.* 41(8):808-816.
- KAGIMOTO H., YASUDA Y., KAWAMURA M. 2016. Effects of expansion behavior of ASR-affected concrete in atmospheres with various values of relative humidity on surface cracking. 15th ICAAR Proceedings, São Paulo, SP, Brazil. 12 p.
- KANG K.W., ECHARRI J.M., LLORENTE C.L. 2013. Servicio de microscopía electrónica de barrido y microanálisis del LIMF Facultad de Ingeniería UNLP. Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia: 660-665.

- KATAYAMA T. 2012. ASR gels and their crystalline phases in concrete universal products in alkali-silica, alkali-silicate and alkali-carbonate reactions. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions (ICAAR), Austin, Texas USA. 12 p.
- KAWAMURA M., TAKEMOTO K., HASABA, S. 1983. Application of quantitative EDXA analysis and microhardness measurements to the study of alkali-silica reaction mechanisms. Alkalies in concrete research and practice. Sixth International Conference. Idorn G.M., Steen Rostam (Eds). Copenhagen: Danish Concrete Association: 167-174.
- KAWAMURA N, KAWABATA Y, KATAYAMA T. 2016. Diagnosis of alkali-silica reaction in airport pavement in Japan. 15th ICAAR Proceedings, São Paulo, SP, Brazil. 10 p.
- KERRICK D., HOOTON R. 1992. ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar tests, *Cem. Concr. Res.* 22:949-960.
- KLEIN C., HURLBUT C. 1998. Manual de mineralogía. Translated by J. Aguilar Peris Edition 4. Ed. Reverté. 390 p.
- LARSEN G., CHILINGAR G.V. 1979. Diagenesis in sediments and sedimentary rocks. *Developments in sedimentology* 25. Elsevier, Amsterdam. 579 p.
- LE MAITRE R.W., STRECKEISEN A., ZANETTIN B., LE BAS M.J., BONIN B., BATEMAN P., BELLINI G., DUDEK A., EFREMOVA S., KELLER J., LAMEYRE J., SABINE P.A., SCHMID R., SØRENSEN H., WOOLEY A.R. 2002. Igneous rocks. A classification and glossary of terms, in: R.W. Le Maitre (Ed.). *Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*, Cambridge University. 236 p.
- LE MAITRE R.W., STRECKEISEN A., ZANETTIN, B., LE BAS M.J., BONIN P., BATEMAN P., BELLINI G., DUDEK A., EFREMOVA S., KELLER J., LAMEYRE J., SABINE P.A., SCHMIDT R., SØRENSEN H., WOOLLEY A.R. 2005. *Igneous rocks: A classification of and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences (IUGS), Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. 2nd edition.* Blackwell Scientific, Oxford. 256 p.
- LEANZA C.A., HUGO C.A 1987. Descubrimiento de fosforitas sedimentarias en el Proterozoico Superior de Tandilia, Buenos Aires, Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 42:417-428.
- LEE, DAVID R. 2007. Characterisation and the diagenetic transformation of non and micro-crystalline silica minerals. *MESci Geology*, University of Liverpool, United Kingdom. 20 p.
- LEEMANN A., KATAYAMA T., FERNANDES I., BROEKMANS M. A. T. M. 2016. Types of alkali-aggregate reactions and the products formed. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials.* 169(3):128-135.
- LEMA H., CUCCHI R. 1981. Hallazgo de metavulcanitas en el Cerro Tandileufú, provincia de Buenos Aires. *Revista Asociación Geológica Argentina.* 36: 1-103.
- LEMA H., CUCCHI R. 1985. Geología de la Sierra Alta de Vela. *Primeras Jornadas Geológicas Bonaerenses:* 867-879.

- LENZNER D., LUDWIG V. 1978. The alkali aggregate reaction with opaline sand stone from Schleswig-Holstein. 4th International Conference on Effects of Alkalis in Cement and Concrete, Purdue University, USA:11-34.
- LEVERATTO M.A., MARCHESE H.G., 1983. Geología y estratigrafía de la Formación La Tinta (y homólogas) en el área clave de Sierra de La Tinta - Barker - Villa Cacique - Arroyo Calaveras, provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 38 (2): 235-247.
