

**ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ALCALINA
POTENCIAL DE ALGUNAS ROCAS
DOLOMÍTICAS DE LA ARGENTINA FRENTE A
LA REACCIÓN ÁLCALI-CARBONATO**

Tesista: Ing. Carlos Alberto Milanesi

Tesis presentada para el grado de:

MAGISTER EN TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIONES DE HORMIGÓN

Director de tesis: Dra. Silvina A. Marfil

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Julio de 2013

*A las mujeres que ocupan un lugar especial en mi corazón:
Ely, Agustina, Martuchi, Sofi, Euge, la Babi y Cotita*

Contenido

Resumen,	V
Abstract,	VI
Agradecimientos,	VII
Introducción,	VIII
▪ Importancia del tema, VIII	
▪ Alcance del estudio y metodología, X	
▪ Objetivos generales y específicos, XI	
▪ Contenido de la tesis, XI	
Definiciones y nomenclatura,	XIII
Índice de figuras,	XVII
Índice de tablas,	XXI
Índice de anexos,	XXII

CAPÍTULO 1

Estado actual del conocimiento, 1

1.1. Generalidades sobre las reacciones entre la pasta de cemento y los agregados, 1

1.2. Síntomas de la reacción expansiva, 4

1.2.1. Manifestaciones externas, 4

1.2.2. Manifestaciones internas, 8

1.2.2.1. Aureolas de carbonatación, 8

1.2.2.2. Bordes de reacción, 10

1.2.2.3. Cambios mineralógicos en el agregado, 14

1.3. Factores que influyen en la expansión del hormigón, 15

1.3.1. Contenido de álcalis de la solución de poro del hormigón, 16

1.3.2. Grado de reactividad de la roca, 20

1.3.3. Humedad y temperatura de curado, 21

1.3.4. Tamaño máximo del agregado grueso, 21

1.3.5. Empleo de inhibidores, 23

1.4. Características de los carbonatos expansivos, 25

1.4.1. Petrografía, 25

1.4.2. Mineralogía, 29

1.5. Mecanismos de expansión, 30

1.6. Métodos disponibles para identificar los carbonatos reactivos, 31

1.6.1. Generalidades sobre los métodos de ensayo, 31

1.6.2. Ensayos sobre muestras de roca, 33

1.6.2.1. Examen petrográfico, 33

1.6.2.2. Método químico canadiense (CSA A23.2-26A), 34

1.6.2.3. Método de expansión del cilindro de roca (ASTM C 586), 36

1.6.3. Ensayos sobre mortero, 39

1.6.3.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637), 39

1.6.3.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674), 42

1.6.3.3. Método de evaluación RILEM (AAR-2 vs. AAR-5), 43

1.6.4. Ensayos sobre hormigón, 48

1.6.4.1. Método del prisma de hormigón, 48

1.6.4.1.1. Método canadiense (CSA A23.2-14A), 48

1.6.4.1.2. Método ASTM C1105, 53

1.6.4.1.3. Método del prisma de hormigón IRAM 1700, 54

1.6.4.2. Método acelerado del prisma de hormigón, 55

1.6.4.3. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec, 56

CAPÍTULO 2

Materiales y Métodos,

59

2.1. Materiales, 59

2.1.1. Cementos pórtland, 59

2.1.2. Agregados dolomíticos, 59

2.1.3. Agregado fino, 61

2.1.4. Adiciones minerales activas, 61

2.1.5. Aditivos químicos, 63

2.2. Métodos de ensayo implementados, 63

2.2.1. Ensayos de evaluación sobre muestras o testigos de roca, 63

- 2.2.1.1. Examen petrográfico, 63
- 2.2.1.2. Método del testigo de roca (ASTM C586 modificado), 64
- 2.2.1.3. Método químico canadiense, 66
- 2.2.2. Ensayos de expansión de mortero, 66
 - 2.2.2.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637), 66
 - 2.2.2.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674), 68
 - 2.2.2.3. Método de evaluación RILEM (modificado), 68
- 2.2.3. Ensayos de expansión sobre hormigón, 70
 - 2.2.3.1. Ensayo acelerado de Larbi y Hudec (modificado), 70
 - 2.2.3.2. Método del prisma de hormigón, 71
- 2.2.4. Ensayos complementarios, 73
 - 2.2.4.1. Difractometría de rayos X (DRX), 73
 - 2.2.4.2. Microscopía óptica, 73

CAPÍTULO 3

Resultados y Discusión,

74

3.1. Evaluación de la reactividad alcalina potencial del agregado, 74

- 3.1.1. Ensayos sobre muestras o testigos de roca, 74
 - 3.1.1.1. Examen petrográfico, 74
 - 3.1.1.2. Método del testigo de roca (ASTM C 586 modificado), 83
 - 3.1.1.3. Método químico canadiense, 96
- 3.1.2. Ensayos de expansión de barras de mortero, 97
 - 3.1.2.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637), 97
 - 3.1.2.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674), 103
 - 3.1.2.3. Método de evaluación RILEM (modificado), 105
- 3.1.3. Ensayos de expansión de prismas de hormigón, 107
 - 3.1.3.1. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec (modificado), 107
 - 3.1.3.2. Método del prisma de hormigón, 115

3.2. Evaluación de algunos métodos para inhibir las expansiones, 120

- 3.2.1. Reducción del contenido de álcalis del hormigón, 121
- 3.2.2. Eficiencia de las AMA, 122
- 3.2.3. Eficiencia de los aditivos químicos, 127
- 3.2.4. Reducción del tamaño máximo del agregado grueso, 130

CAPÍTULO 4

Consideraciones finales, 132

4.1. Conclusiones, 132

4.1.1. Acerca de la reactividad alcalina potencial de las muestras de roca seleccionadas, 132

4.1.2. Acerca de los métodos de ensayo, 134

4.1.3. Acerca del estado actual de los reglamentos y normas referentes a la RAC en Argentina, 137

4.2. Propuestas para investigaciones futuras, 137

CAPÍTULO 5

Referencias, 140

Anexo A: Resultados de los ensayos de DRX 159

Anexo B: Nota de Chris A. Rogers 205

Anexo C: Representación gráfica de las intensidades de las reflexiones identificadas en los DRX indicados en el anexo A, 207

Resumen

La reacción álcali-carbonato (RAC) es una reacción química inusual que afecta la durabilidad del hormigón y constituye un tema de gran controversia entre investigadores y tecnólogos del hormigón. Desde 1991, el autor ha trabajado en este campo con el propósito de evaluar la posibilidad del desarrollo de esta reacción en Argentina. Para llevar a cabo este estudio se seleccionaron muestras de rocas dolomíticas procedentes de diferentes provincias de Argentina (Córdoba, Buenos Aires, Jujuy y Río Negro). La reactividad alcalina potencial de estas rocas fue evaluada mediante un gran número de ensayos (ASTM C 586, CSA A23.2-26A, IRAM 1637, IRAM 1674, métodos de Larbi & Hudec, CSA A23.2-14A, RILEM AAR-2 y AAR-5, DRX, microscopía óptica y electrónica de barrido). Los estudios han puesto de manifiesto la existencia de una dolomía de grano fino, con minerales arcillosos, que reacciona con los álcalis contenidos en el hormigón, mediante un mecanismo expansivo muy similar al de la RAC. Como resultado del ataque alcalino, esta roca experimenta una clara reacción química (dedolomitización), produciendo calcita y brucita. Sólo se observó gel silíceo de manera esporádica y en muy pequeñas cantidades, lo que hace difícil explicar cómo las expansiones observadas en los testigos de roca o en los prismas de mortero u hormigón puedan estar relacionadas con la RAS. Uno de los hallazgos más interesantes de esta investigación es que las adiciones minerales activas y los aditivos químicos a base de litio no fueron capaces de mitigar la expansión del hormigón. Es la primera vez que esta reacción es citada en un país que no sea EEUU, Canadá o China. Esta investigación prueba que el desarrollo de la RAC en nuestro país es posible, lo cual, plantea la necesidad de incluirla en nuestros reglamentos de construcción, tratándola como un tipo particular de reacción álcali-agregado.

Abstract

Alkali-carbonate reaction (ACR) is an unusual reaction that affects concrete durability and constitutes an issue of much controversy between researchers and concrete technologists. Since 1991, the author has been working in this field to evaluate the possibility of the occurrence of this reaction in Argentina. Dolomitic rock samples were collected for this study from different provinces of Argentina (Córdoba, Buenos Aires, Jujuy and Río Negro). The potential alkali reactivity of these rocks was evaluated using different test methods (ASTM C 586, CSA A23.2-26A, IRAM 1637, IRAM 1674, Larbi & Hudec, CSA A23.2-14A, RILEM AAR-2 and AAR-5, XRD, optical microscopy and SEM). The studies have shown the existence of an argillaceous fine-grained dolostone that reacts expansively with concrete alkalis following a mechanism similar to ACR. As a result of the alkali attack, this rock shows a conspicuous chemical reaction (dedolomitization), producing calcite and brucite. Siliceous gel was only observed occasionally and in very small amount, making difficult to explain how the expansions observed on rock, mortar or concrete specimens could be related to ASR. One of the most interesting findings of this research is that supplementary cementing materials and lithium-based compounds were not capable to mitigate the concrete expansion. This is the first time this reaction is reported in a country other than USA, Canada or China. This research proves that the occurrence of ACR in our country is possible, which requires to include this harmful reaction in our building codes to treat it as a particular case of alkali-aggregate reaction.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer al Ing. Hugo Cuneo Simian, por introducirme en el mundo de la tecnología del hormigón y apoyarme incondicionalmente a iniciar mis estudios de postgrado en el LEMIT.

En segundo lugar, deseo agradecer al Ing. Oscar R. Batic[†], por haberme dirigido durante los años en los que me desempeñé como becario de la CIC y permitirme, además, el orgullo de compartir con él la autoría de tantas publicaciones.

Quiero expresar mi profunda gratitud a los Ing. Luis Traversa, Ángel Di Maio y Darío Falcone, por abrirme las puertas del LEMIT para completar los estudios de esta tesis y hacerme sentir como un miembro más de la familia. Agradezco a los Sres. Mauricio Rucci, Ángel Rodríguez y Carlos Rodríguez, por su colaboración en las tareas de laboratorio. Agradezco, en particular, al Lic. Roberto Pavlicevic y a los Sres. Jorge Sota, Ricardo Sota y José Marano, por su apoyo y la experiencia transmitida durante mis primeros años como becario. También quiero agradecer, muy especialmente, al Dr. Ing. Raúl Zerbino y a la Ing. Graciela Giaccio, por haber colaborado con mi formación profesional y, sobretodo, por haberme brindado su amistad.

A los Dres. Pedro J. Maiza y Silvina Marfil, por enseñarme a dar los primeros pasos en la geología y sus minerales, por hacerme sentir parte de su equipo y por su amistad. Una mención especial le debo al Sr. Rodolfo Salomón, quien, de manera absolutamente desinteresada, me ayudó en la representación de todos los DRX.

También deseo agradecer a Cementos Avellaneda S. A., y en especial, al Ing. Daniel Violini, por haber confiado en mí y apoyarme en este proyecto.

A mi familia, le agradezco su amor y el apoyo incondicional brindado. A mi esposa, Elisabet, le agradezco los mates y su compañía, en las largas horas de lectura y trabajo frente a la computadora.

Mucha es la gente que ha contribuido a lo largo de mi carrera para hacer que este trabajo de tesis sea hoy una realidad. La lista es larga y, seguramente, he olvidado incluir a muchos. A ellos, mis disculpas por la omisión. A todos, ¡Muchas gracias!

Introducción

Importancia del tema

Actualmente, se acepta que las reacciones químicas expansivas que pueden tener lugar entre los elementos presentes en la solución de los poros del hormigón y los minerales que constituyen los agregados, denominadas genéricamente como reacciones álcali-agregado (RAA), se dividen en dos tipos: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC).

La RAS se conoce en la Argentina desde hace más de 50 años y es la patología más frecuente en estructuras de hormigón, después de la corrosión del acero. No obstante, el conocimiento adquirido sobre esta reacción ha puesto a disposición del tecnólogo distintas alternativas de prevención, como es el empleo de cementos de bajo o moderado contenido de álcalis o el uso de adiciones minerales activas (AMA), posibilitando la construcción de estructuras de hormigón con un grado razonable de seguridad. El escenario de la RAC, en cambio, es diferente.

Una vez iniciada la expansión del agregado grueso dentro del hormigón, el proceso evolutivo de la RAC puede generar diversos inconvenientes en la estructura, con *consecuencias económicas de magnitud considerable*. En una primera etapa, las deformaciones que sufre el hormigón pueden *afectar la aptitud en servicio de la estructura*. Esta situación es habitual en las centrales hidroeléctricas donde, por ejemplo, la expansión del hormigón puede producir la traba de las piezas móviles (puentes grúas, compuertas, ejes de turbinas, etc.). Este inconveniente pone la estructura fuera de servicio, lo cual, exige la inversión de *importantes sumas de dinero en mantenimiento, rehabilitación o reemplazo de componentes dañados*. Cuando el proceso expansivo avanza, la fisuración del hormigón puede *comprometer la seguridad de la estructura o su durabilidad*, al proveer los canales de acceso para el ingreso de agentes agresivos al hormigón o sus armaduras.

La RAC es una reacción deletérea de muy rara ocurrencia, que ha sido comprobada sólo en tres países del mundo (EEUU, Canadá y China), lo que ha hecho que *el volumen de investigaciones referidas a este tema sea mucho más acotado que en el caso de la RAS*.

En nuestro país, hasta el momento, no se conocen antecedentes de obras en servicio que hayan resultado afectadas por la RAC. No obstante, Argentina posee una vasta extensión geográfica, con una inmensa variedad de agregados de distinta naturaleza, lo que hace que *la probabilidad de ocurrencia de esta reacción constituya una posibilidad cierta*.

Otro aspecto distintivo de la RAC, a diferencia de la RAS, es que *el uso de AMA o aditivos químicos a base de litio no resulta efectivo para inhibir las expansiones generadas por la reacción*. Por esta razón, cuando se está en presencia de agregados potencialmente reactivos debido a la RAC, los reglamentos recomiendan evitar su uso. Si se tiene en cuenta que el volumen que ocupan los agregados en el hormigón es del orden del 75%, se comprende, claramente, la importancia que este aspecto posee, especialmente en los grandes proyectos de ingeniería civil, por cuanto la solución más conveniente, desde el punto de vista técnico-económico, consiste en emplear los agregados disponibles en la zona de la obra.

Si bien las manifestaciones externas en las estructuras afectadas por la RAC son muy similares a los de la RAS, los mecanismos de expansión que operan en cada caso son diversos. En este punto, sin embargo, *existen grandes controversias, constituyendo un tema de debate actual*.

El estudio del comportamiento de los agregados dolomíticos, desde el punto de vista de la RAA, posee una *complejidad especial* por cuanto la roca puede estar constituida por minerales silíceos potencialmente reactivos (comúnmente ópalo, calcedonia o cuarzo micro o criptocristalino), dando posibilidad a la ocurrencia simultánea de ambas reacciones deletéreas (RAS + RAC).

En general, los procesos de deterioro generados por la RAC tardan varios años en manifestarse, lo cual, exige iniciar los estudios de caracterización de los agregados con suficiente anticipación, a fin de poder evaluar la aptitud de uso del material y adoptar las medidas preventivas que correspondan. Esto requiere contar con métodos de ensayo normalizados, laboratorios entrenados en la aplicación de estos métodos y especificaciones reglamentarias que establezcan los requisitos de uso de estos agregados. *En nuestro país, el reglamento CIRSOC 201 no incluye a la RAC como un mecanismo posible de deterioro*.

Por lo expuesto, existen diversas razones que justifican el interés por el estudio de la RAC en nuestro país. Desde el punto de vista académico, se trata de una problemática

compleja, de carácter interdisciplinario y muy poco abordada en la literatura. Esto explica que existan diversos aspectos controvertidos, aún no resueltos por la comunidad científica, que hacen que el tema no esté agotado.

Desde el punto de vista ingenieril, el estudio de esta reacción no sólo es importante por sus consecuencias a nivel social y económico, sino también por el impacto que posee en el desarrollo sostenible de la industria de la construcción.

Por último, existen empresas en nuestro país que disponen de yacimientos de rocas dolomíticas en explotación, que se emplean actualmente en la elaboración de hormigones. Este hecho, sumado a la ausencia de una reglamentación específica sobre la RAC, subraya la importancia de contar con métodos de ensayo normalizados y criterios de evaluación confiables para el estudio de esta reacción.

Por las razones expuestas, a comienzos del año 1990, se inicia en el LEMIT un programa de investigación destinado al estudio de la reactividad alcalina de algunas rocas dolomíticas argentinas con el propósito de evaluar la factibilidad de ocurrencia de la RAC en nuestro país.

Para la elaboración del presente trabajo de tesis se ha hecho uso de los resultados obtenidos en dichos estudios, realizados por el autor junto con un importante grupo de trabajo, durante su paso como becario de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Asimismo, se han incluido otros estudios, efectuados por el autor durante su gestión como Jefe del Departamento de Asistencia Técnica de Cementos Avellaneda S. A.

Los resultados de estos estudios, fruto de un proceso de investigación que abarca un período de más de diez años, se resumen en la presente tesis.

Alcance del estudio y metodología

El enfoque de esta tesis es esencialmente *experimental*.

De las posibles canteras de roca dolomítica existentes en el país, se estudian diez muestras de diferente origen, textura y tamaño de grano. Las rocas proceden de cuatro provincias argentinas: Buenos Aires (Olavarría), Córdoba (Alta Gracia), Río Negro (Valcheta) y Jujuy (Tumbaya).

Se implementan métodos de ensayos acelerados y de largo plazo, aplicados tanto sobre muestras de roca, mortero u hormigón. Se registran los cambios volumétricos experimentados por los testigos o probetas de ensayo y se vinculan estos cambios con las modificaciones químicas, mineralógicas y microestructurales de la roca o el agregado.

No se llevan a cabo estudios en obras de hormigón en servicio ni en modelos a escala reducida.

Objetivos generales y específicos

El *objetivo general* de esta tesis es evaluar la factibilidad de ocurrencia de la RAC en rocas dolomíticas argentinas.

Entre los *objetivos específicos* propuestos se destacan los siguientes:

- ✓ Poner a punto los métodos de ensayo recomendados a nivel internacional para el estudio de la RAC a fin de poder contar en el país con un laboratorio debidamente equipado y entrenado en esta temática.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos con los diferentes métodos implementados para seleccionar aquellos de mayor confiabilidad.
- ✓ Investigar el vínculo que existe entre la reactividad alcalina potencial del agregado y las características petrográficas (textura y composición mineralógica) de la roca.
- ✓ Volcar los conocimientos adquiridos sobre los métodos más efectivos para la detección y control de la RAC en normas y reglamentos.

Contenido de la tesis

Esta tesis está dividida en cinco capítulos. En el *capítulo 1 “Estado actual del conocimiento”*, se realiza una revisión bibliográfica de los principales aspectos de la RAC. Se describen las principales manifestaciones de la reacción y se detallan los factores más importantes que influyen en la expansión del hormigón. Asimismo, se detallan las características petrográficas y mineralógicas de los agregados potencialmente reactivos y se discuten las teorías más recientes acerca de los mecanismos de expansión de la RAC. Por último, se informan los métodos más empleados en la caracterización de la reactividad alcalina de los agregados dolomíticos y los criterios de evaluación utilizados en cada caso, destacando las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos.

En el *capítulo 2 “Materiales y métodos”*, se detallan las características más salientes de los materiales empleados en esta investigación (rocas, cementos, adiciones minerales y aditivos químicos). Se describe el origen de los agregados dolomíticos seleccionados para esta investigación y se informa la composición química de los cementos empleados en la elaboración de morteros y hormigones. También se destacan las características más salientes de las adiciones minerales utilizadas para el control de la RAC y se indican los aditivos químicos empleados. Por último, se describen las metodologías de ensayo implementadas para la evaluación del comportamiento expansivo del material (roca, mortero u hormigón) y los cambios observados a nivel microestructural.

En el *capítulo 3 “Resultados y discusión”*, se describe en detalle la petrografía de los agregados dolomíticos bajo estudio y su composición mineralógica. Se presentan los resultados obtenidos con cada método de ensayo y se comparan con los valores recogidos en la literatura. En base a esta información, se analiza la reactividad alcalina potencial de cada agregado y se discute la validez de los criterios de evaluación aceptados a nivel internacional.

En el *capítulo 4 “Consideraciones finales”*, se resumen las principales conclusiones obtenidas en la presente investigación y se proponen nuevas líneas de investigación a partir de los hallazgos realizados.

Las *referencias bibliográficas* que fueron consultadas para el desarrollo de estos estudios se enumeran en el *capítulo 5*.

Definiciones y nomenclatura

Definiciones

Afanítica: Textura de rocas ígneas de grano fino en la que la mayoría de los cristales individuales no puede distinguirse a simple vista.

Anhedrales: Término aplicado a granos minerales que no muestran ningún desarrollo de forma cristalina.

Brucita: Hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Cristaliza en el sistema hexagonal, romboédrico.

Calcita: Carbonato de calcio (CaCO_3). Cristaliza en el sistema hexagonal, romboédrico.

Caliza: Roca sedimentaria o metamórfica, constituida por más de 50 % de calcita.

Caolinita: Mineral secundario del grupo de las arcillas ($\text{Si}_4\text{Al}_4(\text{OH})_8$). Cristaliza en el sistema triclínico.

Cuarzo: Mineral compuesto de sílice (SiO_2), que cristaliza en el sistema hexagonal, romboédrico.

Dolomía: Roca sedimentaria, constituida por más de 50 % de dolomita.

Dolomita: Carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Cristaliza en el sistema hexagonal, romboédrico.

Esparítica: Textura de rocas carbonáticas en la que se pueden distinguir los cristales idiomorfos (se aplica a un mineral que se presenta bajo la forma de un cristal perfecto o, al menos, limitado por caras cristalinas planas).

Euhedrales: Los cristales euhedrales son aquellos que presentan una forma definida y caras fácilmente reconocibles.

Feldespatos: Aluminosilicatos de K, Na y/o Ca. La composición corresponde a un sistema ternario compuesto de ortoclasa (KAlSi_3O_8) (feldespato potásico), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) (estos dos últimos constituyen las plagioclasas). El feldespato potásico cristaliza en el sistema monoclinico y las plagioclasas son triclinicas.

Granoblástica: Textura de rocas metamórficas en la que grandes cristales (porfiroblastos) de uno o más minerales están asociados con otros de grano mucho más pequeño.

Illita: Mineral secundario del grupo de las arcillas ($\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$). Cristaliza en el sistema monoclinico.

Macroesparítica: Textura similar a la esparítica pero de grano visible a simple vista.

Montmorillonita: Mineral secundario del grupo de las arcillas (esmectitas) ($(\text{Na,Ca})_{0,3}\text{Si}_4(\text{Al,Mg})_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$). Cristaliza en el sistema monoclinico.

Reacción álcali-agregado: Reacción química entre los elementos presentes en la solución de poros del mortero u hormigón (principalmente OH^- , Na^+ , K^+ y Ca^{2+}) y ciertos materiales que constituyen el agregado. Bajo determinadas condiciones, esta reacción química puede producir la expansión del mortero u hormigón con consecuencias deletéreas para la estructura (deformaciones excesivas, fisuras, reducción de las propiedades mecánicas, incremento de la permeabilidad). Existen dos tipos de reacción álcali-agregado: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC).

Reacción álcali-carbonato (RAC): Reacción química entre los elementos presentes en la solución de poros del mortero u hormigón (principalmente OH^- , Na^+ y K^+) y ciertas rocas de naturaleza carbonática (calizas y dolomías). Bajo determinadas condiciones, esta reacción química puede producir la expansión del mortero u hormigón.

Reacción álcali-sílice (RAS): Reacción química entre los elementos presentes en la solución de poros del mortero u hormigón (principalmente OH^- , Na^+ , K^+ y Ca^{2+}) y ciertos minerales de naturaleza silíceas que constituyen el agregado (ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita, cuarzo microcristalino). Bajo determinadas condiciones, esta reacción química puede producir la expansión del mortero u hormigón debido a la formación de geles expansivos.

Repetibilidad: Medida estadística de la dispersión de las mediciones empleadas para el cálculo de un resultado de ensayo, realizadas en un mismo laboratorio, por un mismo operador, sobre un mismo material. Puede valorarse a través del coeficiente de variación o

del intervalo de las distintas mediciones realizadas, expresado en forma absoluta o relativa (porcentaje), respecto del valor promedio.

Reproducibilidad: Medida estadística de la dispersión de los resultados de ensayo obtenidos en distintos laboratorios (ejecutados por distintos operadores), sobre un mismo material. Puede ser valorada a través del coeficiente de variación o de la diferencia máxima que es posible hallar entre los resultados obtenidos en dos laboratorios, expresada en forma relativa (porcentaje), respecto del valor promedio de ambos.

Residuo insoluble: Fracción de la roca, de naturaleza no carbonática, que queda luego de un ataque ácido, realizado comúnmente con ácido clorhídrico (ClH).

Subesparítica: Textura similar a la esparítica pero los cristales son subhedrales.

Subhedrales: Cristales que muestran algunas trazas de forma cristalina.

Yeso: Sulfato de calcio hidratado ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cristaliza en el sistema monoclinico.

Nomenclatura

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ACI: American Concrete Institute

AFNOR: Association Française de Normalisation

Al_2O_3 : Óxido de aluminio o alúmina

ASTM: American Society for Testing Materials

B: Brucita

C: Calcita

CaO: Óxido de calcio

CaCO₃: Carbonato de calcio

CaMg(CO₃)₂: Carbonato de calcio y magnesio

C/D: Relación de las intensidades (cps) de las reflexiones principales de calcita y dolomita.

CSA: Canadian Standards Association

CIC: Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

D: Dolomita

DRX: Difracción de rayos X

F: Feldespato

FHWA: Federal Highway Administration

I: Illita

IRAM: Instituto Argentino de Normalización

INTI-CIRSOC: Instituto Nacional de Tecnología Industrial – Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles

K: Caolinita

K₂O: Óxido de potasio

LEMIT: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica

M: Montmorillonita

MgO: Óxido de magnesio

NaCl: Cloruro de sodio

Na₂O: Óxido de sodio

Na₂O_{eq}: Óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \text{K}_2\text{O}$)

Q: Cuarzo

p.a.: Para análisis (*Pro analysis*)

RAA: Reacción álcali-agregado

RAC: Reacción álcali-carbonato

RAS: Reacción álcali-sílice

RI: Residuo insoluble

RILEM: Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages

SEM: Microscopía electrónica de barrido

Y: Yeso

IN NaOH: Solución 1 normal de hidróxido de sodio

Índice de figuras

Figura 1.1	Vereda de hormigón afectada por la RAC, en Lancaster, Canadá. La junta de contracción del hormigón se desplazó 9 cm hacia la derecha, respecto al hormigón sin reacción (la expansión medida fue de 1,2 % a 3 años) (Williams y Rogers, 1991)	6
Figura 1.2	Vereda de hormigón afectada por la RAC, en Lancaster, Canadá. La expansión del hormigón empujó el cordón 9 cm hacia la derecha, deformando el pavimento asfáltico (Williams y Rogers, 1991)	6
Figura 1.3	Fisuración típica en forma de mapa de una losa de hormigón afectada por la RAC (Ozol, 2006)	3
Figura 1.4	Bordes de reacción (dedolomitización) y halos de carbonato alrededor de un agregado dolomítico, en barras de hormigón del ensayo RILEM AAR-5 a la edad de 16 días (Katayama, 2004)	9
Figura 1.5	Bordes de reacción en agregados afectados por la RAC (Rogers, 1979)	10
Figura 1.6	Migración de álcalis y sílice en la zona de transición del agregado dolomítico (Hadley, 1964)	11
Figura 1.7	Evolución de la resistencia a compresión de hormigones elaborados con agregados dolomíticos que desarrollan bordes de reacción (Hadley, 1964)	12
Figura 1.8	Ausencia de bordes de reacción en agregados dolomíticos afectados por la RAC. A pesar de la expansión deletérea registrada en el hormigón a los 28 días (ensayo RILEM AAR-5), no se observan bordes de reacción sobre el agregado (Katayama, 2004)	13
Figura 1.9	Cristales de brucita en barras de mortero NBRI a la edad de 28 días (Katayama, 2004)	15
Figura 1.10	Cristales de brucita en barras de mortero NBRI a 28 días (López-Buendía <i>et al.</i> , 2008)	15
Figura 1.11	Geles silíceos (ASR gel) y de silicato de magnesio (Mg-sil gel) en barras de hormigón del ensayo RILEM AAR-5 a la edad de 16 días (Katayama, 2004)	16
Figura 1.12	Influencia del contenido de álcalis aportados por el cemento en la expansión del hormigón (Hadley, 1964; Swenson y Guillott, 1964, Alasali <i>et al.</i> , 1991)	17
Figura 1.13	Influencia del contenido de álcalis del hormigón en la expansión de prismas y losas de hormigón (Williams y Rogers, 1991)	17

Figura 1.14	Cordón-cuneta afectado por la RAC, en Polson Park, Kingston, Canadá. La edad del hormigón es 33 años y fue elaborado con un cemento de bajo álcalis (Williams y Rogers, 1991)	18
Figura 1.15	Correlación entre la expansión de prismas de roca en solución alcalina y la correspondiente al hormigón que contiene dicha roca como agregado grueso (Hadley, 1964)	20
Figura 1.16	Influencia de la temperatura en la expansión del hormigón (Alasali <i>et al.</i> , 1991)	22
Figura 1.17	Textura típica de calizas reactivas del este de Canadá. A, B y C corresponden a rocas de diferentes canteras. D, E y F son de la misma cantera. D y F son del mismo sustrato (Rogers, 1979)	26
Figura 1.18	Venilla con textura reactiva en una caliza dolomítica del norte de Virginia, EEUU. La roca posee bandas con textura reactiva y no reactiva que se alternan a nivel microestructural (Ozol, 2006)	28
Figura 1.19	Esquema del mecanismo de expansión de la RAC según Deng y Tang (1993): 1) Restricción: matriz o cemento; 2) cristal de dolomita; 3) difusión del ion OH^- ; 4) difusión del ion CO_3^{2-} ; 5) calcita y brucita; 6) vacíos; 7) límite original; 8) fisuras	30
Figura 1.20	Gráfico del método químico canadiense (CSA, 2009e)	35
Figura 1.21	Expansión de testigos de roca de “expansión tardía” (Dolar-Mantuani, 1971)	37
Figura 1.22	Resultados de expansión obtenidos con el método ASTM C 227 sobre muestras de agregados dolomíticos reactivos de la zona de Kingston, Canadá, extraídas a distintos niveles de cantera (Sims, 1981)	42
Figura 1.23	Influencia de las condiciones de almacenamiento de los prismas del ensayo CSA A23.2-14A en la expansión del hormigón (Rogers, 1990)	52
Figura 2.1	Procedencia de las muestras de roca empleadas en este estudio	60
Figura 2.2	Aspecto de los testigos de roca cilíndricos (19 mm x 75 mm)	64
Figura 2.3	Aspecto de los testigos prismáticos de roca (25 mm x 25 mm x 70 mm)	65
Figura 2.4	Comparador analógico de base ajustable (precisión 0,0001”)	66
Figura 2.5	Comparador analógico de base fija (precisión 0,0001”)	67
Figura 2.6	Aspecto de las barras de mortero (40 mm x 40 mm x 160 mm) del método RILEM AAR-2	69
Figura 2.7	Comparador de longitud analógico (precisión 0,0001”)	71
Figura 3.1	DRX de la muestra de roca natural	75

Figura 3.2	DRX de la muestra de roca natural M4	78
Figura 3.3	DRX del RI de la muestra de roca M4	78
Figura 3.4	DRX de la fracción arcillosa concentrada de la muestra de roca M4	79
Figura 3.5	DRX de la muestra de roca natural M5	79
Figura 3.6	DRX de la muestra de roca natural M8	81
Figura 3.7	Resultados del ensayo ASTM C 586 modificado (muestras M1, M2, M3, M5 y M6).	84
Figura 3.8	Resultados del ensayo ASTM C 586 modificado (muestra M4)	85
Figura 3.9	Resultados del ensayo ASTM C 586 modificado (muestra M7)	85
Figura 3.10	Comportamiento de testigos de roca inmersos en etilen glicol y luego en solución 1N de NaOH (muestra M7)	90
Figura 3.11	Aspecto de la muestra de roca M9 natural (fragmento 1) (x 3100, escala 10 μm)	93
Figura 3.12	Vista de una fisura rellena con calcita en el testigo M9-1 (x 1000, escala 10 μm)	94
Figura 3.13	Aspecto de la muestra de roca M9 natural (fragmento 2) (x 6200, escala 50 μm)	94
Figura 3.14	Aspecto del testigo M9-2 luego del ataque alcalino (x 3100, escala 10 μm)	95
Figura 3.15	Aspecto del testigo M9-2 luego del ataque alcalino (x 4000, escala 50 μm)	95
Figura 3.16	Resultado del ensayo químico canadiense (M10)	97
Figura 3.17	Expansión de barras de mortero en el ensayo IRAM 1637-1992	98
Figura 3.18	Borde de reacción sobre un agregado dolomítico (M4) en una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 5 años de edad	99
Figura 3.19	Bordes de reacción y fisuras en una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 5 años de edad (agregado M4)	100
Figura 3.20	Dedolomitización heterogénea sobre un agregado dolomítico (M4) en una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 5 años de edad	100
Figura 3.21	Corrosión de borde localizada sobre un clasto del agregado M4. Sección delgada de una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 8 meses de edad (x 30)	101
Figura 3.22	Detalle del centro de corrosión indicado en la figura 3.21 con luz paralela (x 300)	101
Figura 3.23	Detalle del centro de corrosión indicado en la figura 3.21 con nicoles cruzados (x 300)	102

Figura 3.24	Borde de reacción sobre un agregado dolomítico (M7) en una barra de mortero IRAM 1674-1997 a los 28 días de edad	104
Figura 3.25	Expansión del agregado M10 en los ensayos de mortero AAR-2 y AAR-5 modificado, según Lu <i>et al.</i> (2008)	106
Figura 3.26	Expansión de testigos de hormigón en solución 1N de NaOH a 23 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)	108
Figura 3.27	Expansión de testigos de hormigón en solución saturada de NaCl a 23 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)	108
Figura 3.28	Expansión de testigos de hormigón en solución 1N de NaOH a 38 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)	109
Figura 3.29	Expansión de testigos de hormigón en solución saturada de NaCl a 38 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)	109
Figura 3.30	Expansión de testigos de hormigón en solución 1N de NaOH a 80 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)	110
Figura 3.31	Expansión de testigos de hormigón en solución saturada de NaCl a 80 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)	110
Figura 3.32	Influencia de la temperatura de la solución del ensayo de Larbi y Hudec (modificado) en la expansión del hormigón	116
Figura 3.33	Correlación entre la expansión del hormigón en solución 1N de NaOH a 80 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado) y el contenido de residuo insoluble del agregado grueso	116
Figura 3.34	Relación entre la expansión del hormigón y la alteración mineralógica experimentada por el agregado M4 en el ensayo de Larbi y Hudec modificado	117
Figura 3.35	Expansión de prismas de hormigón según el método canadiense CSA A23.2 14A-M77 (23 °C)	118
Figura 3.36	Influencia de la temperatura de almacenamiento del hormigón en la expansión alcanzada en los prismas	120
Figura 3.37	Influencia del contenido de álcalis de la mezcla en la expansión del hormigón	121
Figura 3.38	Evolución de la expansión de morteros elaborados con el agregado M7, con y sin puzolana natural (PNZ) o escoria granulada de alto horno (IRAM 1674-1997 modificado)	124
Figura 3.39	Evolución de la expansión de mortero elaborado con el agregado M7, con y sin ceniza volante (IRAM 1674-1997 modificado)	125
Figura 3.40	Expansión del hormigón elaborado con y sin ceniza volante (CSA A23.2-14A-M90)	125
Figura 3.41	Expansión de hormigones elaborados con y sin puzolana natural o humos de sílice (CSA A23.2-14A-M90)	126
Figura 3.42	Influencia de la adición de LiCl sobre la expansión de un mortero afectado por la RAS (IRAM 1637 modificado)	128

Figura 3.43	Influencia de la adición de LiCl sobre la expansión del mortero elaborado con el agregado M7 (IRAM 1637 modificado)	129
Figura 3.44	Influencia de la adición del Li_2CO_3 y $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ sobre la expansión del hormigón elaborado con el agregado M7 (CSA A23.2-14A-M90)	130

Índice de tablas

Tabla 1.1	Influencia del tamaño de las partículas del agregado en la expansión del mortero u hormigón (Lu <i>et al.</i> , 2008)	23
Tabla 1.2	Precisión del método del cilindro de roca según ASTM C 586	38
Tabla 1.3	Requisitos granulométricos de la IRAM 1637	40
Tabla 1.4	Resultados obtenidos con el método ASTM C 227 sobre un agregado dolomítico reactivo de la zona de Kingston, Canadá (Swenson, 1957)	41
Tabla 1.5	Análisis comparativo de las variantes del método acelerado chino (<i>concrete microbar test</i>)	47
Tabla 1.6	Requerimientos granulométricos del agregado grueso (CSA)	49
Tabla 1.7	Evolución de los límites de expansión del método CSA A23.2-14A	51
Tabla 1.8	Valores de precisión de distintos ensayos	53
Tabla 1.9	Análisis comparativo de las distintas normas del ensayo del prisma de hormigón	55
Tabla 1.10	Requerimientos granulométricos del agregado grueso según el método de Hudec y Larbi	56
Tabla 1.11	Período entre lecturas y duración del ensayo de Hudec y Larbi	57
Tabla 1.12	Límites de expansión del hormigón para testigos sumergidos en solución 1N de NaOH a 80 °C (Hudec y Larbi, 1989)	58
Tabla 1.13	Límites de expansión del hormigón para testigos sumergidos en solución saturada de NaCl a 80 °C (Larbi y Hudec, 1990)	58
Tabla 2.1	Principales propiedades de los cementos empleados en este estudio	60
Tabla 2.2	Principales propiedades de las AMA empleadas en estos estudios	62
Tabla 3.1	Análisis químicos de las muestras de roca empleadas en este estudio	81
Tabla 3.2	Principales características de las rocas empleadas en este estudio	82

Tabla 3.3	Concordancia entre los atributos característicos de los agregados dolomíticos susceptibles a la RAC y los hallados en las muestras de roca de este estudio	83
Tabla 3.4	Resultados de las evaluaciones efectuadas mediante DRX en muestras de roca natural y en testigos del ensayo ASTM C 586	88
Tabla 3.5	Expansión de testigos de roca (25 x 25 x 70 mm) inmersos en distintas soluciones de contacto (muestra de roca M9)	91
Tabla 3.6	Resultados de las evaluaciones efectuadas mediante DRX en muestras de roca natural y del ensayo ASTM C 586 modificado	92
Tabla 3.7	Resultados del análisis químico de la muestra de roca (M10)	96
Tabla 3.8	Relación a/c y consistencia de los morteros elaborados según IRAM 1637-1992	97
Tabla 3.9	Relación a/c y consistencia de los morteros elaborados según IRAM 1674-1997	103
Tabla 3.10	Principales parámetros de las mezclas ensayadas según los métodos de Lu <i>et al.</i> (2008) y RILEM AAR-2 (RILEM TC 106-AAR, 2000b)	106
Tabla 3.11	Resumen de la expansión registrada en los testigos de hormigón y los cambios mineralógicos detectados (DRX) en los agregados M1, M4 y M5 en el ensayo de Larbi y Hudec modificado	111
Tabla 3.12	Proporción y asentamiento de los hormigones elaborados según el método canadiense CSA A23.2 14A-M77	117
Tabla 3.13	Mezclas empleadas para el estudio del efecto de las AMA en la expansión del mortero IRAM 1674-1997	123
Tabla 3.14	Mezclas empleadas para el estudio del efecto de las AMA en la expansión del mortero IRAM 1674-1997	123
Tabla 3.15	Mezclas empleadas para el estudio del efecto del LiCl y de la granulometría del agregado en la expansión del mortero IRAM 1637 (modificado)	128
Tabla 3.16	Efecto de la granulometría del agregado de Valcheta en la expansión del mortero en los ensayos IRAM 1637 e IRAM 1674	131

Índice de anexos

Anexo A	Resultados de los ensayos de DRX	159
Anexo B	Nota de Chris A. Rogers	205
Anexo C	Representación gráfica de las intensidades de las reflexiones identificadas en los DRX indicados en el Anexo A	207

CAPÍTULO 1

Estado actual del conocimiento

En el presente capítulo se resume el estado actual del arte vinculado a la reacción álcali-carbonato (RAC). Se describen los principales síntomas de la reacción y los factores que influyen en la magnitud de la expansión del hormigón, entre los que se destacan el contenido de álcalis del hormigón, las condiciones del ambiente en contacto con la estructura (humedad y temperatura) y la reactividad y tamaño máximo del agregado grueso. Se mencionan las características petrográficas esenciales de los agregados reactivos, los cambios mineralógicos que experimentan durante la reacción y las controversias existentes con relación a los mecanismos de expansión propuestos. Por último, se discuten las principales ventajas y limitaciones de los métodos de ensayo disponibles para el estudio de esta reacción.

1.1. Generalidades sobre las reacciones entre la pasta de cemento y los agregados

Se dice que una estructura de hormigón es fiable cuando cumple tres requisitos fundamentales: es segura, durable y desempeña adecuadamente la función para la que fue diseñada (serviciabilidad).

En el campo de la tecnología del hormigón, la seguridad se garantiza elaborando un material que posea el nivel resistente requerido, lo cual, constituye una problemática superada en la actualidad, ya que los conocimientos disponibles permiten alcanzar los valores especificados sin mayor dificultad (Giaccio y Zerbino, 1994, 2004; ACI Committee 363, 2010).

Con respecto a la durabilidad, en cambio, existen aún algunos aspectos que continúan siendo materia de investigación, entre los que se destaca la reacción álcali-agregado (RAA), la cual, constituye la patología más frecuente en el hormigón, detrás de la corrosión (Mehta y Monteiro, 1986).

Para lograr que la industria de la construcción sea sustentable es necesario diseñar mezclas de hormigón durables (Aïtcin y Mindess, 2011). Sin embargo, a pesar de la importante evolución experimentada por algunos códigos y reglamentos de seguridad actuales, el tratamiento de los conceptos de durabilidad y vida en servicio de las estructuras, vinculados al campo específico de la RAA es mucho más limitado (Giovambattista, 2001).

Al nivel de los conocimientos actuales se acepta que una gran variedad de reacciones ocurren entre los compuestos de la pasta de cemento pórtland y los agregados de hormigón (Walker, 1978), las cuales, pueden resultar inocuas, benéficas o incluso deletéreas (Mehta y Monteiro, 1986; Raphael *et al.*, 1989; Batic *et al.*, 2000).

Entre las reacciones de índole benéfica figuran aquellas que mejoran la adherencia de las zonas de transición (ZT) matriz-agregado, ya sea a través de la cristalización de nuevos productos que reducen la porosidad de esta zona o merced a la reducción de la concentración y el tamaño de los cristales de hidróxido de calcio y etringita (Mindess y Young, 1981; Monteiro y Mehta, 1986; Giaccio *et al.*, 1991).

Existen otras reacciones, conocidas genéricamente como “reacciones álcali-agregado” (RAA), que, bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura, generan mecanismos expansivos nocivos para el hormigón que ponen fuera de servicio a la estructura o bien, inician un proceso que puede ser agravado por otras circunstancias que, sumadas, llevan a la destrucción de la misma.

Las reacciones químicas expansivas (RAA) que pueden tener lugar entre los elementos químicos presentes en la solución de poros del hormigón y los minerales que constituyen los agregados se dividen en dos tipos: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC) (ACI Committee 221, 1998; Batic y Sota, 2001; Fournier y Bérubé, 2000).

La RAS constituye un problema real de durabilidad en numerosos países del mundo (ACI Committee 221, 1998), incluso en Argentina, donde esta patología se conoce desde hace más de 50 años (Batic *et al.*, 1984, 1985; Fava *et al.*, 1961; Giovambattista, 2004; Giovambattista *et al.*, 1981, 1986; Klaric, 1992; Maiza y Marfil, 2000; Maiza *et al.*, 1999; Milanesi *et al.*, 2008b).

El conocimiento adquirido sobre la RAS ha puesto a disposición del tecnólogo distintas alternativas de prevención, posibilitando así la construcción de estructuras de hormigón con un grado razonable de seguridad (Giovambattista *et al.*, 1985; Batic y Sota, 2001; Milanesi y Violini, 2008; Milanesi *et al.*, 2008a). Con relación a la RAC, en cambio, el escenario es radicalmente diferente.