- LNEC E 415. 1993. Inertes para argamassas e betões—determinação da reactividade potencial com os álcalis, Análise petrográfica. Especificação LNEC, Lisboa, Portugal. 6 p
- LOCATI F. 2012. Estudio de las rocas del basamento ígneo-metamórfico de la Sierra Chica de Córdoba, utilizadas como agregados para hormigón: Su comportamiento frente a la reacción álcali- agregado (RAA). Tesis Doctoral, Córdoba. 248 p.
- LOCATI F., MARFIL S., BALDO E. 2010. Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction. Engineering Geology 116: 117-128.
- LOCATI F., MARFIL S., BALDO E., BATIC O. 2008. Comportamiento de rocas metamórficas con venas de pseudotaquillitas de las Sierras Chicas de Córdoba, frente a la reacción álcali-silíce. III Congreso Internacional de la AATH, 17ª Reunión Técnica, Córdoba: 257-264.
- LOCATI F., MARFIL S.A. 2013. Productos de neoformación identificados en prismas y barras de mortero realizados con agregados pétreos de la provincia de Córdoba. Revista Hormigón. (53): 2-15.
- LONGUET P., BURGLEN L., ZELWER A. 1973. The liquid phase of hydrated cement. Mat. Const. 676:35-41.
- MADSEN L., MARFIL S., LOCATI F., ROCCO C. 2017. Determinación del grado de fisuración en prismas de hormigón utilizando microscopía UV. Revista Hormigón. (57):7-14.
- MAIZA P., MARFIL S.A. 1991. Comparación de los productos de la reacción álcali - agregado en hormigones de obra y barras de mortero con los obtenidos en ensayos de síntesis. 10ª Reunión Técnica de la A.A.T.H. Olavarría. I: 33-46.
- MAIZA P., MARFIL S.A. 2003a. Susceptibilidad de agregados silíceos a la degradación frente a la reacción álcali – sílice. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. (19):61-64.
- MAIZA P., MARFIL S.A. 2003b. Evaluación de los pavimentos de concreto afectados por la reacción álcali-silíce (RAS) en la ciudad de Bahía Blanca (Provincia de Buenos Aires, Argentina). X Congreso Geológico Chileno Concepción. 8 p.
- MAIZA P., MARFIL S.A., SOTA J.D., BATIC O.R. 1988. Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de reactividad potencial alcalina en áridos finos utilizados en Bahía Blanca y Punta Alta, Prov. de Buenos Aires. II Jornadas Geológicas Bonaerenses, Bahía Blanca: 97-709.
- MAIZA P., MARFIL S.A, MILANESI C.A. 1999. Minerales desarrollados en hormigones deteriorados por la reacción álcali-silíce (provincia de Córdoba).VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales COPROCA, Córdoba, Argentina: 193-200.

- MAIZA P., BATIC O.R., GRECCO L., MARFIL, S.A., SOTA J.D. 2006. Rocas volcánicas de la Patagonia: su comportamiento frente a la RAS. 16° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH). 8 p.
- MAIZA P., BATIC O.R., MARFIL S.A., GRECCO L., GIGLIO, P. 2008. Evaluación de la reactividad alcalina potencial de los agregados gruesos y finos utilizados en la zona de Viedma (prov. de Río Negro). *Revista Hormigón*. (45): 41-52.
- MARCHESE H.G., DI PAOLA E.C. 1975a. Reinterpretación estratigráfica de la perforación Punta Mogotes N° 1, provincia de Buenos Aires. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 30 (1): 17-44.
- MARCHESE H.G., DI PAOLA E. 1975b. Miogeosinclinal Tandil. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 30 (2): 161-179.
- MARFIL S.A. 2013. Análisis de la reactividad de rocas mediante petrografía. Seminario Iberoamericano sobre Diseño Prestacional para Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado, La Plata, Argentina, 23 p.
- MARFIL S.A., MAIZA P. 1989. Aporte de sílice en medio alcalino de los principales componentes deletéreos frente a la reacción álcali-agregado. IX Reunión Técnica AATH. Buenos Aires. 11 p.