La mayor parte de las rocas carbonáticas (calizas, dolomías y mármoles) que se emplean como agregado para hormigón poseen, en general, un comportamiento excelente en servicio (Alexander y Mindess, 2005). Sin embargo, algunas pocas, que afortunadamente se encuentran en la naturaleza en proporciones y áreas muy limitadas, a pesar de satisfacer las exigencias establecidas por las especificaciones técnicas corrientes, en algunas obras se han comportado en forma desfavorable, provocando, en plazos cortos, la destrucción prematura de las estructuras (Grattan-Bellew y Guillott, 1987; Rogers, 1989; Ozol, 2006; Tang *et al.*, 1996).

La RAC fue descrita, por primera vez, por Swenson (1957), después de haber estudiado las causas que motivaron la destrucción de distintas estructuras construidas en las proximidades de Kingston, Ontario, Canadá. Posteriormente, esta reacción destructiva también fue observada en estructuras construidas en USA (Newlon y Sherwood, 1962; Ozol, 2006; Rothstein *et al.*, 2012), China (Tang *et al.*, 1996) y, posiblemente, en Austria (Sommer *et al.*, 2005) e Inglaterra (French, W. J., en Ozol, 2006).

En Argentina, hasta el momento, no se conocen antecedentes de obras en servicio que hayan resultado afectadas por la RAC, aunque es importante destacar que el uso de agregados dolomíticos en nuestro país es poco frecuente (obs. pers.).

Argentina posee una vasta extensión geográfica, con una inmensa variedad de agregados de distinto origen y naturaleza, lo que hace que la probabilidad de ocurrencia de la RAC constituya una posibilidad cierta. Este hecho, sumado a la ausencia de una reglamentación específica sobre la RAC, subraya la importancia de contar con métodos de ensayo normalizados y criterios de evaluación confiables para el estudio de esta reacción.

Lo expresado en el párrafo anterior cobra particular trascendencia si se tiene en cuenta que, en los últimos años, se han sumado al mercado de la construcción empresas que disponen de yacimientos de rocas dolomíticas en explotación, que se emplean actualmente en la elaboración de hormigones (Cabrera, 1996; Milanesi *et al.*, 2010).

En el año 1982, Fava y Galupo dan a conocer los resultados de las primeras experiencias realizadas en el país en la caracterización de agregados dolomíticos desde el punto de vista de la RAC. Las muestras de agregado grueso evaluadas (cantera La Calera, Catamarca) eran calizas con bajo contenido de dolomita (menor al 25 %) y poseían características petrográficas diferentes a las asociadas comúnmente a la RAC. Este trabajo contribuyó al conocimiento tecnológico de la época y fue el único reporte existente en el país, sobre este tema, hasta comienzos de la década del 90.

Si bien, los procesos de deterioro generados por la RAC pueden ser mucho más virulentos que los de la RAS (Rogers, 1979; Williams y Rogers, 1991), en general, tardan varios años en manifestarse. Por este motivo, en el caso de estructuras masivas o que vayan a estar en contacto con ambientes de alta humedad, es muy importante iniciar los estudios de caracterización de los agregados con suficiente anticipación. Esto permitirá evaluar con certeza la aptitud de uso del material y adoptar las medidas preventivas que el caso requiera.

El estudio de la durabilidad de los agregados de naturaleza dolomítica es particularmente complejo ya que ambas reacciones alcalinas (RAS + RAC) pueden actuar en forma simultánea. Este caso se da cuando, además de la dolomita, la roca está constituida por minerales silíceos potencialmente reactivos, como el ópalo, la calcedonia o el cuarzo micro o criptocristalino (Mather *et al.*, 1964; Fournier y Bérubé, 1989, 2000; Tong y Tang, 1996; CSA, 2009a).

1.2. Síntomas de la reacción expansiva

1.2.1. Manifestaciones externas

El síntoma básico de la reacción es una rápida expansión del hormigón con el consiguiente agrietamiento (Swenson, 1957; Newlon y Sherwood, 1962). En el caso de algunos pavimentos, por ejemplo, dicho agrietamiento se produjo entre los dos y tres primeros meses posteriores a la terminación de la construcción de las losas (Hadley, 1964). Según la experiencia china (Deng *et al.*, 1993; Shu y Deng, 1996), las primeras manifestaciones de RAC aparecen antes de los primeros cinco años de la vida en servicio de la estructura.

En Canadá (Swenson, 1957; Swenson y Guillott, 1964; Rogers, 1986a), se han reportado casos de veredas y pisos de hormigón, cordones-cuneta y muros de fundación afectados por la RAC. Newlon y Sherwood (1962) informan sobre un caso de RAC, detectado en Virginia, EEUU, en un tablero de puente.

En los 90, aparecen en la literatura varios casos de estructuras con signos característicos de la RAC, construidas en el norte de China, sobre el final de los 80, entre las que se incluyen pilas de puentes, pistas de aeropuertos y columnas y durmientes pretensados (Deng *et al.*, 1993; Shu y Deng, 1996). En 1986, Hugenberg cita el caso de una presa de gravedad, construida en 1948, en EEUU, con manifestaciones deletéreas atribuidas a la RAC, a pesar de la presencia clara de geles de la RAS.

Los aspectos visibles de la RAC en las estructuras afectadas por esta reacción son similares a los que se observan en las obras en que se ha producido la RAS, con algunas excepciones.

Como regla general, el patrón de fisuración está influenciado por numerosos factores entre los que se destacan las condiciones de restricción (presencia de armaduras, tensiones actuantes), la forma y dimensión de los elementos estructurales y la distribución de la humedad (Ozol, 2006). De este modo, las fisuras pueden ser importantes o solamente visibles cuando la superficie del hormigón se halla humedecida.

En los pisos y pavimentos (figuras 1.1 a 1.3) es común observar el cierre de juntas y la expulsión del material de sellado, la rotura y dislocación del hormigón en la zona de juntas y la presencia de la fisuración característica en forma de mapa (Swenson, 1957; Hadley, 1964; Williams y Rogers, 1991; Deng *et al.*, 1993).

En el caso de columnas o durmientes pretensados, donde el confinamiento lateral es reducido, la fisuración puede ser vertical o paralela a la dirección de la armadura principal (Deng *et al.*, 1993), mientras que en los muros, donde la expansión lateral es limitada, el agrietamiento tiende a ser horizontal (Ozol, 2006).

Las primeras descripciones realizadas por Swenson (1957) y Hadley (1964) acerca de las muestras de hormigón extraídas de estructuras afectadas por la RAC indicaban que el hormigón entre fisuras generalmente conservaba su integridad y aparentemente no era afectado por la reacción.

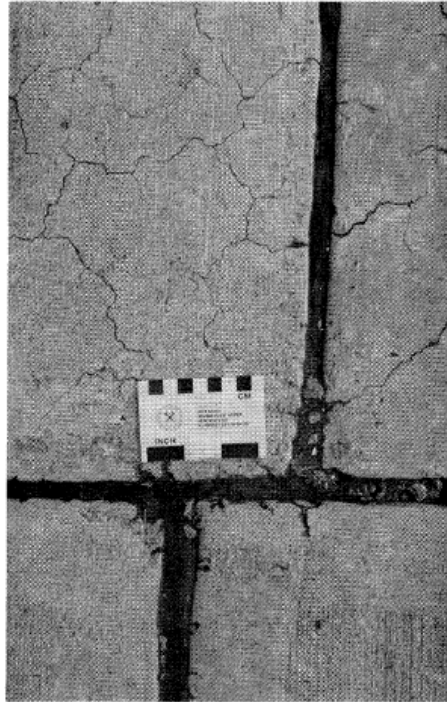


Figura 1.1: Vereda de hormigón afectada por la RAC, en Lancaster, Canadá. La junta de contracción del hormigón se desplazó 9 cm hacia la derecha, respecto al hormigón sin reacción (la expansión medida fue de 1,2 % a 3 años) (Williams y Rogers, 1991)



Figura 1.2: Vereda de hormigón afectada por la RAC, en Lancaster, Canadá. La expansión del hormigón empujó el cordón 9 cm hacia la derecha, deformando el pavimento asfáltico (Williams y Rogers, 1991)



Figura 1.3: Fisuración típica en forma de mapa de una losa de hormigón afectada por la RAC (Ozol, 2006)

A nivel macroscópico, al realizar la inspección visual del hormigón, no es habitual detectar manchas en la zona de grietas ni productos que puedan explicar la magnitud de las expansiones observadas. Nada parecido al gel que se observa en forma de exudaciones y que normalmente aparece sobre la superficie de las estructuras, en zonas agrietadas, cuando se produce la RAS. Lo dicho, es válido tanto para hormigones en servicio que han sido afectados por la RAC como para probetas de laboratorio que hayan demostrado poseer expansiones excesivas.

La ausencia de cantidades significativas de depósitos de gel en los hormigones que expandían en forma excesiva fue considerada, inicialmente, un hecho llamativo (Swenson, 1957; Newlon y Sherwood, 1962; Swenson y Guillott, 1964).

Por lo general, la cantidad de gel detectado en los hormigones elaborados con los agregados dolomíticos canadienses, típicamente reactivos (como el de Kingston u otros similares), es usualmente pequeña. Sin embargo, también es cierto que la expansión debida a la RAS no necesariamente guarda relación directa con la cantidad de gel producida (Grattan-Bellew *et al.*, 2008).

En resumen, si bien la presencia de geles silíceos en el hormigón provee una fuerte indicación de que la expansión de éste pueda ser debida a la RAS, al menos en parte, no se descarta la posibilidad de que ambas reacciones (RAS + RAC) puedan ocurrir en forma simultánea (Mather *et al.*, 1964; Hugenberg, 1986; Ozol, 2006).

Una vez iniciada la expansión del agregado grueso dentro del hormigón, el proceso evolutivo de la RAC puede generar diversos inconvenientes en la estructura, con consecuencias económicas de magnitud considerable.

Por un lado, la fisuración del hormigón puede comprometer la estabilidad de la estructura o afectar su durabilidad, al proveer los canales de acceso para el ingreso de agentes agresivos al hormigón o sus armaduras (Cl^- , CO_2). El sólo ingreso del agua en las fisuras, en caso de tratarse de estructuras sometidas a ciclos de congelación y deshielo, puede también agravar el proceso de deterioro del hormigón.

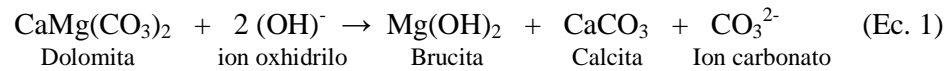
Además del aspecto estructural, las obras afectadas pueden también ver perjudicada su aptitud en servicio o su estética. Esta situación es habitual en las centrales hidroeléctricas donde, por ejemplo, la expansión del hormigón debida a la RAC puede producir la traba de las piezas móviles (puentes grúas, compuertas, ejes de turbinas, etc.) (Hugenberg, 1986). Este inconveniente pone la estructura fuera de servicio, lo cual, exige la inversión de importantes sumas de dinero en mantenimiento, rehabilitación o reemplazo de componentes dañados.

1.2.2. Manifestaciones internas

1.2.2.1. Aureolas de carbonatación

Hadley (1961) comprobó, mediante análisis realizados por difracción de rayos X (DRX), que las calizas dolomíticas expansivas de Kingston (Canadá), al reaccionar con la pasta de cemento, mostraban una disminución en el contenido de dolomita, en comparación al contenido de calcita, y la aparición de brucita.

Este cambio en la composición mineralógica del agregado, como resultado de la reacción entre la dolomita y la solución alcalina del hormigón, se conoce con el nombre de “reacción de dedolomitización” (Ec. 1):



Según esta ecuación, la dolomita es reemplazada por dos fases sólidas (brucita y calcita), mientras que el carbonato puede permanecer disuelto en la solución o precipitar como un sólido cristalino en función de la naturaleza del catión asociado al ion oxhidrilo.

Cuando el catión es Na^+ o K^+ , el ion carbonato permanece disuelto en la solución. Si el catión es el Li^+ , la solubilidad del Li_2CO_3 es muy baja y hace que éste precipite junto con la calcita y brucita.

Cuando el carbonato alcalino se encuentra disuelto en la solución presente en los poros del hormigón, se combina con los compuestos de hidratación del cemento, pudiendo dar lugar a la formación de distintos productos.

Hadley, en 1961, detectó, mediante DRX, la presencia de carboaluminatos de calcio en la pasta cementícea, en probetas cilíndricas compuestas de pasta y roca reactiva.

Otra posibilidad, es que el carbonato alcalino reaccione con el hidróxido de calcio que se origina como resultado de la hidratación de los silicatos de calcio del cemento (Monteiro y Mehta, 1986). Esta reacción (Ec. 2) da lugar a la formación de calcita, creando aureolas o halos de carbonatación (figura 1.4) alrededor de los agregados (Hadley, 1964; Duke *et al.*, 1997; Katayama, 2004; Katayama y Sommer, 2008).

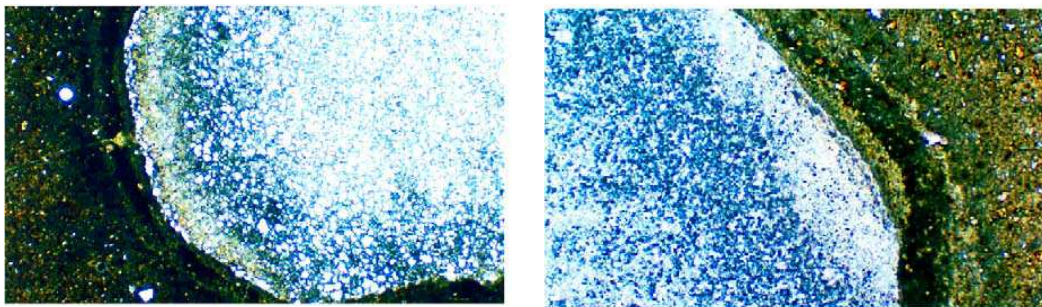
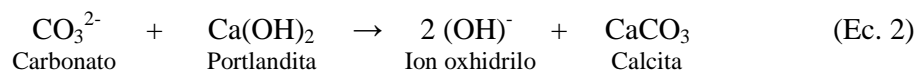


Figura 1.4: Bordes de reacción (dedolomitización) y halos de carbonato alrededor de un agregado dolomítico, en barras de hormigón del ensayo RILEM AAR-5 a la edad de 16 días (Katayama, 2004)

Paralelamente, este proceso de carbonatación motiva la regeneración de los iones oxidrilos (Ec. 2), permitiendo que la reacción de dedolomitización persista hasta que la dolomita desaparezca o la alcalinidad (pH) disminuya por causa de reacciones secundarias (Hadley, 1961).

1.2.2.2. Bordes de reacción

Una de las manifestaciones características de la RAC, citada en la bibliografía (Rogers, 1979; Grattan-Bellew, 1996b), es la formación de bordes de reacción (figura 1.5).

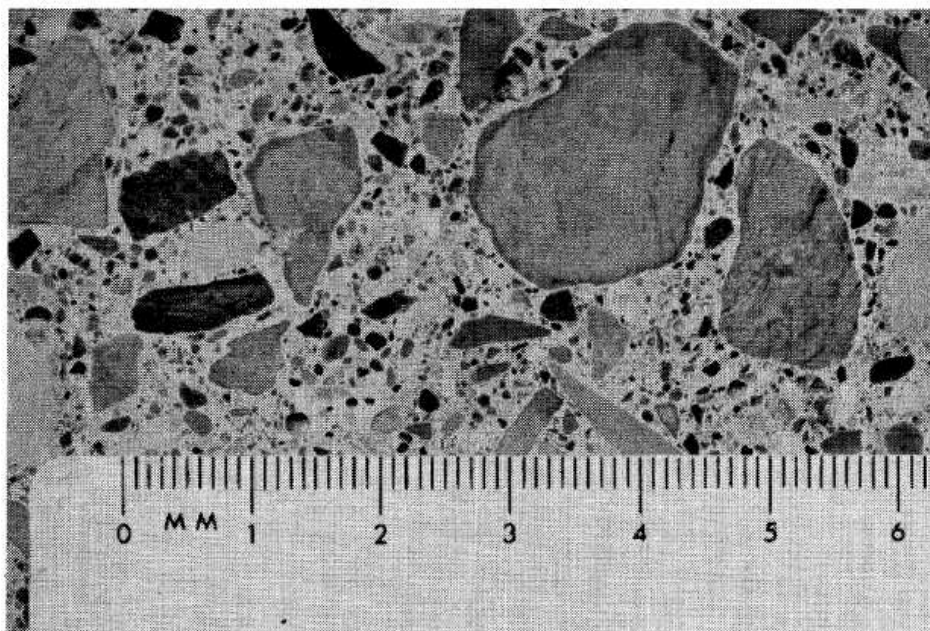


Figura 1.5: Bordes de reacción en agregados afectados por la RAC (Rogers, 1979)

En las calizas dolomíticas típicamente reactivas (Swenson, 1957; Hadley, 1964) estos bordes presentan coloración oscura. Samuel *et al.* (1989) citan el caso de bordes de coloración blanca desarrollados en calizas dolomíticas no expansivas de la India.

Es habitual clasificar los bordes de reacción en tres tipos (positivos, neutros o negativos), en función del grado de solubilidad que presenta la zona periférica del agregado, en comparación al centro de la partícula, cuando ésta es atacada con una solución débil de ácido clorhídrico (Hadley, 1964; Walker, 1978; Katayama, 2004).

Los bordes de reacción positivos presentan mayor resistencia (menor solubilidad) al ataque ácido que el centro de la partícula. Estos bordes se observan comúnmente en las rocas dolomíticas impuras y se caracterizan por presentar un enriquecimiento de sílice en la periferia de las partículas afectadas (Hadley, 1964). Los carbonatos que forman este tipo de bordes son de características similares a los expansivos (RAC), aunque se diferencian de estos por poseer un contenido más reducido de arcilla y un porcentaje más elevado de dolomita (Hadley, 1964).

Según Hadley (1964), los álcalis presentes en la pasta de cemento difunden hacia el agregado (figura 1.6), donde reaccionan con la dolomita y los componentes silíceos presentes en la roca (cuarzo, arcillas), formando brucita (Ec. 1) y silicatos alcalinos solubles. El ion silicato reacciona con la brucita para formar silicatos de magnesio hidratados, dando origen al borde de reacción. En la figura 1.7 se muestran resultados obtenidos por Hadley (1964), en hormigones elaborados con agregados de la zona de Indiana, EEUU (Jeffersonville, Elgin), donde se observa la disminución resistente atribuida a la RAC.

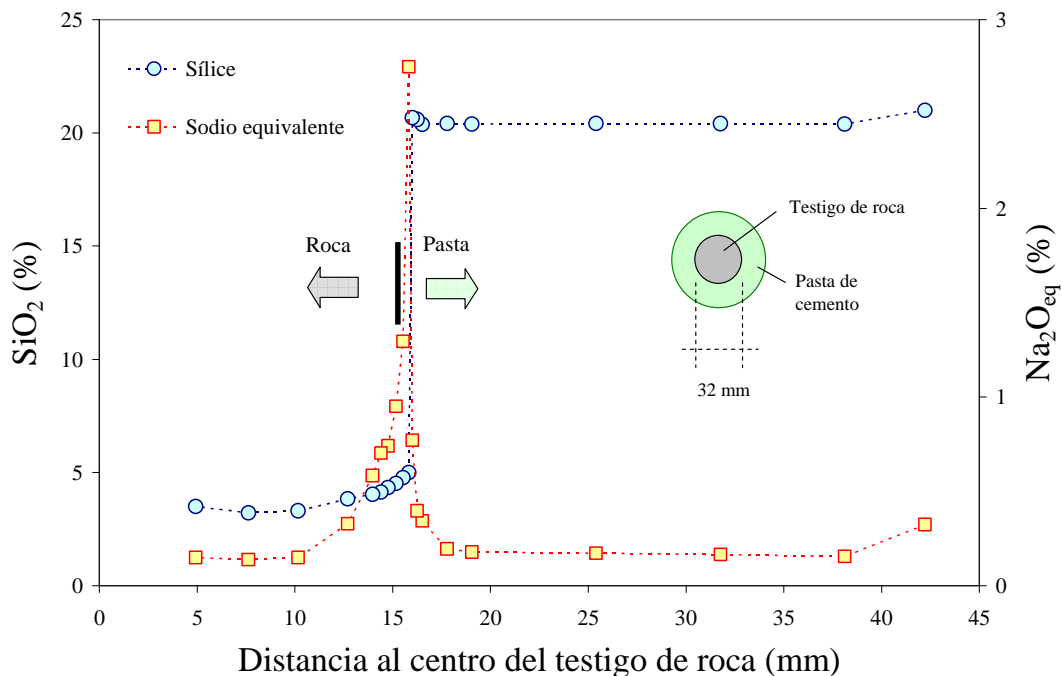


Figura 1.6: Migración de álcalis y sílice en la zona de transición del agregado dolomítico (Hadley, 1964)

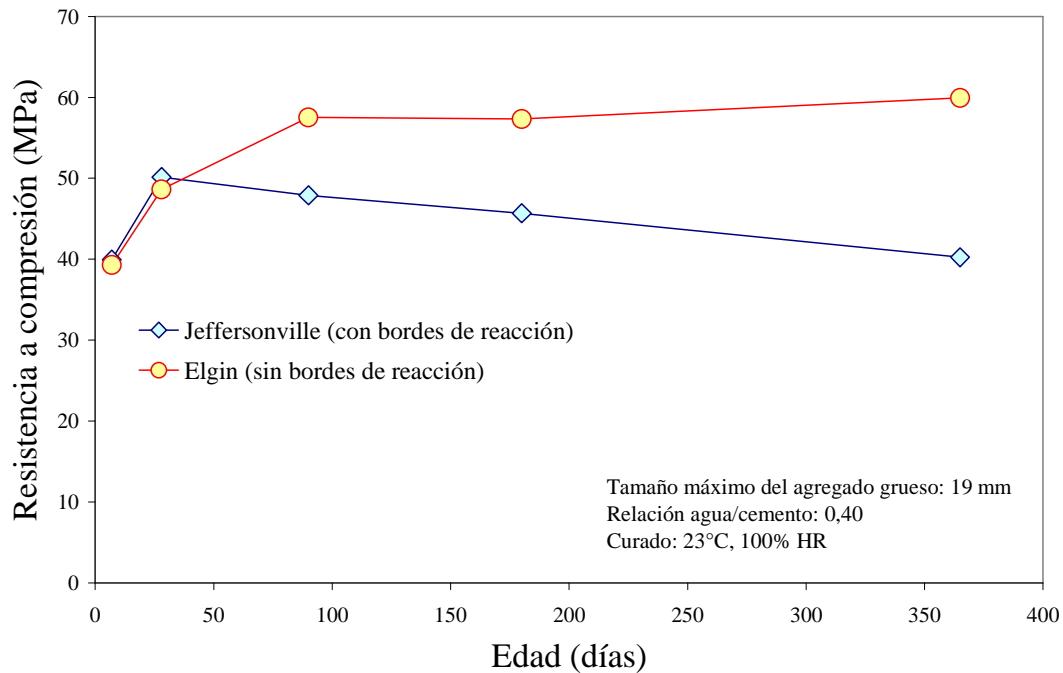


Figura 1.7: Evolución de la resistencia a compresión de hormigones elaborados con agregados dolomíticos que desarrollan bordes de reacción (Hadley, 1964)

La precipitación de los silicatos solubles, a partir de su reacción con la brucita, crea un gradiente en la solución de poros de la roca que promueve la difusión de sílice hacia la región de interfase (figura 1.6). Este mecanismo explica la ausencia de este tipo de bordes en las rocas calizas (carentes de dolomita) debido a la imposibilidad de formar brucita.

Para Hadley (1964), si bien la formación de los bordes de reacción y la expansión del agregado están directamente vinculadas al proceso de dedolomitización, la expansión del agregado depende, además, del contenido de arcilla y de la composición de la fracción carbonática de la roca. Katayama (1992, 2004), por el contrario, sugiere que ambos procesos no tienen relación alguna con la expansión de la roca, la cual, es atribuida a la RAS.

Al final de la década del 50, Hadley (1964) y otros investigadores se abocaron al estudio de las causas que motivaron el deterioro prematuro de algunos pavimentos construidos con agregados dolomíticos de la zona de Iowa (USA). Las losas mostraban un

proceso de deterioro progresivo (fisuración y rotura en la zona de juntas y bordes del pavimento) y un debilitamiento generalizado del hormigón. El estudio petrográfico del hormigón permitió identificar la presencia de bordes de reacción en los agregados y una intensa carbonatación de la pasta, lo que fue vinculado a la disminución resistente del hormigón.

Los carbonatos que no contienen dolomita o la contienen en pequeña proporción, pueden producir los llamados bordes de reacción “negativos”. En general, se considera que estos bordes no son perjudiciales para el hormigón o pueden resultar beneficiosos al mejorar la adherencia entre la roca y la pasta de cemento (Buck y Dolch, 1966), aunque existen también algunas excepciones (Katayama, 1992).

No existen evidencias de que los bordes de reacción neutros produzcan un efecto perjudicial en el hormigón (Poole, 1981; Katayama, 1992).

Sin duda alguna, la presencia de bordes de reacción en el agregado constituye un índice que marca la posible ocurrencia de la RAC en el hormigón y así, en general, lo entienden las normas de aplicación (Thomas *et al.*, 2008; CSA, 2009b; ASTM, 2010f). La ausencia de estos bordes (figura 1.8), sin embargo, no necesariamente implica lo contrario (Katayama, 2004).

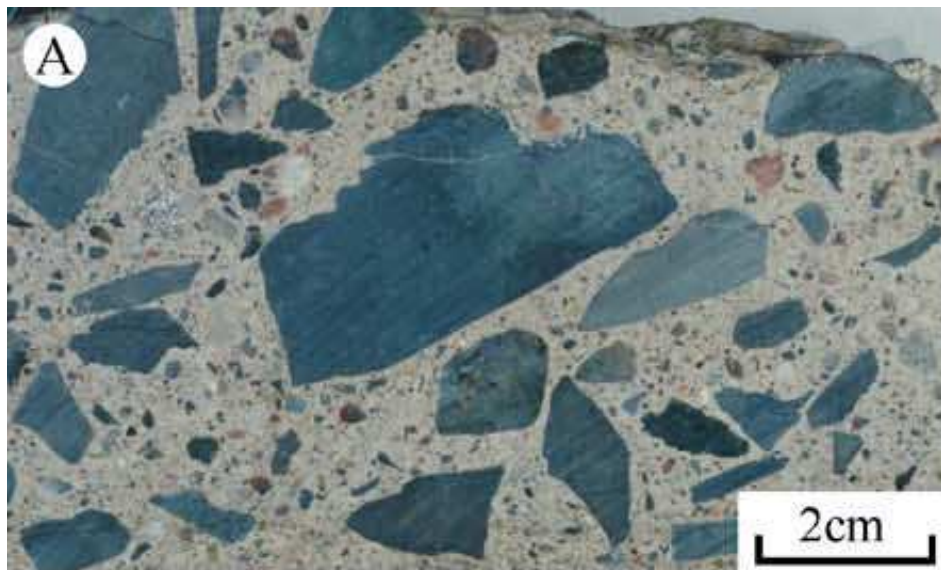


Figura 1.8: Ausencia de bordes de reacción en agregados dolomíticos afectados por la RAC. A pesar de la expansión deletérea registrada en el hormigón a los 28 días (ensayo RILEM AAR-5), no se observan bordes de reacción sobre el agregado (Katayama, 2004)

Si bien existe una tendencia natural a considerar que los bordes de reacción son producto de las reacciones químicas que ocurren entre el agregado y los álcalis de cemento, las evidencias experimentales recogidas en la literatura distan mucho de confirmar esta presunción (Hadley, 1964; Walker, 1978; Katayama, 2004).

Hadley (1961, 1964) y otros investigadores (Walker, 1978), comprobaron que las rocas dolomíticas típicamente reactivas experimentaban una intensa dedolomitización alrededor de los agregados, a partir de lo cual, se asoció que ambos fenómenos (dedolomitización y bordes de reacción) estaban asociados.

Sin embargo, experiencias realizadas por Newlon y colaboradores, recopiladas por Walker (1978), demostraron que los bordes de reacción producidos por agregados dolomíticos de la zona de Virginia (USA) eran más prominentes en los hormigones elaborados con cementos de bajo contenido de álcalis que en aquellos de alto álcalis.

Grattan-Bellew y Lefebvre (1986) no pudieron encontrar cambios en la composición química (SEM-EDS) o mineralógica (DRX) de los bordes de reacción observados en los agregados dolomíticos de la zona de Kingston, a pesar de las importantes expansiones registradas en los hormigones elaborados con estos agregados. Resultados similares fueron informados por Grattan-Bellew (1996b) y Duke *et al.* (1997), quienes encontraron que el proceso de dedolomitización, lejos de lo esperado, puede presentarse con mayor intensidad en el centro de la partícula que en el borde del agregado.

1.2.2.3. Cambios mineralógicos en el agregado y productos de reacción

El ataque del ion oxhidrilo (OH^-) sobre la dolomita genera la aparición de brucita y calcita (Ec. 1). Dado que este último mineral es también un componente habitual de los agregados dolomíticos, la brucita se convierte en el producto de reacción específico de la RAC.

Si bien la presencia de brucita puede ser inferida por distintas técnicas (DRX, SEM-EDS, etc.), su identificación no siempre resulta sencilla debido a la forma y tamaño de sus cristales (Duke *et al.*, 1997; Katayama, 2004; Katayama y Sommer, 2008). En las figuras 1.9 y 1.10 se muestran algunos ejemplos de cristales de brucita, detectados mediante SEM, donde se observa que el tamaño de sus cristales es inferior a 5 μm .

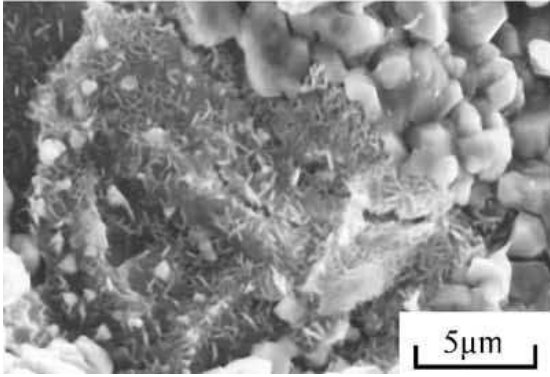


Figura 1.9: Cristales de brucita en barras de mortero NBRI a la edad de 28 días (Katayama, 2004)

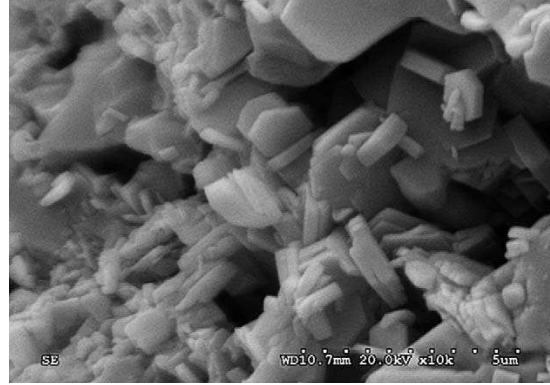


Figura 1.10: Cristales de brucita en barras de mortero NBRI a 28 días (López-Buendía *et al.*, 2008)

La ausencia de cantidades significativas de gel en los hormigones afectados por la RAC ha sido señalada en numerosas oportunidades como uno de los hechos característicos de esta reacción (Swenson, 1957; Newlon y Sherwood, 1962; Swenson y Guillott, 1964; Grattan-Bellew y Guillott, 1987; Grattan-Bellew *et al.*, 2008).

Katayama (1992, 2004), por el contrario, sugiere que la RAC no es más que una RAS generada por la presencia de cuarzo criptocristalino ($< 2 \mu\text{m}$) en el agregado. Según este investigador, la dificultad para la detección apropiada de estos geles está vinculada a dos hechos. Por un lado, sugiere que los geles silíceos pueden reaccionar con la brucita para formar geles de silicatos de Mg, no expansivos, que se confunden con el resto de los productos de la microestructura del hormigón. Adicionalmente, señala que el empleo de las técnicas petrográficas clásicas es inadecuado debido al reducido tamaño de los depósitos de gel. En la figura 1.11 se muestra el aspecto de los geles observados por Katayama y la escala de observación empleada.

1.3. Factores que influyen en la expansión del hormigón

Los factores que pueden influir en el grado de deterioro de los hormigones afectados por la RAC son numerosos. A continuación se discutirán aquellos que se destacan en la bibliografía y que han sido investigados en profundidad en ensayos de laboratorio o en pruebas de campo (análisis de prototipos a escala).

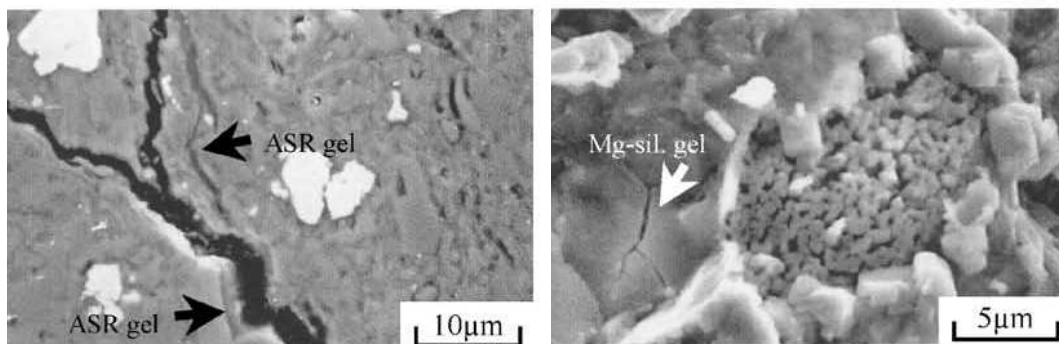


Figura 1.11: Geles silíceos (ASR gel) y de silicato de magnesio (Mg-sil gel) en barras de hormigón del ensayo RILEM AAR-5 a la edad de 16 días (Katayama, 2004)

1.3.1. Contenido de álcalis en el hormigón

Los primeros estudios realizados en USA y Canadá demostraron que la expansión del hormigón debida a la RAC está directamente relacionada con el contenido de álcalis del hormigón aportados por el cemento (Swenson, 1957; Newlon y Sherwood, 1962; Hadley, 1964). En la figura 1.12 se muestra una recopilación de datos, informados por distintos investigadores (Hadley, 1964; Swenson y Guillott, 1964; Alasali *et al.*, 1991), que muestran esta dependencia.

En la figura 1.13 se muestran resultados de estudios realizados por Williams y Rogers (1991), en mezclas de hormigón elaboradas con distintos contenidos de álcalis y agregados de la zona de Pittsburg (Kingston, Canadá). Los valores que se grafican corresponden a la expansión registrada tanto en prismas de hormigón almacenados en cámara húmeda como en losas expuestas al ambiente exterior (Ontario, Canadá). Esta figura muestra, claramente, que la expansión del hormigón se incrementa en forma proporcional al contenido de álcalis de la mezcla.

En base a la Ec. 1, Tang *et al.* (1991) concluyen que existe una relación directa entre el grado de avance de la reacción (expansión) y el pH de la solución de poros del hormigón. Deng y Tang (1993) demostraron que para valores de pH inferiores a 12 la reacción de dedolomitización (expansión) procede de manera muy lenta o no tiene lugar.

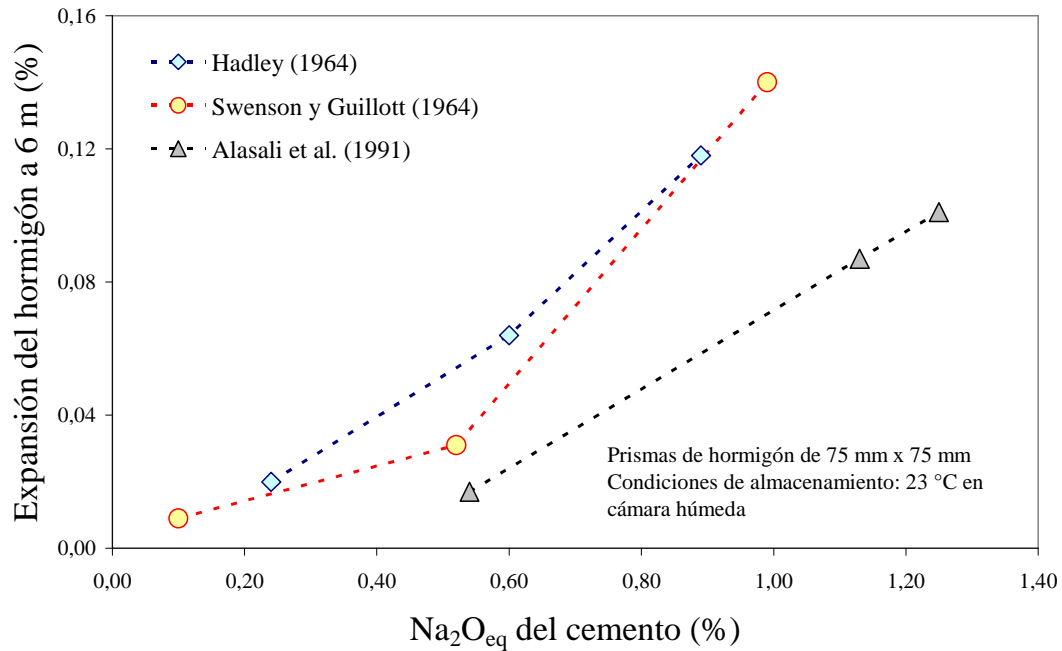


Figura 1.12: Influencia del contenido de álcalis aportados por el cemento en la expansión del hormigón (Hadley, 1964; Swenson y Guillott, 1964, Alasali *et al.*, 1991)

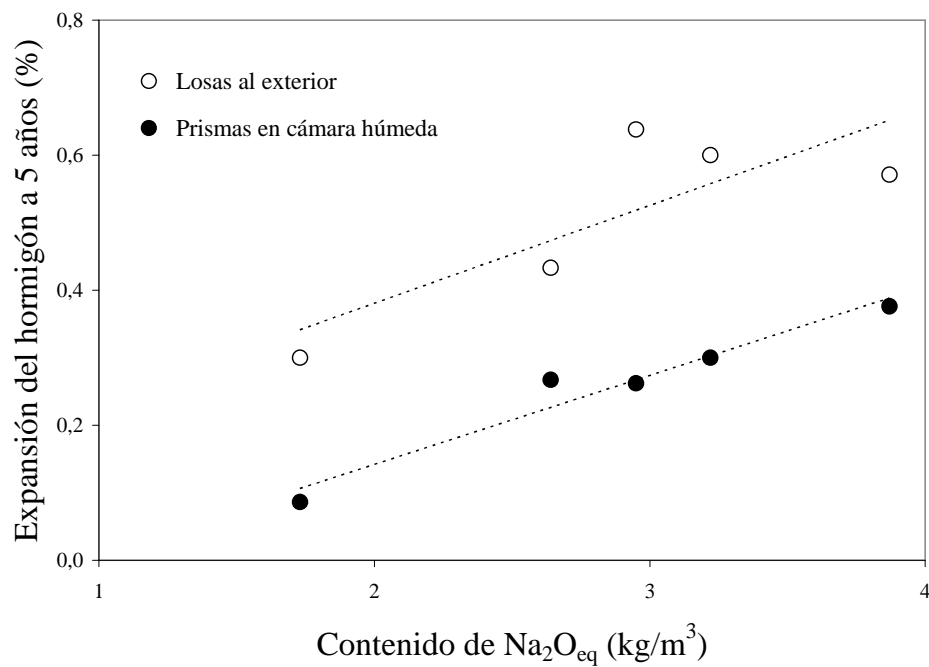


Figura 1.13: Influencia del contenido de álcalis del hormigón en la expansión de prismas y losas de hormigón (Williams y Rogers, 1991)

En un primer momento, esta vinculación entre alcalinidad y expansión llevó a los investigadores a evaluar la posibilidad de controlar la RAC a través de la restricción del contenido de álcalis del cemento. Sin embargo, pronto se descubrió que, con las rocas de alta reactividad, era necesario limitar de manera drástica el contenido de álcalis del hormigón para inhibir la expansión del agregado (Swenson y Guillott, 1964).

Williams y Rogers (1991) citan el caso de cordones-cuneta (figura 1.14), construidos en 1957, con cemento de bajo álcali (del orden de 0,30 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), que a los 33 años de servicio mostraban signos de reacción deletérea asociados a la RAC (fisuración y cierre de juntas).

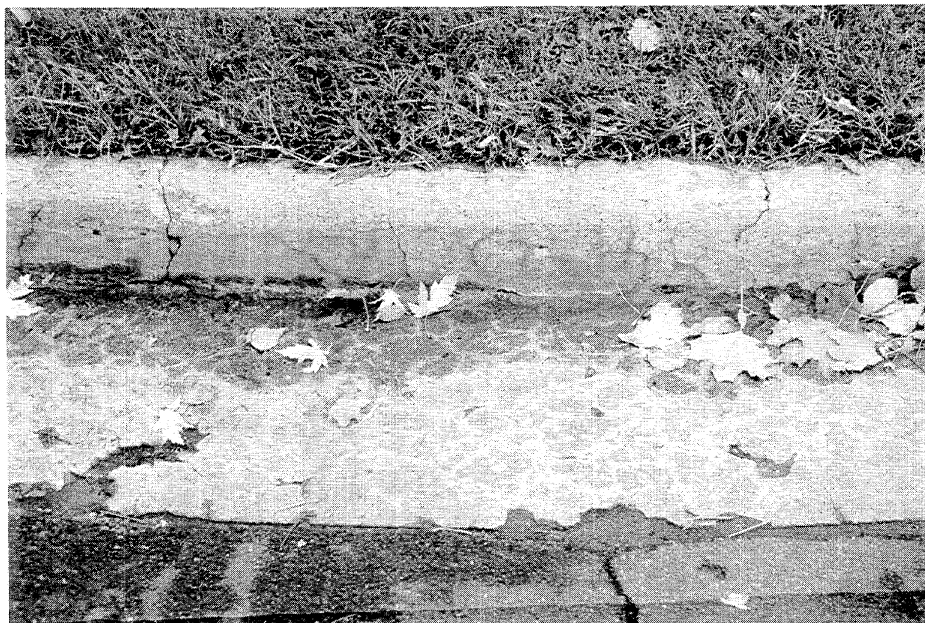


Figura 1.14: Cordón-cuneta afectado por la RAC, en Polson Park, Kingston, Canadá. La edad del hormigón es 33 años y fue elaborado con un cemento de bajo álcalis (Williams y Rogers, 1991)

Si bien los álcalis (Na^+ , K^+) presentes en la solución de poros del hormigón pueden tener diversos orígenes (AMA, agua, aditivos, agregados), sin lugar a dudas, el cemento constituye la principal fuente de aporte.

Por ello, en el caso de la RAS, durante años, las especificaciones limitaron el contenido de álcalis del cemento, buscando controlar los efectos nocivos de la reacción. Un ejemplo, en este sentido, lo constituye el Reglamento CIRSOC 201-82 (INTI-CIRSOC,

1982), el cual, exige que el contenido de óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) del cemento sea inferior a 0,60 %, en el caso de contar con agregados potencialmente reactivos frente a la RAS.

En 1964, Swenson y Guillott sugieren que el valor máximo del contenido de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ del cemento debía ubicarse entre 0,40 % y 0,45 % para controlar los efectos expansivos de los hormigones elaborados con las calizas dolomíticas de Kingston, Canadá.

Hoy, este concepto ha evolucionado y se considera más apropiado limitar el contenido de álcalis del hormigón y no del cemento, en función de la reactividad del agregado y otros factores (Milanesi *et al.*, 2008a). En el caso específico de la RAC, por el contrario, se acepta que no existe un límite práctico para el contenido de álcalis del cemento que sea suficiente para inhibir esta reacción (Thomas *et al.*, 2008; CSA, 2009f; AASHTO, 2010).

Algunos estudios muestran que, en soluciones de igual actividad, el Na es más activo que el K y éste más que el Li (Hadley, 1964; Lu *et al.*, 2006a, b). No obstante, existen otros agregados que no cumplen con este orden de prelación (Qian *et al.*, 2002b).

En el caso de la RAS, para que la reacción expansiva se produzca, no basta con que el agregado posea sílice reactiva (ópalo, vidrio volcánico, tridimita, etc.) y que la solución de poros aporte suficiente álcalis. Es necesario, además, entre otras cosas, que ambos componentes (sílice reactiva y álcalis) se hallen en proporciones determinadas, dentro de cuyos márgenes existe una proporción llamada *pessimum*, para la cual se produce la máxima expansión (Fournier y Bérubé, 2000; Batic y Sota, 2001). Esto equivale a decir que la curva representativa de la expansión del mortero u hormigón, en función de la proporción del agregado reactivo, para un determinado contenido de álcali, presenta un máximo correspondiente a la proporción *pessimum*.

En el caso de la RAC, el efecto *pessimum* no se hace presente. En otras palabras, la máxima expansión se da para contenidos de carbonato reactivo del 100 % (Hadley, 1964; Grattan-Bellew y Guillott, 1987).

1.3.2. Grado de reactividad de la roca

El grado de reactividad de la roca puede evaluarse a través de la determinación de la expansión de prismas o testigos extraídos de las mismas, cuando son sumergidos en soluciones alcalinas (Hadley, 1961; Grattan-Bellew, 1981; Rogers, 1986a).

Se ha demostrado que estas expansiones dependen de varios factores. Entre ellos, se destacan la concentración de la solución alcalina (Swenson y Guillott, 1964), la dirección de extracción del testigo en relación a los planos de estratificación de la roca (Swenson y Guillott, 1964; Sims, 1981), la temperatura de la solución (Tang y Lu, 1986), las dimensiones del testigo (Dolar-Mantuani, 1971; Grattan-Bellew, 1981) y la reactividad intrínseca del carbonato (Ozol, 2006).

La figura 1.15 muestra la correlación que existe entre la expansión de prismas de roca y la del hormigón que la contiene en forma de agregado grueso (Hadley, 1964; Grattan-Bellew, 1981; Newlon *et al.*, 1972, en Ozol, 2006).

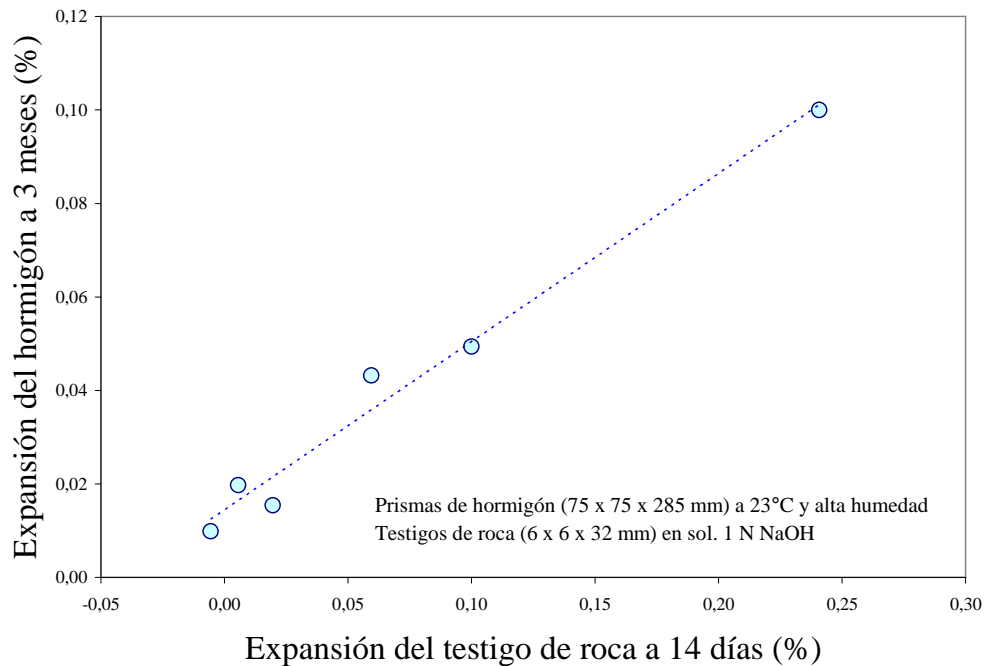


Figura 1.15: Correlación entre la expansión de prismas de roca en solución alcalina y la correspondiente al hormigón que contiene dicha roca como agregado grueso (Hadley, 1964)

1.3.3. Humedad y temperatura de curado

Los primeros estudios realizados por Swenson (1957) pusieron de manifiesto la influencia que ejercen las condiciones de exposición en la expansión de hormigón. En particular, se observó que tanto la velocidad como el grado de expansión del hormigón se maximizaban bajo condiciones de humedecimiento y secado.

En 1964, Swenson y Guillott informan resultados de expansión obtenidos en prismas de hormigón bajo condiciones variables de humedad a temperatura ambiente ($\approx 23\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los prismas fueron sometidos a un curado húmedo inicial de siete días, seguido de un período de secado (50 % de humedad relativa) de 63 días, luego de lo cual, fueron sumergidos en agua. Los resultados evidenciaron que el hormigón no presentaba expansión alguna durante el período de secado y que ésta aparecía una vez iniciada la inmersión bajo agua.

Estos investigadores encontraron que la expansión del hormigón, en condiciones de alta humedad, se incrementa al aumentar la temperatura de curado de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ y es algo menor a $54\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto último, sin embargo, podría estar vinculado a un fenómeno de lixiviación alcalina (Ideker *et al.*, 2008). Según Swenson y Guillott (1964), la dependencia de la expansión del hormigón con la temperatura sugiere que la naturaleza expansiva de la reacción es esencialmente química.

En la figura 1.16 se representan resultados obtenidos por Alasali *et al.* (1991) que muestran la influencia de la temperatura en la expansión del hormigón. Resultados similares son informados por Williams y Rogers (1991).

1.3.4. Tamaño máximo del agregado grueso

Hasta el momento, todos los reportes en los que se hace mención de estructuras afectadas por la RAC se refieren, exclusivamente, al uso de rocas dolomíticas como agregado grueso (Swenson y Guillott, 1964; Willimas y Rogers, 1991; Deng *et al.*, 1996; Fournier y Bérubé, 2000; Ozol, 2006; ASTM, 2010a).

A diferencia de lo que sucede en la RAS, en estudios de laboratorio se ha verificado que la expansión del hormigón afectado por la RAC disminuye con la reducción del tamaño máximo del agregado grueso (Swenson y Guillott, en Hadley, 1964).

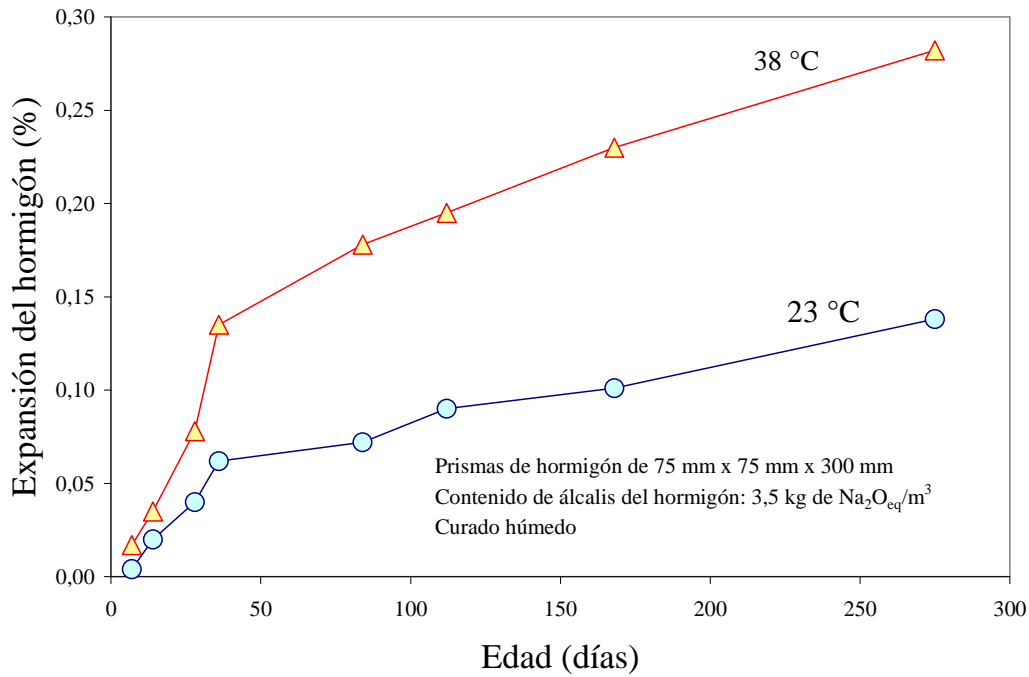


Figura 1.16: Influencia de la temperatura en la expansión del hormigón (Alasali *et al.*, 1991)

Como se discutirá en 1.6.3, esta es la razón por la que los métodos basados en el ensayo de mezclas de mortero, que utilizan agregados con partículas de reducido tamaño (≤ 5 mm), no resultan efectivos para el estudio de la RAC (Grattan-Bellew, 1983b; Shayan *et al.*, 1988; Fournier y Bérubé, 2000). Las normas ASTM C 227 (ASTM, 2010b) y CSA A23.2-27A (CSA, 2009f) reconocen también esta limitación.

En 2004, Sommer y otros desarrollan, en base a este fenómeno, un método específico para el estudio de los agregados de naturaleza dolomítica.

La base conceptual de este enfoque es comparar los resultados de expansión obtenidos con dos métodos de ensayo (AAR-2 vs. AAR-5), cada uno de los cuales utiliza el agregado con una granulometría diferente. En el método AAR-2, la granulometría del agregado es similar a la del NBRI (0,150 mm a 4,75 mm). En el AAR-5, la mezcla se elabora con un agregado grueso monogranular (5 mm a 10 mm) en el que se han eliminado las partículas de reducido tamaño (menor a 4 mm). Al comparar los resultados obtenidos por ambos métodos es posible inferir la tipología de reacción presente en el agregado.

En la tabla 1.1 se muestran resultados de expansión de barras de mortero y hormigón, elaborados con agregados dolomíticos de Canadá (Pit) y China (CH), luego de 28 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C (Lu *et al.*, 2008). Estos resultados muestran que el valor de expansión obtenido aumenta a medida que lo hace el tamaño de las partículas del agregado.

Tabla 1.1: Influencia del tamaño de las partículas del agregado en la expansión del mortero u hormigón (Lu *et al.*, 2008)

Agregado	Expansión a 28 días en solución 1N de NaOH a 80 °C (%)		
	0,15 - 4,75 mm ⁽¹⁾	2,5 - 5,0 mm ⁽²⁾	5 - 10 mm ⁽²⁾
Pit 6	0,095	0,150	0,180
Pit 13	-	0,120	0,120
Pit 15	0,102	0,180	0,210
Pit 16	0,156	0,221	0,227
CH	0,115	0,140 ⁽³⁾	0,120

1) Barras de 25 x 25 x 285 mm; a/c = 0,47

2) Barras de 40 x 40 x 160 mm; a/c = 0,33

3) Datos obtenidos con partículas de la fracción 1,25 mm a 2,50 mm

La vinculación entre la expansión del hormigón y el tamaño máximo del agregado grueso en la RAC ha sido aprovechada por algunos investigadores para sugerir medidas de prevención. No obstante, los resultados obtenidos diluyendo el agregado reactivo o limitando su tamaño máximo no han sido satisfactorios (Hadley, 1964; Soles *et al.*, 1989).

1.3.5. Empleo de inhibidores

Una de las características distintivas de la RAC, que la diferencian de la RAS, es que el uso de adiciones minerales activas (puzolanas, escorias, etc.) o aditivos químicos a base de litio no resulta efectivo para inhibir las expansiones generadas por esta reacción (Swenson y Guillott, 1964; Walker, 1978; Pagano y Cady, 1982; Thomas y Innis, 1998).

Rogers y Hooton (1992) informan resultados de expansión obtenidos en losas de hormigón, expuestas al exterior, hasta la edad de cinco años. La mezcla fue elaborada con agregado grueso dolomítico de la zona de Pittsburg (Canadá), reemplazando un 50 % (en peso) del cemento (0,67 % de Na₂O_{eq}) por escoria de alto horno. A los dos años de edad, las losas de hormigón mostraron fisuras y una expansión superior a 0,10 %.

Shu y Deng (1996) prueban que la inhibición de la RAC, en rocas de alta reactividad alcalina (Kingston), sólo puede lograrse combinando el uso de un cemento de bajo álcalis (del orden de 0,40 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) con la adición de un alto contenido de AMA (70 % de ceniza volante, 90 % de escoria granulada de alto horno o 30 % de humos de sílice).

Katayama y Sommer (2008) informan que el reemplazo de un 50 % de escoria de alto horno, de alta finura ($605 \text{ m}^2/\text{kg}$), logró reducir la expansión del hormigón (AAR-5) en sólo un 30 % (de 0,14 %, en el hormigón sin adición, a 0,11 %, incorporando un 50 % de escoria).

Swenson y Guillott (1964) reportan que ninguna de las diez puzolanas empleadas para inhibir la reacción expansiva del agregado de Pittsburg resultó efectiva. Las puzolanas seleccionadas eran materiales efectivos frente a la RAS y fueron utilizadas en reemplazo de un 25 % en peso de un cemento de alto álcalis. Todos los hormigones evaluados alcanzaron la misma magnitud de expansión al cabo de dos años. Estos investigadores agregan, además, que la adición de LiCl tampoco logró reducir las expansiones del hormigón hasta esa edad.

Pagano y Cady (1982) evaluaron la efectividad inhibidora del Li_2CO_3 y FeCl_3 en hormigones elaborados con agregado grueso dolomítico de alta reactividad (Kingston, Canadá). Para ello, llevaron el contenido de álcalis del cemento a 2,0 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ mediante la adición de NaOH al agua de amasado. Las dosis de Li_2CO_3 y FeCl_3 llegaron hasta el 5 % y 7 % en peso del agua de mezclado, respectivamente. Los prismas de hormigón permanecieron inmersos en agua saturada de cal, a temperatura ambiente, hasta la edad de 8 meses. Al final del ensayo, ninguno de estos dos aditivos logró controlar los efectos expansivos de la RAC, aunque las expansiones del hormigón se redujeron en un 50 %, aproximadamente.

Por lo expuesto, cuando se está en presencia de agregados potencialmente reactivos debido a la RAC, los reglamentos recomiendan evitar su uso, por ejemplo, a través de la explotación selectiva de la cantera (Thomas *et al.*, 2008; CSA, 2009f; AASHTO, 2010).

1.4. Características de los carbonatos expansivos

1.4.1. Petrografía

Los primeros estudios realizados en Canadá y EEUU pusieron de manifiesto que todos los carbonatos expansivos provenían de rocas dolomíticas arcillosas, de grano muy fino y con una textura característica (Hadley, 1964; Newlon y Sherwood, 1962; Walker, 1978; Rogers, 1979; Ozol, 2006).

Según la recopilación efectuada por Walker (1978), el contenido de dolomita en las rocas reactivas, referido a la fracción carbonato, se ubica entre el 40 % y 75 %. Hadley (1964), sin embargo, muestra ejemplos de rocas expansivas (expansión en testigos de roca > 0,5 %) en las que el contenido de dolomita va desde el 15 % a más del 90 %. Según Deng *et al.* (1992, 1993) y Shu y Deng (1996), el contenido de dolomita de los carbonatos reactivos hallados en China se ubica en un intervalo más amplio (4 % al 95 %) que el de los agregados americanos.

El contenido de residuo insoluble en las rocas típicamente reactivas, según Walker (1978), varía entre el 5 % y 30 %, aproximadamente. No obstante, existen también ejemplos de rocas expansivas con contenidos de residuo insoluble que caen fuera de este rango (Rogers, 1986a).

Desde el punto de vista petrográfico, las rocas americanas (Canadá y EEUU) típicamente reactivas poseen una textura característica que resulta de la existencia de pequeños cristales de dolomita (< 50 μm), diseminados en una matriz de grano muy fino de calcita (< 5 μm) y arcilla, y pequeñas concentraciones de cuarzo y otros minerales detríticos (Hadley, 1961, 1964; Swenson y Guillott, 1964). La figura 1.17 muestra el aspecto de la textura característica de los carbonatos reactivos hallados en la región de Ontario, Canadá (Rogers; 1979).

La arcilla puede encontrarse formando inclusiones en los cristales de dolomita, orientadas en la dirección de los planos cristalográficos principales, acompañando la forma del cristal (Swenson y Guillott, 1964; Grattan-Bellew y Guillott, 1987). También puede encontrarse finamente diseminada en la matriz, formando una especie de red (Tang *et al.*, 1986), y concentrada en las proximidades de la interfaz matriz-dolomita (Grattan-Bellew y Guillott, 1987). Estos minerales arcillosos, a menudo, le dan a la observación óptica de los cortes delgados un aspecto de sombra o turbidez (Swenson y Guillott, 1964).

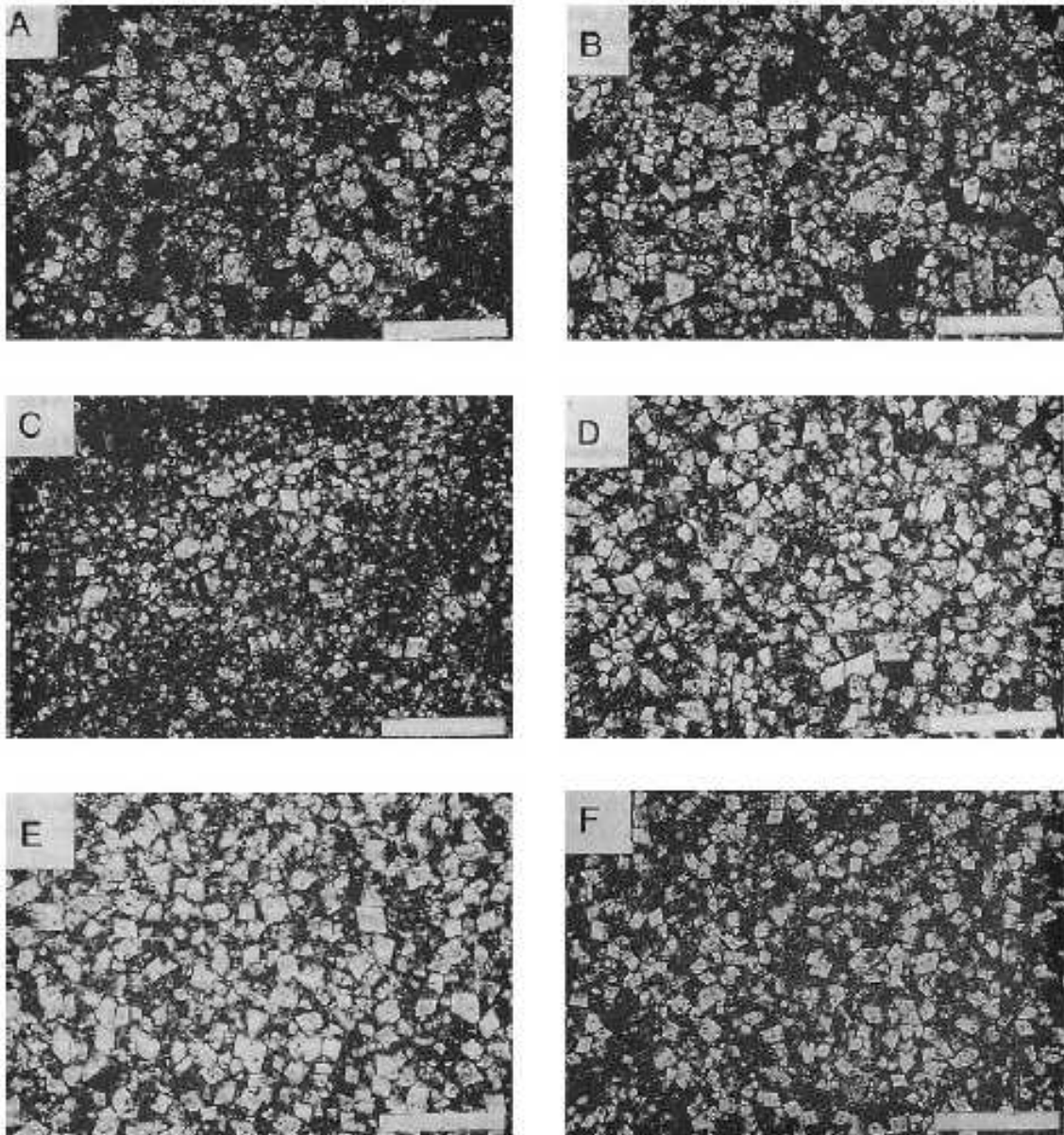


Figura 1.17: Textura típica de calizas reactivas del este de Canadá. A, B y C corresponden a rocas de diferentes canteras. D, E y F son de la misma cantera. D y F son del mismo sustrato (Rogers, 1979)

En general, las rocas americanas típicamente reactivas se destacan por ser de gran compacidad (absorción $< 2\%$, densidad relativa $> 2,70$), adecuada dureza (desgaste Los Ángeles $< 30\%$) y grano fino. No obstante, existen también algunas excepciones (Newlon y Sherwood, 1962; Swenson y Guillott, 1964; Walker, 1978; Rogers, 1986a).

Sin duda alguna, la estructura compacta y textura característica de los carbonatos reactivos permiten explicar las excelentes cualidades físicas de estos agregados. Sin

embargo, según la opinión de varios investigadores (Grattan-Bellew y Guillott, 1987; Tang *et al.*, 1986; Ozol, 2006), estas cualidades son también responsables, al menos en parte, de su reactividad alcalina deletérea.

En general, la experiencia americana indica que la mayoría de los carbonatos expansivos posee la textura descrita, al menos, en pequeñas áreas de la roca (formando venillas, por ejemplo) o sólo en determinados niveles de la cantera. La figura 1.18 muestra un ejemplo en este sentido, donde es posible observar que, aún dentro de un mismo nivel de estratificación, la textura puede variar fuertemente dentro de distancias muy cortas, incluso a escala microestructural (Ozol, 2006).

La textura indicada en la figura 1.17 se encuentra presente en las denominadas “rocas de expansión temprana” (*early expanders*), cuyas manifestaciones deletéreas pueden aparecer en el hormigón dentro del primer año de vida en servicio de la obra (Ozol, 2006).

En las denominadas “rocas de expansión tardía” (*late expanders*), descritas por Dolar-Mantuani (1971), la textura “típica” se modifica. La matriz del carbonato es de grano más grueso y está constituida por dolomita, calcita y arcilla, y un mayor contenido de minerales silíceos. El tamaño máximo de los cristales de dolomita es más grueso (de 10 μm a 200 μm) y es mayor también el contenido de residuo insoluble (del 20 % al 50 %). Sin embargo, el verdadero comportamiento en servicio de estas rocas, a largo plazo, es una cuestión aún no del todo resuelta (Ozol, 2006).

Durante muchos años, la textura clásica descrita precedentemente ha servido de guía en Canadá y EEUU para la identificación de los agregados potencialmente reactivos frente a la RAC, razón por la cual, ha sido incorporada en los documentos normativos y reglamentarios de dichos países (ACI Committee 221, 1998; Thomas *et al.*, 2008; CSA, 2009a; AASHTO, 2010; ASTM, 2010a).

Estudios realizados en China (Deng *et al.*, 1992; Qian *et al.*, 2002a), sin embargo, han puesto de manifiesto que la textura “característica” de los carbonatos reactivos americanos no parece constituir el denominador común en las rocas expansivas del país asiático.

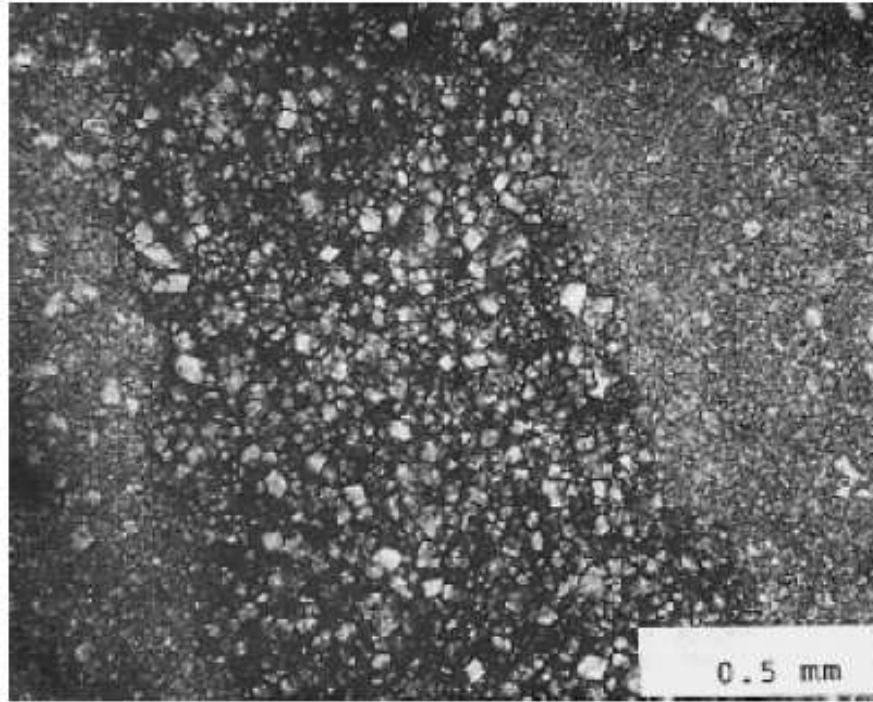


Figura 1.18: Venilla con textura reactiva en una caliza dolomítica del norte de Virginia, EEUU. La roca posee bandas con textura reactiva y no reactiva que se alternan a nivel microestructural (Ozol, 2006)

Como fue señalado precedentemente (Deng *et al.*, 1992, 1993; Shu y Deng, 1996), el contenido de dolomita de los carbonatos reactivos chinos es más amplio que el de los agregados americanos, en tanto que el tamaño máximo de los cristales de dolomita, en algunos casos, puede ser algo más grueso (hasta 80 μm). Asimismo, existen referencias de rocas reactivas con residuos insolubles inferiores al 5 % (Qian *et al.*, 2002a) y otras que llegan al 44 % (Grattan-Bellew *et al.*, 2008).

Según Ozol (2006), sólo dos condiciones parecen necesarias para que la RAC presente características expansivas: la presencia de cristales de grano fino y una estructura porosa que permita el ingreso de los álcalis a la roca.

Todos estos elementos deben de ser tenidos en cuenta al momento del examen petrográfico y pueden servir para establecer una primera diferenciación de los agregados desde el punto de vista de la RAC.

1.4.2. Mineralogía

En una dolomita ideal existe igual cantidad de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} por unidad de fórmula. Sin embargo, la dolomita puede incorporar otros iones Ca^{2+} en su retículo cristalino, por encima de este 50 % molar ideal, lo cual, genera un desorden atómico y la alteración de su retículo cristalino. Esta variedad mineral se conoce con el nombre de protodolomita (Guillott, 1963; Swenson y Guillott, 1964).

Estudios realizados por Swenson y Guillott (1964), mediante técnicas de DRX, en carbonatos expansivos de la zona de Kingston (Canadá), evidenciaron la presencia de esta variedad metaestable de dolomita. Sin embargo, Hadley (1964) pudo observar que esta protodolomita también se encontró asociada, en varias oportunidades, con carbonatos no expansivos.

Desde un primer momento se consideró la posibilidad de que minerales arcillosos de características expansivas (esmeclitas) estuvieran presentes en la roca o se desarrollen a partir de minerales arcillosos no expansivos, como resultado del ataque alcalino (Swenson y Guillott, 1964). Sin embargo, ninguna de estas dos hipótesis fue comprobada y hasta ahora los únicos minerales arcillosos encontrados en los carbonatos expansivos son, principalmente, illita y algo de clorita (Swenson y Guillott, 1964). También se han reportado vestigios de caolinita (Grattan-Bellew y Guillott, 1987).

Como es sabido, el ópalo es una de las variedades de sílice de mayor susceptibilidad a los álcalis. De allí que se hayan realizado varios intentos en verificar su presencia en los carbonatos expansivos con las más variadas técnicas (microscopía óptica, DRX, DTA, técnicas gravimétricas, etc.). Hasta la fecha, todos estos intentos han resultado fallidos (Swenson y Guillott, 1964; Grattan-Bellew y Guillott, 1987).

Según Katayama (1992, 2004), la expansión del agregado dolomítico no se debe a la RAC sino a la RAS generada por la presencia de cuarzo micro y criptocristalino, que componen el residuo insoluble de la roca.

Si bien algunas investigaciones recientes (Grattan-Bellew *et al.*, 2008) aportan datos que sustentan la posición de Katayama, no parece existir una correlación clara entre la expansión del hormigón y el contenido de residuo insoluble de la roca (Rogers, 1986a; Deng *et al.*, 1993, Shu y Deng, 1996).

1.5. Mecanismos de expansión

Si bien se han expuesto distintas hipótesis para explicar el fenómeno expansivo asociado a la RAC (Hadley, 1964; Sherwood y Newlon, 1964; Swenson y Guillott, 1964, Pagano y Cady, 1982; Tang *et al.*, 1986, 1994), el mecanismo de dicha reacción no se haya aún aclarado y es motivo actual de gran controversia (Mitchell *et al.*, 1992; Deng y Tang, 1993; Grattan-Bellew *et al.*, 2008; Katayama y Sommer, 2008; Katayama, 2012; Katayama y Grattan-Bellew, 2012; Jensen, 2012).

En base a la hipótesis propuesta originalmente por Tang *et al.* (1986, 1994, 1996), la expansión del agregado se produce merced al crecimiento y reordenamiento de los cristales de brucita y calcita, dentro de los espacios limitados de la microestructura de la roca.

Según esta teoría, la red arcillosa debilita el esqueleto de la roca y actúa como vía de acceso de los iones oxhidrilo y alcalinos (OH^- , K^+ y Na^+) hacia el interior de la misma, pero no constituye un elemento esencial en el mecanismo (Deng y Tang, 1993). En la figura 1.19 se muestra un esquema del mecanismo propuesto por Deng y Tang (1993).

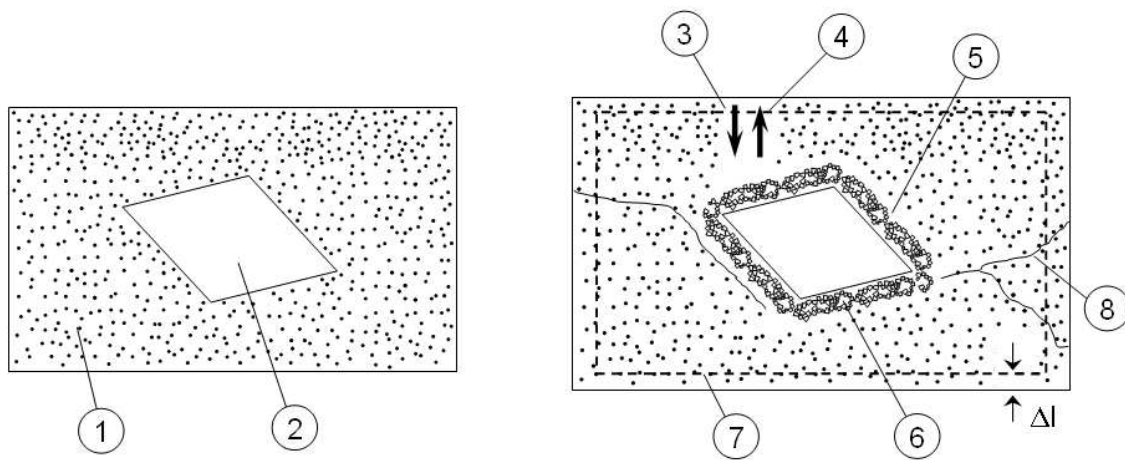


Figura 1.19: Esquema del mecanismo de expansión de la RAC según Deng y Tang (1993): 1) Restricción: matriz o cemento; 2) cristal de dolomita; 3) difusión del ion OH^- ; 4) difusión del ion CO_3^{2-} ; 5) calcita y brucita; 6) vacíos; 7) límite original; 8) fisuras

Para Katayama y Sommer (2008), la RAC es el resultado de la combinación de una RAS deletérea y una reacción de dedolomitización inocua. La RAS es originada por la presencia de cuarzo micro y criptocristalino, en tanto que la RAC genera brucita y un halo de carbonato alrededor del agregado. Para estos investigadores, el término “RAC” es engañoso y debería ser colocado “en el museo de historia del hormigón”, como ocurrió con la reacción álcali-silicato, que junto con la primera, constituyen formas de la RAS.

1.6. Métodos disponibles para identificar los carbonatos reactivos

1.6.1. Generalidades sobre los métodos de ensayo

La información más realista acerca de la reactividad alcalina de un agregado en el hormigón la da el conocimiento de su verdadero desempeño en estructuras existentes (ACI Committee 221, 1998). Sin embargo, si tal información no está disponible o es considerada insuficiente, o bien, poco confiable, el agregado debe ser evaluado mediante métodos de ensayo de laboratorio.

Si bien existe una numerosa cantidad de métodos de ensayo propuestos en la bibliografía para el estudio de la RAC (Hudec y Larbi, 1989; Bérubé y Fournier, 1992; Tang *et al.*, 1994; ACI Committee 221, 1998; Fournier *et al.*, 2006), no se ha desarrollado aún un método “ideal” que reúna en sí mismo las siguientes características básicas (Grattan-Bellew, 1983b):

- Confiabilidad: el método debe predecir con certeza el comportamiento del agregado en servicio y poseer, además, una adecuada repetibilidad y reproducibilidad
- Celeridad: los resultados deben ser obtenidos en pocos días (preferiblemente, en 14 días o menos)
- Universalidad: el método debe ser aplicable a todo tipo de roca, es decir, debe ser capaz de evaluar agregados susceptibles a la RAC y RAS.

Aun cuando han habido importantes avances en este sentido (Sims y Nixon, 2006; Lu *et al.*, 2008), la falta de un ensayo de carácter “universal”, que sea reconocido, además, por la comunidad técnica internacional, obedece, en gran parte, a las enormes diferencias que existen entre los distintos tipos de agregados disponibles en la naturaleza, esencialmente, desde el punto de vista petrográfico y mineralógico (Grattan-Bellew, 1983b; RILEM TC 106-AAR; 2000a).

Si bien existen algunos intentos en correlacionar los resultados de los estudios de laboratorio con el desempeño de los agregados en condiciones reales de campo (prototipos), la gran cantidad de factores que afecta esta relación (temperatura, humedad, presencia de armaduras, proporción del hormigón, granulometría, etc.), hace que este tema no se encuentre aún resuelto y sea materia de investigación permanente (Rogers y Hooton, 1992; Fournier *et al.*, 2000, 2006).

Esto hace que la selección de los métodos de ensayo y la definición de los límites de reactividad perjudicial sean revisadas permanentemente (Grattan-Bellew, 1983a, b, 1989, 1996a; Rogers, 1986a; Shayan *et al.*, 1988; Bérubé y Fournier, 1992; Fournier *et al.*, 2006).

Todos los métodos disponibles poseen ventajas y limitaciones y es por ello que las conclusiones y soluciones a encarar nunca deben tomarse en base a los resultados de un único ensayo (Bérubé y Fournier, 1992; Fournier y Bérubé, 2000).

Si bien, los métodos de evaluación más confiables son los de largo plazo, existe una decidida tendencia actual hacia la búsqueda de métodos de ensayo acelerados, que permitan disminuir los tiempos de respuesta, sin mayor pérdida de confiabilidad (Rogers y Hooton, 1989a; Bérubé y Fournier, 1992; Grattan-Bellew, 1996a; RILEM TC 106-AAR, 2000a; Batic *et al.*, 2010; Falcone y Milanese, 2012a, b).

En general, los métodos de estudio de la RAC pueden ser aplicados ya sea sobre testigos de roca o muestras del agregado propiamente dicho, o sobre morteros u hormigones, y realizan su evaluación combinando técnicas cuantitativas (medición de cambios de longitud) y cualitativas (observación de cortes delgados).

En resumen, la evaluación de la reactividad alcalina potencial de un agregado dolomítico es una tarea compleja y requiere la intervención de un especialista en el tema (CSA, 2009f, Thomas *et al.*, 2008). El carácter interdisciplinario y la naturaleza subjetiva de parte del trabajo, el impacto que posee en los resultados un ligero apartamiento de las condiciones de ensayo normalizadas (Rogers, 1986b; Rogers y Hooton, 1989b; Zhang *et al.*; 1999) y la dificultad inherente de medir deformaciones específicas de tan pequeña magnitud en los testigos o probetas de ensayo (CSA, 2009a), son algunos de los motivos que dificultan el estudio de este tipo de agregados.

En lo que sigue, se informan los métodos empleados con mayor frecuencia en la caracterización de la reactividad alcalina de los agregados de naturaleza dolomítica y los criterios de evaluación utilizados en cada caso, destacando las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos.

1.6.2. Ensayos sobre muestras de roca

1.6.2.1. Examen petrográfico

En Argentina, el examen petrográfico se realiza siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1649 (IRAM, 2008), similar a la ASTM C 295 (ASTM, 2010c) o CSA A23.2-15A (CSA, 2009c), y constituye el primer paso en la evaluación de la aptitud de un agregado frente a la RAC.

Este método de evaluación consiste, esencialmente, en la identificación y cuantificación de los minerales que constituyen la roca, con la finalidad de detectar la posible existencia de componentes potencialmente reactivos frente a la RAS o RAC (dolomita) y la identificación de la textura de la roca.

Estos estudios se realizan, habitualmente, a través de la observación de cortes delgados de la roca, con ayuda de un microscopio petrográfico, además de la implementación de técnicas complementarias como difracción de rayos X (DRX), análisis químicos o microscopía electrónica de barrido (SEM), entre otras.

Estos análisis deben ser realizados por un petrógrafo debidamente entrenado en la inspección, toma de muestras y observación de cortes delgados, con experiencia en la RAA (Nixon *et al.*, 2008).

Los primeros trabajos sobre RAC indican que la mayoría de las rocas dolomíticas expansivas posee la textura característica indicada en la figura 1.17. No obstante, si bien esto es destacado en las normas y reglamentos americanos (ACI Committee 221, 1998; CSA, 2009a; AASHTO, 2010; ASTM, 2010a), existen también algunas excepciones al respecto (Deng *et al.*, 1992; Qian *et al.*, 2002a; Ozol, 2006; Thomas *et al.*, 2008).

Tampoco queda claro si el contenido de dolomita de la roca constituye un factor de peso para pronosticar el desempeño del agregado dentro del hormigón. Si bien, los primeros trabajos sobre la RAC mencionan que la mayor reactividad en este tipo de rocas

se da cuando el contenido de dolomita (referido a la fracción carbonato) se ubica en torno al 50 %, la norma ASTM C 33 (2010a) aclara que algunas rocas dolomíticas puras pueden también producir una expansión lenta en el hormigón. Como se indicó en 1.4.1, los agregados reactivos de origen chino constituyen otro ejemplo en este sentido. Una consideración similar cabe con relación al contenido de residuo insoluble de la roca.

Según Ozol (2006), sólo dos condiciones parecen necesarias para la RAC: la presencia de cristales de dolomita grano fino y una estructura porosa que permita el ingreso de los álcalis a la roca.

Aunque el examen petrográfico del agregado resulta imprescindible, es insuficiente para predecir con certeza su grado de reactividad (Thomas *et al.*, 2008; CSA, 2009a; AASHTO, 2010; ASTM, 2010c). No obstante, se trata de un método rápido, que ayuda a programar el plan de ensayos a implementar para confirmar o refutar las presunciones inferidas a partir del mismo e interpretar los resultados de los ensayos físicos.

En nuestro país, la norma IRAM 1649 (IRAM, 2008) no da ningún lineamiento para la identificación de los agregados dolomíticos que puedan resultar afectados por la RAC. Recientemente, la norma IRAM 1531 (IRAM, 2012) ha establecido los lineamientos que, desde el punto de vista petrográfico, deben tenerse en cuenta para considerar a un agregado dolomítico potencialmente reactivo (frente a la RAC).

1.6.2.2. Método químico canadiense (CSA A23.2-26A)

Este método fue propuesto por Rogers (1986a) y adoptado por la norma canadiense (CSA, 2009e) y otras reparticiones americanas vinculadas al campo vial (Thomas *et al.*, 2008; AASHTO, 2010). No existe una versión de este método en el ámbito de las normas ASTM o IRAM.

El ensayo consiste en determinar, mediante un análisis químico de la roca (partículas de tamaño inferior a 160 μm), los % (en peso) de CaO , MgO y Al_2O_3 , y representar los resultados obtenidos (CaO/MgO y Al_2O_3) en un gráfico semi-logarítmico (figura 1.20). El porcentaje de alúmina (Al_2O_3), de acuerdo a la hipótesis de Rogers (1986a), representa el contenido de arcilla de la roca. La experiencia canadiense muestra que los agregados susceptibles a la RAC se ubican en la zona central del gráfico.

De acuerdo a este método, los agregados constituidos por un 100 % de dolomita podrían considerarse inocuos, ya que la relación CaO/MgO ($\approx 1,4$) sería suficientemente baja como para ubicar el punto correspondiente fuera de la zona central del gráfico. Una consideración similar cabe para algunos agregados reactivos de origen chino (Deng *et al.*, 1992), de bajo contenido de dolomita (del orden de 5 %), donde la relación CaO/MgO (≈ 90) ubicaría el punto por encima de la recta límite superior del gráfico.

Si el agregado, en virtud de su composición química, es considerado potencialmente reactivo frente a la RAC, debe ser ensayado mediante el método del prisma de hormigón (CSA, 2009b; ASTM, 2010g; IRAM, 1997b) a fin de confirmar dicha presunción. Cuando el agregado se ubica fuera de la zona central del gráfico de la figura 1.20, es considerado inocuo frente a la RAC. En este caso, el agregado puede resultar aún potencialmente reactivo frente a la RAS, lo cual, debe ser verificado mediante la implementación de algún método físico complementario (CSA, 2009b, d; ASTM, 2010h, i; IRAM, 1997a, b).

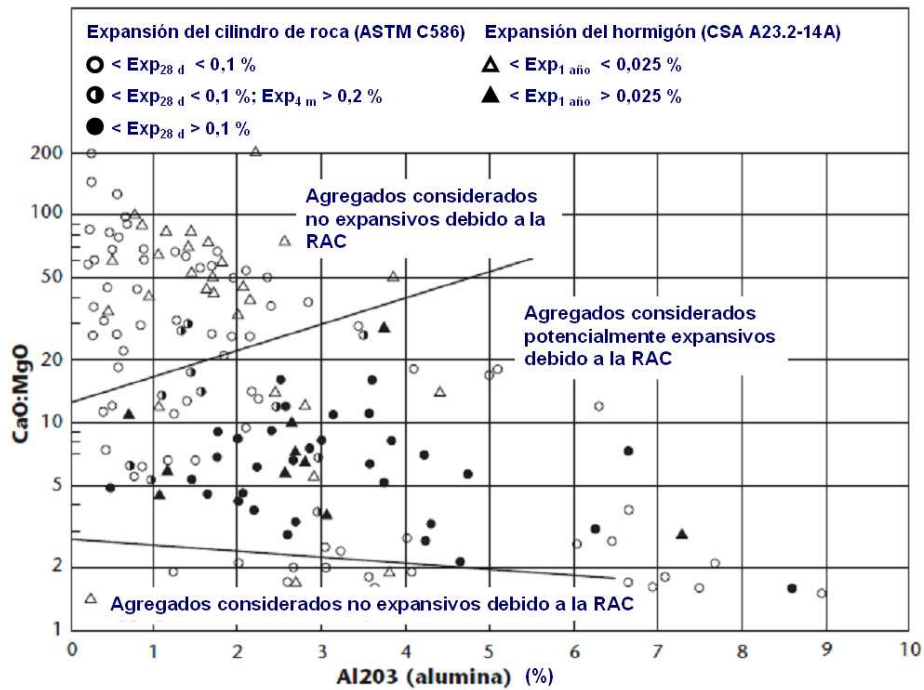


Figura 1.20: Gráfico del método químico canadiense (CSA, 2009e)

En resumen, se trata de un método rápido y de bajo costo. Puede ser empleado en la evaluación preliminar del agregado para proceder a su aceptación, pero no a su rechazo,

debiendo confirmar sus resultados mediante algún método físico complementario. No parece un método de aplicación frecuente fuera de la frontera canadiense.

1.6.2.3. Método de expansión del cilindro de roca (ASTM C 586)

Este método de ensayo fue desarrollado por Hadley (1961) y adoptado por la norma ASTM C 586 (2010d). No existe una versión de este método en el ámbito de las normas CSA o IRAM.

La técnica de ensayo es sencilla y consiste en medir los cambios de longitud que experimentan pequeños testigos extraídos de la roca en estudio, al ser sumergidos en una solución 1N de NaOH, a temperatura ambiente ($\approx 23\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Los testigos, cilíndricos o prismáticos, de 9 mm de diámetro (o lado) y 35 mm de longitud, deben ser extraídos, preferentemente, en dirección normal a los planos de estratificación de la roca, en virtud de la fuerte influencia que posee la orientación del testigo en los valores de expansión registrados (Sims, 1981). Si no es posible identificar la orientación de los planos de estratificación, se deben ensayar tres testigos, perpendiculares entre sí, y tomar los valores de expansión máximos (ASTM, 2010d).