- MARFIL S.A., MAIZA P. 1992. Síntesis de ceolitas a partir de arcillas caolínicas. I Reunión de Mineralogía y Metalogenia. La Plata: 161-169.
- MARFIL S.A., MAIZA P.J. 1993. Zeolite crystallization in portland cement concrete due to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*. 23(6):1283-1288.
- MARFIL S.A., MAIZA P.J. 2001. Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina. *Cem. Concr. Res.* 31(7): 1017-1021.
- MARFIL S.A., MAIZA P. 2011. Agregados de la provincia de Buenos Aires. *Publicación Especial ASAGAI: Agregados pétreos de las provincias de Buenos Aires y Córdoba*. Bonalumi A., Marfil S. (Eds): 25-66.
- MARFIL S.A., MAIZA, P., MAS G. 1988. Minerales sintetizados en condiciones experimentales que simulan el fraguado del hormigón del cemento portland. II Jornadas Geológicas Bonaerenses: 683-695.
- MARFIL S, BATIC O, MAIZA P. 2012. Petrography of potentially alkali reactive sandstone from Argentina. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions (ICAAR), Austin, Texas (USA). 8 p.
- MASON B. 1966. *Principles of Geochemistry*, 3rd edition, Wiley, New York. 329 p.
- MCGOWAN J.K., VIVIAN H.E. 1952. Studies in cement-aggregate reaction: correlation between crack development and expansion of mortars. *Australian Journal of Applied Science*. 3:228-232.
- MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, HANSON G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In: Johnsson M J, Basu A, eds. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. *Geol. Soc. Spec. Pap.*: 21-40.
- MELVER J., SIMS S. 1981. Further studies on the measurement of undulatory extinction in quartz. 5th ICAAR, Ciudad del Cabo, Sudáfrica. S 252/3: 7-10.
- MIELENZ R.C. 1954. Petrographic examination of concrete aggregate. *ASTM*. 5: 1188-1218.

- MIELENZ R.C. 1958. Petrographic examination of concrete aggregate to determine potential alkali-reactivity. Report No. 18-C, Highway (Transportation) Res. Board: 29-38.
- MIDDLETON G.V. 1960. Chemical composition of sandstones. GSA Bulletin. 71(7):1011-1026.
- MILANESI C., SOUZA C.E., MARFIL S., MAIZA P. 2008. Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra. 3er Congreso Internacional. 17ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Memorias, Córdoba: 273-280.
- MINDENSS S., YOUNG F. 1981. Concrete. Edition, illustrated. Publisher, Prentice-Hall. 640 p.
- MOUSSY V.M. 1860. Description géographique et statistique de la cofederation Argentine. I-III, Paris: 1810-1869.
- MURLIDHAR B.R., MOHAMAD T., ARMAGHANI D.J. 2016. Potential alkali silica reactivity of various rock types in an aggregate granite quarry. Measurement 81:221-231.
- NÁGERA j.j. 1919. La Sierra Baya. An. Minist. Agric. Arg., Sec. Geol., XIV, 1.
- NÁGERA J.J. 1932. Primera carta geológica general de Tandilia, escala 1:500.000. Litografía Colombatti y Cía. Ltda., Buenos Aires.
- NÁGERA J.J. 1940. Historia física de la provincia de Buenos Aires, 1. Tandilia. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Humanidades y Ciencia de la Educación. Biblioteca de Humanidades XXIV. 24 p.
- NIXON P.J., SIMS I. 2016. RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, RILEM State-of-the-Art Reports, Vol. 17, Springer, Dordrecht, Netherlands. 176 p.
- OLAFSSON H. 1986. The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars. 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ottawa, Canada: 461-466.
- PAN J.W., FENG Y.T, WANG J.T., SUN Q.C., ZHANG C.H., OWAN D.R.J. 2012. Modelling of alkali-silica reaction in concrete: a review. Front. Struct. Civ. Eng. 6(1):1-18.