La norma ASTM C 586 considera que las expansiones que exceden de 0,10 % constituyen un indicio de la existencia de una reacción química en la roca, con características deletéreas potenciales para el hormigón, por lo cual, recomienda la realización de ensayos adicionales, preferentemente con el método ASTM C 1105 (ASTM, 2010g).

Aunque esta norma no establece un plazo para juzgar el nivel de expansión alcanzado por los testigos, indica que las tendencias expansivas de la roca se manifiestan, por lo general, después de los 28 días de inmersión alcalina.

En general, se considera que la roca es potencialmente reactiva cuando la expansión del testigo, a las cuatro semanas de inmersión alcalina, es superior a 0,10 %, o alternativamente, mayor a 0,20 %, a las 16 semanas (Rogers, 1896a; Bérubé y Fournier, 1992; Ozol, 2006). No obstante, existen algunas excepciones sobre el particular.

Rogers (1986a) cita algunos ejemplos en los que, a pesar de haber registrado valores de expansión en testigos de roca inferiores a 0,10 %, a 28 días, el agregado mostró

en el hormigón un comportamiento expansivo excesivo (expansión a un año $\approx 0,050$ %), que incluyó la formación de fisuras.

Existen, además, algunos casos donde se han registrado expansiones superiores al 1 % en testigos de roca, en agregados considerados no reactivos, debido a la presencia de arcillas expansivas del grupo de las esmectitas (Rogers, 1986a; CSA, 2009a).

Dolar-Mantuani (1971) comprobó que, en las denominadas “rocas de expansión tardía”, el proceso de expansión se inicia, en promedio, recién después de los seis meses de inmersión alcalina, llegando a obtener valores de expansión superiores al 2 % al cabo de cuatro años (figura 1.21). Estos resultados ponen en tela de juicio la confiabilidad de este ensayo en la predicción de la expansión probable del hormigón a causa de la RAC.

En la tabla 1.2 se indican las diferencias máximas de expansión que pueden obtenerse entre dos testigos de ensayo, extraídos de un mismo bloque de roca (75 mm x 75 mm x 50 mm), en función del valor promedio de expansión de ambos, según ASTM C 586.

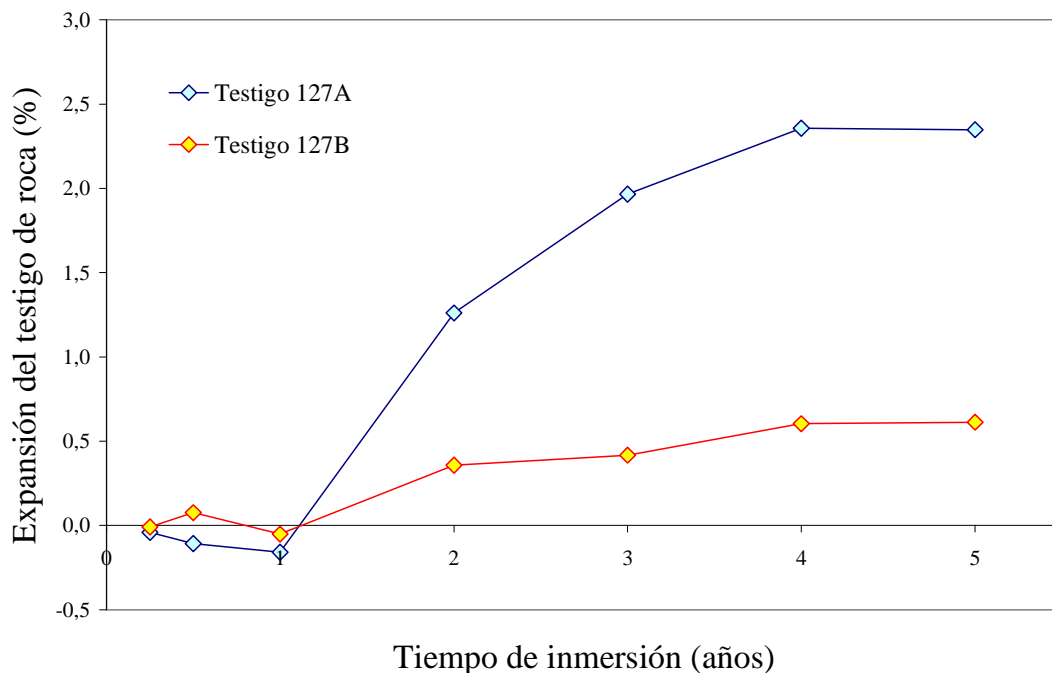


Figura 1.21: Expansión de testigos de roca de “expansión tardía” (Dolar-Mantuani, 1971)

Tabla 1.2: Precisión del método del cilindro de roca según ASTM C586 (2010d)

Expansión promedio (%) ⁽¹⁾	Repetibilidad (%) ⁽²⁾
< 0,50	0,072
> 0,50	0,269

1) Expansión promedio del par de testigos de roca adyacentes, extraídos de un mismo bloque (75 x 75 x 50 mm) de roca.

2) Diferencia máxima de la expansión del par de testigos, para una probabilidad de superar dicha diferencia de 1 en 20 (5%).

Como es posible observar, la diferencia que es dable esperar cuando la expansión promedio es inferior a 0,50 %, es del mismo orden de magnitud que el límite máximo aceptado para evaluar la reactividad de la roca (0,10 %), lo cual, marca la elevada sensibilidad del método a las variaciones litológicas (Ozol, 2006).

Por ello, a pesar de que la correlación entre los valores promedio de expansión de testigos de roca y las expansiones correspondientes obtenidas en prismas de hormigón es usualmente buena (Hadley, 1964; Ozol, 2006), la elevada dispersión que puede hallarse entre los valores individuales de expansión de los testigos de ensayo (figura 1.15) impone serias limitaciones al empleo de este método.

Numerosos investigadores han trabajado en la búsqueda de diversos ensayos acelerados, diseñados a partir de modificaciones introducidas al método ASTM C 586 (Grattan-Bellew, 1981; Tang y Lu, 1986). Estos métodos, sin embargo, no han alcanzado gran popularidad.

En resumen, el método del cilindro de roca permite predecir la reactividad expansiva potencial del agregado, pero sólo en forma cualitativa y de manera relativamente rápida (de uno a cuatro meses) (Ozol, 2006; ASTM, 2010d).

Puede ser empleado con ventajas para realizar una primera separación preliminar de las fuentes de provisión del material o para detectar sectores de cantera reactivos, siendo necesario extraer una importante cantidad de testigos (del orden de tres testigos por metro de profundidad). No se recomienda su uso para establecer condiciones de una especificación a cumplir por el agregado.

Debido a su elevada sensibilidad a los cambios en la litología de la roca, sus resultados pueden ser de difícil interpretación, o aún, contradictorios. Por esta razón, no es recomendable su empleo como método de aceptación o rechazo (Ozol, 2006; ASTM 2010d). Por ello, tanto este método de ensayo como cualquiera de sus variaciones, deben ser empleados con precaución en la evaluación de la relatividad alcalina potencial de los agregados.

Bérubé y Fournier (1992) señalan que este método no es aceptado por la industria de la construcción debido a la reducida cantidad de material que es ensayada.

1.6.3. Ensayos sobre mortero

Debido a la influencia que posee la granulometría del agregado en la expansión del hormigón (Lu *et al.*, 2008), en general, los métodos basados en el ensayo de morteros (IRAM 1637, IRAM 1674) no son eficientes para la evaluación de la RAC (Bérubé y Fournier, 1992).

A pesar de ello, su aplicación en el estudio de los agregados dolomíticos reviste especial interés, fundamentalmente, por dos motivos. En primer lugar, la experiencia adquirida en la aplicación de estos métodos, tanto a nivel internacional como en nuestro país, es muy importante (Grattan-Bellew, 1983b, 1989), con lo cual, la confianza en sus resultados es mayor. En segundo lugar, la evaluación de la magnitud de la expansión alcanzada por el mortero, en comparación a la del hormigón, permite incorporar información complementaria para identificar la tipología de reacción presente.

En lo que sigue, se resumen los lineamientos de los métodos de evaluación de mortero más empleados.

1.6.3.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637)

Este método de ensayo ha sido normalizado en Argentina bajo la norma IRAM 1637 (IRAM, 1992), tomando como antecedente la norma ASTM C 227 (ASTM, 2010b).

Desde tiempo atrás, se sabe que este método es inadecuado para el estudio de la RAC y de ciertos agregados de expansión lenta que deben su reactividad al cuarzo tensionado o microcristalino (Swenson, 1957; Bérubé y Fournier, 1992, Grattan-Bellew, 1983b, 1989). De hecho, la norma ASTM C 227 reconoce que las rocas dolomíticas

reactivas (RAC) pueden no llegar a producir expansiones significativas con este método, aunque existen algunas excepciones (Hadley, 1964).

Hasta fines de la década del 80, este método de ensayo era considerado el más confiable para evaluar la reactividad alcalina potencial de los agregados y, por ello, durante muchos años, fue el más utilizado (Grattan-Bellew, 1983b). Su aceptación, casi universal, llevó a muchos investigadores a emplearlo como método de referencia para la evaluación de nuevos métodos de ensayo acelerados (Grattan-Bellew, 1989).

La metodología empleada por esta técnica de ensayo es sencilla y a continuación se describen sus principales lineamientos en forma sucinta.

En primer lugar, se elaboran cuatro probetas prismáticas de mortero, de sección cuadrada, de 25 mm de lado y 285 mm de longitud (longitud efectiva \approx 250 mm).

El contenido de álcali del cemento, expresado en % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, debe ser mayor a 1 %. El agregado grueso debe ser triturado y lavado para quitarle el polvo adherido. Su granulometría debe cumplir con los requerimientos indicados en la tabla 1.3.

Tabla 1.3: Requisitos granulométricos de la IRAM 1637 (IRAM, 1992)

Pasa tamiz IRAM (ASTM)	Retiene tamiz IRAM (ASTM)	Fracción (en peso) (%)
4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	10
2,36 mm (Nº 8)	1,18 mm (Nº 16)	25
1,18 mm (Nº 16)	600 μm (Nº 30)	25
600 μm (Nº 30)	300 μm (Nº 50)	25
300 μm (Nº 50)	150 μm (Nº 100)	15

La relación agregado/cemento utilizada en la elaboración del mortero es igual a 2,25. La cantidad de agua de amasado es la necesaria para lograr una consistencia en la mesa de asentamiento (con 10 golpes en 6 segundos) comprendida entre 105 y 120.

Una vez moldeadas las barras, se introducen en cámara húmeda (23 °C), durante 24 horas, luego de lo cual, se retiran de los moldes y se toma la lectura inicial.

A continuación, las barras son introducidas dentro de un recipiente estanco, fabricado en las condiciones que indica la norma, de manera de alcanzar dentro del mismo

las condiciones de estacionamiento previstas (38 °C y elevada humedad relativa). Este recipiente, junto con las barras, es almacenado dentro de un recinto mantenido a una temperatura de $37,8 \pm 1,7$ °C, hasta la próxima medición.

La determinación de la expansión del mortero se realiza midiendo las barras en forma periódica, expresando los cambios de longitud en % de la longitud efectiva. Para ello, se retiran los recipientes de almacenamiento de la cámara de 38 °C, con no menos de 16 horas de anticipación, para llevarlos a temperatura ambiente (23 °C) en forma gradual.

La norma ASTM C 33 (ASTM, 2010a) indica que la expansión (debida a la RAS) se considera excesiva si supera 0,05 % a los tres meses de ensayo o 0,10 % a los seis meses. Algunos investigadores recomiendan extender el plazo de estas evaluaciones, aplicando estos mismos porcentajes, a las edades de seis y 12 meses, respectivamente (Grattan-Bellew, 1989).

En 1957, Swenson advirtió que los agregados dolomíticos, que en obra producían un claro deterioro de las estructuras, mostraban una expansión insuficiente en este método y eran considerados inocuos, en base a los criterios establecidos para juzgar a los agregados de naturaleza silíceo (tabla 1.4).

Tabla 1.4: Resultados obtenidos con el método ASTM C 227 sobre un agregado dolomítico reactivo de la zona de Kingston, Canadá (Swenson, 1957)

Agregado	Contenido de álcalis del cemento (% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)	Expansión del mortero (%)	
		3 meses	6 meses
KB	1,19	0,017	0,036
	1,05	0,034	0,046
	0,45	0,015	0,024
M4 (Valcheta)	1,14	0,060	0,069
Valores máximos de expansión sugeridos por ASTM C 33 (%)		0,050	0,100

En la figura 1.22 se muestran los resultados de expansión informados por Sims (1981), obtenidos con el método ASTM C 227, con agregados dolomíticos de la zona de Kingston, típicamente reactivos frente a la RAC. Según los límites sugeridos por la norma ASTM C 33, estos agregados deberían considerarse inocuos, a pesar de su conocida reactividad.

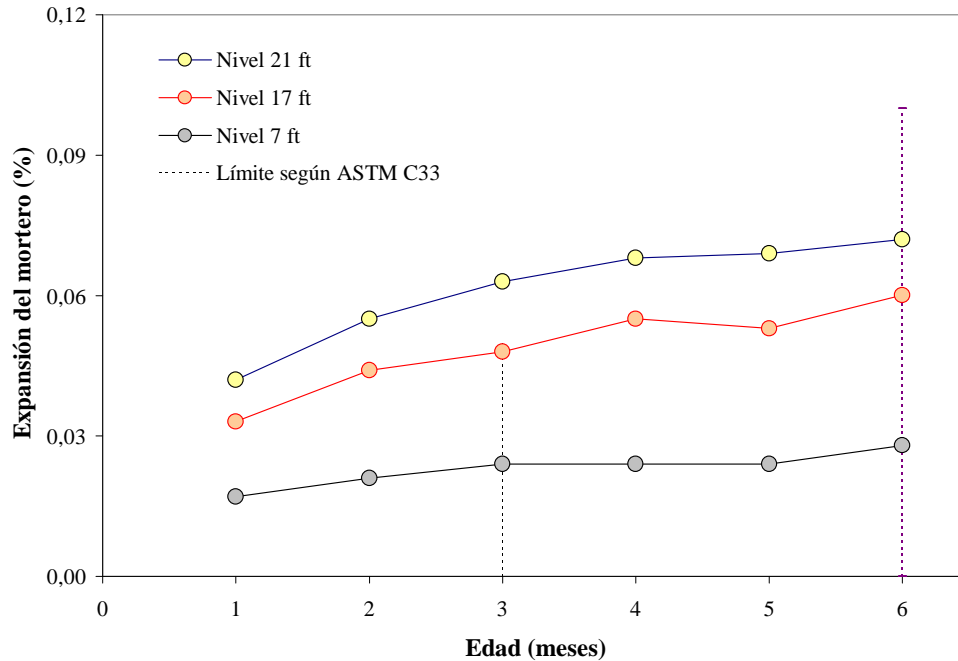


Figura 1.22: Resultados de expansión obtenidos con el método ASTM C 227 sobre muestras de agregados dolomíticos reactivos de la zona de Kingston, Canadá, extraídas a distintos niveles de cantera (Sims, 1981)

1.6.3.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674)

Este método de ensayo, popularmente conocido como NBRI, se encuentra normalizado en Argentina bajo la norma IRAM 1674 (IRAM, 1997a), similar a la ASTM C 1260 (ASTM, 2010h) o la CSA A23.2-25A (CSA, 2009d).

Se elaboran tres probetas prismáticas de mortero, de sección cuadrada, de 25 mm de lado y 250 mm de longitud efectiva.

No existen restricciones en cuanto al contenido de álcali del cemento. La norma ASTM C 1260 sólo requiere que el valor de la expansión en autoclave sea inferior a 0,20 %. El agregado grueso debe ser preparado bajo las mismas condiciones de la IRAM 1637.

La relación agregado/cemento utilizada en la elaboración de la mezcla es igual a 2,25. La cantidad de agua de amasado es la necesaria para lograr una relación agua/cemento igual a 0,47.

Una vez moldeadas las barras, se introducen en cámara húmeda (23 °C), durante 24 horas, luego de lo cual, se retiran de los moldes. Posteriormente, las barras se sumergen en agua, a temperatura ambiente, llevando el conjunto a una estufa a 80 ± 2 °C, durante 24 horas. A las 48 horas de edad, luego de registrada la lectura inicial, las barras se sumergen en una solución 1N de NaOH a 80 °C, hasta finalizar el ensayo (14 días de inmersión en la solución \equiv 16 días de edad).

La determinación de la expansión del mortero se realiza midiendo las barras en forma periódica, expresando los cambios de longitud en % de la longitud efectiva inicial. La lectura de las barras se realiza en el menor tiempo posible, a fin de evitar la disminución excesiva de la temperatura del mortero.

La IRAM 1674, adoptando el criterio de la ASTM C 1260, en un apéndice informativo, indica que el agregado se considera inocuo cuando la expansión del mortero, a los 16 días de edad, es inferior a 0,10 %. Cuando la expansión de éste es superior a 0,20 %, el agregado debe considerarse potencialmente reactivo. Si la expansión del mortero se halla comprendida entre 0,10 % y 0,20 %, se considera que el comportamiento del agregado es incierto, siendo necesario aplicar métodos de ensayo complementarios para definir su reactividad. Otros criterios son recomendados por la CSA (CSA, 2009f), FHWA (Thomas *et al.*, 2008) y la AASHTO (AASHTO, 2010).

En Argentina, existe una vasta experiencia en la aplicación de este método (Milanesi y Batic, 1995; Falcone *et al.*, 2008), siendo además el más empleado en la actualidad para evaluar la aptitud de un agregado, desde el punto de vista de la RAS. Sin embargo, a pesar de su popularidad, en los últimos años han surgido nuevos interrogantes acerca de su confiabilidad, especialmente cuando se emplea en la caracterización de agregados gruesos (Thomas *et al.*, 2008).

En el caso de la RAC, diversos investigadores (Shayan *et al.*, 1988; Lu *et al.*, 2008) han probado que las rocas dolomíticas reactivas no producen expansiones significativas con este método.

1.6.3.3. Métodos de evaluación RILEM (AAR-2 vs. AAR-5)

Como se indicó en 1.1, la evaluación de la reactividad alcalina de un agregado dolomítico es particularmente compleja por cuanto ambas tipologías de reacción (RAS y RAC) pueden estar presentes. Para estos casos, RILEM ha desarrollado una metodología de evaluación que consiste en comparar los resultados obtenidos por dos métodos de ensayo (AAR-2 vs. AAR-5) cuya principal diferencia conceptual reside en trabajar con agregados de diferente granulometría.

La base de este enfoque consiste en aprovechar el efecto que posee la granulometría del agregado sobre la expansión del mortero u hormigón (según cuál sea el tamaño máximo del agregado que se utilice en la elaboración de la mezcla) según la tipología de reacción de aquel (RAS o RAC). Si la expansión del agregado es debida a la RAS, cuanto mayor es el tamaño de sus partículas, menor es la expansión obtenida. Por el contrario, si la expansión es debida a la RAC, como se indicó en 1.3.4, un aumento en el tamaño del agregado conduce, usualmente, a un incremento en la expansión.

El método AAR-2 (RILEM TC 106-AAR, 2000b) está diseñado en base al NBRI y utiliza barras de mortero de 40 mm x 40 mm x 160 mm. El cemento debe poseer un contenido total de álcali mayor a 1,0 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, una superficie específica (Blaine) superior a 450 m^2/kg y un valor de expansión en autoclave inferior a 0,20 %. Los demás requerimientos metodológicos (granulometría, parámetros de diseño de la mezcla, etc.) son similares a los de las normas ASTM C 1260 o IRAM 1674. Una particularidad de este método es que permite incorporar un aditivo superfluidificante a la mezcla, en caso de que la consistencia de ésta esté por debajo de 105.

El método AAR-5 (tabla 1.5) fue desarrollado por Sommer *et al.* (2004, 2005) a partir del denominado método chino de la micro-barra de hormigón (Xu *et al.*, 2002).

Si bien su metodología es muy similar a la del método AAR-2 (barras de 40 mm x 40 mm x 160 mm, sumergidas en solución 1N de NaOH a 80 °C), la principal diferencia conceptual es que la mezcla evaluada es un hormigón, ya que el agregado está constituido por partículas mayores a 4 mm.

Para la elaboración de la mezcla se utiliza un cemento pórtland normal (tipo I, según ASTM C 150), similar al CPN, según IRAM 50000, de alto contenido de álcalis

(1,0 % \pm 0,1 % de Na₂O_{eq}). El contenido de álcalis del cemento, además, se eleva a 1,5 % de Na₂O_{eq} mediante la adición de NaOH al agua de mezclado.

La relación agregado/cemento, en peso, es igual a 1 y la relación agua/cemento es igual a 0,32. El agregado grueso debe ser triturado y fraccionado, de modo de eliminar las partículas de tamaño inferior a 4 mm y superior a 8 mm. Por cada ensayo se moldean tres barras.

Una vez finalizada la compactación (en forma manual o mecánica), las barras se almacenan en cámara húmeda (23 °C, 100 % de humedad), durante 24 horas. Luego de este curado, las barras se sumergen en agua, a temperatura ambiente, llevando el contenedor a la estufa, mantenida a 80 °C, durante 24 horas. A las 48 horas del moldeo, se registra la lectura inicial de las barras y se sumergen en una solución 1N de NaOH a 80 °C.

La lectura de las barras se realiza manteniendo la temperatura de éstas a 80 °C, razón por la cual, las mediciones deben ser realizadas con la mayor celeridad posible. La lectura de los cambios de longitud se realiza periódicamente hasta los 28 días de edad.

En resumen, la metodología propuesta por RILEM consiste en ejecutar ambos métodos (AAR-2 y AAR-5), utilizando los mismos materiales y el mismo tipo de barra (40 mm x 40 mm x 160 mm), y comparar los resultados de expansión a 14 días de inmersión en la solución alcalina, aplicando los siguientes criterios:

- ✓ Si la expansión obtenida con el método AAR-2 es excesiva (mayor a 0,05 %), el agregado debe ser evaluado con el método del prisma de hormigón AAR-3 (RILEM TC 106-AAR, 2000c) o su par acelerado AAR-4 (Nixon *et al.*, 2008), de manera de confirmar su reactividad alcalina potencial (en este caso se presume que el agregado es potencialmente reactivo debido a la RAS).
- ✓ Si la expansión obtenida con el método AAR-2 no es excesiva y resulta menor que con el método AAR-5, se presume que el comportamiento expansivo del agregado es diferente a lo esperado y debe ser evaluado con los métodos AAR-3 o AAR-4 de manera de confirmar su reactividad alcalina potencial (en este caso existe una fuerte presunción de que el agregado pueda ser potencialmente reactivo debido a la RAC).

- ✓ Si la expansión obtenida con el método AAR-2 no es excesiva y resulta mayor que con el método AAR-5, por una diferencia mayor a 0,01 %, se considera que el agregado es inocuo, por lo cual, no es necesario llevar a cabo ningún ensayo complementario.

En 2008, Lu *et al.* proponen, en base al método chino, un método acelerado al que consideran de alcance “universal”, ya que permite detectar la reactividad de un agregado, independientemente de la tipología de reacción involucrada (RAS o RAC).

Este método, básicamente, propone las siguientes modificaciones:

- ✓ Eliminar el requisito de incrementar el contenido de álcalis del cemento de manera artificial, a fin de acotar la variación de los resultados.
- ✓ Aplicar las condiciones de curado y tratamiento de las barras del método NBRI (equivalente al método AAR-2)
- ✓ Disminuir el tamaño de la fracción del agregado (2,5 mm a 5,0 mm). Esto evita las dificultades de mezclado inherentes al uso de partículas mayores a 5 mm, mejora la trabajabilidad de la mezcla y permite, además, aplicar el método para el estudio de ambas reacciones (RAS y RAC).
- ✓ Incrementar la relación a/c de la mezcla a 0,33 para mejorar su trabajabilidad y evitar el uso de aditivos superfluidificantes.

Según los autores de este método, el agregado debería considerarse inocuo frente a la RAC cuando la expansión del mortero, a los 30 días de edad, es inferior a 0,10 % (cuando se trata de agregados potencialmente reactivos frente a la RAS, el límite parece ubicarse en 0,093 %, a los 16 días).

Si bien este método presenta resultados promisorios, no parece existir una correlación adecuada entre sus resultados y los del prisma de hormigón (Lu *et al.*, 2008; Falcone y Milanesi, 2012a).

En la tabla 1.5 se resumen los principales lineamientos de este método, en comparación al AAR-5 de RILEM y el método chino.

Tabla 1.5: Análisis comparativo de las variantes del método acelerado chino (*concrete microbar test*)

Método de ensayo		AAR-5 (RILEM)	Ensayo universal de Lu <i>et al.</i>	Método Chino (concrete microbar test)
Características del agregado	Fracción (mm)	4,0 - 8,0	2,5 - 5,0	5,0 - 10,0
	Contenido de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$)	1,0 % \pm 0,1 %	0,91 %	< 0,60 %
Características del cemento	Agregado adicional de álcalis	Sí ⁽¹⁾	No	Sí ⁽²⁾
	Blaine (m^2/kg)	> 450	-	-
	Expansión en autoclave (%)	< 0,20	-	-
	Agregado/cemento (en masa)	1:1	1:1	1:1
Parámetros para la dosificación de la mezcla	Agua/cemento (en masa)	0,32	0,33	0,30
	Posibilidad de incorporar un superfluidificante	Sí	No	No
Mezclado		Manual ⁽³⁾	Mecánico	Manual ⁽³⁾
Dimensión de los moldes (mm)		40 x 40 x 160	40 x 40 x 160	40 x 40 x 160
Comapactación de la mezcla		Manual o mecánica	Manual y mecánica	?
Curado inicial		24 h (CH) + 24 h (H_2O a 80 °C) ⁽⁴⁾	24 h (CH) + 24 h (H_2O a 80 °C) ⁽⁴⁾	24 h (CH) + 4 h (1N NaOH a 80 °C) ⁽⁴⁾
Lectura inicial (horas, desde el inicio del mezclado)		48	48	28
Condiciones de almacenamiento		Sol. 1N NaOH a 80 °C	Sol. 1N NaOH a 80 °C	Sol. 1N NaOH a 80 °C
Seguimiento de la evolución de masa de las barras		No	Sí	No
Límites de expansión sugeridos		• Si $\text{Exp}_{14\text{d}} \text{ AAR-2} > 0,05 \%$ → AAR-3/4		
		• Si $\text{Exp}_{14\text{d}} \text{ AAR-2} < 0,05 \%$:		
		– $\text{Exp AAR-5} \geq \text{Exp AAR-2}$ → AAR-3/4	0,10 % a 28 días	0,10 % a 28 días
		– $\text{Exp AAR-5} < \text{Exp AAR-2}$ → No reactivo		

1) Se adiciona NaOH al agua de mezclado para elevar el contenido a 1,5 %; 2) Se adiciona KOH al agua de mezclado para elevar el contenido a 1,5 %

3) Puede ser mecánico, adaptando la paleta mezcladora; 4) CH: Cámara húmeda, H_2O : Agua

1.6.4. Ensayos sobre hormigón

1.6.4.1. Método del prisma de hormigón

El método del prisma de hormigón fue desarrollado por Swenson (1957), en Canadá, como herramienta metodológica para el estudio de la RAC, debido a la dificultad que ofrecían los métodos disponibles en la década del 50 (ASTM C 227 y método químico) para detectar agregados con reacciones de este tipo. Posteriormente, una metodología similar a la empleada por este investigador fue incorporada al cuerpo de normas canadiense, bajo la designación CSA A23.2-14A (CSA, 2009b).

Si bien la normalización de este método surgió originalmente como una necesidad para la detección de la RAC, su uso fue rápidamente extendido al estudio de la RAS (Grattan-Bellew, 1983b). Con el correr de los años, el método sufrió una serie de modificaciones tendientes a mejorar su respuesta (Rogers, 1986a; Grattan-Bellew, 1989; Bérubé y Fournier, 1992).

A pesar de las críticas que ha recibido como cualquier otro método de ensayo (Fournier *et al.*, 2006), es considerado, actualmente, el método más confiable que existe para evaluar la reactividad alcalina de los agregados y ha sido adoptado por las principales entidades de normalización del mundo (IRAM, 1997b; ASTM, 2010g, i; CSA, 2009b; RILEM TC 106-AAR, 2000c).

En lo que sigue, se describirán, brevemente, las metodologías empleadas por las versiones más conocidas de este método de ensayo, destacando las ventajas y limitaciones de cada una de ellas. Por último, se sugerirán algunos cambios que es posible incorporar en la norma IRAM 1700 a fin de mejorar su desempeño desde el punto de vista operativo y científico, teniendo en cuenta el estado actual del conocimiento en esta temática.

1.6.4.1.1. Método canadiense (CSA A23.2-14A)

Este método (CSA, 2009b) está indicado para evaluar la reactividad alcalina potencial del agregado grueso o fino, o de su combinación, como consecuencia de la RAS o RAC. También puede ser utilizado para demostrar la efectividad de las adiciones minerales activas o de los aditivos a base de litio para inhibir la RAS, de acuerdo a la norma CSA A23.2-28A (CSA, 2009g).

Para el caso específico de la RAC, este método consiste en medir los cambios de longitud que experimentan prismas de hormigón, confeccionados con una mezcla de alto contenido de álcalis y el agregado grueso bajo estudio, al ser mantenidos en condiciones de alta humedad, a 38 °C.

Para el diseño de la mezcla se utiliza un cemento de uso general (GU), similar al cemento pórtland normal (CPN, según IRAM 50000), de alto contenido de álcalis ($0,9 \% \pm 0,1 \%$ de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) y un contenido de cemento de 420 kg/m^3 de hormigón. El contenido de álcalis del hormigón se eleva a $5,25 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq/m}^3}$, mediante la adición de NaOH al agua de mezclado. El valor de la relación agua/cemento puede ajustarse entre 0,42 a 0,45, con el fin de lograr una mezcla de suficiente trabajabilidad para compactar adecuadamente el hormigón dentro de los moldes. Esta norma, sin embargo, no especifica el asentamiento que debe emplearse para tal fin.

El agregado grueso debe ser fraccionado de modo de cumplir los requisitos indicados en la tabla 1.6. Las partículas de tamaño inferior a 5 mm se descartan. Si la cantidad de material retenido sobre el tamiz de 20 mm es mayor al 15 %, éste debe triturarse hasta pasar por este tamiz y recombinarse.

Tabla 1.6: Requerimientos granulométricos del agregado grueso (CSA, 2009b)

Designación del tamiz CSA (mm)		Fracción (en peso) de la muestra para un TMA ⁽¹⁾	
Pasa	Retiene	$\geq 19 \text{ mm}$	14 mm
20	14	1/3	-
14	10	1/3	1/2
10	5	1/3	1/2

(1) TMA: *Tamaño máximo del agregado grueso*

El agregado fino debe poseer un módulo de finura igual a $2,7 \pm 0,2$ y ser de características inocuas (no reactivo). Para esto, debe generar una expansión inferior a 0,10 %, a los 14 días de inmersión alcalina, al ser ensayado mediante el método NBRI (IRAM, 1997a; CSA, 2009d).

La relación agregado grueso/fino, en masa, para agregados de densidad normal, es 60/40. Si se trata de agregados livianos o pesados, el contenido de agregado grueso, en estado seco, por m^3 de hormigón, debe ser igual al $70 \% \pm 2 \%$ del peso de la unidad de volumen (PUV) del agregado grueso seco y compactado.

Se moldean tres prismas de hormigón, de $75 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de lado y una longitud comprendida entre 275 mm y 405 mm. Esta es la única norma que especifica una tolerancia para la medida transversal de los prismas, debido a la influencia que posee en los resultados de expansión.

Los prismas de hormigón son compactados en forma manual ya que se ha verificado que la vibración puede inducir a reducir la expansión del hormigón. Finalizado el moldeo, los prismas se almacenan en cámara húmeda ($23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 100 % de humedad), durante 24 horas.

Luego del curado, se registra la lectura inicial de los prismas y se colocan dentro de un recipiente plástico que permite mantener el ambiente saturado de humedad. Este recipiente, de 22 l a 25 l de capacidad, posee la pared interior recubierta con un revestimiento absorbente, saturado de agua (papel secante o similar), con 20 mm de agua en el fondo. El recipiente de almacenamiento se completa con un bastidor perforado, situado a 35 mm del fondo, de modo de evitar que los prismas estén en contacto directo con el agua. Este conjunto se estaciona en una cámara de almacenamiento mantenida a $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las lecturas periódicas de los prismas se realizan a temperatura ambiente, para lo cual, estos deben retirarse de la cámara de almacenamiento ($38 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 16 horas antes de la medición, de manera de estabilizar la temperatura. Las lecturas de los cambios de longitud se realizan periódicamente hasta las 52 semanas.

En la tabla 1.7 se resumen las modificaciones que ha experimentado este método de ensayo a lo largo de los años con relación a la temperatura de almacenamiento de los prismas, el contenido de álcalis del hormigón y los límites de expansión recomendados. Actualmente, la norma CSA A23.2-27A (CSA, 2009f) considera que el agregado es potencialmente reactivo cuando la expansión del hormigón, a las 52 semanas, es mayor a 0,04 %.

Cuando la expansión del hormigón es superior al límite máximo recomendado, es aconsejable efectuar un estudio petrográfico de la microestructura del hormigón a fin de confirmar que la expansión es debida a la RAC. Para ello, es necesario investigar si el hormigón presenta algunas de las manifestaciones típicas de esta reacción, como la existencia de bordes de reacción en el agregado grueso, o detectar si se produjeron cambios mineralógicos en él (dedolomitización) o la carbonatación de la pasta en las zonas de interfase matriz-agregado.

Aun cuando el método del prisma de hormigón es también un método acelerado (Fournier y Bérubé, 2000), es el que más se aproxima a las condiciones reales del hormigón de obra.

Tabla 1.7: Evolución de los límites de expansión del método CSA A23.2-14A

Norma CSA (año de publicación)	Temperatura de estacionamiento (°C)	Contenido de álcalis del hormigón (kg de Na ₂ O _{eq} /m ³)	Aptitud del método ⁽¹⁾	Límite máximo recomendado		
				Expansión (%)	Edad	Observaciones
1977	23	3,10	RAC	0,020	3 m	Ambiente húmedo
				0,040	3 m	Ambiente seco
				0,030	Cualquier edad	-
				0,010	3 m	-
1986	23	3,88	RAC	0,025	1 año	Exposición a la humedad y sales descongelantes (NaCl)
				0,025	1 año	-
1990	38	3,88	RAS	0,040	1 año	-
				0,040	1 año	-
1994	38	5,25	RAS y RAC	0,040	1 año	-

1) Se refiere a la tipología de reacción (RAS o RAC) para la cual se considera que el método es apto

El método canadiense ha sido reconocido, en numerosas ocasiones, como el de mayor confiabilidad (Thomas *et al.*, 2008; RILEM TC 106-AAR, 2000a; CSA, 2009a). Sin embargo, en la práctica, su utilización se ve a menudo impedida ya que el plazo requerido para la evaluación de sus resultados (un año) no suele ser compatible con los cronogramas de ejecución del proyecto de la mayoría de las obras civiles.

Estudios realizados por diversos investigadores (Rogers y Hooton; 1989b; Rogers, 1990; Batic y Milanesi, 1995; Fournier *et al.*, 2000; Ideker *et al.*, 2006) han puesto de manifiesto que los resultados de expansión de este método pueden resultar muy variables debido a la influencia de diversos factores (lixiviación alcalina, naturaleza del agregado fino no reactivo, diferencias en la dosificación, etc.).

En la figura 1.23 se muestra la influencia que poseen las condiciones de almacenamiento de los prismas de ensayo en la expansión del hormigón, según datos publicados por Rogers (1990).

En esta figura se observa que el almacenamiento de los prismas dentro de bolsas plásticas cerradas (junto con 100 ml de agua) genera un incremento en la expansión del hormigón, a las 52 semanas, del orden del 50 %, en comparación a la obtenida en cámara húmeda. Estudios realizados por Rogers y Hooton (1989b) demostraron que, al cabo de 2,5 años, el hormigón almacenado en cámara húmeda (sin protección alguna y con constante renovación de humedad) perdía, por lixiviación, un 63 % de los álcalis, en tanto que, dentro de las bolsas plásticas, la disminución llegaba sólo al 22 %.

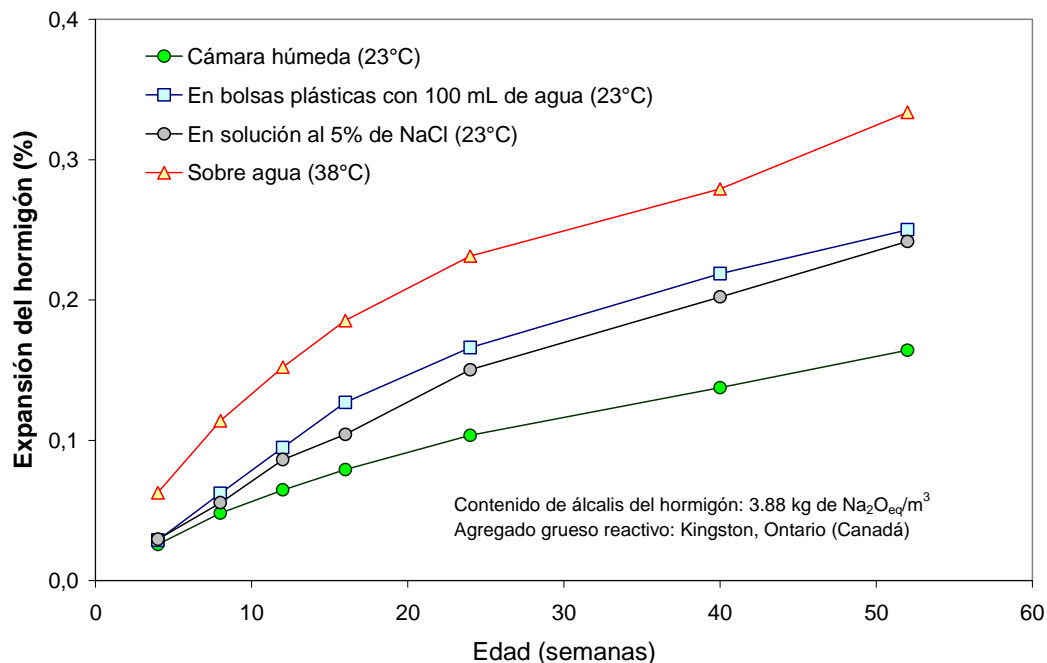


Figura 1.23. Influencia de las condiciones de almacenamiento de los prismas del ensayo CSA A23.2-14A en la expansión del hormigón (Rogers, 1990)

En 1987, Rogers publicó los resultados de un estudio interlaboratorios, realizado con el propósito de evaluar la precisión del método del prisma de hormigón canadiense, aplicado a los agregados con RAC. La metodología empleada por este investigador (que corresponde a la versión del año 1977), consistía en almacenar los prismas en cámara húmeda, a 23 °C. Los resultados de este estudio, adoptados por las normas CSA A23.2-14A, ASTM C 1105 e IRAM 1700, se indican en la tabla 1.8.

Del análisis de la tabla 1.8, surge que el método del prisma de hormigón posee una variabilidad superior a la de otros ensayos conocidos. Si bien es posible mejorar la precisión de este método mediante el empleo de materiales patrones, los resultados obtenidos con la versión del año 1994, empleando agregados potencialmente reactivos debido a la RAS, son todavía muy elevados (Fournier y Malhotra, 1996; Fournier y Rogers, 2008).

Lo expuesto, explica por qué la norma canadiense exige que el laboratorio interviniente demuestre su habilidad para conducir este método, mediante la realización de ensayos en paralelo, con agregados de comportamiento conocido, a modo de control.

Tabla 1.8: Valores de precisión de distintos ensayos

Método de ensayo		Coeficiente de variación (%)	
		Repetibilidad	Reproducibilidad
CSA A23.2-14A	Método del prisma de hormigón	12,0 ⁽¹⁾	23,0 ⁽²⁾
ASTM C1260	Método acelerado de la barra de mortero (NBRI)	2,9 ⁽³⁾	15,2 ⁽³⁾
ASTM C39C39M	Resistencia a compresión	2,4 ⁽⁴⁾	5,0 ⁽⁴⁾

1) Corresponde a una expansión del hormigón > 0,02 % a 12 meses

2) Corresponde a una expansión del hormigón > 0,014 % a 12 meses

3) Corresponde a una expansión del mortero > 0,10 % a 14 días

4) Corresponde al ensayo de tres probetas cilíndricas de 15 x 30 cm

En la tabla 1.9 se resumen los principales lineamientos del método canadiense, en comparación a los métodos propuestos por ASTM e IRAM.

1.6.4.1.2. Método ASTM C 1105

ASTM posee dos métodos de ensayo que emplean mezclas de hormigón para el estudio de la RAA. La norma ASTM C 1293 (ASTM, 2010i) sigue una metodología muy similar al método propuesto por la norma canadiense CSA A23.2-14A (CSA, 2009b), pero sólo es aplicable al estudio de agregados potencialmente reactivos frente a la RAS. La norma ASTM C 1105, en cambio, propone un método específico para el estudio de la RAC (ASTM, 2010g).

Según los alcances de esta norma, el método ASTM C 1105 está indicado para evaluar el comportamiento expansivo del conjunto de materiales propuestos para el hormigón de la obra, frente a la RAC.

Por este motivo, este método establece muy pocos requisitos para la selección de los materiales componentes del hormigón y las proporciones que deben emplearse para la elaboración de las mezclas de ensayo (tipo y contenido de álcalis del cemento, granulometría de los agregados, contenido de cemento y agregado grueso) (tabla 1.8).

Un aspecto interesante de este método es que, al no acelerar la reacción mediante el incremento de la temperatura de ensayo o el contenido de álcalis del hormigón, es altamente improbable que arroje un falso positivo. Del mismo modo, es altamente probable que este método sea incapaz de detectar los agregados dolomíticos de expansión diferida mencionados por Rogers (1986a).

Debido a la falta de definición de un gran número de parámetros, que influyen de manera significativa en la expansión del hormigón, es de esperar que los resultados obtenidos con este ensayo posean una variabilidad mucho mayor a la del método canadiense. En este sentido, es un error que el método ASTM C 1105 tome los valores de repetibilidad y reproducibilidad de la norma CSA A23.2-14A, ya que los requisitos establecidos por ambas metodologías difieren significativamente (obs. pers.).

No se conocen referencias en la literatura que hagan mención al empleo de éste método de ensayo para el estudio de la RAC.

1.6.4.1.3. Método del prisma de hormigón IRAM 1700

Este método (IRAM, 1997b) está indicado para evaluar la reactividad alcalina potencial del agregado grueso o fino, como consecuencia de la RAS o RAC.

Por estar diseñado en base a la norma CSA A23.2-14A, este método posee muchas similitudes con el método canadiense (tabla 1.8). Las diferencias más importantes aparecen en las condiciones de almacenamiento de los prismas de ensayo y en la medición de la lectura inicial.

Una vez efectuado el desmolde (24 horas), los prismas se envuelven con una tela de algodón, saturada de agua, y se insertan en tubos de polietileno, de 100 μm de espesor, de la misma longitud del prisma. Los prismas, junto con el trapo y el tubo de polietileno, son introducidos en bolsas plásticas, cerradas, junto con 5 ml de agua en su interior. Este conjunto, a su vez, es introducido en recipientes plásticos de almacenamiento, similares a los empleados por la norma canadiense, los que son mantenidos a 23 °C, durante 24 horas, hasta registrar la lectura inicial. Hecho esto, los recipientes de almacenamiento se estacionan a 38 ± 2 °C, durante 52 semanas. Este procedimiento es similar al empleado por el método RILEM AAR-3 (RILEM TC 106-AAR, 2000c).

Las primeras experiencias realizadas en el país en la aplicación del método del prisma de hormigón para el estudio de la RAC fueron publicadas por Fava y Galupo (1982). Posteriormente, Batic y Milanesi (1995) informaron los resultados obtenidos al aplicar el método IRAM 1700 en agregados de diverso origen y distinta reactividad alcalina.

En cuanto a las ventajas y limitaciones de este método de ensayo, valen las mismas consideraciones efectuadas para el caso del método canadiense.

Tabla 1.9: Análisis comparativo de las distintas normas del ensayo del prisma de hormigón

Método de ensayo		CSA A23.2-14A (2009)	ASTM C 1105-08a	IRAM 1700 (1997)
Alcance del método	Tipo de reacción	RAS o RAC	RAC	RAS o RAC
	Agregado a evaluar	Grueso, fino o la combinación	Grueso, fino o la combinación	Grueso o fino
	Posibilidad de evaluar la eficiencia inhibidora de una AMA o aditivo químico	Sí	Sí	No
	Posibilidad de evaluar la combinación cemento-agregado	No	Sí	No
Características del agregado grueso	Tamaño máximo del agregado grueso (mm)	20 o 14	19	20
	Posibilidad de evaluar la fracción > 19 mm (o 20 mm, según sea la norma)	Sí (cuando el contenido de la fracción es > al 15 %)	Sí (incluyéndola en forma proporcional o ensayándola en forma separada)	No (se descarta el material de tamaño mayor a 20 mm)
	Granulometría	El agregado se recompone en dos o tres fracciones (tabla 2)	No especifica	El agregado se recompone en tres fracciones (tabla 2)
Características del agregado fino	Granulometría		No especifica	
	Forma de verificar su comportamiento inocuo	Expansión a 16 d < 0,10 % (según CSA A23.2-25A) Expansión a 52 s < 0,015 % (según CSA A23.2-14A)	Según ASTM C33 (posibilidad de usar varios métodos: ASTM C289, C1260, C1293)	Expansión a 16 d < 0,10 % (según IRAM 1674) Expansión a 52 s < 0,015 % (según IRAM 1700)
Características del cemento	Tipo	GU (de uso general) (puede contener hasta un 5 % de filler calcáreo) 0,9 ± 0,1	El especificado en obra (en su defecto, debe cumplir con ASTM C150 o C595) El especificado en obra	IRAM 1503 0,9 ± 0,1
	Contenido de álcalis equivalente (% de Na ₂ O _{eq})	(se incrementa a 1,25 mediante NaOH)	(en su defecto, el de mayor contenido de álcalis)	(se incrementa a 1,25 mediante NaOH)
Parámetros para la dosificación del hormigón	Contenido de cemento (kg/m ³)	420 ± 10	El especificado en obra (en su defecto, 307 ± 3)	420 ± 10
	Contenido de álcalis (kg de Na ₂ O _{eq} /m ³)	5,25	No especifica	5,25
	Relación agua/cemento	0,42 a 0,45	No especifica	0,42 a 0,45
	Asentamiento (cm)	No especifica	El especificado en obra (en su defecto, 90 ± 15 mm)	No especifica
	Posibilidad de incorporar aditivos para ajustar la trabajabilidad	No	Sí	No
	Relación agregado grueso (AG):fino (AF), en masa	60:40 (para agregados pesados o livianos, el contenido de AG es igual a 0,70 ± 0,2 * PUV)	No especifica	60:40 (para agregados pesados o livianos, el contenido de AG es igual a 0,70 ± 0,2 * PUV)
Mezclado del hormigón		Mecánico	Mecánico	Mecánico
Moldes	Sección transversal (mm)	(75 ± 1) x (75 ± 1)	75 x 75	75 x 75
	Largo (mm)	275 a 405	≈ 285	275 a 405
Comapactación del hormigón en los moldes		Manual (varillado)	Manual o mecánica	Manual (varillado)
Curado inicial		23 ± 2°C, HR = 100%	23 ± 2°C, HR > 95%	23 ± 2°C, HR = 100%
Lectura inicial (horas, desde el inicio del mezclado)		24 ± 4	23,5 ± 0,5	48 ± 6
Condiciones de almacenamiento de los prismas de hormigón		En recipientes plásticos, con agua en el fondo y mecha (38 ± 2°C, alta humedad)	En cámara húmeda (23 ± 2°C, HR = 100%)	En recipientes plásticos, envueltos en tela húmeda, dentro de bolsas plásticas (38 ± 2°C, alta humedad)
Repetibilidad	Diferencia máxima entre las mediciones individuales que constituyen un resultado de ensayo	0,008% (p/exp. < 0,02%)	0,008% (p/exp. < 0,02%)	0,008% (p/exp. < 0,02%)
	Diferencia máxima entre las mediciones individuales respecto al valor promedio	40% (p/exp. > 0,02%)	40% (p/exp. > 0,02%)	40% (p/exp. > 0,02%)
Reproducibilidad (diferencia máxima entre laboratorios, respecto del valor promedio de expansión)		23% (para exp < 0,014%)	23% (para exp < 0,014%)	23% (para exp < 0,014%)
		65% (para exp < 0,014%)	65% (para exp < 0,014%)	65% (para exp < 0,014%)
Límites de expansión sugeridos		0,040% (52 semanas)	0,015% (3 meses) 0,025% (6 meses) 0,030% (1 año)	0,040% (52 semanas)

1.6.4.2. Método acelerado del prisma de hormigón

El método acelerado del prisma de hormigón (MAPH) consiste, básicamente, en moldear prismas de hormigón, conforme a los requisitos de las normas ASTM C 1293, CSA A23.2-14A o RILEM AAR-3, llevando la temperatura de estacionamiento a 60 °C.

A pesar de las objeciones planteadas por algunos investigadores (Ideker *et al.*, 2008), gran parte de la comunidad tecnológica considera al MAPH como una alternativa viable al método tradicional (Sims y Nixon, 2006; Nixon *et al.*, 2008), existiendo ya algunos antecedentes de normalización (Nixon *et al.*, 2008; AFNOR, 2004) y también experiencias realizadas en Argentina (Batic *et al.*, 2010; Falcone *et al.*, 2011; Falcone y Milanesi, 2012b).

Entre las ventajas comparativas de este método se destacan la menor duración del ensayo (de 3 a 5 meses) y su mejor reproducibilidad (Fournier y Rogers, 2008). Asimismo, existen algunos datos que señalan que este método posee una mayor eficiencia para la identificación de agregados marginales y de reacción lenta, por la presencia de cuarzo tensionado y deformado (Shayan *et al.*, 2008; Falcone *et al.*, 2011; Falcone y Milanesi, 2012b).

1.6.4.3. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec

A fines de la década del 90, Hudec y Larbi (1989) y Larbi y Hudec (1990) presentaron las bases de un nuevo método de ensayo acelerado para la evaluación de la reactividad alcalina potencial de los agregados (RAS y RAC).

El ensayo consiste en la evaluación de la expansión de testigos de hormigón cilíndricos, de 19,0 mm ($\frac{3}{4}$ ") de diámetro y 70 mm de longitud, extraídos de bloques prismáticos, moldeados con el agregado grueso que se desea estudiar.

Para preparar el hormigón se utiliza un agregado fino inocuo y un cemento pórtland normal, cuyo contenido total de álcalis es incrementado a 1,25 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, mediante la incorporación de NaOH al agua de amasado.

El agregado grueso es obtenido por trituración, clasificación y lavado del material de cantera original, de manera de cumplir con los requisitos granulométricos que se indican en la tabla 1.10.

Tabla 1.10: Requerimientos granulométricos del agregado grueso (Hudec y Larbi, 1989)

Pasa tamiz IRAM (ASTM)	Retiene tamiz IRAM (ASTM)	Fracción (en peso) (%)
$\frac{3}{8}$ " (9,5 mm)	$\frac{1}{4}$ " (6,7 mm)	$\frac{1}{3}$
$\frac{1}{4}$ " (6,7 mm)	4,75 mm (Nº 4)	$\frac{1}{3}$
4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	$\frac{1}{3}$

La dosificación de la mezcla de ensayo queda definida a través de las siguientes relaciones en peso: agua/cemento = 0,42; arena/cemento = 1,6 y agregado total/cemento = 4.

El curado de bloques de hormigón se realiza en ambiente húmedo, a temperatura ambiente ($\approx 22\text{ }^{\circ}\text{C}$), por un período de 28 días. Al final de dicho periodo de curado, se extraen, por calado, testigos de hormigón endurecido de 19,0 mm ($\frac{3}{4}$ ") de diámetro. Estos testigos, posteriormente, son aserrados con el objeto de obtener una longitud aproximada de 70 mm.

Una vez aserrados los testigos, se sumergen en agua, a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 4 horas y se determina la lectura inicial. Luego, se sumergen los testigos en una solución 1N de NaOH, a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ o bien, en una solución saturada de NaCl, a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ u $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, según el tratamiento escogido.

La lectura de los cambios de longitud de los testigos se realiza, en todos los casos, a temperatura ambiente ($22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Para ello, en los ensayos de alta temperatura ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$), es necesario quitar de las estufas, con la debida anticipación, los contenedores que albergan a los testigos de ensayo para llevarlos a temperatura ambiente en forma natural.

La medición de las expansiones, según la propuesta original del método, se realiza mediante un sistema controlado por computadora e instrumentado con dos traductores diferenciales (LVDT). En la tabla 1.11 se indican los lapsos de tiempo entre lecturas y la duración del ensayo, en función de la temperatura del baño de inmersión.

Tabla 1.11: Período entre lecturas y duración del ensayo de Hudec y Larbi

Solución de ensayo	Temperatura del baño ($^{\circ}\text{C}$)	Período entre lecturas	Período de inmersión	Duración del ensayo
1N de NaOH	80	48 horas	28 días	2 meses
	22	14 días	6 meses	7 meses
Saturada de NaCl	80	48 horas	28 días	2 meses

Según los autores del método, para el caso específico de la RAC, la correlación hallada entre los métodos propuestos y los ensayos normalizados empleados en el estudio (ASTM C 227 y CSA-A23.2-14A) es significativa ($R^2 > 0,90$).

En las tablas 1.12 y 1.13 se muestran los límites de expansión recomendados para los tratamientos de alta temperatura (1N de NaOH o saturada de NaCl) y las edades de ensayo sugeridas para realizar la evaluación correspondiente.

Tabla 1.12: Límites de expansión del hormigón para testigos sumergidos en solución 1N de NaOH a 80 °C (Hudec y Larbi, 1989)

Tipología de reacción	Ensayos de referencia		Hudec y Larbi		
	Edad	ASTM C227	CSA A23.2-14A	Tiempo de inmersión	1N de NaOH a 80 °C
RAS	3 meses	0,050	-	6 días	0,171
	6 meses	0,100	-	12 días	0,330
RAC	12 meses	-	0,025	24 días	0,162

Tabla 1.13: Límites de expansión del hormigón para testigos sumergidos en solución saturada de NaCl a 80 °C (Larbi y Hudec, 1990)

Tipología de reacción	Ensayos de referencia		Larbi y Hudec		
	Edad	ASTM C227	CSA A23.2-14A	Tiempo de inmersión	Saturada de NaCl a 80 °C
RAS	3 meses	0,050	-	6 días	0,041
	6 meses	0,100	-	12 días	0,061
RAC	12 meses	-	0,025	24 días	0,071

CAPÍTULO 2

Materiales y Métodos

En este capítulo se detallan las características más salientes de los materiales empleados en esta investigación (rocas, cementos, adiciones minerales y aditivos químicos). Se describe el origen de los agregados dolomíticos seleccionados para esta investigación y se informa la composición química de los cementos pórtland empleados en la elaboración de las mezclas de mortero y hormigón. Se destacan las características más salientes de las adiciones minerales activas utilizadas (puzolana natural, escoria de alto horno, ceniza volante y humos de sílice) para el control de la RAC y se indica la composición de los aditivos químicos empleados. Por último, se describen las metodologías de ensayo implementadas para evaluar el comportamiento expansivo del material (roca, mortero u hormigón) y los cambios observados a nivel microestructural.

2.1. Materiales

A continuación se describen las principales características de los materiales empleados para la realización de estas experiencias.

2.1.1. Cementos pórtland

En todos los casos, se emplearon muestras de cemento pórtland normal, tipo CPN40, según IRAM 50000 (similar al tipo I, según ASTM C150). Se utilizaron cementos de alto ($1,15 \pm 0,01$ % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) y bajo contenido de álcalis (0,34 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$). Las principales características de estos cementos se indican en la tabla 2.1.

2.1.2. Agregados dolomíticos

Para esta investigación se seleccionaron diez muestras de roca dolomítica (M1 a M10), procedentes de siete canteras, ubicadas en distintos puntos del país.

Tabla 2.1. Principales propiedades de los cementos empleados en este estudio

Cemento (designación)		Unidad	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Superficie específica Blaine		m ² /kg	nd	322	328	340	nd
Resistencia a compresión	7 días	MPa	31,9	30,0	nd	32,7	32,6
	28 días		46,3	44,0	46,2	42,5	50,0
Expansión en autoclave		%	nd	0,12	0,08	0,29	nd
Óxido de sodio (Na ₂ O)		%	0,61	0,69	0,08	0,65	0,17
Óxido de potasio (K ₂ O)		%	0,80	0,73	1,62	0,92	0,26
Óxido de sodio equivalente (Na ₂ O _{eq})		%	1,14	1,16	1,15	1,25	0,34

nd: No disponible

Por razones operativas, el muestreo de las rocas se realizó de los acopios de cantera, lo cual, impidió conocer la orientación de los trozos de roca respecto a los planos de estratificación. En la figura 2.1 se indica la procedencia de las muestras de roca empleadas y su identificación.

**Figura 2.1** Procedencia de las muestras de roca empleadas en este estudio

2.1.3. Agregado fino

Arena Oriental (AO). El agregado fino empleado es una arena silíceas, denominada comúnmente “Oriental”. Está constituida principalmente por cuarzo (80 %), feldespatos (> 15 %) y una muy pequeña cantidad de calcedonia (0,1 %). En general, los clastos son frescos e inalterados.

Se trata de un material de características inocuas frente a la RAS, muy utilizado en ensayos de laboratorio en la elaboración de mezclas de referencia o patrón. Posee un módulo de finura de 2,79 y una densidad relativa (en condición saturado superficie seca) igual a 2,63. Su absorción es 0,3 %.

Arena de trituración (ACH). Procedente de la zona de Las Piedritas, provincia del Chaco. Se trata de una ortocuarcita, compacta, de clastos redondeados de cuarzo, con tamaño de grano fino a medio. El cemento es abundante y de naturaleza silíceas, compuesto por ópalo, calcedonia y cuarzo microcristalino, con granulaciones de hematita, lo que le da su color rojizo. La constitución de su cemento (ópalo) le otorga una elevada reactividad alcalina potencial, por lo cual, es muy utilizado en ensayos de laboratorio.

Este material se empleó, mezclado junto con la arena oriental (10 % de ACH + 90 % de AO), para elaborar un mortero de elevada expansión, debida a la RAS. Este mortero se utilizó para evaluar la efectividad inhibidora que posee el LiCl (1 % en peso del cemento) frente a la RAS.

2.1.4. Adiciones minerales activas

Con la finalidad de abarcar un amplio rango de posibilidades en lo que a actividad puzolánica (capacidad inhibidora) se refiere, se emplearon las siguientes adiciones minerales activas (AMA):

Puzolana Natural (PNZ): Procedente de la ciudad de Zapala, provincia de Neuquén. Se trata de una toba vítrea, de características similares a la utilizada en la fabricación del cemento puzolánico empleado en la elaboración de los hormigones correspondientes al emprendimiento hidroeléctrico de Piedra del Águila (Cengija *et al.*, 1989).

Ceniza volante (CV1 y CV2). Procedente de la central termoeléctrica de AES Argentina (ex Agua y Energía Eléctrica Sociedad del Estado), ubicada en la localidad de San Nicolás; provincia de Buenos Aires. Según ASTM C 618 (ASTM, 2010e), esta ceniza es clase F (de bajo contenido de calcio).

Escoria granulada de alto horno (EGAH). Procedente de la de la planta siderúrgica de la firma SIDERAR (ex SOMISA), ubicada en la localidad de Ramallo, provincia de Buenos Aires.

Humos de sílice (HS). Es un subproducto resultante de la reducción del cuarzo de alta pureza, en la fabricación de metales silíceos y ferrosilíceos. Consiste en partículas muy finas y esféricas, con una superficie específica elevada (del orden de 20000 m²/kg) y un alto contenido de sílice amorfa, por lo cual, demuestra ser efectivo para el control de la RAS. Dado que al momento de la realización de estos estudios su producción en el país era nula, se optó por evaluar una muestra de origen noruego.

En la tabla 2.2 se indican las principales características de las AMA y los % de reemplazo (en peso del cemento) escogidos para la elaboración de las mezclas. Si bien el contenido de álcalis de estas AMA (excepto HS) es superior o del mismo orden que el del cemento que reemplaza, en general, se considera que este aspecto constituye un factor de segundo orden a la hora de definir su capacidad inhibidora frente a la RAA (Cement & Concrete Association of New Zeland, 2003; CSA, 2009a, f).

Tabla 2.2. Principales propiedades de las AMA empleadas en estos estudios

Adición mineral activa (designación)		Norma	PNZ	CV1	CV2	EGAH	HS
Nivel de reemplazo	%	-	30	40	60	10	
Superficie específica Blaine	m ² /kg	IRAM 1623	615	480	370	325	-
Densidad relativa	-	IRAM 1624	2,44	2,50	2,29	2,84	-
Pérdida por calcinación (PPC)	%	ASTM C311	15,0	3,6	10,0	-	1,2
Óxido de silicio (SiO ₂)	%	ASTM C311	57,2	59,8	49,8	35,5	98,6
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	%	ASTM C311	8,0	9,6	6,0	2,8	0,0
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	%	ASTM C311	14,0	19,7	14,5	16,5	0,0
Óxido de calcio (CaO)	%	ASTM C311	2,6	3,9	6,6	36,7	0,0
Óxido de magnesio (MgO)	%	ASTM C311	0,9	1,4	10,4	4,8	0,0
Óxido de azufre (SO ₃)	%	ASTM C311	0,0	0,0	0,7	0,1	0,0
Óxido de sodio (Na ₂ O)	%	ASTM C311	1,62	1,36	0,81	0,43	0,08
Óxido de potasio (K ₂ O)	%	ASTM C311	0,68	0,60	1,10	0,82	0,11
Óxido de sodio equivalente (Na ₂ O _{eq})	%	ASTM C311	2,07	1,75	1,53	0,97	0,15

2.1.5. Aditivos químicos

Con miras a controlar los efectos expansivos generados por la RAA, se emplearon tres aditivos químicos, de efectos conocidos en el hormigón (Swenson y Guillott, 1964; Pagano y Cady, 1982): cloruro de litio (LiCl), cloruro férrico hexahidrato ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y carbonato de litio (Li_2CO_3). En todos los casos, se usaron productos de alta pureza (p. a.).

El LiCl fue empleado en la elaboración de morteros, disuelto en el agua de amasado, en una dosis igual al 1 % en peso del cemento. El $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y Li_2CO_3 , se utilizaron en la preparación de mezclas de hormigón. El primero, se incorporó en una dosis equivalente al 7 % del agua de amasado (4 % en peso del cemento). El segundo, se adicionó en una dosis igual al 5 % del agua de amasado (2,8 % en peso del cemento).

2.2. Métodos de ensayo implementados

Con el propósito de evaluar la reactividad alcalina de las dolomías bajo estudio, se emplearon diversos métodos de ensayo, aplicados tanto sobre muestras de roca, mortero u hormigón. En lo que sigue, se resumen los principales lineamientos de los métodos aplicados en cada caso.

2.2.1. Ensayos de evaluación sobre muestras o testigos de roca

2.2.1.1. Examen petrográfico

Este ensayo se efectuó siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1649 (IRAM, 2008). En todos los casos, el examen de las muestras de roca se llevó a cabo mediante lupa binocular y a través de la observación de secciones delgadas con microscopio óptico de polarización. Se utilizó un estereomicroscopio Olympus SZ-CTV y un microscopio petrográfico Olympus B2-UMA trinocular con video cámara Sony 151^a y el programa Image-Pro Plus para captura y procesamiento de imágenes. Estos estudios fueron complementados con la evaluación de la composición de la roca mediante DRX (utilizando un difractómetro Rigaku D-Max III-C, con monocromador de grafito, a 35 Kv y 15mA) y análisis químicos. Estos últimos se realizaron en ACTLABS (Canadá) por ICP (espectrometría de emisión con plasma de argón).

2.2.1.2. Método del testigo de roca (ASTM C 586 modificado)

El procedimiento general de este método siguió los lineamientos de la norma ASTM C 586 (ASTM, 2010d).

Al no contar con una broca del diámetro indicado por la norma (9 mm), se optó por adaptar las dimensiones del testigo de roca (19 mm de diámetro y 75 mm de longitud), incrementando el volumen de solución alcalina. En algunos casos, se trabajó con testigos prismáticos de sección transversal cuadrada (25 mm x 25 mm), con una longitud de 70 ± 10 mm. No se observaron planos de estratificación dentro de los trozos de roca, por lo que la dirección de extracción de los testigos se realizó al azar, sin respetar una dirección preferencial.

Los extremos de los testigos cilíndricos fueron torneados en forma cónica (figura 2.2), con el objeto de asegurar un contacto franco con la base del comparador, de tipo circunferencial y concéntrico al eje del testigo. En el caso de los testigos prismáticos, se practicaron perforaciones en sus extremos, del orden de 8 mm de diámetro, dentro de las cuales, se empotraron pernos de referencia, fijados con pasta cementícea (figura 2.3).



Figura 2.2 Aspecto de los testigos de roca cilíndricos (19 mm x 75 mm)



Figura 2.3 Aspecto de los testigos prismáticos de roca (25 mm x 25 mm x 70 mm)

Luego de un período de estabilización en agua (≈ 7 días), los testigos fueron sumergidos en solución 1N de NaOH a temperatura ambiente (23 ± 2 °C). El volumen de solución alcalina empleado por cada testigo fue del orden de 250 ml.

Los cambios de longitud de los testigos de roca se registraron de manera periódica, en algunos casos hasta los tres años de inmersión, utilizando un comparador analógico, de base ajustable, con una precisión de 0,0001" (figura 2.4).

Se realizaron estudios adicionales sobre algunas muestras que contenían arcillas expansivas (esmeclitas) con el propósito de evaluar la posible vinculación entre estos minerales y los cambios dimensionales experimentados por la roca. Para ello, se emplearon testigos de roca prismáticos (25 mm x 25 mm x 70 mm) sumergidos en solución alcalina (NaOH), agua y etilen glicol.

A fin de investigar los posibles cambios mineralógicos experimentados por la roca durante el curso de estos ensayos, algunos testigos fueron evaluados mediante DRX, luego de algunos meses de inmersión en la solución alcalina (NaOH).



Figura 2.4 Comparador analógico de base ajustable (precisión 0,0001")

2.2.1.3. Método químico canadiense

Se cuantificó el contenido de CaO , MgO y Al_2O_3 por ICP en rocas expansivas y se graficó la relación CaO/MgO vs. Al_2O_3 a fin de cotejar la correlación existente entre el comportamiento de la roca frente a los álcalis y el pronóstico de la norma CSA A23.2-26A (CSA, 2009e).

2.2.2. Ensayos de expansión sobre mortero

2.2.2.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637)

Como se indicó en 1.6.3.1, la norma ASTM C 227 considera que este método es inadecuado para el estudio de la RAC (ASTM, 2010b). Sin embargo, la enorme experiencia adquirida en el país en la aplicación de este ensayo lo convierte en una herramienta de investigación muy valiosa. Es importante recordar, además (ver 1.1), que en los agregados dolomíticos ambas reacciones alcalinas (RAS + RAC) pueden actuar en forma simultánea, por lo cual, la aplicación de este método de ensayo sigue siendo válida y es lo que primó al programar esta investigación.

En estas experiencias, el método de la barra de mortero se llevó a cabo siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1637 (IRAM, 1992).

Se moldearon barras de mortero de sección cuadrada (25 mm de lado) y 285 mm de longitud (250 mm de longitud efectiva), con una relación agregado/cemento, en peso, igual a 2,25, manteniendo constante la consistencia del mortero ($105 < \text{flow} < 120$).

Luego de registrada la lectura inicial, las barras fueron almacenadas dentro de recipientes plásticos, estancos, provistos de mecha (recubiertos interiormente con papel absorbente), los cuales, fueron mantenidos a 38 ± 2 °C.

La determinación de las expansiones de las barras de mortero se realizó en forma periódica, hasta la edad de cuatro años, mediante un comparador analógico, de base fija, con una precisión de 0,0001" (figura 2.5). A los cinco años de edad, se realizaron cortes delgados de las barras para examinar los cambios microestructurales producidos en el mortero.



Figura 2.5 Comparador analógico de base fija (precisión 0,0001")

Este método se empleó también, con algunas modificaciones, para evaluar algunas alternativas destinadas al control de la expansión deletérea del agregado. La primera, consistió en incorporar al mortero un conocido aditivo inhibidor de la RAS (LiCl), sin

efecto alguno sobre la RAC (Swenson y Guillott, 1964). La segunda opción, se orientó a evaluar el efecto del incremento del tamaño de las partículas del agregado sobre la expansión del mortero (Swenson y Guillott, en Hadley, 1964).

2.2.2.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674)

Este método de ensayo se llevó a cabo siguiendo los requerimientos de la norma IRAM 1674 (IRAM, 1997a), excepto en lo referente a la proporción de las mezclas, ya que en lugar de mantener fija la a/c (0,47), se mantuvo constante la consistencia del mortero ($105 < \text{flow} < 120$).

La determinación de las expansiones de las barras de mortero se realizó en forma periódica, hasta los 28 días de edad, mediante un comparador analógico, de base fija, con una precisión de 0,0001" (figura 2.5).

Este método de ensayo fue empleado también para evaluar el efecto de la incorporación de distintas AMA (PNZ, EGAH, CV1, HS) al mortero. Dado que la cantidad de agregado disponible era insuficiente para llevar a cabo toda la experiencia, el mortero con ceniza volante CV1 y su correspondiente mezcla de referencia (sin ceniza) se prepararon utilizando la fracción comprendida entre los tamices 4,75 mm (tamiz N° 4) y 1,18 mm (tamiz N° 16).

Esta circunstancia permitió comparar los resultados obtenidos con ambas granulometrías (fracción 4,75 mm a 1,18 mm vs. 4,75 mm a 0,150 mm) y valorar el efecto que ésta posee sobre la expansión del mortero.

2.2.2.3. Métodos de evaluación RILEM (modificados)

Si bien el procedimiento de evaluación implementado siguió los lineamientos sugeridos por el grupo RILEM (ver 1.6.3.3), se introdujeron algunas modificaciones en los métodos de ensayo AAR-2 y AAR-5.

Aunque los principales parámetros de interés del cemento utilizado (CP3) cumplieron los requisitos recomendados por RILEM ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} > 1 \%$, expansión en autoclave $< 0,20 \%$), su finura (ver tabla 2.1) fue inferior a la exigida por este organismo (superficie específica Blaine $> 450 \text{ m}^2/\text{kg}$).

La granulometría del agregado empleado en la elaboración de las barras del método AAR-2, una vez triturado y lavado, fue la especificada por la IRAM 1637.

La determinación de las expansiones de las barras de mortero (figura 2.6) se realizó en forma periódica, hasta la edad de 28 días, mediante un comparador analógico, de base ajustable, con una precisión de 0,0001" (figura 2.4).



Figura 2.6 Aspecto de las barras de mortero (40 mm x 40 mm x 160 mm) del método RILEM AAR-2

En reemplazo del método AAR-5 se implementó el ensayo propuesto por Lu *et al.* (2008). La mezcla se elaboró con el cemento CP3 (1,14 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), utilizando una proporción cemento/agregado, en peso, igual a 1 y una relación a/c igual a 0,33. El agregado fue procesado de manera que el tamaño de sus partículas quedara comprendido entre 4,75 mm (tamiz N° 4) y 2,36 mm (tamiz N° 8).

Este método de ensayo fue empleado también para evaluar el efecto inhibitor de la incorporación al mortero de un 40 %, en peso, de ceniza volante (CV2), según la recomendación de Lu *et al.* (1992). En todos los casos, se incorporó al mortero un aditivo superfluidificante de modo de lograr una mezcla de consistencia adecuada.

Con cada mezcla se moldearon tres probetas prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm, cuyo tratamiento posterior fue idéntico al de la IRAM 1674 (24 horas de curado en cámara húmeda + 24 horas de inmersión en agua a 80 °C + inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C).

Los cambios de longitud de los prismas de mortero se registraron, de manera periódica, hasta los 30 días de edad, utilizando un comparador analógico, de base ajustable, con una precisión de 0,0001”.

2.2.3. Ensayos de expansión sobre hormigón

2.2.3.1. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec (modificado)

El procedimiento de ensayo siguió los lineamientos del método propuesto por Hudec y Larbi (1989) y Larbi y Hudec (1990), con las diferencias que a continuación se detallan.

El hormigón se elaboró con un agregado fino inocuo (AO) y un cemento pórtland normal (CP1), cuyo contenido total de álcalis fue incrementado a 1,25 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, mediante la incorporación de NaOH al agua de amasado. La granulometría del agregado grueso cumplió los requisitos indicados en la tabla 1.10.

La dosificación de la mezcla de ensayo y el moldeo y curado de los bloques de hormigón se realizaron según la propuesta original del método (Hudec y Larbi, 1989; Larbi y Hudec, 1990). En lugar de extraer, por calado, testigos cilíndricos de 19,0 mm ($\frac{3}{4}$ ”) de diámetro, estos se obtuvieron por aserrado, logrando testigos prismáticos de 25 mm x 25 mm x 70 mm (Batic y Milanesi, 1991).

Una vez determinada la lectura inicial, los testigos fueron sometidos a seis tratamientos, combinando dos soluciones alcalinas (1N de NaOH y saturada de NaCl) y tres temperaturas (23 °C, 38 °C y 80 °C).

Los cambios de longitud de los testigos se realizaron siguiendo la metodología de la IRAM 1674, esto es, realizando las lecturas manteniendo las probetas a la temperatura de ensayo (23 °C, 38 °C u 80 °C, según corresponda).

En lugar de medir las expansiones de los testigos mediante LVDT (según la propuesta original del método), ésta se llevó a cabo mediante el uso de un comparador analógico, de base ajustable, con una precisión de 0,0001” (figura 2.4).

2.2.3.2. Método del prisma de hormigón

La reactividad alcalina potencial de algunas muestras de agregado se evaluó mediante el ensayo del prisma de hormigón canadiense (CSA A23.2-14A), según la versión del año 1977 (Batic y Milanesi, 1991).

La roca bajo estudio fue empleada como agregado grueso, utilizando un agregado fino (AO) de características inocuas. Las mezclas se elaboraron con un cemento (CP1) de alto contenido de álcalis (1,14 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) y un contenido nominal de cemento de 310 kg/m^3 (contenido de álcalis del hormigón = $3,53 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$).

Se moldearon prismas de hormigón de 75 mm x 100 mm x 430 mm, los que fueron almacenados en cámara húmeda (23 °C) hasta los 8 meses. A partir de esta edad, los prismas fueron introducidos en bolsas plásticas, cerradas, junto con 100 ml de agua, con el fin de minimizar los fenómenos de lixiviación alcalina (Rogers y Hooton, 1989b; Rogers, 1990).

Los cambios de longitud de los prismas de hormigón se registraron de manera periódica, hasta los tres años de edad, utilizando un comparador analógico (horizontal), con una precisión de 0,0001” (figura 2.7).



Figura 2.7 Comparador de longitud analógico (precisión 0,0001”)

A raíz del comportamiento expansivo registrado en una muestra de hormigón, se decidió evaluar la influencia de la temperatura de curado en el mecanismo de expansión de ese agregado.

Para ello, se empleó el método del prisma de hormigón CSA A23.2-14A-M86 (Milanesi y Batic, 1994). La mezcla se elaboró con un cemento de alto contenido de álcalis (1,14 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), incrementando el contenido de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ a 1,25 % mediante la adición de NaOH al agua de mezclado. El contenido de cemento empleado en la elaboración del hormigón fue igual a 310 kg/m^3 ($a/c = 0,53$), con lo cual, el contenido total de álcalis de la mezcla resultó igual a $3,88 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$.

Se moldearon prismas de hormigón de $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$, los que fueron almacenados a 23°C y 38°C , dentro de bolsas plásticas, cerradas, junto con 100 ml de agua. Los cambios de longitud de estos prismas se registraron de manera periódica, hasta los cuatro años de edad, utilizando un comparador analógico (vertical), de base ajustable, con una precisión de $0,0001''$ (figura 2.4).

En vista del comportamiento deletéreo observado en algunas muestras, se decidió estudiar distintas estrategias de inhibición de la reacción con el fin de controlar los fenómenos expansivos del agregado. Se investigó el comportamiento de tres AMA (PNZ, CV1 y HS) (tabla 2.2), el uso de un cemento de bajo contenido de álcalis (0,34 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) y el empleo de dos aditivos químicos ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y Li_2CO_3).

El estudio del efecto de las AMA y de la reducción del contenido de álcalis del hormigón ($1,05 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$) se realizó mediante el método CSA A23.2-14A-M90 (Milanesi y Batic, 1993a, b; Milanesi *et al.*, 2012), utilizando una muestra de agregado grueso de 19,0 mm de tamaño máximo.

En todos los casos, los hormigones fueron elaborados con un contenido de ligante (AMA + cemento) igual a 310 kg/m^3 y una relación $a/c = 0,57$. Las mezclas con AMA se elaboraron con un cemento de alto contenido de álcalis (1,16 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$). Los porcentajes de adición empleados se indican en la tabla 2.2.

Los prismas de hormigón ($75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$) fueron almacenados a 38°C , dentro de bolsas plásticas, cerradas, junto con 100 ml de agua. Los cambios de

longitud de estos prismas se registraron de manera periódica, hasta los tres años de edad, utilizando un comparador analógico (vertical), con una precisión de 0,0001” (figura 2.4).

El estudio del efecto de los aditivos químicos se realizó con la misma metodología descrita precedentemente, utilizando el agregado grueso con un tamaño máximo menor (9,5 mm).

2.2.4. Ensayos complementarios

2.2.4.1. Difractometría de rayos X (DRX)

Los cambios mineralógicos producidos en las rocas o agregados durante el curso de algunos de los ensayos implementados se realizaron mediante DRX. La característica del equipo utilizado se indicó en 2.2.1.1.

2.2.4.2. Observaciones de cortes delgados

A fin de investigar la evolución de la microestructura del mortero u hormigón (características de la pasta cementícea, presencia de fisuras, bordes de reacción, etc.) se extrajeron muestras de los distintos especímenes de ensayo (barras de mortero, prismas de hormigón) para su observación mediante microscopía óptica. La característica de los equipos usados se indicó en 2.2.1.1.

CAPÍTULO 3

Resultados y Discusión

En el presente capítulo se informan los resultados de los ensayos implementados para caracterizar la reactividad alcalina potencial de muestras de agregados carbonáticos seleccionadas para este estudio. Se describen los ensayos llevados a cabo sobre muestras de roca (examen petrográfico, DRX, ensayos químicos y de expansión de testigos), barras de mortero y prismas de hormigón. Se incluyen ensayos acelerados y de larga duración (hasta 5 años). Se comparan los resultados obtenidos con los valores recogidos en la literatura y se analiza la reactividad alcalina potencial de cada agregado. En base a esta información, se discute la validez de los criterios de evaluación aceptados a nivel nacional e internacional. En una segunda etapa, se evalúa la efectividad de diversos recursos tecnológicos para inhibir las reacciones expansivas debidas a la RAC. Se estudia el efecto que posee la reducción del contenido de álcalis del hormigón, el empleo de AMA de efectividad comprobada, el uso de aditivos químicos específicos y la reducción del tamaño máximo del agregado.

3.1. Evaluación de la reactividad alcalina potencial del agregado

3.1.1. Ensayos sobre muestras o testigos de roca

3.1.1.1. Examen petrográfico

A continuación se describirán las principales características petrográficas de las rocas empleadas en la presente investigación. El análisis de la composición mineralógica de cada una de estas muestras se realizó mediante la observación de cortes delgados (microscopía óptica), DRX (Anexo A) y análisis químicos (tabla 3.1).

M1. Procedente de la zona de Olavarría, provincia de Buenos Aires. Es una roca de color castaño amarillento claro y tamaño de grano fino. Posee estructura maciza con estratificación poco marcada. Se trata de una roca compacta y sin alteración.

La roca posee una estructura homogénea de tipo esparítica. Los cristales de dolomita se presentan en secciones euhedrales a subhedrales, con tamaños que varían entre 100 μm y 200 μm , teniendo alrededor del 90 % de los cristales un tamaño comprendido entre 140 μm y 150 μm .

La roca está compuesta, esencialmente, por dolomita, algo de calcita (venillas) y una pequeña cantidad de cuarzo en forma intersticial. En base a los resultados de los análisis químicos (AQ) se estima que el contenido de calcita no supera el 10 %. Por DRX (figura 3.1) se identificó dolomita predominante con calcita subordinada y muy escasa cantidad de cuarzo (Anexo A: tablas A.1 y A.2).

Esta roca posee un contenido de residuo insoluble igual a 3 %. Su densidad relativa y absorción son 2,70 y 1,2 %, respectivamente. La roca se clasifica como dolomía esparítica.

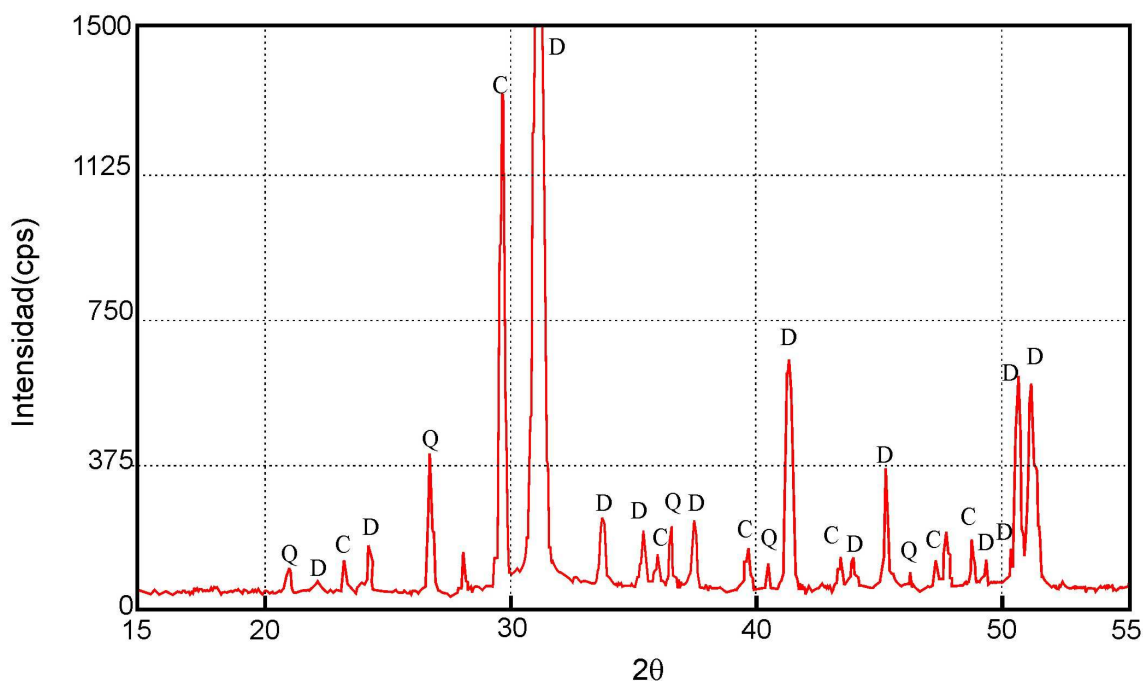


Figura 3.1 DRX de la muestra de roca natural M1 (ver tabla A.2 en Anexo A)

M2. Procedente de la zona de Olavarría, provincia de Buenos Aires. Es una roca de color castaño amarillento y tamaño de grano fino. Presenta estructura maciza con estratificación poco marcada. Se trata de una roca compacta y sin alteración.

Al microscopio se observa una textura esparítica constituida por secciones subhedrales a euhedrales de dolomita, con un tamaño medio de 150 μm . Se observan, además, sectores donde el tamaño de las secciones alcanza 250 μm . Distribuidas intersticialmente en la roca se presentan muy escasas (menos del 1 %) secciones anhedrales de cuarzo, límpidas. Además, es posible observar escasas grietas irregulares rellenas por dolomita recrystalizada y óxidos de hierro.

En base a los resultados de los AQ se estima que el contenido de calcita no supera el 5 %. Por DRX se identificó dolomita de excelente cristalinidad, muy escasa cantidad de feldespato y sólo la reflexión más intensa de calcita (en 3,035 Å) (Anexo A: tabla A.3). Dado que no se detectaron picos de cuarzo, se infiere que el elevado porcentaje de residuo insoluble que constituye esta roca (23 %) está compuesto, esencialmente, por material arcilloso de muy baja cristalinidad. La densidad relativa y absorción de esta muestra de roca son iguales a 2,69 y 1,2 %, respectivamente. La roca se clasifica como dolomía esparítica.

M3. Procedente de la zona de Olavarría, provincia de Buenos Aires. Es una roca de color rosado grisáceo y tamaño de grano fino. Presenta una estructura maciza sin estratificación. Se trata de una roca muy compacta y sin alteración visible.

Al microscopio se observa una textura no muy homogénea constituida por secciones subhedrales e euhedrales de dolomita, con tamaños que oscilan entre 80 μm y 150 μm (tipo esparita). También se presentan algunos sectores donde las secciones alcanzan un tamaño de 250 μm , irregulares, con cierta disposición subparalela, que constituyen aproximadamente el 15 % de la roca. Distribuidas intersticialmente, en algunos casos conformando pequeñas venillas, se presentan secciones anhedrales de cuarzo secundario, límpidas, en ocasiones microcristalinas, en un porcentaje aproximado del 5 %.

En base a los resultados de los AQ (tabla 3.1) se estima que el contenido de calcita es poco significativo ($<< 5$ %). Por DRX se identificó dolomita de muy buena cristalinidad y sólo las reflexiones más intensas de calcita (3,027 Å), cuarzo (3,337 Å) y feldespato (3,192 Å) (Anexo A: tabla A.4).

Esta muestra de roca posee un contenido de residuo insoluble igual a 14 %. Su densidad relativa es igual a 2,82 y su absorción 0,4 %. La roca se clasifica como dolomía esparítica silicificada.

M4, M7, M9 y M10. Procedentes de la zona de Valcheta, provincia de Río Negro. Se trata de una roca de origen hidrotermal, de edad Terciario Inferior, porosa, sin alteración, de color blanco grisáceo y tamaño de grano muy fino. Presenta una textura maciza, sin estratificación.

Al microscopio se observa una textura homogénea, constituida, casi en forma exclusiva, por dolomita y cantidades menores de cuarzo, feldespato, material arcilloso y rocas volcánicas riolíticas. Por DRX (figura 3.2) se detectan, casi con exclusividad, reflexiones correspondientes a dolomita (tabla A.5 y A.6). En ocasiones, se identifican reflexiones atribuidas a yeso (tabla A.5) y caolinita (tabla A.17). Los cristales anhedrales a subhedrales de dolomita poseen tamaños que oscilan entre 10 μm y 30 μm , conformando una textura subesparítica.

El contenido de residuo insoluble de esta roca es muy variable, tomando valores que oscilan entre el 3 % y el 18 %. Dentro de los minerales que constituyen el residuo insoluble (tablas A.7 y A.8) se identificó cuarzo, feldespato y montmorillonita (figuras 3.3 y 3.4).

La mayor parte de las muestras de roca evaluadas en este estudio poseen una densidad relativa del orden de 2,59, con valores de absorción que se ubican en el entorno de 5 % (algunas muestras, de gran compacidad, poseen valores de absorción inferiores al 1 %). La roca se clasifica como dolomía subesparítica.

M5 y M6. Procedentes de la zona de Alta Gracia, provincia de Córdoba.

Al microscopio, la muestra M5 presenta una textura granoblástica, con tamaño de grano mediano a grueso (1,5 mm a 4,5 mm), constituida por un 30 % de dolomita, calcita y un contenido de residuo insoluble del orden de 3 %.

A partir de los resultados de los AQ, se estima que el contenido de calcita es del orden del 40 %. Por DRX (figura 3.5) se identificó dolomita con calcita subordinada y una reflexión en 3,186 Å adjudicada a feldespato (no se identificaron reflexiones de cuarzo) (tabla A.9).