- PANKHURST R.B., RAMOS V.A., LINARES E. 2003. Antiquity of the Río de la Plata Craton in Tandilia, southern Buenos Aires province, Argentina. Journal of South American Earth Sciences. 16:5-13.
- PAZOS P., SÁNCHEZ-BETTUCCI L., LOUREIRO J. 2008. The Neoproterozoic glacial record in the Río de la Plata Craton: a critical reappraisal. In: Pankhurst R.J., Trouw R.A.J., Brito Neves B.B., De Wit MJ (Eds). West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region. Geological Society, London, Special Publications. 294:343-364. doi:10.1144/SP294.18.
- PETTIJOHN F.J. 1975. Sedimentary rocks. Harper and Row. New York. 628 p.
- PETTIJOHN F.J., POTTER P.E., SIEVER R. 1972. Sand and sandstones. Springer, Verlag, New York. 618 p.
- PETTIJOHN F. 1976. Rocas Sedimentarias. 3ra. Edición. Editorial Universitaria de Bs. As. 731 p.
- PETTIJOHN F., POTTER P., SIEVER R. 1987. Sand and sandstone, Springer, Verlag, New York. 2da edición. 630 p.
- PIPER D.Z. 1974. Rare earth elements in the sedimentary cycle: a summary. Chemical Geology. 14: 285-304.

- PLUSQUELLEC G., GEIKER M. R., DUCHESNE J., LINDGÅRD J., DE WEERDT K. 2016. Review of methods to determine the ph and the free alkali content of the pore solution in concrete. 15th ICAAR. São Paulo, Brazil. 9 p.
- POIRÉ D.G. 1987. Mineralogía y sedimentología de la Formación Sierras Bayas en el núcleo septentrional de las sierras homónimas, partido de Olavarría, provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral 494, FCNyM, UNLP. 271 p.
- POIRÉ D.G. 1993. Estratigrafía del Precámbrico sedimentario de Olavarría, Sierras Bayas, provincia de Buenos Aires, Argentina. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos. 2:1-11.
- POIRÉ D.G. 2004. Sedimentary history of the Neoproterozoic of Olavarría, Tandilia System, Argentina: new evidence from their sedimentary sequences and unconformities. A snowball Earth or a phantom glacial?. 1 Symposium on Neoproterozoic-Early Paleozoic Events in SW-Gondwana: 46-48.
- POIRÉ D.G. 2008. Marcadores geológicos regionales del Neoproterozoico de Olavarría, Sistema de Tandilia. XVII Congreso Geológico Argentino, Jujuy: 1041-1042.
- POIRÉ D.G., GAUCHER C. 2007. Lithostratigraphy and correlations of two Neoproterozoic basins from the Río de la Plata Craton, SW-Gondwana. 3er Symposium on Neoproterozoic-Early Paleozoic Events in Southwestern Gondwana, Short Papers, Stellenbosch: 23-27.
- POIRÉ D.G., GAUCHER C., GERMS G. 2007. La Superficie Barker y su importancia regional, Neoproterozoico del Cratón del Río de La Plata. 6ª Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Mar del Plata. Resúmenes: 36-37.
- POIRÉ D.G., GAUCHER C. 2009. Lithostratigraphy. Neoproterozoic-Cambrian evolution of the Río de La Plata Palaeocontinent. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds). Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana. *Developments in Precambrian Geology*, Elsevier. 16(4.2):87-101.
- POIRÉ D.G., SPALLETTI L. 2005. La cubierta sedimentaria precámbrica-paleozoica inferior del Sistema de Tandilia. En: de Barrio R.E., Etcheverry R.O., Caballé M.F., Llambías E. (Eds). *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires*. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. Relatorio. 4: 51-68.
- POIRÉ D.G., SPALLETTI L.A., DEL VALLE A. 2003. The Cambrian-Ordovician siliciclastic platform of the Balcarce Formation (Tandilia System, Argentina): facies, trace fossils, palaeoenvironments and sequence stratigraphy. *Geologica Acta*. 1 (1): 41-60.