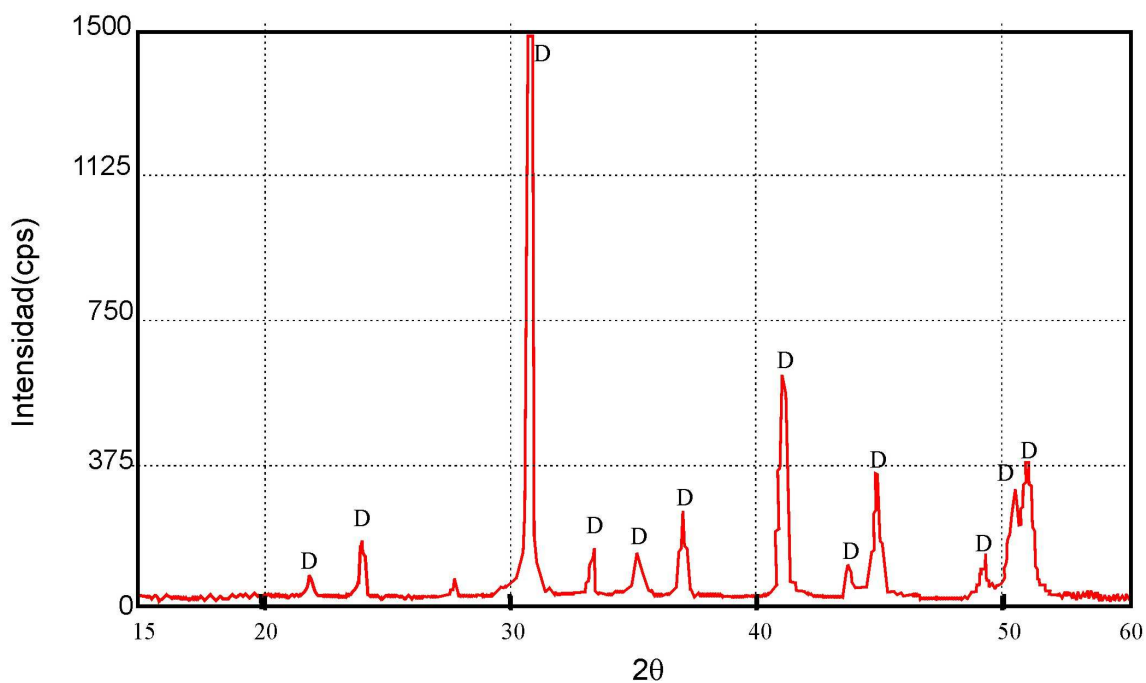


Figura 3.2 DRX de la muestra de roca natural M4 (ver tabla A.6 en Anexo A)

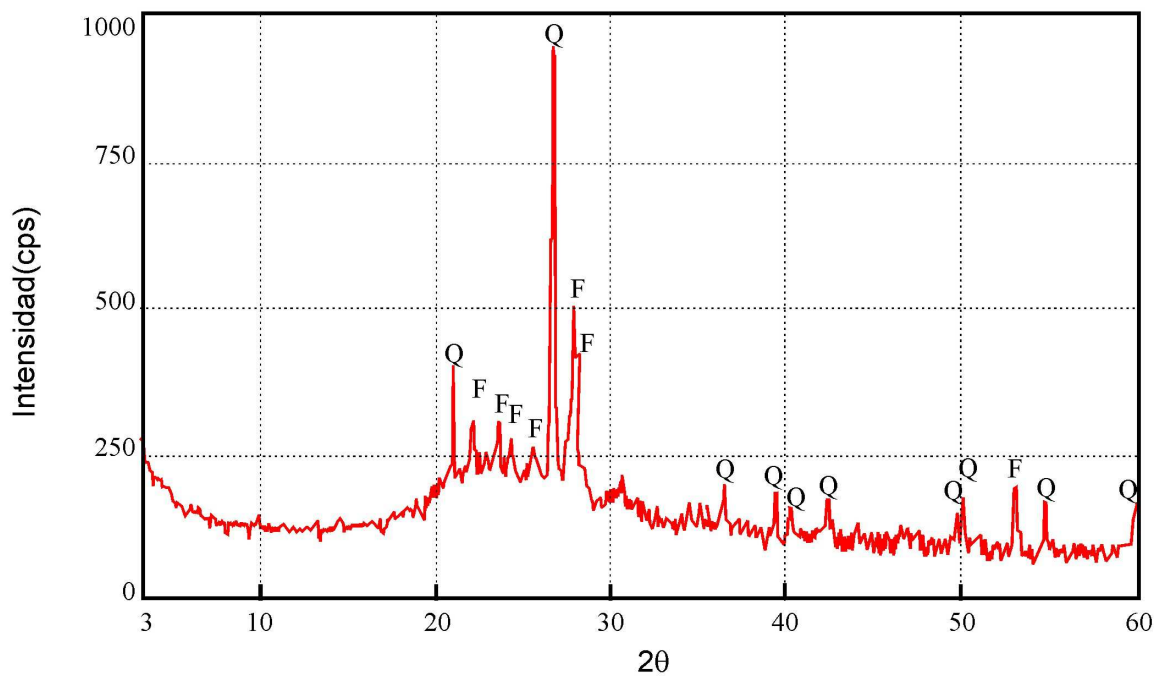


Figura 3.3 DRX del RI de la muestra de roca M4 (ver tabla A.7 en Anexo A)

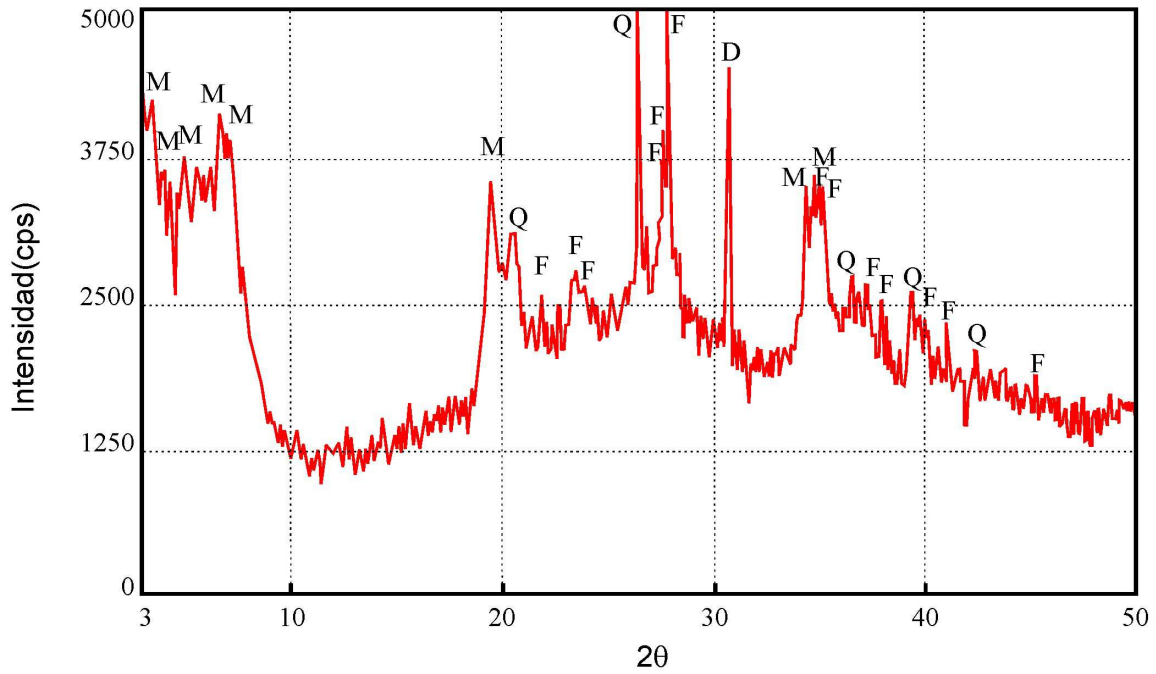


Figura 3.4 DRX de la fracción arcillosa concentrada de la muestra de roca M4 (ver tabla A.8 en Anexo A)

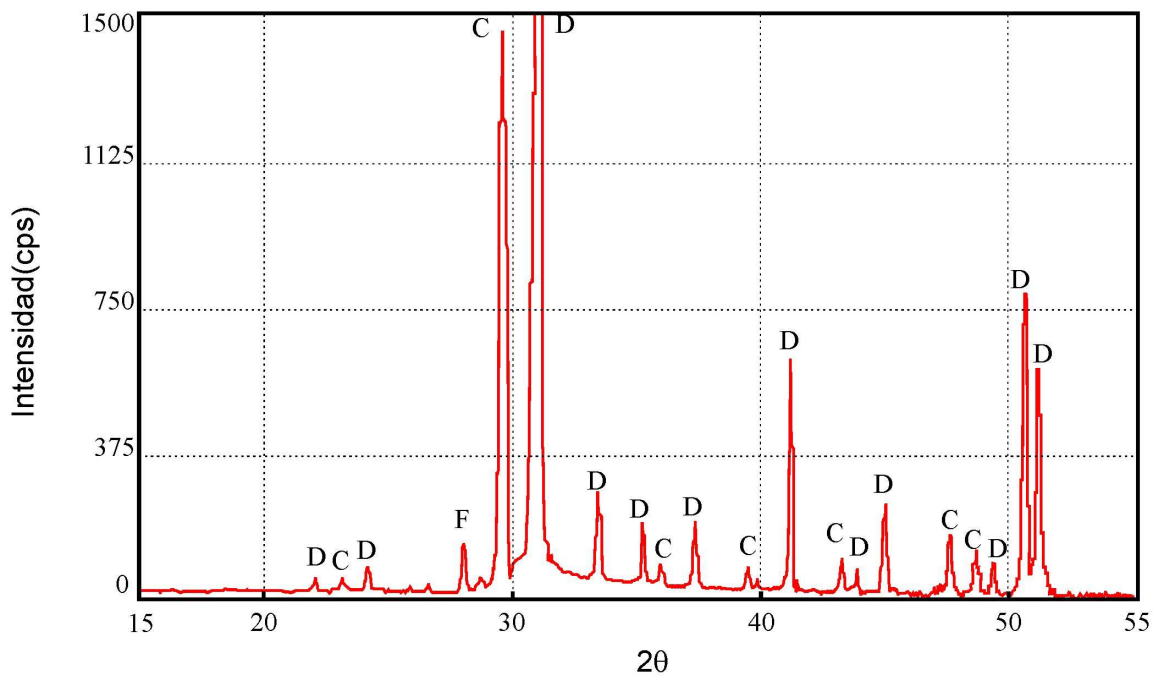


Figura 3.5 DRX de la muestra de roca natural M5 (ver tabla A.9 en Anexo A)

Como se verá en el punto 3.1.1.2, la muestra M6 sólo fue ensayada mediante el método del cilindro de roca ASTM C 586. Sobre esta muestra no se realizaron cortes delgados. Sin embargo, de acuerdo a los AQ (tabla 3.1), es posible inferir que su contenido de calcita es muy bajo o nulo. Esta muestra posee un contenido de residuo insoluble inferior al 3 %.

Ambas muestras de roca pueden clasificarse como caliza dolomítica macroesparítica.

M8. Procedente de la zona de Tumbaya, provincia de Jujuy. La roca es de color gris claro, en algunos sectores amarillo verdoso. El tamaño de grano es fino (afanítico), con estratificación poco marcada. Es una roca compacta y fresca.

Al microscopio se observa una textura homogénea, constituida por pequeñas secciones subhedrales a euhedrales de calcita y dolomita, con tamaños de grano que varían entre 70 μm y 100 μm (tipo esparita). Se observan, además, grietas irregulares, rellenas por secciones euhedrales de calcita, óxidos de hierro y arcilla. Esta última también se encuentra distribuida intersticialmente en toda la roca.

Del análisis de los datos de la tabla 3.1 (AQ), surge que el contenido de calcita es muy bajo. Por DRX (figura 3.6) se identificó dolomita y muy escasa cantidad de calcita, cuarzo y feldespato (solo aparecen las reflexiones más intensas en 3,034 Å, 3,342 Å y 3,199 Å) (tabla A.10).

La densidad relativa y absorción de esta muestra son iguales a 2,70 y 0,5 %, respectivamente. El valor de su residuo insoluble es 8 %. La roca se clasifica como dolomía esparítica.

En la tabla 3.2 se sintetizan las principales características petrográficas de las rocas, su composición mineralógica y algunas propiedades físicas (densidad y absorción). A partir del análisis de esta tabla, es posible realizar las siguientes consideraciones:

- ✓ *Textura*: Ninguna de las muestras analizadas posee la textura característica distintiva de las rocas dolomíticas típicamente reactivas debido a la RAC (ACI Committee 221, 1998; CSA, 2009a; AASHTO, 2010; ASTM, 2010a). No se identificó la textura bimodal que en ocasiones se observa en este grupo de rocas (pequeños cristales de dolomita flotando en una matriz de calcita microcristalina).

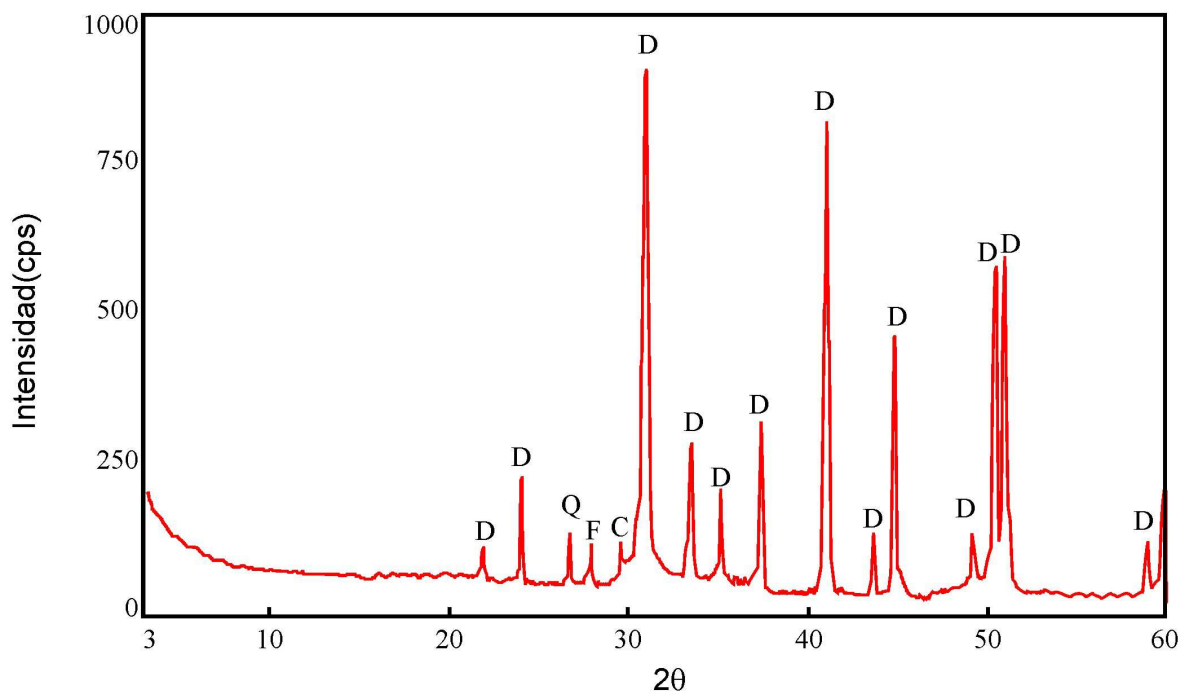


Figura 3.6 DRX de la muestra de roca natural M8 (ver tabla A.10 en Anexo A)

Tabla 3.1 Análisis químicos de las muestras de roca empleadas en este estudio

Muestra	PPC (%)	CaO (%)	MgO (%)	R ₂ O ₃ (%)	RI (%)	Total (%)
M1	51,0	26,5	18,3	1,0	3,3	100
M2	34,4	23,8	16,5	1,5	23,3	99
M3	40,1	23,8	19,5	1,6	13,7	99
M4	41,8	28,1	16,8	1,2	10,7	99
M5	45,6	43,8	6,9	0,8	2,9	100
M6	45,0	29,4	22,5	0,0	2,6	100
M7	40,0	23,6	18,0	1,3	17,9	101
M8	43,0	27,7	19,7	1,5	8,1	100
M9	nd	nd	nd	nd	nd	nd
M10	44,1	30,5	20,5	nd	nd	nd

PPC: Pérdida por calcinación; CaO: Óxido de calcio; MgO: Óxido de magnesio;
 R₂O₃: Óxidos trivalentes precipitables por amoníaco; RI: Residuo insoluble; nd:
 No disponible

Tabla 3.2 Principales características de las rocas empleadas en este estudio

Muestra de roca	Clasificación petrográfica	Origen	Minerales identificados por DRX ⁽¹⁾	Tamaño de los cristales de dolomita (mm)	Residuo insoluble (%)	Densidad relativa	Absorción (%)
M1	Dolomía calcítica	Olavarría (Buenos Aires)	D (C, Q)	≈ 150	3	2,70	1,2
M2	Dolomía calcítica	Olavarría (Buenos Aires)	D (C)	≈ 150	23	2,69	1,2
M3	Dolomía calcítica	Olavarría (Buenos Aires)	D (C, Q)	≈ 120	14	2,82	0,4
M4, M7, M9, M10	Dolomía	Valcheta (Río Negro)	D (Y) (RI: Q, F, M)	≈ 20	3 a 18	2,59	5,0
M5, M6	Caliza dolomítica	Alta Gracia (Córdoba)	D, C	≈ 3000	3	2,83	0,3
M8	Caliza dolomítica	Tumabaya (Jujuy)	D (C, Q)	≈ 85	8	2,70	0,5

1) D: dolomita; C: calcita; Q: cuarzo; F: feldespato; M: Montmorillonita; Y: yeso; RI: residuo insoluble. Se estima que los minerales indicados entre paréntesis se hallan presentes, en forma individual, en un % inferior al 10 %.

- ✓ *Tamaño de los cristales de dolomita.* En general, con excepción de la roca de Valcheta, las muestras examinadas son de grano grueso (cristales de dolomita > 50 µm).
- ✓ *Contenido de residuo insoluble (RI).* En general, los RI de las muestras de roca evaluadas (excepto M1, M5 y M6) se ubican dentro del rango que podría considerarse crítico para la RAC. A pesar de esta última excepción (M1, M5 y M6), el valor del RI, en forma aislada, no constituye una condición esencial para la RAC (Ozol, 2006).
- ✓ *Compacidad de la roca.* Como ocurre con la mayoría de las rocas que resultan afectadas por la RAC, las muestras evaluadas en este estudio (excepto las de Valcheta) son compactas, de alta densidad y baja absorción.
- ✓ *Presencia de minerales potencialmente reactivos frente a la RAS.* La única muestra que posee minerales potencialmente reactivos frente a la RAS es la de Valcheta. Esta muestra contiene una baja proporción de fragmentos líticos, de origen volcánico, y algunos componentes silíceos, de carácter amorfo o pobremente cristalino (tabla A.7), que podrían jugar algún papel en su reactividad alcalina potencial.
- ✓ *Presencia de minerales arcillosos expansivos.* Si bien se estima que el contenido de montmorillonita en las muestras de Valcheta (M4 y M7) es inferior al 4 % (Ponce B., com. pers.), su presencia podría contribuir a movimientos expansivos dentro del agregado, en presencia de humedad.

En resumen (tabla 3.3), si bien la dolomía de Valcheta no tiene la textura característica de las rocas potencialmente reactivas (RAC), posee las dos condiciones necesarias señaladas por Ozol (2006) para esta reacción: estar constituida por cristales de dolomita de grano fino ($< 50 \mu\text{m}$) y tener una estructura porosa que permita el ingreso de los álcalis a la roca. Paralelamente, la detección de fragmentos líticos, de origen volcánico, además de algunas variedades de sílice amorfa o pobremente cristalina, harían factible también su reactividad alcalina frente a la RAS.

El resto de las rocas, desde el punto de vista petrográfico, no reúne las condiciones necesarias para ser consideradas potencialmente reactivas (RAS y/o RAC), pudiendo ser calificadas como inocuas.

Tabla 3.3 Concordancia entre los atributos característicos de los agregados dolomíticos susceptibles a la RAC y los hallados en las muestras de roca de este estudio

Muestra de roca	Textura característica (1)	Cantidades abundantes de calcita y dolomita	Residuo insoluble elevado ($> 5\%$)	Dolomita de grano fino ($< 50 \mu\text{m}$)	Elevada permeabilidad (alta absorción)
M1	No	No	No	No	No
M2	No	No	Sí	No	No
M3	No	No	Sí	No	No
M4, M7, M9, M10	No	No	Sí	Sí	Sí
M5, M6	No	Sí	No	No	No
M8	No	No	Sí	No	No

1) Cristales de dolomita dispersos en una matriz de calcita microcristalina (textura bimodal)

3.1.1.2. Método del testigo de roca (ASTM C 586 modificado)

En la figura 3.7 se representan los valores de expansión de testigos de roca cilíndricos (muestras M1, M2, M3, M5 y M6), hasta los tres años de inmersión alcalina. Los resultados indicados en esta figura corresponden al promedio de cuatro a cinco valores de ensayo, excepto en la muestra M5, para la cual se extrajeron sólo dos testigos. En esta figura se indica, además, en línea de trazos, el valor máximo de expansión (0,10 %) que habitualmente recomienda la literatura para considerar la roca potencialmente reactiva (ASTM, 2010d; Rogers, 1986a).

En la figura 3.7 es posible distinguir la existencia de un periodo inicial de contracción en las muestras M1, M2 y M3, seguido por otro de expansión, que culmina,

aproximadamente, a los 15 meses de inmersión. A partir de allí, la longitud de los testigos se estabiliza, registrándose valores de expansión inferiores a 0,10 %. No se observaron productos de reacción sobre la superficie de los testigos o precipitados en la solución de ensayo.

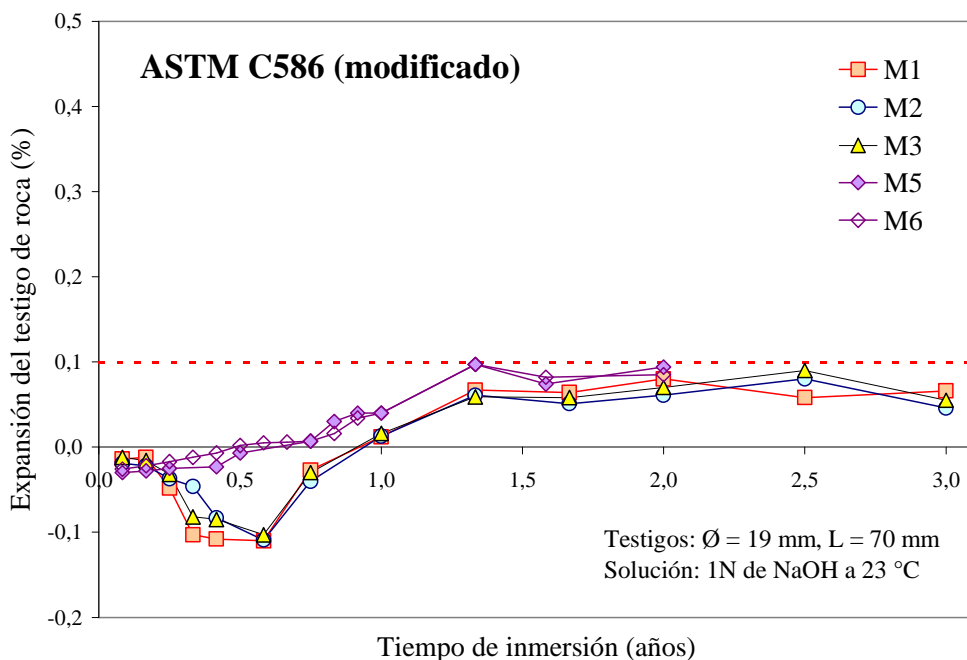


Figura 3.7 Resultados del ensayo ASTM C 586 modificado (muestras M1, M2, M3, M5 y M6).

Si bien el comportamiento indicado en la figura 3.7 (contracción-expansión) es similar al descrito por Dolar-Mantuani (1971) para las rocas de expansión tardía (ver figura 1.20), los valores de expansión alcanzados en este estudio son significativamente más bajos. Este análisis, sin embargo, es de interés puramente académico, ya que como se verá seguidamente, estas rocas no poseen un comportamiento deletéreo en el hormigón, lo cual, corrobora experiencias similares realizadas por otros autores (Walker, 1978).

En la figura 3.8 se representan los valores de expansión de los testigos de la muestra M4, en forma individual (M4-1, M4-2 y M4-3), debido a la elevada dispersión hallada en los resultados. La figura 3.9 muestra el comportamiento observado en dos testigos pertenecientes a la muestra M7.

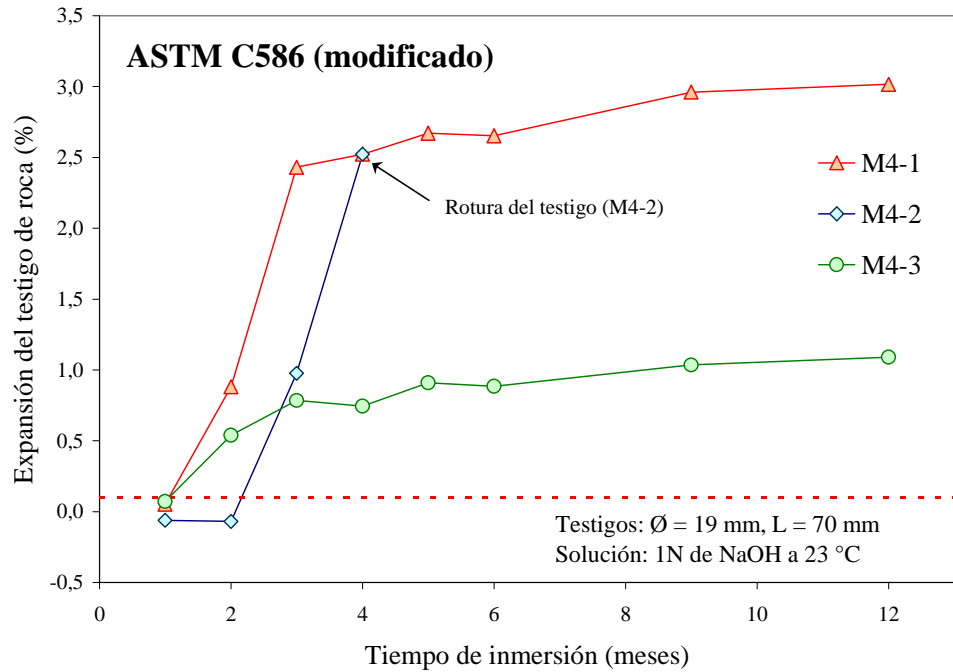


Figura 3.8 Resultados del ensayo ASTM C 586 modificado (muestra M4)

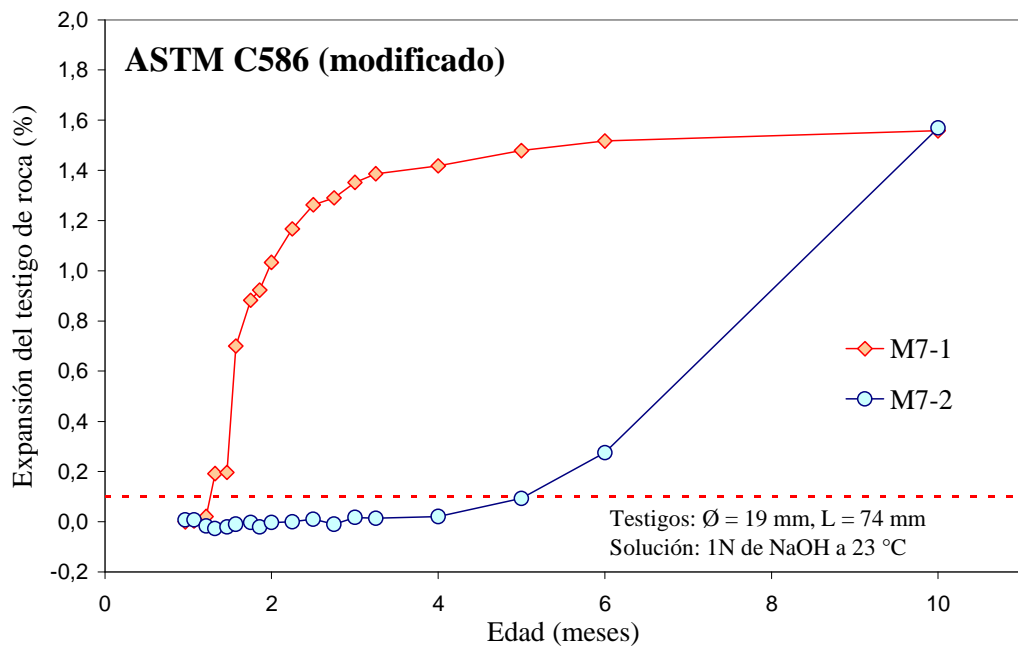


Figura 3.9 Resultados del ensayo ASTM C 586 modificado (muestra M7)

A partir del análisis de las figuras 3.8 y 3.9, es posible destacar las siguientes observaciones:

- ✓ Si bien el comportamiento individual de los testigos es muy diferente entre sí, es claro que estas muestras de roca (M4 y M7) poseen un comportamiento visiblemente expansivo, especialmente a largo plazo, donde se han llegado a medir cambios de longitud de hasta el 3 %.

Como se mencionó en 1.6.2.3, existen numerosas referencias en la literatura que destacan la marcada sensibilidad que posee este método de ensayo a las variaciones de la litología de la roca (Hugenberger, 1986; Deng *et al.*, 1993; Shu y Deng, 1996; Ozol, 2006). Si se tiene en cuenta, además, que en este estudio los testigos fueron extraídos de distintos bloques de roca, con dirección aleatoria (por no ser discernibles los planos de estratificación), se comprende que la elevada dispersión encontrada sea factible.

- ✓ En general, en coincidencia con lo señalado por la norma ASTM C 586 (2010d), las tendencias expansivas de estas muestras se manifiestan después de los 28 días. Habitualmente, a esta edad, las expansiones no llegan a 0,10 %. A las 16 semanas, en cambio, las expansiones se ubican entre 0,7 % y 2,5 %, llegando en algunos casos a provocar la rotura del testigo (Batic y Milanesi, 1991).
- ✓ A pesar de la presencia de numerosas fisuras y de las importantes expansiones registradas en los testigos de ensayo, no se identificaron manchas, geles, decoloraciones o productos de reacción sobre estos.

Las fisuras se detectaron cuando la expansión de los testigos se ubicó entre 0,5 % y 1,0 %. Las fisuras, en general, se presentaron visibles a ojo desnudo, aunque en algunos casos fue necesaria una lupa (4,2x) para su detección. Sobre el particular, Newlon y Sherwood (1962) informan que las fisuras se observan a niveles de expansión sustancialmente inferiores (entre 0,05 % y 0,50 %, aproximadamente). Es importante destacar, sin embargo, que la dimensión transversal de los testigos empleados por estos investigadores (6 mm) es muy inferior a la de los utilizados en estas experiencias, lo cual, permite explicar las diferencias citadas. En los testigos de mayor dimensión, la restricción que genera el núcleo central, que todavía no ha reaccionado, es comparativamente mayor, lo cual, difiere la formación de las fisuras, permitiendo que éstas aparezcan a niveles de expansión algo mayores (obs. pers.).

- ✓ Otro aspecto interesante a destacar es la forma que adoptan las curvas “Expansión vs. Tiempo”. En forma similar a lo que ocurre en el hormigón (Batic y Sota, 2001), en estas curvas es posible distinguir tres fases:
- Fase de inducción. Durante este período, la longitud de los testigos permanece razonablemente estable e incluso es posible verificar una ligera contracción. En estas experiencias, se ha comprobado que la duración de este período puede extenderse entre uno y dos meses. Sin embargo, es altamente probable que la duración de esta fase dependa de otros factores tales como el grado de reactividad de la roca y la dimensión transversal del testigo. Para el caso de una roca de elevada reactividad y un testigo de pequeña dimensión transversal, es posible que la fase de inducción sea muy breve, llegando a ser imperceptible (obs. pers.). Las experiencias realizadas por Dolar-Mantuani (1971), Grattan-Bellew (1981), Sims (1981) y Williams y Rogers (1991) dan prueba de lo mencionado precedentemente.
 - Fase de expansión principal. Durante el transcurso de este período la expansión del testigo crece en forma lineal con el tiempo y se detectan las primeras fisuras.
 - Fase de expansión final (o de expansión tardía). A largo plazo, las expansiones crecen muy lentamente o se detienen. En estos estudios, no se han realizado estudios adicionales para investigar si este comportamiento comienza a manifestarse una vez que la reacción dedolomitización ha afectado todo el espesor del testigo o si existe alguna otra razón. Se presume que el estudio de este fenómeno permitirá echar luz sobre el mecanismo expansivo de esta roca.

Con el propósito de evaluar posibles cambios en la composición mineralógica de la roca durante el transcurso del ensayo ASTM C 586 (modificado), se efectuaron algunos estudios mediante DRX sobre los testigos de las muestras M1, M4 y M5 (Anexo A: tablas A11 a A16).

Estos estudios se llevaron a cabo sobre dos tipos de muestra: una denominada “de borde”, obtenida por raspado de la superficie del testigo, y otra “integral”, lograda a partir de la molienda completa del testigo. Estos difractogramas fueron comparados con los

obtenidos sobre muestras de roca natural (sin tratamiento) con el fin de indagar la posible formación de nuevas especies minerales o cambios en la relación calcita/dolomita (C/D).

En la tabla 3.4 se indican las edades de ensayo de los testigos al momento de realizar el estudio, los cambios dimensionales registrados hasta ese momento, la nómina de los minerales identificados mediante DRX y la relación C/D, calculada a partir de la relación de las intensidades de las reflexiones correspondientes a calcita (3,035 Å) y dolomita (2,883 Å).

Tabla 3.4 Resultados de las evaluaciones efectuadas mediante DRX en muestras de roca natural y en testigos del ensayo ASTM C 586

Muestra de roca	Edad de evaluación (meses)	Expansión del testigo (%)	Minerales identificados por DRX ^(1,2)		
			Roca natural (sin tratamiento)	Testigo de roca en NaOH ⁽³⁾ Integral	De borde
M1	5,5	-0,11	D, C, Q (C/D = 0,15)	D, C, Q (C/D = 0,04)	D, C, Q (C/D = 0,16)
M4	5,0	2,50	D (C/D = 0,00)	D, C, B (C/D = 0,18)	D, C (C/D = 0,40)
M5	3,5	-0,02	D, C (C/D = 0,13)	D, C (C/D = 0,04)	D, C (C/D = 0,18)

1) D: dolomita; C: calcita; Q: cuarzo; B: Brucita

2) C/D: Relación de las intensidades (cps) de las reflexiones principales correspondientes a calcita ($d1 = 3,035 \text{ Å}$) y dolomita ($d1 = 2,883 \text{ Å}$)

3) Integral: La muestra analizada se obtiene a partir de la molienda completa del testigo; De borde: La muestra analizada se obtiene de la superficie del testigo, por raspado.

A partir del análisis de la tabla 3.4 es posible efectuar las siguientes consideraciones:

- ✓ *Muestra M1.* Los minerales dominantes en las tres muestras de roca examinadas (natural, de borde e integral) son dolomita (D), calcita (C) y cuarzo (Q). En ninguna de las muestras extraídas de los testigos se detectó la presencia de brucita. Además, el valor de la relación C/D de la muestra extraída del borde del testigo (zona de mayor ataque) no difiere en forma significativa de aquel correspondiente a la muestra de roca natural. Estas observaciones, en conjunto, permiten presumir que el ataque químico sobre esta roca ha sido muy leve. El hecho de que la relación C/D de la muestra integral haya sido tan baja es atribuido a las heterogeneidades propias de la litología de la roca.

- ✓ *Muestra M4.* Esta muestra presenta una característica muy singular y es que todas las reflexiones identificadas en la muestra natural (sin alteración) corresponden, casi con exclusividad, a dolomita, lo cual, hace que el proceso de dedolomitización pueda ser detectado fácilmente.

Como es posible observar en la tabla A.13, el difractograma correspondiente a la muestra integral testifica la formación de calcita y brucita como resultado del proceso de dedolomitización. En este caso, la relación C/D se incrementó desde cero (muestra sin alteración) a 0,18 (muestra integral). Si bien, en la muestra extraída del borde del testigo no se detectó la presencia de brucita, la relación C/D de esta zona ($C/D = 0,40$) fue mucho mayor que la correspondiente a la muestra integral ($C/D = 0,18$), lo que marca que el proceso de reacción en la zona superficial fue más intenso que en la zona del núcleo.

- ✓ *Muestra M5.* En las tres muestras de roca examinadas (natural, de borde e integral) se detectaron dos especies minerales dominantes: dolomita (D) y calcita (C). En base a un análisis similar al realizado en la muestra M1, es posible presumir que el ataque químico sobre esta roca, de gran estabilidad volumétrica (contracción = 0,02 %), ha sido muy leve.

En resumen, en vista del comportamiento expansivo registrado en los testigos de roca M4 y M7 y las manifestaciones de reacción verificadas (fisuras y dedolomitización), la roca de Valcheta debe considerarse potencialmente reactiva, siendo recomendable la realización de ensayos adicionales sobre morteros u hormigones para verificar esta condición.

A fin de evaluar la influencia negativa que podría ejercer la presencia de montmorillonita en esta roca, se sometió una muestra de la misma (M9) al ensayo de inmersión en etilen glicol, siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1519-1982 (IRAM, 1982).

El etilen glicol es un producto orgánico que expande la red cristalina de la montmorillonita con mayor intensidad que el agua (Higgs, 1976). Este recurso es empleado por la norma IRAM 1519-1982 para evaluar la estabilidad de los basaltos con arcillas expansivas. Este método es considerado muy exigente y asimilable a un tratamiento acelerado de mojado y secado (Cortezzi *et al.*, 1986; Traversa y Giovambattista, 1987;

Traversa *et al.*, 1987). Si la pérdida en peso de la muestra de roca, luego de un período de inmersión en etilen glicol de 30 días, es inferior al 10 %, se considera que la roca es estable y que la presencia de montmorillonita puede considerarse inocua (INTI-CIRSOC, 1982, 2005). La pérdida en peso registrada en este ensayo (0 %) mostró que la muestra de roca evaluada (M9) presentó un comportamiento estable frente al etilen glicol (Milanesi y Batic, 1994).

En la figura 3.10 se muestran resultados de una experiencia similar, en la que se evaluó la estabilidad dimensional de dos testigos de roca (M7-1 y M7-2) sumergidos en etilen glicol, a temperatura ambiente, durante dos meses. Luego de este período, los testigos fueron transferidos a una solución 1N de NaOH, a temperatura ambiente, y se registraron los cambios dimensionales durante seis meses.

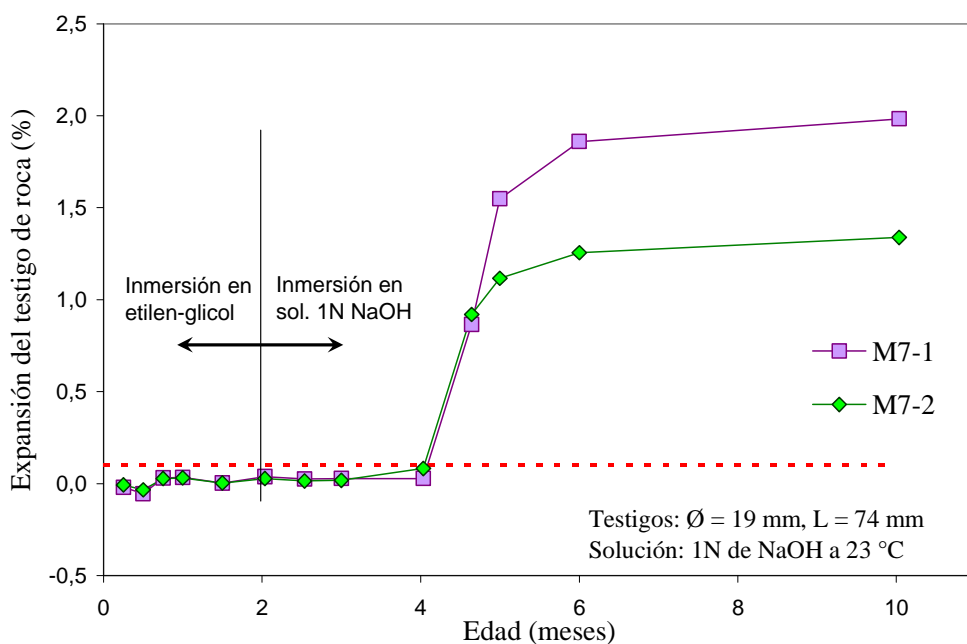


Figura 3.10 Comportamiento de testigos de roca inmersos en etilen glicol y luego en solución 1N de NaOH (muestra M7)

Los resultados representados en la figura 3.10 confirman lo mencionado precedentemente. A pesar de la presencia de montmorillonita en esta roca, la respuesta de los testigos al etilen glicol fue nula. Posteriormente, en la solución alcalina, luego del período de inducción del orden de dos meses, característico en estas muestras (figuras 3.8 y 3.9), las expansiones se hicieron presentes en toda su magnitud.

Para confirmar el rol de la componente arcillosa (montmorillonita) en el comportamiento expansivo de la dolomía de Valcheta, se realizaron algunas experiencias adicionales midiendo la expansión de testigos de roca inmersos en distintas soluciones de contacto. Para ello, se extrajeron, por aserrado, tres testigos prismáticos (25 mm x 25 mm x 70 mm) de dos fragmentos de roca diferentes (designados como 1 y 2).

De a pares (un prisma del fragmento 1 y otro del 2), los testigos fueron sumergidos en agua, etilen glicol y en solución 1N de NaOH, a temperatura ambiente (23 ± 2 °C), registrando los cambios dimensionales en forma periódica. En la tabla 3.5 se informan los resultados de expansión obtenidos.

Tabla 3.5 Expansión de testigos de roca (25 x 25 x 70 mm) inmersos en distintas soluciones de contacto (muestra de roca M9)

Testigos de roca	Expansión del testigo (%) ⁽¹⁾		
	1N de NaOH (4 meses)	Etilen glicol (4 meses)	Agua (9 meses)
M9-1	0,284	0,033	0,000
M9-2	Roto ⁽²⁾	0,028	0,003

1) Testigos de roca prismáticos (25 mm x 25 mm x 70 mm).

2) La rotura del testigo se produjo para una expansión superior a 2,5 %, antes de los dos meses de estacionamiento.

Si bien es claro que los testigos provenientes de ambos fragmentos presentan una elevada expansión en la solución alcalina ($> 0,20$ % a 4 meses), sus velocidades de reacción son bien disímiles. Este hecho confirma, una vez más, la gran influencia que ejercen la heterogeneidad de la roca y la dirección de extracción del testigo sobre los resultados de este método, entre otros factores.

Los cambios dimensionales de los testigos inmersos en agua y etilen glicol no fueron significativos, lo cual, permite minimizar la influencia de la montmorillonita en el mecanismo expansivo de esta roca.

A fin de explorar el grado de relación que existe entre expansión y reacción en los testigos que estuvieron sumergidos en solución 1N de NaOH, durante cuatro meses (M9-1 y M9-2, tabla 3.5), se realizaron estudios complementarios mediante DRX y SEM. Las

reflexiones identificadas correspondientes a las muestras de roca, con y sin tratamiento (testigos de roca luego de cuatro meses de ensayo vs. muestras sin alterar), se indican en el Anexo A (tablas A.17 a A.20). En la tabla 3.6 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 3.6 Resultados de las evaluaciones efectuadas mediante DRX en muestras de roca natural y del ensayo ASTM C 586 modificado

Testigo de roca M9	Minerales identificados y relaciones obtenidas mediante DRX						
	Roca natural (sin tratamiento)			Testigo de roca en NaOH ⁽¹⁾			
	Calcita	Brucita	C/D ⁽²⁾	Calcita	Brucita	C/D ⁽²⁾	Expansión (%)
M9-1	No	No	0,00	Sí	Sí	0,09	≈ 0,3
M9-2	No	No	0,00	Sí	Sí	0,34	> 2,5

1) *Luego de un período de inmersión de cuatro meses en solución 1N de NaOH a 23 °C.*

2) *C/D: Relación de las intensidades (cps) de las reflexiones correspondientes a calcita (3,035 Å) y dolomita (2,883 Å).*

Como es habitual en la roca de Valcheta (M9), las reflexiones de las muestras sin alterar corresponden exclusivamente a dolomita. En las muestras sometidas al ataque alcalino, en cambio, aparecen dos fases adicionales (calcita y brucita), resultantes del proceso de dedolomitización.

El análisis comparativo de estos difractogramas permite confirmar, además, que existe una relación directa entre expansión y reacción. Mientras la muestra obtenida a partir del testigo M9-1 (expansión = 0,284 %) presenta una relación C/D igual a 0,09, la relación correspondiente al testigo M9-2 (expansión > 2,5 %) llega a ser casi cuatro veces mayor (C/D = 0,34).

La figura 3.11 muestra el aspecto de un trozo de la muestra de roca M9, vista con microscopio electrónico de barrido (SEM), extraída del fragmento 1, sin alterar. Además de los cristales de dolomita, se observa un material que, por su morfología, probablemente corresponda a arcillas (illita y/o montmorillonita).

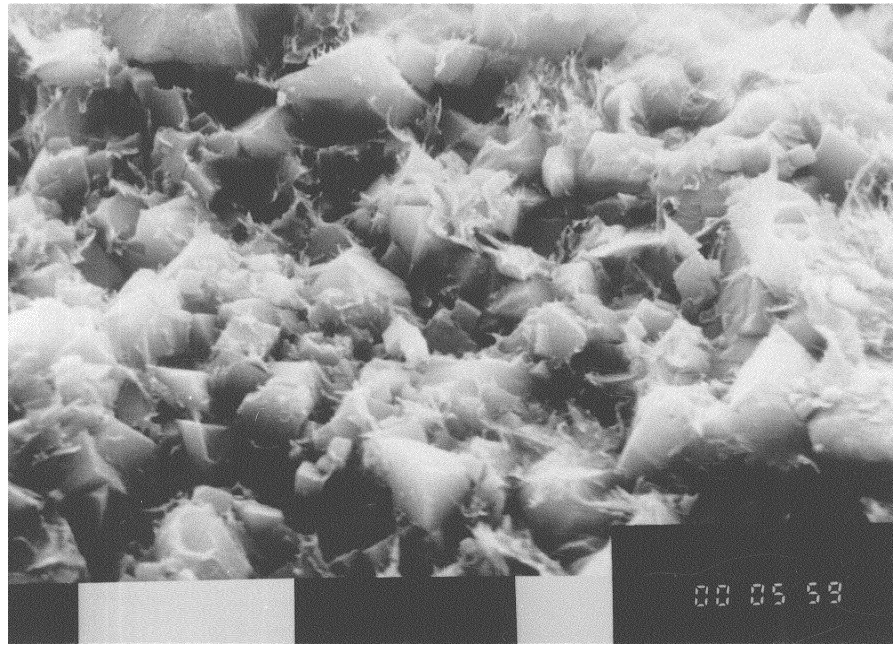


Figura 3.11 Aspecto de la muestra de roca M9 natural (fragmento 1)
(x 3100, escala 10 μm)

El examen de la microestructura del testigo M9-1 (fragmento 1), luego de cuatro meses de inmersión en la solución alcalina, no muestra signos claros de alteración, excepto en la zona de poros o fisuras, donde, aparentemente, la mayor permeabilidad de la roca facilitó el ingreso de la solución alcalina y el consecuente ataque alcalino o la cristalización de los productos de reacción. En la figura 3.12 (vista de una fisura con SEM) se observan cristales de calcita y dolomita, de tamaños bien diferenciados (los de mayor tamaño corresponden a calcita).

La figura 3.13 corresponde a un trozo de roca M9, sin tratamiento, proveniente del fragmento 2. En general, no se advierten grandes diferencias con la muestra extraída del fragmento 1. Se observan cristales de dolomita y el material arcilloso mencionado anteriormente.

La figura 3.14 muestra el aspecto que presenta el testigo M9-2 al cabo de cuatro meses de ensayo (NaOH). Se observan cristales de calcita con un grado de empaquetamiento más abierto que la roca original y la desaparición del material de aspecto arcilloso.

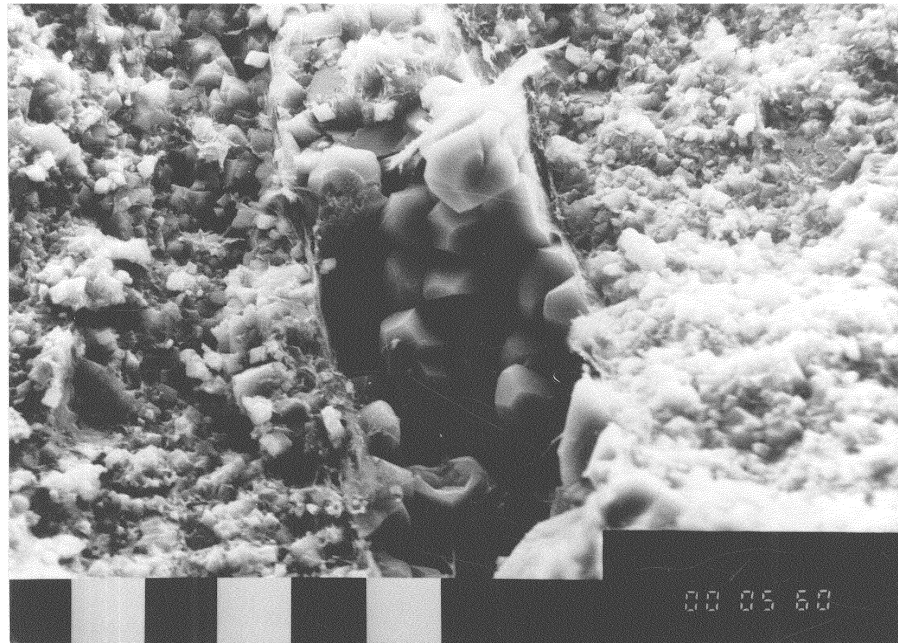


Figura 3.12 Vista de una fisura rellena con calcita en el testigo M9-1 (x 1000, escala 10 μm)

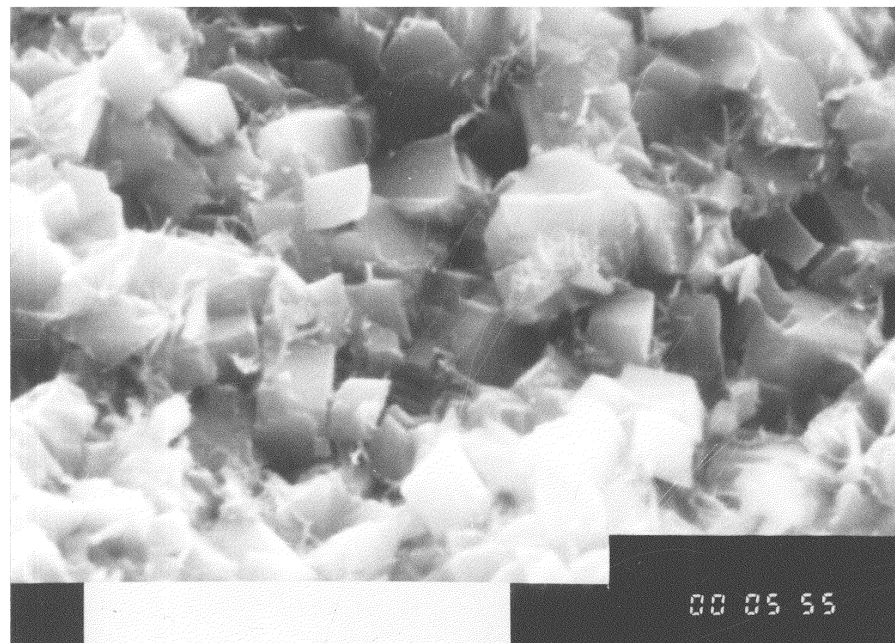


Figura 3.13 Aspecto de la muestra de roca M9 natural (fragmento 2) (x 6200, escala 50 μm)

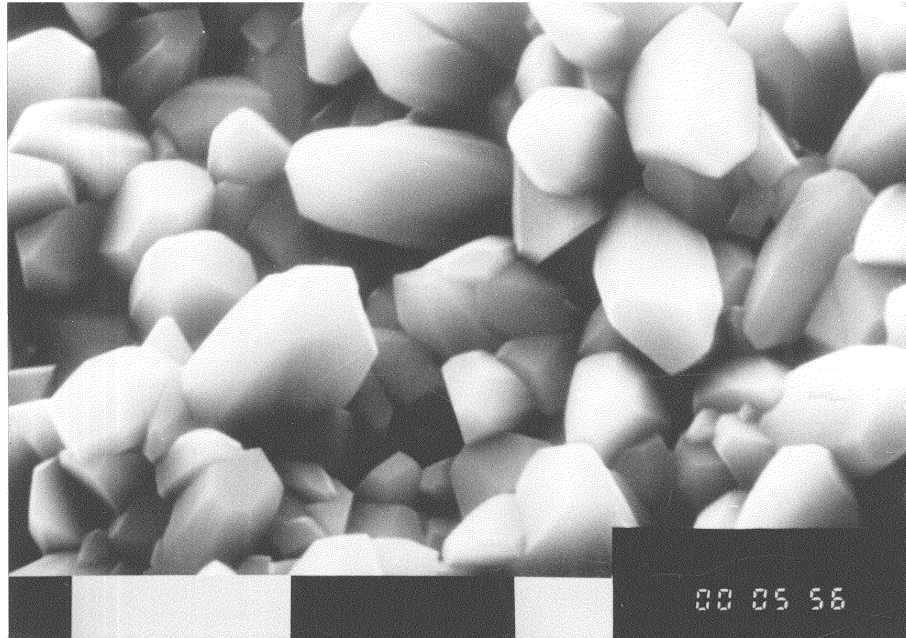


Figura 3.14 Aspecto del testigo M9-2 luego del ataque alcalino (x 3100, escala 10 μm)



Figura 3.15 Aspecto del testigo M9-2 luego del ataque alcalino (x 4000, escala 50 μm)

La figura 3.15 muestra otra vista del ataque alcalino. Sólo se observan cristales de calcita y la presencia de una fisura atravesando un mineral que constituye la roca.

En ningún caso se pudo identificar la presencia de cristales de brucita, a pesar de su detección mediante DRX, lo cual, se debe, en gran parte, al reducido tamaño de sus cristales (Duke *et al.*, 1997; Katayama, 2004; Katayama y Sommer, 2008).

3.1.1.3. Método químico canadiense

En virtud del comportamiento expansivo constatado en las muestras procedentes de Valcheta (M4, M7 y M9), se decidió evaluar la aptitud del método químico canadiense (CSA, 2009e) para predecir el comportamiento deletéreo de esta roca.

En la tabla 3.7 se resumen los resultados de la composición química de la muestra de roca M10. En base a estos datos, en la figura 3.16 se representa la localización del punto correspondiente a esta muestra ($\text{CaO/MgO} = 1,5$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,6$ %), sobre el gráfico semilogarítmico de la norma CSA A23.2-26A.

La relación CaO/MgO obtenida para esta muestra es muy similar al valor mínimo teórico que corresponde a una roca dolomítica pura (1,4). Esto hace que el punto se ubique en la zona del gráfico que corresponde a las rocas calificadas “no expansivas frente a la RAC”, por lo que el agregado debería considerarse inocuo.

Esta contradicción, teniendo en cuenta del comportamiento deletéreo constatado en esta roca, pone en duda la aplicabilidad “universal” de este método. Según el conocimiento del autor, ésta es la primera vez que en la literatura se menciona la limitación de este método para pronosticar el comportamiento expansivo de una roca dolomítica frente a la RAC (Milanesi *et al.*, 2012).

Tabla 3.7 Resultados del análisis químico de la muestra de roca (M10)

Composición (%)							
CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Na_2O	K_2O	PPC
30,5	20,5	0,6	0,2	3,2	0,10	0,09	44,1
PPC: Pérdida por calcinación							

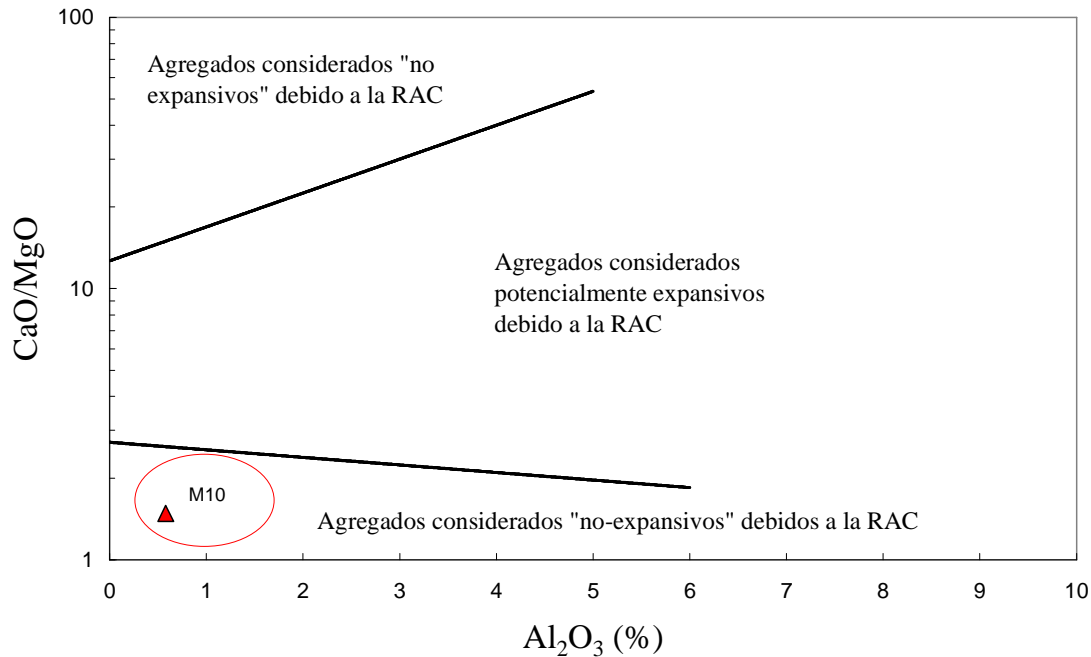


Figura 3.16 Resultado del ensayo químico canadiense (M10)

3.1.2. Ensayos de expansión de barras de mortero

3.1.2.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637)

En la tabla 3.8 se indican los valores de la relación a/c y consistencia de las mezclas ensayadas según la norma IRAM 1637-1992.

Tabla 3.8. Relación a/c y consistencia de los morteros elaborados según IRAM 1637-1992

Aggregado dolomítico ⁽¹⁾	M1	M2	M3	M4	M5	M8
Cemento (designación)	CP1	CP1	CP1	CP1	CP1	CP2
Relación agua/cemento (a/c)	0,60	0,60	0,60	0,77	0,57	0,53
Extendido (flow)	111	105	113	110	117	108

(1) Granulometría según IRAM 1647 (pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 0,150 mm)

En la figura 3.17 se muestran los valores de expansión del mortero hasta la edad de cuatro años. En todos los casos, los valores de expansión informados corresponden al promedio de al menos tres barras, cuyas lecturas se ubican dentro del ± 15 % del valor promedio del grupo.

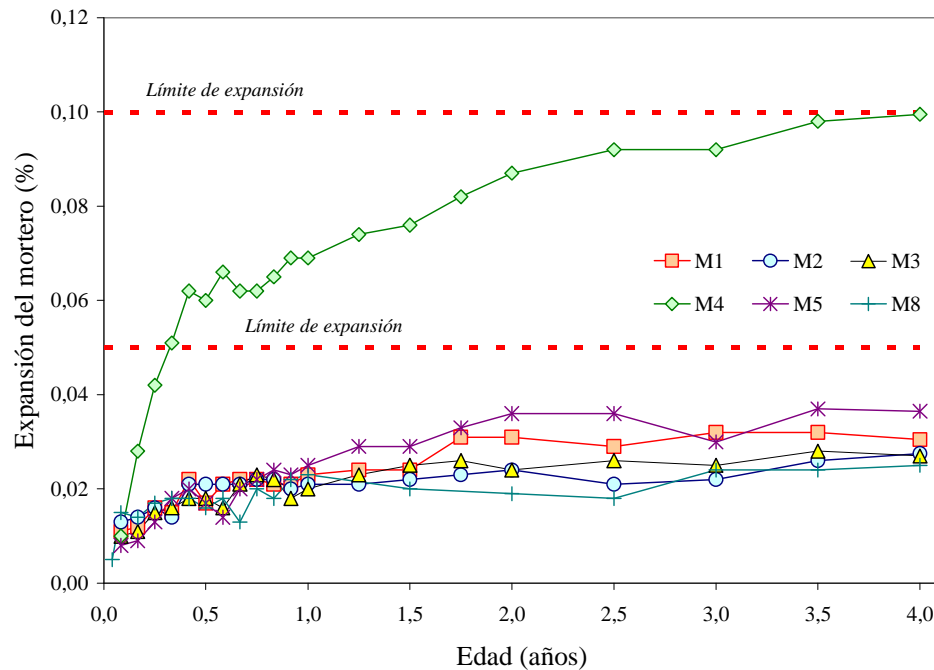


Figura 3.17 Expansión de barras de mortero en el ensayo IRAM 1637-1992

De la observación de la figura 3.17, queda claro que el único mortero que presenta inestabilidad volumétrica es el elaborado con el agregado M4.

Como se indicó en 1.6.3.1, la norma ASTM C 33 (ASTM, 2010a) sugiere que el agregado debe ser considerado potencialmente reactivo (frente a la RAS) cuando la expansión es mayor a 0,05 % o 0,10 %, a los 3 y 6 meses de ensayo, respectivamente. Grattan-Bellew (1989), en cambio, propone un límite más restrictivo y sugiere extender la evaluación hasta los 12 meses (expansión < 0,10 %).

En base a estos límites, el comportamiento expansivo del agregado M4 podría calificarse como “marginal” ya que, si bien la expansión del mortero a los seis meses es importante (0,060 %), a partir de esta edad, la velocidad de reacción disminuye en forma significativa, haciendo que la expansión alcance el límite propuesto por Grattan-Bellew (0,10 %) luego de cuatro años de curado.

A pesar de lo expuesto, si se comparan las expansiones del mortero M4 con los valores típicos que se obtienen al ensayar los célebres agregados canadienses (ver figura 1.2.3 y tabla 1.4), se concluye que los resultados hallados en estas experiencias son

similares a los que reporta la literatura. En resumen, aun cuando el comportamiento de este agregado pueda ser considerado marginal, el nivel de las expansiones registradas es suficientemente importante para que el mismo sea considerado peligroso, en especial, tratándose de un agregado de origen dolomítico.

A pesar de las expansiones registradas en el mortero M4, hasta la edad de ensayo informada, las barras no presentaron signos externos de reacción (exudación de geles) ni fisuras. A escala microscópica (secciones delgadas), sin embargo, se detectaron diversas manifestaciones.

Las figuras 3.18 y 3.19 muestran el aspecto de los bordes de reacción detectados sobre el agregado M4, luego de cinco años de curado, visto con microscopio óptico sobre secciones delgadas, con luz paralela. En la figura 3.19 también se observa gran cantidad de fisuras que atraviesan la pasta y las zonas de interfase.

En la figura 3.20 (con nicols cruzados) se observa un clasto del agregado M4 afectado en forma parcial por el proceso de dedolomitización. En esta figura, los núcleos con más baja birrefringencia son aún dolomíticos.

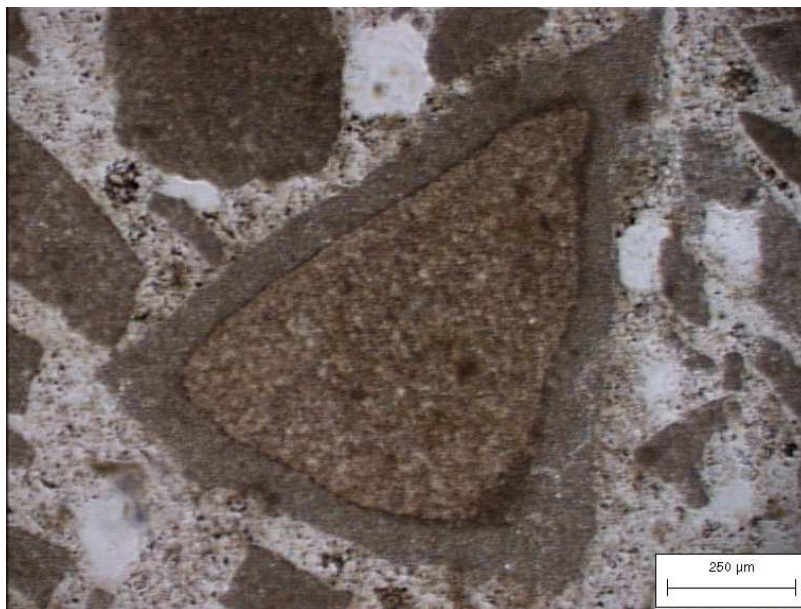


Figura 3.18 Borde de reacción sobre un agregado dolomítico (M4) en una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 5 años de edad

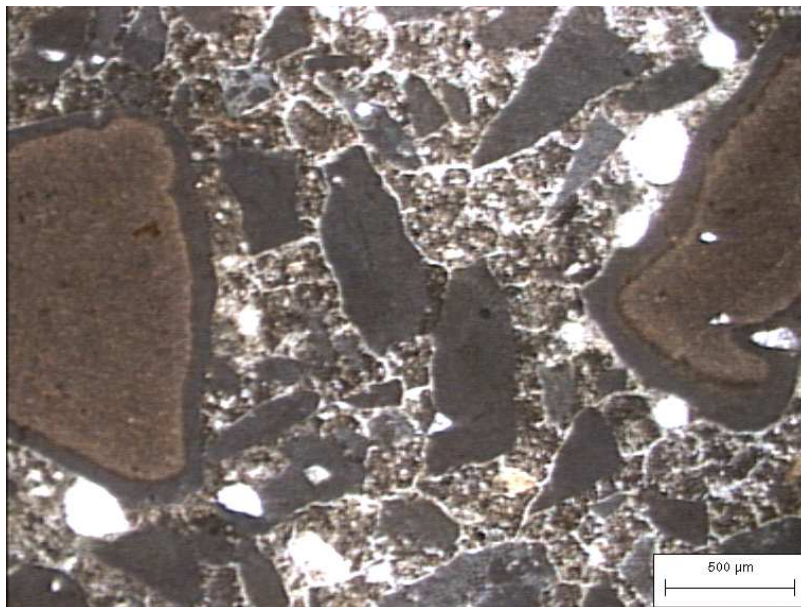


Figura 3.19 Bordes de reacción y fisuras en una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 5 años de edad (agregado M4)

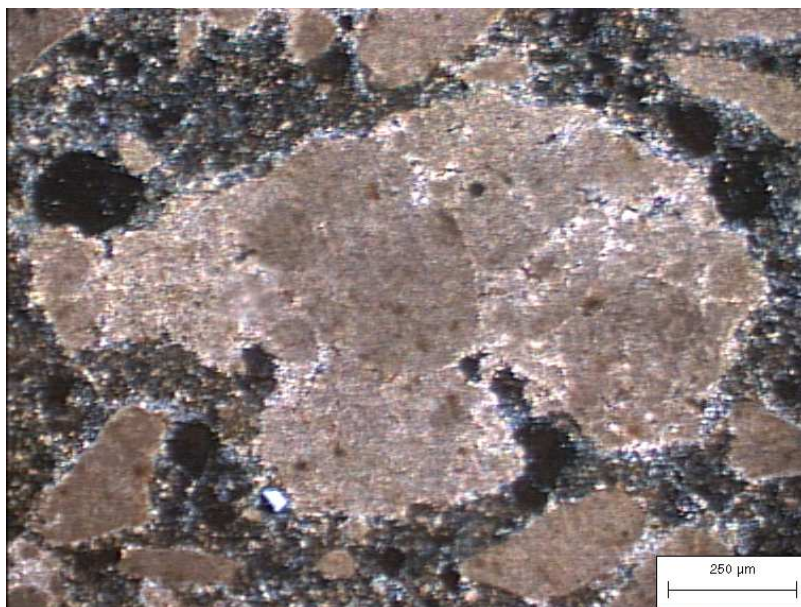


Figura 3.20 Dedolomitización heterogénea sobre un agregado dolomítico (M4) en una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 5 años de edad

Sólo se observaron geles atribuidos a la RAS en forma esporádica, en exigua cantidad y muy localizados (figuras 3.21 a 3.23). Este hecho merece, al menos, tres comentarios.

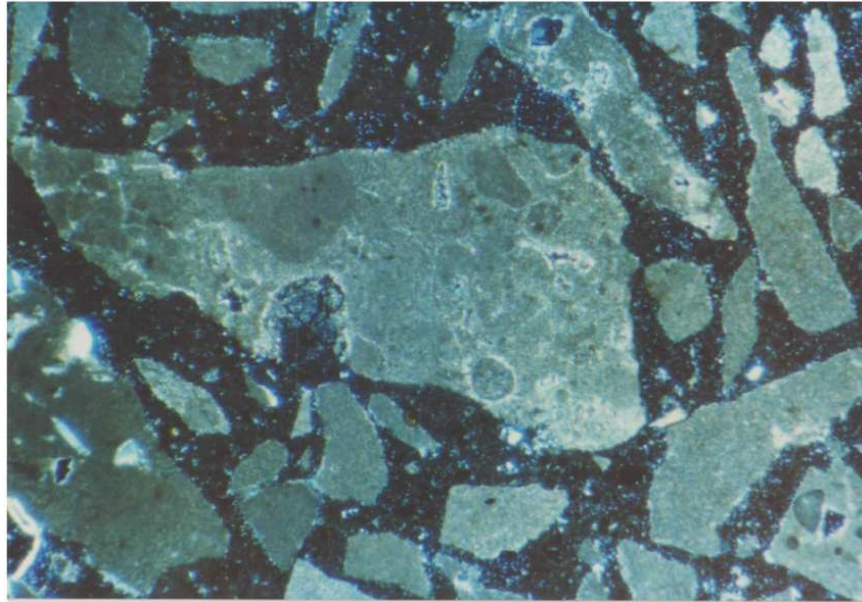


Figura 3.21 Corrosión de borde localizada sobre un clasto del agregado M4. Sección delgada de una barra de mortero IRAM 1637-1992 de 8 meses de edad (x 30)

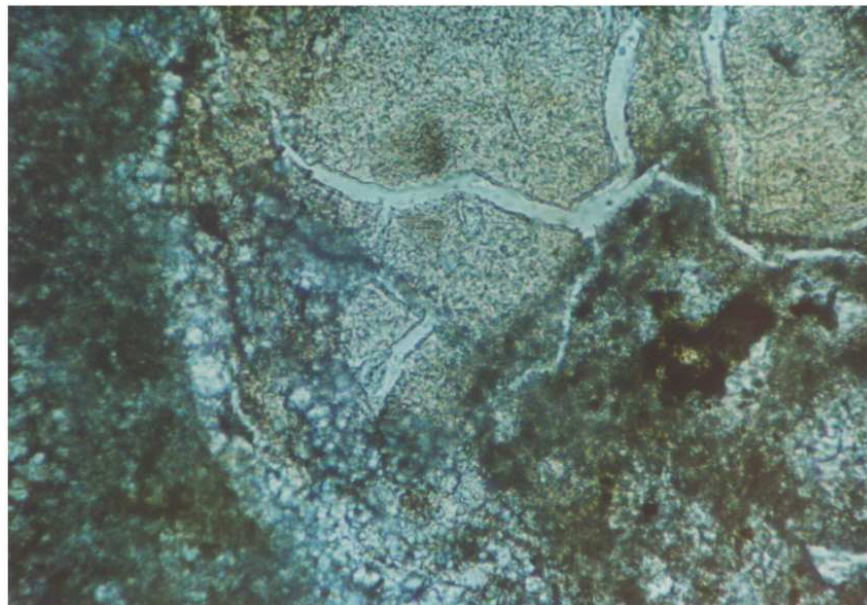


Figura 3.22 Detalle del centro de corrosión indicado en la figura 3.21 con luz paralela (x 300)

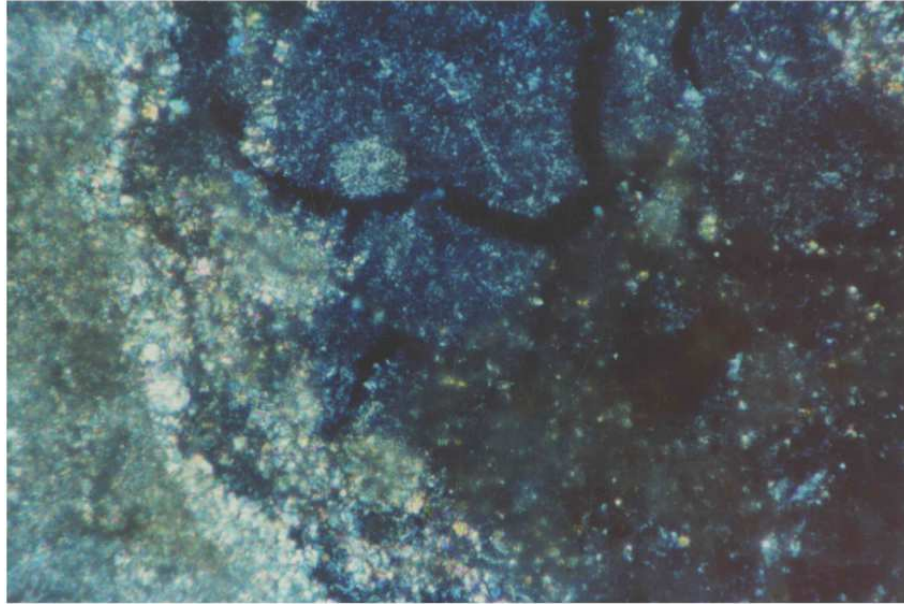


Figura 3.23 Detalle del centro de corrosión indicado en la figura 3.21 con nicoles cruzados (x 300)

En primer lugar, como se indicó en 3.1.1.1, dado que la muestra M4 está constituida por una baja proporción de componentes silíceos lábiles, la detección de algunos depósitos de gel no debe ser motivo de sorpresa. No obstante, su presencia abre la posibilidad de que ambas reacciones (RAS + RAC) puedan estar ocurriendo en forma simultánea (Mather *et al.*, 1964; Hugenberg, 1986; Ozol, 2006). Por último, es importante recordar que la ausencia de cantidades significativas de gel en los morteros u hormigones que expanden debido a la RAC fue siempre considerada un hecho llamativo de esta reacción (Swenson, 1957; Newlon y Sherwood, 1962; Swenson y Guillott, 1964; Grattan-Bellew *et al.*, 2008).

El cambio dimensional registrado en el resto de los morteros evaluados (M1, M2, M3, M5 y M8) es atribuido a la expansión de la pasta cementícea debido a la acción de la elevada humedad ambiente a la que se someten las barras. Como se verá en 3.1.3, esta ligera expansión del mortero no produce consecuencias deletéreas para el hormigón.

3.1.2.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674)

En la tabla 3.9 se indican los valores de la relación a/c y consistencia de las mezclas ensayadas según la norma IRAM 1674-1997, con las modificaciones indicadas en el capítulo 2. Se resumen, además, los resultados de expansión obtenidos a los 14 días de inmersión en la solución alcalina (1N de NaOH a 80 °C).

Tabla 3.9. Relación a/c y consistencia de los morteros elaborados según IRAM 1674-1997

Agregado dolomítico	M2	M3	M5	M7	M8	M9
Cemento	CP2	CP2	CP2	CP1	CP2	CP2
Relación agua/cemento (a/c)	0,61	0,53	0,48	0,77	0,53	0,74
Extendido (flow)	130 ⁽¹⁾	120	110	110	108	107
Expansión del mortero a 14 días (%) ⁽²⁾	0,062 ⁽³⁾	0,065 ⁽³⁾	0,018 ⁽³⁾	0,103 ⁽³⁾	0,013	0,093

1) A pesar de haber excedido el valor máximo de flow (120), no pudo reiterarse el ensayo por falta de agregado.

2) Valor de expansión registrado a los 14 días de inmersión alcalina.

3) Morteros que, por cuestiones operativas, recibieron un curado inicial, en cámara húmeda, de 48 horas.

Como se indicó en 1.6.3.2, se considera que un agregado posee características inocuas (frente a la RAS) cuando la expansión del mortero, a los 16 días de edad (14 días de inmersión en solución de NaOH), es inferior a 0,10 % (Milanesi y Batic, 1995; IRAM, 1997a; Falcone *et al.*, 2008; Thomas *et al.*, 2008; AASHTO, 2010; ASTM, 2010h).

Si bien las rocas dolomíticas reactivas (debido a la RAC) experimentan cambios dimensionales notorios en este método, las expansiones del mortero, por lo general, no superan el límite mencionado precedentemente. Por esta razón, este método es desaconsejado en el estudio de la RAC.

Del análisis de los datos de la tabla 3.9, surge que los agregados M2, M3, M5 y M8 pueden ser considerados inocuos, desde el punto de vista de la RAS (expansión_{14 días} < 0,10 %). El comportamiento de los agregados M7 y M9 (Valcheta), en cambio, debe considerarse marginal, por cuanto la expansión registrada, en ambos casos, es muy próxima al límite formal. Estos resultados coinciden con los informados por otros investigadores (Shayan *et al.*, 1988; Lu *et al.*, 2008).

La figura 3.24 muestra un aspecto del proceso de reacción detectado en el agregado M7, en una barra de mortero del ensayo IRAM 1674-1997, a la edad de 28 días. En este caso se observa que el proceso de dedolomitización ha afectado no sólo la periferia

del agregado (borde de reacción) sino también la parte central del clasto, seguramente, debido a la existencia de poros macroscópicos (como el indicado en la figura) que facilitan el ingreso de la solución alcalina.

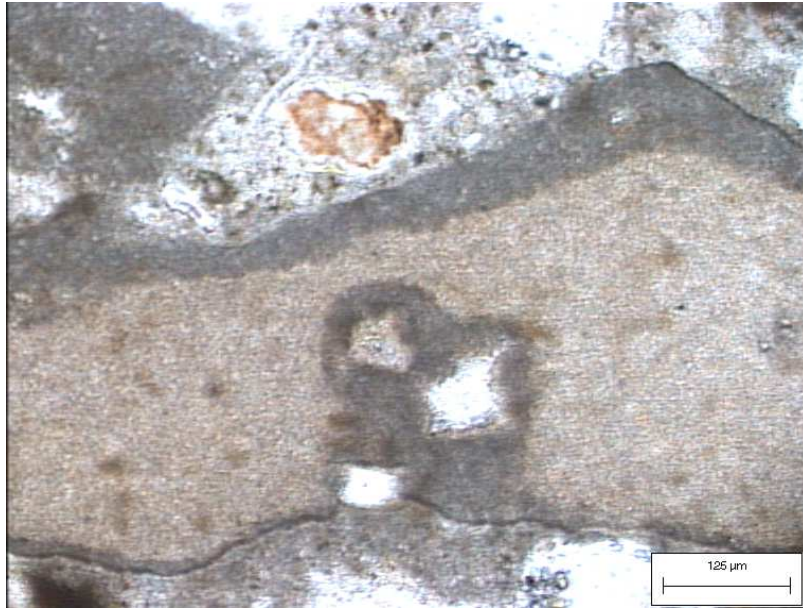


Figura 3.24 Borde de reacción sobre un agregado dolomítico (M7) en una barra de mortero IRAM 1674-1997 a los 28 días de edad

Un aspecto que merece destacarse es la muy baja expansión registrada en las barras de mortero elaboradas con el agregado M8, al finalizar el ensayo ($\text{expansión}_{28 \text{ días}} = 0,019 \%$). Este hecho es particularmente interesante por cuanto se comprobó, mediante DRX (tabla A.21), que el agregado experimentó durante el curso del ensayo un fuerte proceso de dedolomitización. Se registró un importante incremento en el contenido de calcita (la relación C/D pasó de 0,02, en la roca original, a 0,11, en el agregado del mortero) y se identificaron las dos reflexiones más intensas de brucita ($2,365 \text{ \AA}$ y $4,770 \text{ \AA}$).

Si bien, los resultados de este estudio no son suficientes para establecer una relación cuantitativa entre “reacción” y “expansión”, parecen sostener, una vez más, que ambos términos no deben ser considerados equivalentes. En otras palabras, la reacción de dedolomitización, al menos bajo determinadas condiciones, no siempre conduce a un proceso de expansión deletérea en el mortero u hormigón (Katayama, 1992, 2004).

3.1.2.3. Método de evaluación RILEM (modificado)

Este procedimiento de evaluación fue empleado, exclusivamente, para confirmar la reactividad alcalina del agregado procedente de Valcheta (M10).

Los parámetros de diseño de las mezclas (a/c, agregado/cemento) se indican en la tabla 3.10. En este caso, se recurrió a la incorporación de un aditivo superfluidificante a fin de mejorar la trabajabilidad del mortero. En la figura 3.25 se muestran los resultados de expansión del mortero hasta la edad de 30 días.

Como se indicó en 1.6.3.3, existen tres criterios para poder considerar que un agregado dolomítico es potencialmente reactivo debido a la RAC:

- a) La expansión del mortero AAR-5 (modificado), según la propuesta de Lu *et al.* (2008), es mayor a 0,10 % a los 30 días de edad.
- b) La expansión obtenida con el método AAR-5 (modificado) debe ser mayor o igual a la obtenida en el método AAR-2.
- c) La inclusión de la ceniza volante no debería reducir en forma significativa la expansión del mortero.

En base a estos criterios, el agregado M10 debería considerarse potencialmente reactivo frente a la RAC por las siguientes razones:

- ✓ La expansión del mortero AAR-5 (modificado), a los 30 días de edad (0,109 %), supera ligeramente el límite indicado en el punto “a”.
- ✓ El efecto que ejerce la granulometría del agregado en las expansiones del mortero es típica de la RAC: cuanto mayor es el tamaño de las partículas que constituyen el agregado (como ocurre en el ensayo AAR-5 modificado, en comparación al AAR-2), mayor es la expansión del mortero. De la observación de la figura 3.25, surge que la expansión alcanzada a los 30 días por el mortero AAR-5 (agregado sin finos), en comparación al AAR-2, es del orden del 10 %. Este valor resulta inferior a otros que se reportan en la literatura (Lu *et al.*, 2008), indicados en la tabla 1.1 (ver punto 1.3.4).
- ✓ La ceniza volante no sólo fue incapaz de inhibir la expansión del mortero, sino que, además, a los 30 días de edad, la potenció, superando al mortero de referencia (sin ceniza volante). Este comportamiento, verificado en experiencias anteriores (Milanesi y Batic,

1993a, b; Milanesi *et al.* 2012), constituye una singularidad en el tema de la RAC y pone en duda la participación de la RAS en el mecanismo expansivo de esta roca.

Tabla 3.10: Principales parámetros de las mezclas ensayadas según los métodos de Lu *et al.* (2008) y RILEM AAR-2 (RILEM TC 106-AAR, 2000b)

Agregado dolomítico	M10		
Método de ensayo	RILEM AAR-2	Método de Lu <i>et al.</i> (2008)	
Fracción granulométrica	0 - 5 mm ⁽¹⁾	2,5 - 5,0 mm ⁽²⁾	
Ligante (tablas 2.1 y 2.2)	CP3	CP3	CP3 + 40 % CV2
Relación agua/cemento (a/c)	0,47	0,33	
Relación agregado/cemento	2,25	1,00	
Aditivo superfluidificante (%)	0,90	0,64	0,90
Extendido (flow)	50	70	74

1) Según IRAM 1647 (pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 0,150 mm)

2) Fracción granulométrica: pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 2,36 mm

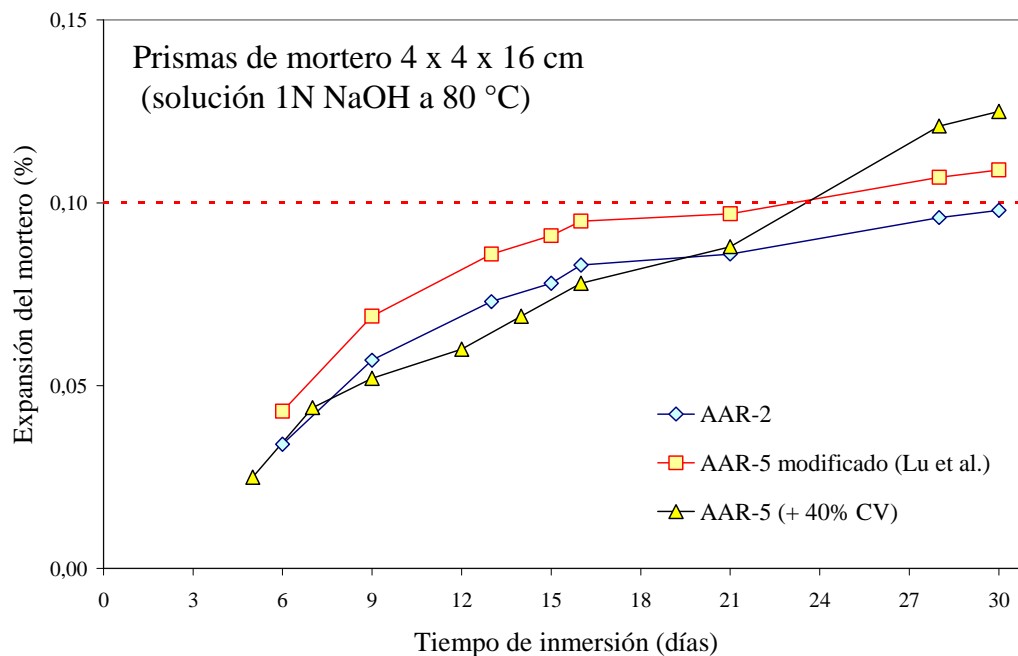


Figura 3.25 Expansión del agregado M10 en los ensayos de mortero AAR-2 y AAR-5 modificado, según Lu *et al.* (2008)

3.1.3. Ensayos de expansión de prismas de hormigón

3.1.3.1. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec (modificado)

En las figuras 3.26 a 3.31 se representan los valores de expansión de los testigos de hormigón de este ensayo, para cada uno de los tratamientos implementados: dos soluciones alcalinas (1N de NaOH y saturada de NaCl) combinadas con tres temperaturas (23 °C, 38 °C y 80 °C). Los cambios mineralógicos experimentados por los agregados dolomíticos M1, M4 y M5 se investigaron mediante DRX (Anexo A). Se hicieron también gráficos de barras (Anexo C) para visualizar las variaciones de las intensidades de los picos de calcita y dolomita debido al proceso de dedolomitización. Se seleccionaron algunos testigos y se extrajeron partículas del agregado grueso de la zona expuesta a la solución (Ext) y del interior de los mismos (Int).

En la tabla 3.11 se resumen los indicadores escogidos para comparar los distintos grados de avance alcanzados por la reacción de dedolomitización (C/D y cantidad de picos de brucita detectados). Los estudios de DRX se realizaron luego de los siguientes períodos de inmersión: 56 días, para los tratamientos a 80 °C, y 8 meses, para los tratamientos a 23 °C y 38 °C. En esta tabla se incluyen, además, los resultados de expansión de los testigos al momento de su extracción de las soluciones de ensayo para llevar a cabo los estudios de DRX. Del análisis de los resultados obtenidos es posible realizar las siguientes reflexiones:

a) Observaciones efectuadas en los ensayos realizados a 23 °C

A 23 °C, sólo el agregado M4 presentó en el hormigón, en ambas soluciones (NaOH o NaCl), un comportamiento expansivo. La expansión del hormigón elaborado con este agregado, luego de seis meses de inmersión en la solución de NaOH ($\approx 0,300$ %) fue casi tres veces superior a la registrada en la solución de NaCl ($\approx 0,100$ %). En ambos casos (NaOH y NaCl), se observaron, a simple vista, fisuras que afectaron toda la estructura del hormigón (agregados, matriz y zonas de interfase). Algunas partículas de agregado grueso mostraban sus bordes con una coloración más clara que el centro de la partícula. Mediante DRX se comprobó que el agregado de los testigos expuestos a la solución salina, durante ocho meses, experimentó un claro proceso de dedolomitización, con formación de calcita (C/D $\approx 0,18$) y brucita. En ningún caso se observó la presencia de geles o productos similares sobre la superficie de los testigos o en la solución de ensayo.