- POKLEPOVIC F., LOCATI F., SILVA R., MARFIL S., MAIZA, P. 2010. Estudio del pavimento de hormigón de la autopista Córdoba-Carlos Paz, provincia de Córdoba, Argentina: Patologías vinculadas a su deterioro. *International Congress of Pathology and Reinforcement of Structures*. 15p.
- POLLASTRO R.M. 1993. Considerations and applications of the Illite/Smectite Geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of Miocene to Mississippian age. *Clays and Clay Minerals*. 41:119-133.
- PONCE J.M., BATIC O.R. 2006. Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. *Cem. Concr. Res.* (36):1148-1156.



- POOLE A.B, SIMS I. 2016. Concrete petrography: A handbook of investigative techniques, Second Edition. CRC Press. 816 p.
- POTHE DE BALDIS E.D., BALDIS B., CUOMO J. 1983. Los fósiles precámbricos de la Formación Sierras Bayas (Olavarría) y su importancia intercontinental. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 38 (1): 73-83.
- POWERS T.C., STEINOUR H.H. 1955a. An interpretation of some published researchers on alkali-aggregate reaction. Part 1-The chemical reactions and mechanism of expansion. *Journal of the American Concrete Institute*. (51):497-516.
- POWERS T.C., STEINOUR H.H. 1955b. An interpretation of some published researchers on alkali-aggregate reaction. Part 2-A hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete. *Journal of the American Concrete Institute*. (51):785-811.
- RAJABIPOUR F., GIANNINI E., DUNANT C., IDEKER J.H, THOMAS M.D. 2015. Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cem. Concr. Res.* 76:130-146.
- RAMOS V.A. 1988. Late Proterozoic-Early Paleozoic of South America. A collisional history. *Episodes* 11:168-174.
- RAMOS V.A. 1999. Evolución tectónica del territorio argentino. En: Caminos R (ed) *Geología Argentina, Anales SEGEMAR*. 29(24):715-784.
- RAMOS V., FERNANDES I., SANTOS SILVA A., SOARES D., FOURNIER B., LEAL S., NORONHA F. 2016. Assessment of the potential reactivity of granitic rocks - Petrography and expansion tests. *Cement and Concrete Research*. 86:63-77.
- RAPELA C.W., PANKHURST R.J., CASQUET C., FANNING C.M., BALDO E.G., GONZÁLEZ-CASADO J.M., GALINDO C., DAHLQUIST J. 2007. The Río de la Plata Craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth Sci Rev* 83:49-82. doi:10.1016/j.earscirev.2007.03.004.
- RAPELA C.W., CASQUET C., PANKHURST R.J., BALDO E.G., FANNING C.M., GALINDO C., DAHLQUIST J., GONZÁLEZ-CASADO J.M. 2008. The final assembly of Gondwana: the evidence from the Sierras Pampeanas. En: *Proceedings of 3rd International Geological Congress, Oslo*
- RASBAND W.S. 2017. ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>
- REGLAMENTO CIRSOC 201.2005. Presidencia de la Nación. Secretaría de Obras Públicas. Reglamento argentino de estructuras de hormigón. 666 p.
- REGOURD-MORANVILLE M. 1989. Products of reaction and petrographic examination. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Kyoto: 445-456.
- REGOURD M., HORNAIN H. 1986. Microstructure of reaction products. In: Grattan-Bellew P.E. (Ed). 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Ottawa: 375-380.
- RHOADES R., MIELENZ R.C. 1946. Petrography of concrete aggregate. *Journal of the American Concrete Institute*. 17(6):581-600.

- RILEM TC 191-ARP. 2005. Alkali-reactivity and prevention. Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity'AAR-5: Rapid preliminary screening test for carbonate aggregates Sommer, P. Nixon, I. Sims. *Journal Serial, Materials and Structures*. RILEM. 38(282):787-792.
- RILEM AAR-0. 2016. Outline guide to the use of RILEM methods in the assessment of the alkali-reactivity potential of aggregates. TC-219-ACS, Nixon P.J., Sims I. (Eds): 5-34.
- RILEM AAR-1.1. 2016. Detection of potential alkali-reactivity-Part 1. Petrographic examination method. TC-219-ACS, Nixon P.J., Sims I. (Eds): 35-60.
- RILEM AAR-2. 2016. Detection of potential alkali-reactivity-accelerated mortar-bar test method for aggregates. TC-219-ACS, Nixon P.J., Sims I. (Eds): 61-77.
- RILEM AAR-3. 2016. Detection of potential alkali-reactivity-38°C test method for aggregate combinations using concrete prisms. TC-219-ACS, Nixon P.J., Sims I. (Eds):79-97.
- RILEM AAR-4.1. 2016. Detection of potential alkali-reactivity-60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms. TC-219-ACS, Nixon P.J., Sims I. (Eds): 99-116.
- RODGERS K.A., BROWNE P.R.L., BUDDLE T., GREATREX R.A., HAMPTON W.A., PASTARS D., SMITH B.Y. 2002. Minerals and microbes among hot springs of New Zealand. *Mineralogical Society Bulletin*. 134: 3-8.
- SAOUMA V.E., MARTIN R.A., HARIRI-ARDEBILI M.A., KATAYAMA T. 2015. A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction. *Cement and Concrete Research*. 68:184-195.
- SCASSO R.A., LIMARINO C.O. 1997. *Petrología y Diagénesis de Rocas Clásticas*. Asociación Argentina de Sedimentología. Publicación especial, 260 p.
- SEILACHER A., CINGOLANI C.A., VARELA R. 2002. Ichnostratigraphic correlation of Early Paleozoic sandstones in North Africa and Central Argentina. In: Salem M., Oun K. (Eds). *Geology of Northwest Libya*, Earth Sci Soc Lybia. (1):275-292.
- SHAYAN A. 1993. Alkali-reactivity of deformed granitic rocks: a case study, *Cem. Concr. Res.*23:1229-1236.
- SIMS I. 1992. Alkali-silica reaction-UK experience, in the alkali-silica reaction in concrete. Swamy R.N. (Ed), Blackie and Son, London. 333 p.
- SOLLERO M.B.S, BAIMA L.Q.G, BOLORINO H. 2016. Investigation and assessment of alkali-aggregate reaction (AAR) in the Pirapora Dam. 15th ICAAR, São Paulo, Brazil. 8 p.
- SOTA J.D. 1997. Dispositivo y metodología para la extracción del líquido de los poros del hormigón del cemento portland. *Jornadas Sobre Materiales de Construcción*, Buenos Aires, Tandil:549-552.
- SOTA J.D., GIACCIO G.M., ZERBINO R.L. 1996. High performance concrete: study of mortar pore solution. 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden. 2. 5p.
- SOTA J.D., IASI R., PEREZ R., BATIC O.R. 1997. Los iones presentes en el líquido de poros de los hormigones afectados por la reacción álcali-agregado. XXI Congreso Argentino de Química, Bahía Blanca. 10 p.
- SPALLETTI L.A., DEL VALLE A. 1984. Las diamictitas del sector oriental de Tandilia: caracteres sedimentológicos y origen. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 39 (3-4):188-206.

- St. JOHN D.A., POOLE A.B., SIMS I. 1998. Concrete petrography. A handbook of investigative techniques. Arnold (Ed). 474 p.
- STANTON T.E. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. American Society of Civil Engineers. 66: 1781-1811.
- STANTON T.E. 1942 Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. (107). 54p.
- STANTON T.E., PORTER O.J., MEDER S., NICOL A. 1942. California experience with the expansion of concrete through reactions between cement and aggregate. ACI Journal. 38. 209 p.
- STARK D. 1991. The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity. Durability of Concrete, Proceedings, Second International Conference, Montreal, Canada 1991. Detroit: American Concrete Institute, SP126. (2):973-987.
- STRUBLE L., DIAMOND S. 1981 Unstable swelling behaviour of alkali silica gels. Cement and Concrete Research. 11:611-617.
- SWENSON EG. 1957. A reactive aggregate undetected by ASTM test. ASTM Bulletin. 226: 48-51.
- TARBUCK E.J, LUTGENS F.K. 2005. Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física. Pearson Prentice Hall, 8va edición. 685 p.
- TERUGGI M.E. 1964. Paleocorrientes y paleogeografía de las ortocuarcitas de la Serie de La Tinta (Provincia de Buenos Aires). Anales de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. 5: 1-27.
- TERUGGI M.E. 1982. Diccionario Sedimentológico. Volumen I: Rocas Clásticas y Piroclásticas. Ediciones Científicas Argentinas Librart. Buenos Aires. 104 p.
- TERUGGI M.E., KILMURRAY J.O. 1975. Tandilia. Relatorio, VI Congreso Geológico Argentino. Geología de la Provincia de Buenos Aires: 57-77.
- TERUGGI, M.E., KILMURRAY, J.O., 1980. Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires. En: J. Turner (Ed.): Geología Regional Argentina. 2:919-965.
- TERUGGI M.E., LEGUIZAMÓN M.A., RAMOS V.A. 1988. Metamorfitas de bajo grado con afinidades oceánicas en el basamento de Tandil: sus implicaciones geotectónicas, provincia de Buenos Aires. Rev. Asoc. Geol. Arg., 43: 366-374.
- TRAVERSA L.P. 2004. Patología de las estructuras de hormigón armado. Ciencia y Tecnología del Hormigón. 11: 41-48.
- TRAVERSA L.P.2012. Durabilidad de las estructuras de hormigón armado: Anales LEMIT. Serie III, Año 1 (2). 119p.
- TUCKER M. 1988. Techniques in Sedimentology. M. Tucker Ed., Blackwell Scientific Publications. 94 p.
- ULM F.J., COUSSY O., LI K., LARIVE C. 2000. Thermo-Chemo-Mechanics of ASR expansion in concrete structures. Journal of Engineering Mechanics, ASCE. 126(3):233-242.
- VAN STADEN A., ZIMMERMANN U., GUTZMER J. CHEMALE JR. F., GERMS G.J.B. 2009. Age of a Hirnantian glacial diamictite in eastern Argentina and consequences for the correlation with Lower

- Palaeozoic rocks in South Africa. Annual Meeting of the Norwegian Geological Society Vinterkonferansen. Bergen: 13-15.
- VAN STADEN A., ZIMMERMANN U., GUTZMER J., CHEMALE F. Jr., GERMS G. 2010. Correlation of Ordovician diamictites from Argentina and South Africa using detrital zircon dating. *J. Geol. Soc. London*. 167:217-220.
- VERNON R.H. 2004. A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press, UK. 579 p.
- VERONELLI D.J.E. 1978. Durabilidad de los hormigones: Reacción árido-álcalis. *Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento*, 352. 33p.
- VINEY M., DEITRICH D., MUSTOE G., LINK P., LAMPKE T., GOTZE J., ROSSLER R. 2016. Multistage silicification of Pliocene wood: Re-examination of an 1985 discovery from Idaho, USA. *Geosciences*. 6. 21 p.
- VOLLPRACHT A., LOTHENBACH B., SNELLINGS R., HAUFE J. 2015. The pore solution of blended cements: a review. *Mater. Struct.* 49: 3341–3367
- VON GOSEN W., BUGGISCH W., DIMIERI L.V. 1990. Structural and metamorphic evolution of the Sierras Australes (Buenos Aires Province/Argentina). *Geologische Rundschau*. 79(3):797-821.
- VON GOSEN W., BUGGISCH W., KRUMM S. 1991. Metamorphic and deformation mechanisms in the Sierras Australes fold thrust belt (Buenos Aires, Province, Argentina). *Tectonophysics*. 185:335-356.
- WAINZSTEIN M., TRAVERSA L.P. 1975. Aspectos relativos a la durabilidad de hormigones de cemento portland. *Anales del LEMIT. Serie II*. (286):47-100.
- WALKER H.N., LANE D.S., STUTZMAN P.E. 2006. Petrographic methods of examining hardened concrete: A petrographic manual. Report FHWA-HRT-04-150, US Department of Transportation and Federal Highway Administration. 33 p.
- WENK H.-R., MONTEIRO P.J.M., SHOMGLIN K. 2008. Relationship between aggregate microstructure and mortar expansion. A case study of deformed granitic rocks from the Santa Rosa mylonite zone. *J. Mater. Sci.* 43: 1278-1285.
- WEST G. 1991. A note on undulatory extinction of quartz in granite. *Eng. Geol. Hydrogeol.* 24:159-165.
- WEST G. 1994. Undulatory extinction of quartz in some British granites in relation to age and potential reactivity. *Q. J. Eng. Geol.* 27:69-74.
- WORDEN R.H., MORAD S. 2000. Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. *Quartz Cementation in Sandstones*. Worden R.H., Morad S. (Eds). 29 Special Publication of the International Association of Sedimentologists. 342 p.
- WORDEN R.H., MAYALL M., EVANS I.J. 2000. The effect of ductile compaction and quartz cementation on porosity and permeability in the Tertiary clastics, South China Sea: prediction of reservoir quality. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 84:345-359.
- YRIGOYEN M. 1975. Geología del subsuelo y la plataforma continental. *Relatorio: Geología de la Provincia de Buenos Aires, 6to Congreso Geológico Argentino*. Buenos Aires: 139-168.

- ZALBA P.E., ANDREIS R.R., 1998. Basamento saprolitizado y secuencia sedimentaria suprayacente en San Manuel, Sierras Septentrionales de Buenos Aires, Argentina. 7a Reunión Argentina de Sedimentología: 143-153.
- ZALBA P.E., ANDREIS R.R., IÑIGUEZ RODRIGUEZ A.M. 1988. Formación Las Aguilas, Barker, Sierras Septentrionales de la Prov. de Buenos Aires, nueva propuesta estratigráfica. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 43(2): 198-209.
- ZALBA P.E., MANASSERO M., LAVERRET E., BEAUFORT D., MEUNIER A., MOROSI M., SEGOVIA L. 2007. Middle Permian Telodiagenetic processes in neoproterozoic Sequences, Tandilia System, Argentina. Journal of Sedimentary Research (77):525-538.
- ZALBA P.E., MOROSI M.E., MANASSERO M., CONCONI M.S. 2010a. Microscale diagnostic diagenetic features in Neoproterozoic and Ordovician units, Tandilia basin, Argentina: a review. J App.I Sci. 10(22): 2754-2772.
- ZALBA P., MOROSI M., CONCONI M.S., SEGOVIA L., 2010b. Arcillas de Tandilia. Geología, mineralogía y propiedades tecnológicas. Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As., 1ed, Editorial Universitaria de La Plata, 168 p.
- ZALBA P., MOROSI M., CONCONI M. 2016. Gondwana industrial clays Tandilia System, Argentina: Geology and applications. Springer Earth System Sciences. Blondel P., Guilyardi E., Rabassa J., Horwood C. (Ed). 168 p.
- ZÁRATE M.A, RABASSA J. 2005. Geomorfología de la provincia de Buenos Aires. En: de Barrio R.E., Echeverri R.O., Caballé M.F., Llambias E. (Eds), Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires. Relatorio del 16º Congreso Geológico Argentino. La Plata:119-138.
- ZERBINO R.1998. Adherencia matriz-agregado y mecanismos de deformación y rotura en hormigón. 1er Cong. Int. de Tecnología del Hormigón. AATH. 1-4:135-148.
- ZIMMERMANN U. 2018. The provenance of selected neoproterozoic to Lower Paleozoic basin successions of southwest Gondwana: A Review and proposal for further research. Geology of Southwest Gondwana: 561-591.
- ZIMMERMANN U, POIRE D.G., GOMEZ PERAL L. 2005. Provenance studies on neoproterozoic successions of the tandilia system (Buenos Aires Province, Argentina): preliminary data. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. Actas 4: 6 p.
- ZIMMERMANN U., SPALLETI L.A. 2009. Provenance of the Lower Paleozoic Balcarce Formation Tandilia System, Buenos Aires Province, Argentina- Implications for paleogeographic reconstructions of SW Gondwana. Sedimentary Geology. 219:7-23.