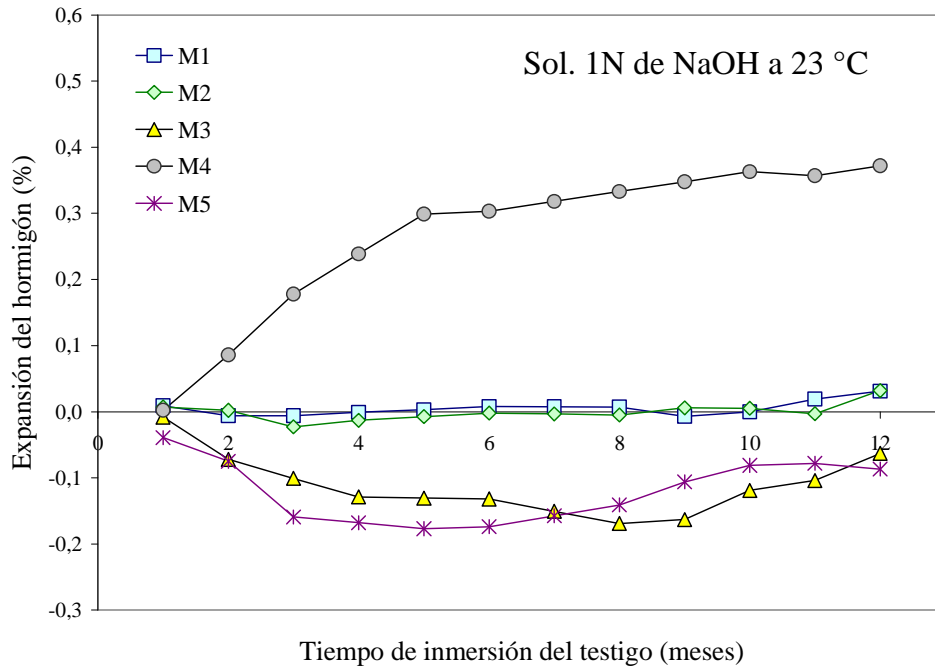


Figura 3.26 Expansión de testigos de hormigón en solución 1N de NaOH a 23 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)

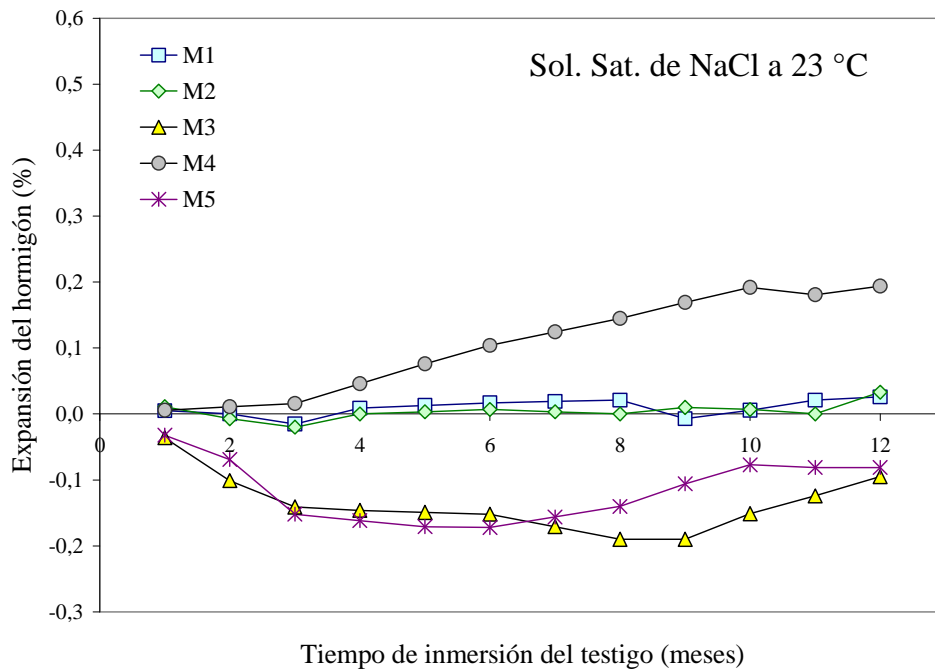


Figura 3.27 Expansión de testigos de hormigón en solución saturada de NaCl a 23 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)

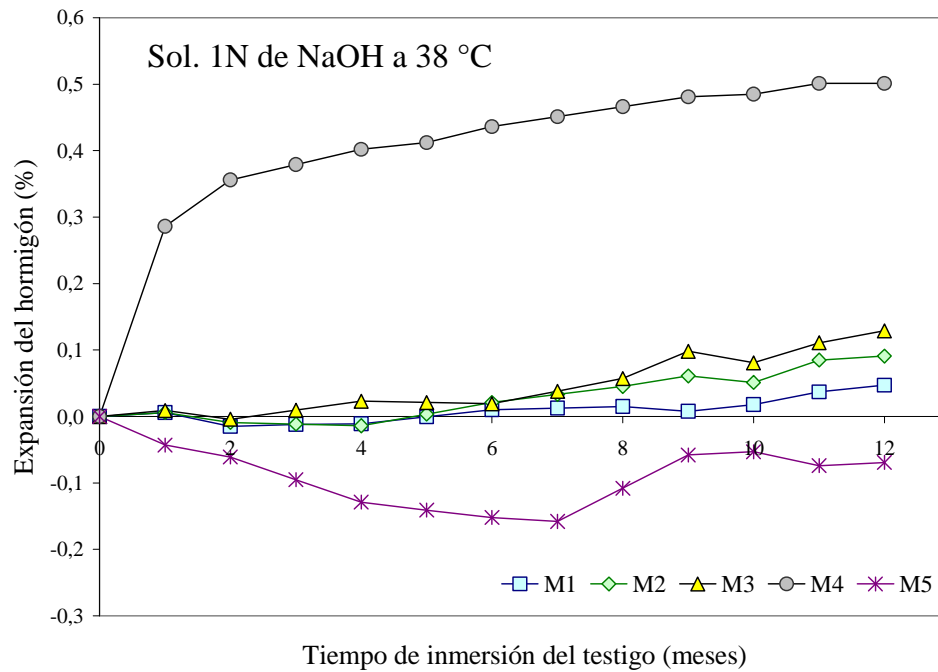


Figura 3.28 Expansión de testigos de hormigón en solución 1N de NaOH a 38 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)

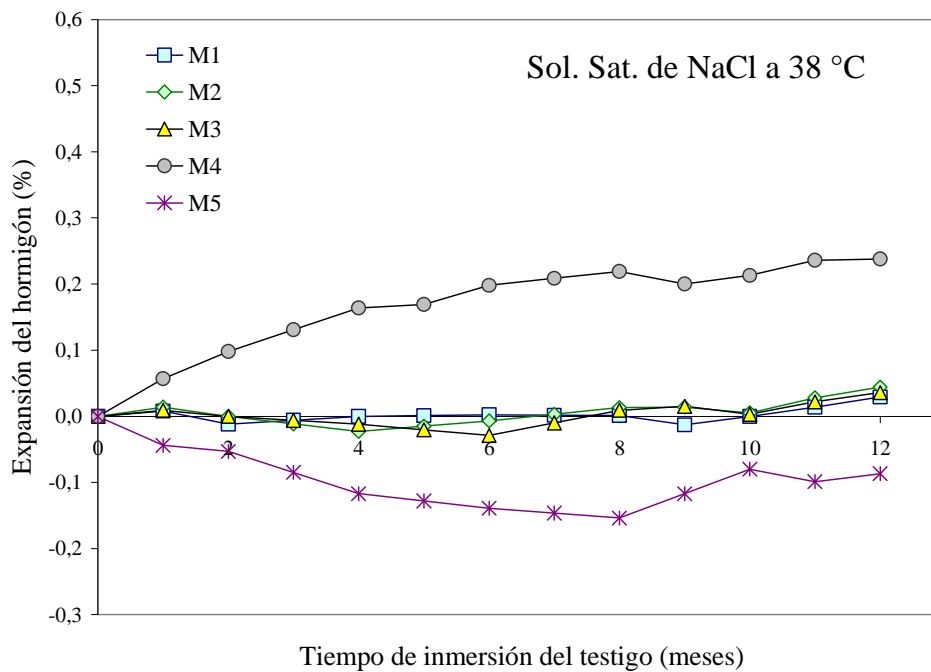


Figura 3.29 Expansión de testigos de hormigón en solución saturada de NaCl a 38 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)

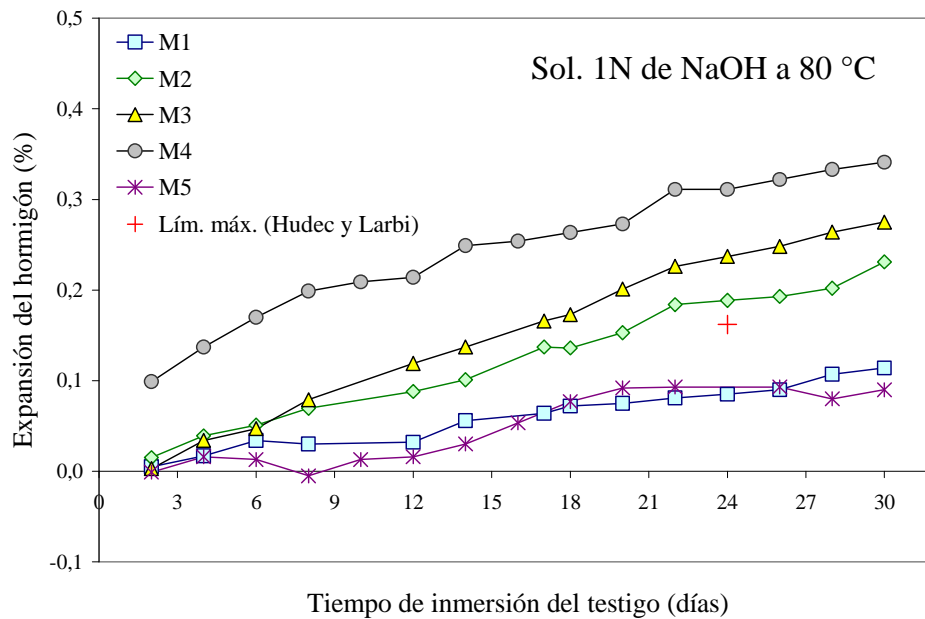


Figura 3.30 Expansión de testigos de hormigón en solución 1N de NaOH a 80 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)

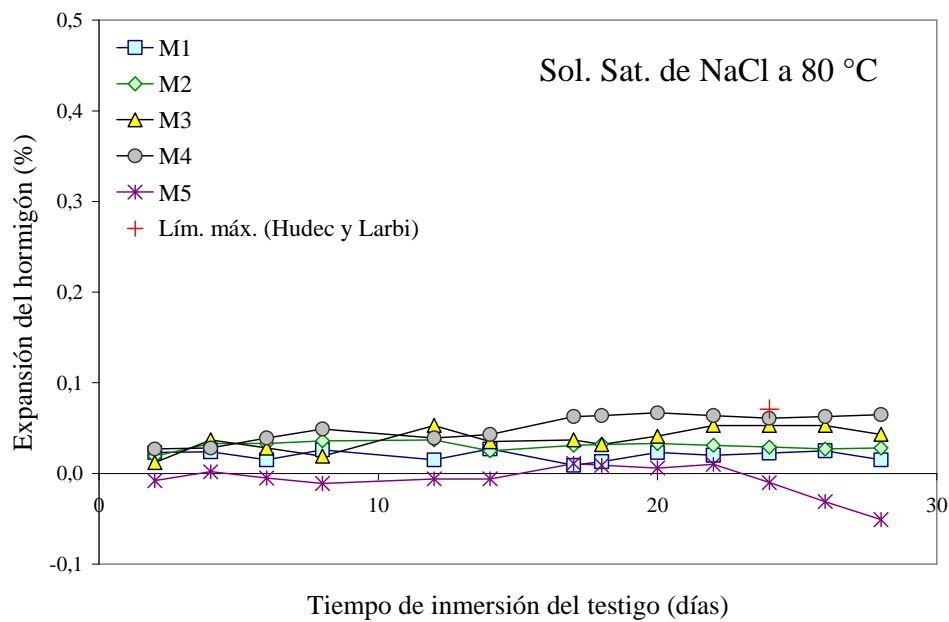


Figura 3.31 Expansión de testigos de hormigón en solución saturada de NaCl a 80 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado)

Tabla 3.11: Resumen de la expansión registrada en los testigos de hormigón y los cambios mineralógicos detectados (DRX) en los agregados M1, M4 y M5 en el ensayo de Larbi y Hudec modificado

Testigo de hormigón	Parámetros de evaluación	Solución 1N de NaOH				Solución saturada de NaCl			
		38 °C		80 °C		22 °C		38 °C	
		Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext
M1	Expansión (%) ⁽¹⁾	0,015		0,142		0,021		0,001	
	Brucita ⁽²⁾	2	2	-	2	-	1	-	-
	C/D ⁽³⁾	0,15	0,18	0,01	0,35	0,03	0,03	0,05	0,03
M4	Expansión (%) ⁽¹⁾	0,466		0,477		0,145		0,219	
	Brucita ⁽²⁾	3	3	4	4	-	1	-	1
	C/D ⁽³⁾	0,83	5,00	1,92	25,00	0,15	0,20	0,17	0,16
M5	Expansión (%) ⁽¹⁾	-0,108		0,200		-0,140		-0,154	
	Brucita ⁽²⁾	1	1	-	-	-	-	-	-
	C/D ⁽³⁾	0,15	0,11	0,15	0,24	0,07	0,10	0,11	0,07

1) Expansión promedio registrada a 56 días (80 °C) u 8 meses (23 °C o 38 °C) de inmersión

2) Cantidad de reflexiones de brucita identificadas

3) Cociente de las intensidades relativas (I/I_0) correspondientes a las reflexiones principales de calcita ($d = 3,035 \text{ \AA}$) y dolomita ($2,883 \text{ \AA}$)

Los agregados M1 y M2 exhibieron en el hormigón un comportamiento estable (figuras 3.26 y 3.27), sin manifestaciones de reacción de ningún tipo. No se observaron fisuras ni alteraciones en las zonas de interfase o productos que pudieran estar asociados a alguna reacción química. Las partículas del agregado M1, extraídas de los testigos de hormigón, luego de ocho meses en contacto con la solución de NaCl (expansión = 0,021 %), mostraron una relación C/D muy baja ($\approx 0,03$), lo que permitiría descartar cualquier presunción de reacción (dedolomitización).

Los hormigones elaborados con los agregados M3 y M5 mostraron un proceso de contracción variable, similar al reportado por Larbi y Hudec (1990). No se detectaron procesos de deterioro en el hormigón (fisuras, alteraciones en las zonas de interfase, etc.). La baja relación C/D ($\approx 0,09$) y la ausencia de reflexiones de brucita en los DRX, constituyen elementos suficientes para descartar la reacción de dedolomitización del agregado, luego de ocho meses de inmersión en la solución salina (contracción = 0,140 %).

b) Observaciones efectuadas en los ensayos realizados a 38 °C

Al igual que lo observado a temperatura ambiente, a 38 °C, tanto la expansión del hormigón como la transformación mineralógica experimentada por el agregado M4, resultó

mayor en los testigos expuestos a la solución de NaOH. Luego de seis meses en esta solución, la expansión del hormigón ($\approx 0,440 \%$) fue más de un 100 % superior a la registrada en la solución de NaCl ($\approx 0,200 \%$). Esta diferencia de expansión en los testigos fue coherente con el grado de avance de la reacción (dedolomitización) experimentada por el agregado. Al cabo de ocho meses, el agregado expuesto a la solución de NaOH experimentó un importante proceso de dedolomitización, con formación de abundante calcita ($C/D \approx 3,0$) y brucita. Si bien este último mineral también se detectó en los agregados de los testigos inmersos en la solución de NaCl, el valor promedio de C/D (0,17) fue del mismo orden que el obtenido a 23°C . No se observaron geles o productos similares sobre la superficie de los testigos o en la solución de ensayo. En todos los testigos se observaron fisuras que afectaban tanto los agregados como la matriz y las zonas de interfase.

En la solución de NaOH, los testigos de hormigón M1, M2 y M3 exhibieron una tendencia levemente expansiva, que comenzó a evidenciarse a partir de los seis meses de ensayo. Si bien a esta edad la expansión registrada en el hormigón M1 fue muy baja ($0,010 \%$), en el agregado se detectó la presencia de brucita ($2,365 \text{ \AA}$ y $4,770 \text{ \AA}$), lo que permite afirmar que la roca experimentó un proceso de dedolomitización. El grado de reacción alcanzado, sin embargo, podría calificarse como leve, ya que la relación C/D ($\approx 0,17$) no parece haber mostrado un cambio significativo, en comparación a la muestra de roca natural ($C/D \approx 0,12$ a $0,18$). En la solución de NaCl, los testigos M1, M2 y M3 mostraron un comportamiento estable, sin cambios en la composición mineralógica de los agregados. En el caso particular del agregado M1, luego de ocho meses de inmersión, la relación C/D resultó, en promedio, igual a 0,04 (tabla 3.11). Este bajo valor, sumado a la ausencia de reflexiones de brucita, indica que el agregado no ha experimentado una reacción química significativa.

El hormigón elaborado con el agregado M5 mostró un comportamiento similar al observado a temperatura ambiente. En NaOH, la contracción del hormigón ($0,152 \%$), al cabo de ocho meses de ensayo, se da en paralelo con una reacción de dedolomitización incipiente. En efecto, si bien la relación C/D ($0,11$ a $0,15$) no parece haberse modificado sustancialmente, en comparación a la muestra de roca original ($\approx 0,13$), la identificación sistemática del segundo pico ($d_2 = 4,770 \text{ \AA}$) de brucita, en ambos difractogramas (int y ext), permite dar testimonio de la citada reacción química. En contacto con la solución de

NaCl, no se detectaron cambios en la composición mineralógica del agregado. La relación C/D fue baja ($\approx 0,09$) y no se identificaron reflexiones que pudieran atribuirse a brucita. No se detectaron procesos de deterioro en el hormigón (fisuras, alteración en las zonas de interfase, etc.).

d) Observaciones efectuadas en los ensayos realizados a 80 °C

Todos los hormigones ensayados a 80 °C, en solución 1N de NaOH (M1 a M5), mostraron un comportamiento expansivo sostenido hasta la finalización del ensayo (figura 3.30).

En el caso del agregado M4, la expansión del hormigón, luego de 24 días de inmersión en la solución de NaOH (0,311 %), superó holgadamente el límite propuesto por Hudec y Larbi (0,161 %). Si bien este límite sólo puede ser empleado a modo indicativo (ya que el procedimiento de lectura aplicado en esta investigación no coincide con el que emplean los autores del método), en vista de la importante expansión experimentada por el hormigón, no hay duda que este agregado debe considerarse potencialmente reactivo. A los 56 días, la elevada expansión experimentada por el hormigón (0,477 %) fue acompañada por una muy fuerte reacción de dedolomitización en el agregado. El valor promedio de la relación C/D se ubicó en el orden de 13 (tabla 3.11), llegando a 25 en los agregados expuestos al contacto directo con la solución (tabla A.30), quedando, en este último caso, muy poca dolomita sin reaccionar. Como se observa en la figura 3.31, la expansión de los testigos de hormigón sumergidos en la solución de NaCl (0,061 %) se ubicó ligeramente por debajo del límite propuesto por Larbi y Hudec (1990).

La conducta expansiva moderada del hormigón elaborado con el agregado M1, en la solución de NaOH ($\text{expansión}_{24 \text{ días}} = 0,085 \% < 0,161 \%$) permite calificarlo como inocuo. A los 56 días de inmersión, la expansión alcanzada por este hormigón ($\approx 0,140 \%$), sin ser excesiva (teniendo en cuenta la edad de evaluación), fue acompañada por una importante reacción de dedolomitización en el agregado. El valor de la relación C/D_{Ext} (0,35), correspondiente a las partículas de agregado expuestas al contacto directo con la solución (tabla A.28), superó de manera significativa al valor correspondiente a la roca natural ($C/D \approx 0,12$ a $0,18$). Además, se detectó la formación de brucita ($2,365 \text{ \AA}$ y $4,770 \text{ \AA}$). A finalizar el ensayo (56 días), se detectaron fisuras sobre los testigos y una gran

cantidad de geles en la solución. En la solución de NaCl (figura 3.31), el comportamiento del hormigón fue absolutamente estable ($\text{expansión}_{24 \text{ días}} = 0,023 \% < 0,071 \%$).

Los testigos de hormigón elaborados con los agregados M2 y M3, que permanecieron sumergidos en la solución de NaOH, mostraron signos de RAS. En los testigos M2, algunas partículas de agregado (las de color más oscuro) se mostraron totalmente alteradas y se deshacían con total facilidad al rasparlas con algún elemento punzante. Al cabo de 56 días de inmersión, el hormigón presentó fisuras finas que afectaban la matriz y algunos geles sobre la superficie de los testigos. Similares manifestaciones se observaron en los testigos de hormigón M3. Al finalizar el ensayo, no se detectaron geles en la solución.

En contacto con la solución 1N de NaOH, el hormigón elaborado a partir del agregado M5 mostró un comportamiento expansivo similar al hormigón elaborado con el agregado M1 ($\text{expansión}_{24 \text{ días}} = 0,093 \% < 0,161 \%$). En base a este resultado, el agregado M5 debería considerarse inocuo. No obstante, la expansión del hormigón a los 56 días de inmersión ($\approx 0,200 \%$) fue acompañada por una importante reacción de dedolomitización en el agregado y fisuras finas en la matriz e interfaces. A pesar de no haber identificado reflexiones que pudieran atribuirse a brucita, el valor de C/D ($\approx 0,20$), correspondiente a las partículas de agregado expuestas al contacto directo con la solución (tabla A.32), superó al valor correspondiente a la roca natural ($C/D \approx 0,13$). Este hecho testimonia que el agregado ha experimentado un proceso moderado de dedolomitización. En contacto con la solución de NaCl (figura 3.31), los testigos experimentaron un proceso de contracción leve ($\text{contracción}_{24 \text{ días}} = 0,010 \%$) sin consecuencias deletéreas para el hormigón.

En base a lo expuesto, es posible resumir las siguientes reflexiones:

- Del conjunto de rocas evaluadas, la única que demostró un comportamiento expansivo, de características deletéreas para el hormigón, es la M4. Del análisis de los resultados de expansión obtenidos con esta muestra, surge que:
 - ✓ La expansión del hormigón expuesto a la solución 1N de NaOH fue siempre mayor que la registrada en solución saturada de NaCl. Este comportamiento es coincidente con el reportado por Hudec y Larbi (1989) y Larbi y Hudec (1990), pero no por otros investigadores (Alasali *et al.*, 1991).

- ✓ Los ensayos a temperatura ambiente (especialmente, el de inmersión en solución 1 N de NaOH) permiten poner de manifiesto, claramente, el comportamiento expansivo del agregado M4. A pesar de ello, el tiempo requerido para obtener conclusiones definitivas puede ser extenso, particularmente al usar solución saturada de NaCl.
- ✓ El aumento de la temperatura del baño, de 23 °C a 38 °C, produce un incremento significativo de la expansión del hormigón que puede aprovecharse para acelerar los tiempos de respuesta del método. Este recurso, sin embargo, debe utilizarse con precaución ya que el uso de una temperatura más elevada puede cambiar los mecanismos de expansión. En efecto, la figura 3.32 muestra que, a 80 °C, todos los hormigones inmersos en la solución 1N de NaOH tuvieron un comportamiento expansivo significativo. El análisis de la figura 3.33 muestra que estas expansiones están fuertemente vinculadas al contenido de residuo insoluble del agregado grueso. Este hecho, si se tiene cuenta que se detectaron geles, tanto sobre la superficie de los testigos como precipitados en la solución, permite inferir que las expansiones registradas a 80 °C en NaOH se deben, fundamentalmente, a la RAS. Es interesante destacar, además, que el punto que representa a la muestra M4 en la figura 3.33 es el que más se aleja de la línea de correlación correspondiente al resto de los agregados. Este hecho podría estar indicando que el mecanismo de expansión asociado a esta roca es diferente al que opera en el resto de las muestras evaluadas.
- ✓ En la figura 3.34 se representa la correlación existente entre la expansión del hormigón (cualquiera sea la solución empleada) y los valores correspondientes de la relación C/D. Esta figura muestra, claramente, que el grado de correlación hallado entre “expansión” y “reacción” (dedolomitización) es importante, lo que permite sustentar que el comportamiento expansivo del agregado M4 obedece a la RAC.

3.1.3.2. Método del prisma de hormigón

En la tabla 3.12 se indican las proporciones y asentamientos de las mezclas de hormigón elaboradas según el método CSA A23.2-14A-M77 (Batic y Milanesi, 1991), con las modificaciones indicadas en el capítulo 2. En base a estos datos, surge que el contenido promedio de álcalis del hormigón es igual a 3,50 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$.

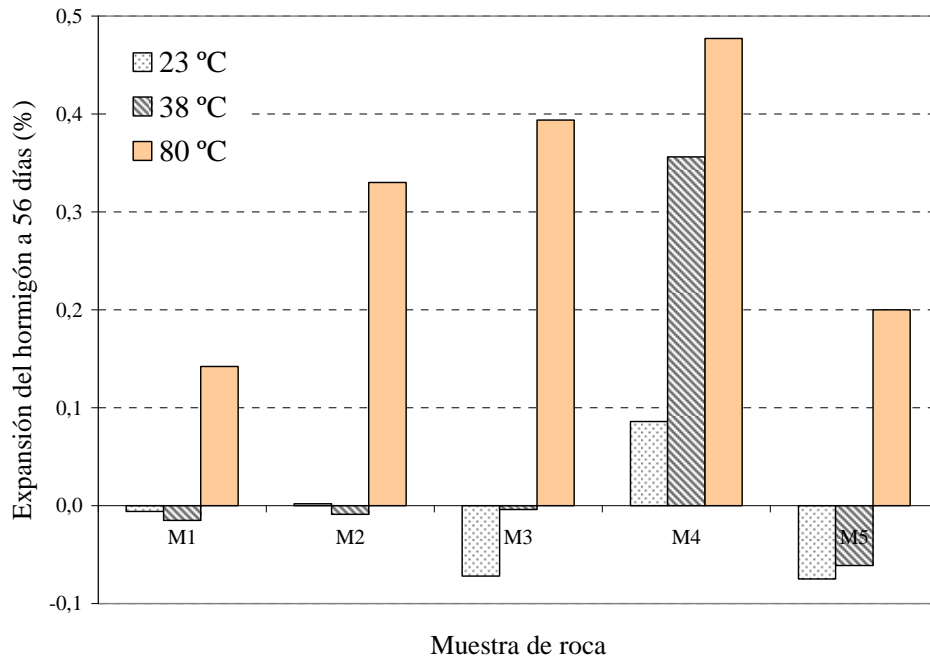


Figura 3.32 Influencia de la temperatura de la solución del ensayo de Larbi y Hudec (modificado) en la expansión del hormigón

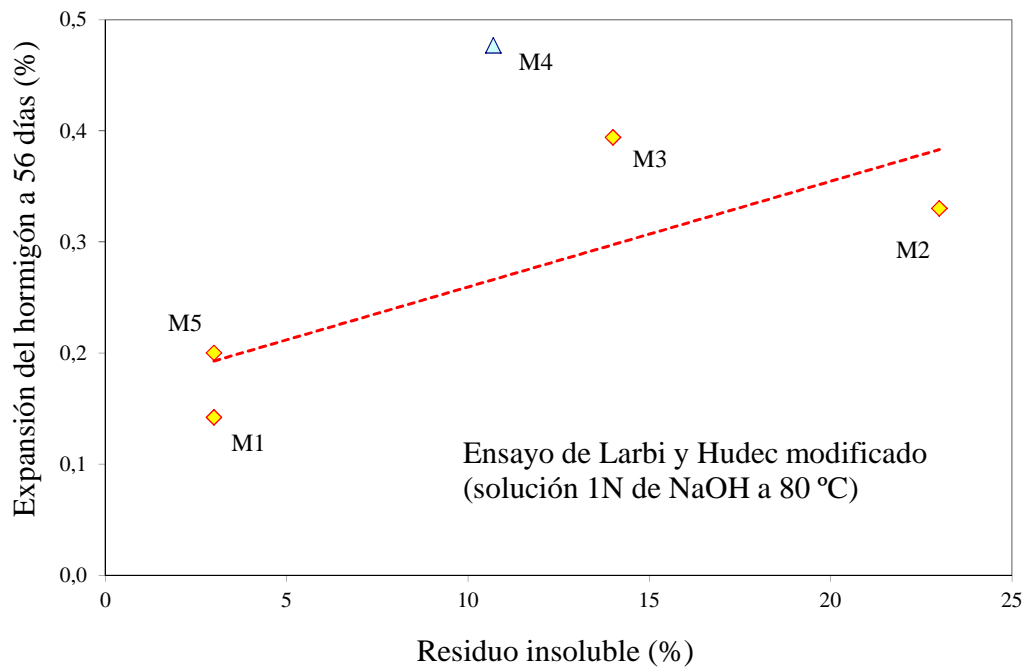


Figura 3.33 Correlación entre la expansión del hormigón en solución 1N de NaOH a 80 °C (ensayo de Larbi y Hudec modificado) y el contenido de residuo insoluble del agregado grueso

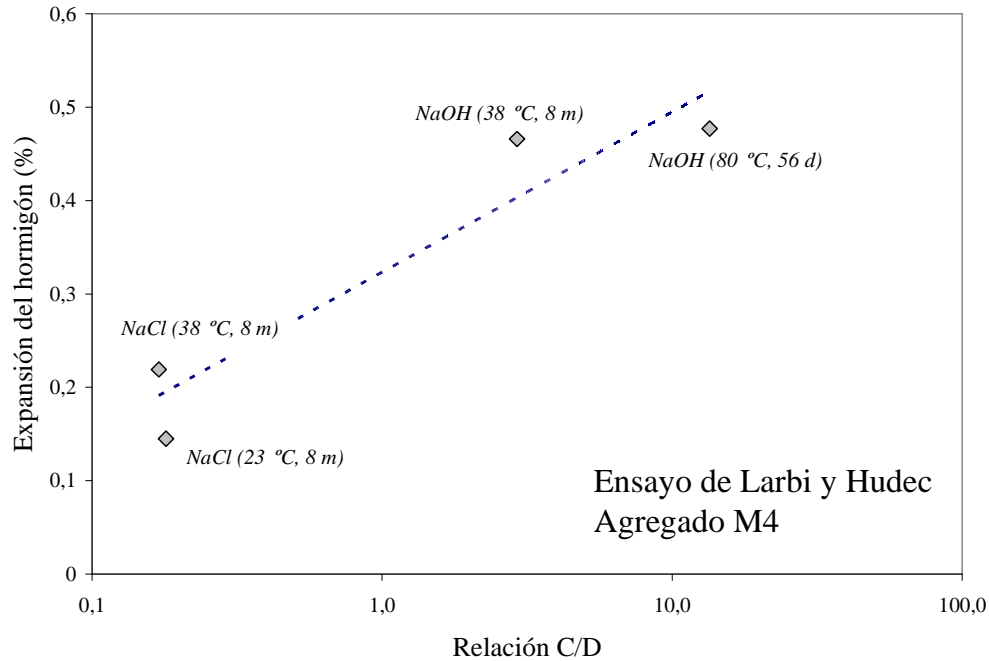


Figura 3.34 Relación entre la expansión del hormigón y la alteración mineralógica experimentada por el agregado M4 en el ensayo de Larbi y Hudec modificado

Tabla 3.12: Proporción y asentamiento de los hormigones elaborados según el método canadiense CSA A23.2 14A-M77

Agregado (designación)	M1	M2	M3	M4	M5
Cemento (kg/m^3) ⁽¹⁾	309	306	305	306	310
Agua (kg/m^3)	186	178	178	174	165
Arena Oriental, AO (kg/m^3) ⁽²⁾	920	931	1004	923	947
Agregado grueso (kg/m^3) ⁽²⁾	944	952	936	937	1019
Relación agua/cemento	0,60	0,58	0,58	0,57	0,53
Asentamiento (cm)	12,5	10,5	10,0	6,0	7,0

1) Cemento CPI (1,14 % de Na_2O_{eq})

2) Agregados en condición saturado superficie seca

En la figura 3.35 se representan los resultados de expansión obtenidos con este método hasta los seis años de edad.

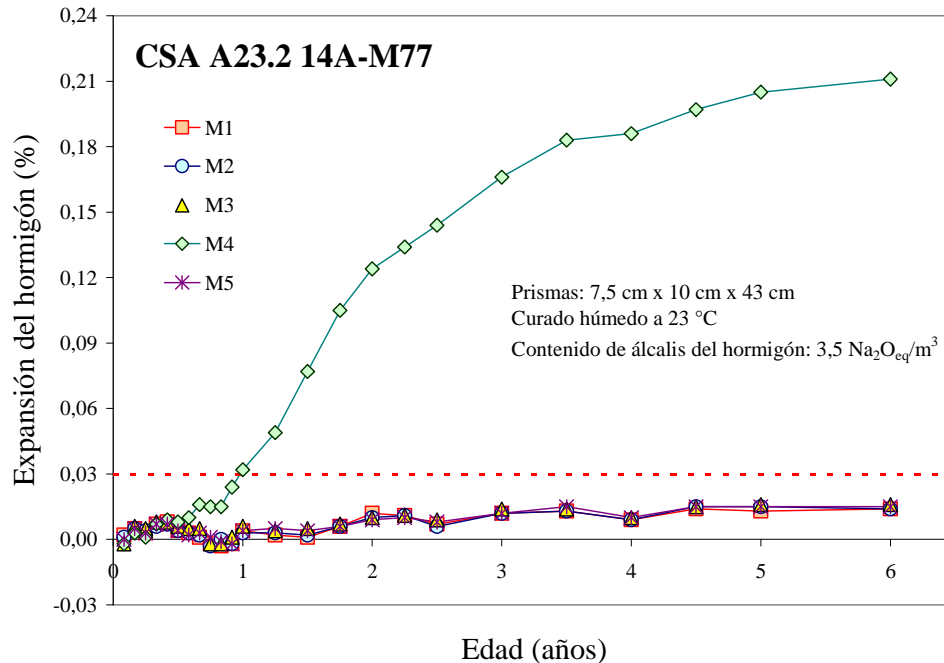


Figura 3.35 Expansión de prismas de hormigón según el método canadiense CSA A23.2 14A-M77 (23 °C)

Al observar la figura 3.35, surge, claramente, que el único agregado que muestra una conducta expansiva en el hormigón es el M4. El resto de los agregados evaluados (M1, M2, M3 y M5) presentó un comportamiento estable a lo largo de todo el período de evaluación.

En base al criterio establecido en 1.6.4.1 (tabla 1.7), el agregado M4 debe ser considerado potencialmente reactivo (RAC), dado que la expansión del hormigón supera, a los 12 meses de edad (0,032 %), el valor límite establecido para este ensayo (0,030 %).

Hasta los 12 meses de edad, sólo se observaron manchas de color claro sobre la superficie del hormigón (M4), localizadas alrededor de aquellos agregados que se ubican próximos a la superficie de los prismas. Aun cuando no se efectuaron estudios complementarios para indagar la naturaleza de estas aureolas, se presume que las mismas son consecuencia del proceso de formación de los denominados “halos de carbonatación”, mencionados en el punto 1.2.2.1. Si bien la existencia de estos halos ha sido testimoniada a nivel microestructural (Duke *et al.*, 1997; Katayama, 2004; Katayama y Sommer, 2008),

no se conocen referencias que mencionen que este mismo fenómeno pueda tener manifestaciones a nivel macroscópico.

En coincidencia con lo reportado por otros investigadores (Newlon y Sherwood, 1962; Swenson y Guillott, 1964; Rogers, 1986a), las primeras fisuras que pudieron observarse a simple vista, en el hormigón M4, se detectaron cuando los prismas alcanzaron un nivel de expansión del orden de 0,050 %. No se observaron geles ni exudaciones blanquecinas sobre la superficie del hormigón. A los cuatro años de edad (expansión $\approx 0,19$ %), se comprobó que el agregado incluido en el hormigón había experimentado un claro proceso de dedolomitización, con formación de calcita y brucita (Milanesi *et al.*, 1996).

A raíz del comportamiento expansivo registrado en el hormigón elaborado con el agregado M4, se decidió evaluar la influencia de la temperatura de curado del hormigón en este fenómeno. Para ello, se empleó el método CSA A23.2-14A-M86 (Milanesi y Batic, 1994). Según esta versión, el contenido total de álcalis de la mezcla se eleva a 3,88 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$.

En la figura 3.36 se representa la expansión del hormigón elaborado con el agregado M7, hasta los cuatro años de edad, en función de la temperatura de almacenamiento de los prismas (23 °C y 38 °C). Del análisis de esta figura, surge que, a 38 °C, la reacción se acelera y la expansión resultante es mayor que la obtenida a temperatura ambiente (la expansión que alcanza el hormigón a 38 °C, a la edad de cuatro meses, es del mismo orden que la obtenida a 23 °C, a un año).

Sobre la superficie de los prismas se observaron manchas de color claro, similares a las descritas precedentemente (halos). Las primeras fisuras se detectaron para niveles de expansión próximos a 0,040 %. No observaron geles ni exudaciones sobre la superficie del hormigón.

Como se indicó en 1.3.3, la dependencia de la expansión del hormigón con la temperatura de estacionamiento sugiere que la naturaleza expansiva de la reacción es esencialmente química. Estos resultados son similares a los informados por otros investigadores (Swenson y Guillott, 1964; Alasali *et al.*, 1991; Williams y Rogers, 1991).

La falta de una correlación clara entre la expansión del hormigón (medida a 23 °C) y su contenido de álcalis (ver figura 3.35: M4 y figura 3.36: M7) es atribuida al uso de distintas muestras de roca y a la escasa diferencia en el contenido de álcalis de ambas mezclas. Esta dependencia, sin embargo, se verá claramente al analizar el punto 3.2.1.

Los hechos descriptos (influencia de la temperatura y del contenido de álcalis) permiten conjeturar que el fenómeno expansivo generado por el agregado dolomítico de Valcheta responde a la conducta clásica de la reacción álcali-agregado. Este agregado, además, ha demostrado ejercer una influencia negativa en el comportamiento mecánico del hormigón como resultado de su elevada susceptibilidad alcalina (Milanesi y Batic, 1993c).

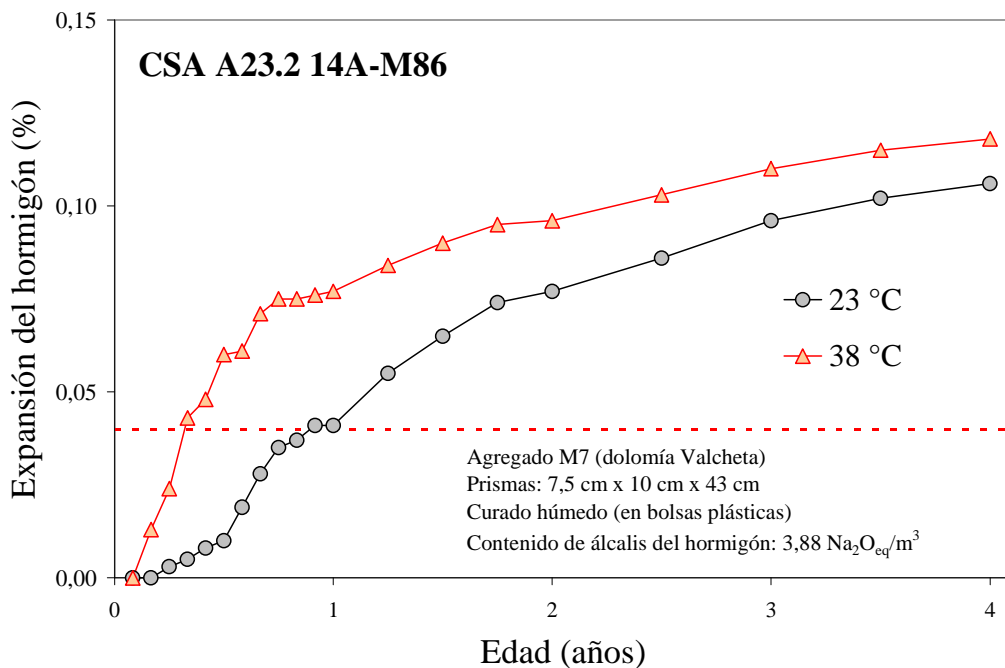


Figura 3.36 Influencia de la temperatura de almacenamiento del hormigón en la expansión alcanzada en los prismas

3.2. Evaluación de algunos métodos para inhibir las expansiones

En vista del comportamiento deletéreo constatado en las mezclas de hormigón elaboradas con la dolomía de Valcheta (M4 y M7), se decidió evaluar distintas estrategias de inhibición de la reacción con miras a controlar los fenómenos expansivos del agregado.

Para ello, se estudió el efecto de la reducción del contenido de álcalis del hormigón, se recurrió al reemplazo del cemento por distintas AMA de probada eficacia y a la incorporación de dos aditivos químicos a base de litio ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y Li_2CO_3).

Con el fin de ahondar en el conocimiento del mecanismo de expansión de esta roca, se llevaron a cabo algunas experiencias adicionales destinadas a investigar la influencia que posee la granulometría del agregado en la expansión de mezclas de mortero.

En lo que sigue se resumen los resultados obtenidos en estas experiencias.

3.2.1. Reducción del contenido de álcalis del hormigón

En la figura 3.37 se representan los valores de expansión de dos hormigones, elaborados con el agregado grueso M9, en los que se varió el contenido de álcalis de las mezclas utilizando cementos de distinto contenido de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$.

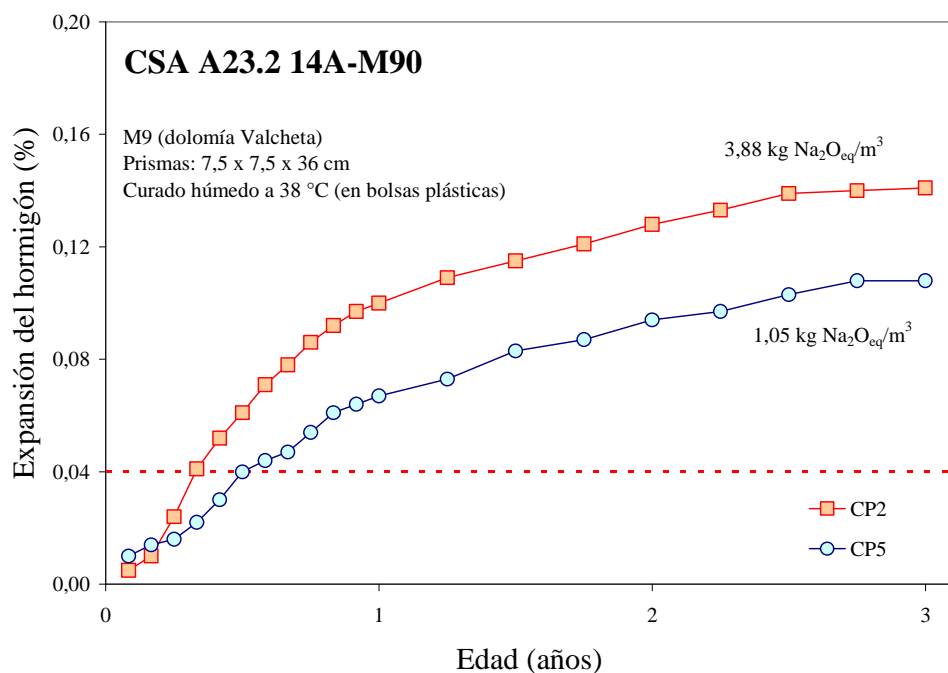


Figura 3.37 Influencia del contenido de álcalis de la mezcla en la expansión del hormigón

Como es dable observar, mientras la reducción operada en el contenido de álcalis de la mezcla fue del orden del 75 %, la disminución de la expansión del hormigón a un año

apenas alcanzó el 30 %. Estos resultados son mucho más pesimistas que los informados por otros investigadores (Hadley, 1964; Swenson y Guillott, 1964; Alasali *et al.*, 1991).

Es difícil especular que una mezcla de hormigón, con tan bajo contenido de álcalis ($\approx 1 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3 < 1,8 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$), pueda sufrir algún proceso expansivo generado por la RAS (Thomas *et al.*, 2008; AASHTO, 2010). En otras palabras, estos resultados sugieren que el mecanismo expansivo del agregado de Valcheta podría estar vinculado a la RAC.

3.2.2. Eficiencia de las AMA

Como se indicó en el capítulo 2, para estudiar el efecto inhibitor de las AMA se recurrió al empleo de dos métodos de ensayo: el IRAM 1674-1997 (NBRI) y el método del prisma de hormigón CSA A23.2-14A-M90 (Milanesi y Batic, 1993b), con las modificaciones indicadas en dicho capítulo.

En las tablas 3.13 y 3.14 se indican los valores de la relación a/c y consistencia de cada una de las mezclas ensayadas. Se resumen, además, los resultados de expansión obtenidos con el método IRAM 1674, a los 14 días de inmersión en la solución alcalina (1N de NaOH a 80 °C).

Según el criterio sugerido por las normas ASTM 1567 y CSA A23.2-28A (CSA, 2009g; ASTM, 2010j), se considera que la AMA es capaz de inhibir los efectos expansivos del agregado reactivo cuando la expansión del mortero NBRI, a los 16 días de edad (14 días de inmersión en solución de NaOH), es inferior a 0,10 %. Dado que en el método NBRI las expansiones registradas en las mezclas sin adición resultaron inferiores o muy próximas al valor límite (tabla 3.9), es razonable considerar que la AMA es efectiva cuando su incorporación al mortero reduce de manera significativa las expansiones que se obtienen en una mezcla sin adición.

Si la AMA es evaluada mediante el método del prisma de hormigón (CSA, 2009g), se considera que la AMA es efectiva cuando la expansión del hormigón, a los dos años de edad, es inferior a 0,04 %.

Tabla 3.13: Mezclas empleadas para el estudio del efecto de las AMA en la expansión del mortero IRAM 1674-1997

Agregado dolomítico	M2		M3		M5	
Fracción granulométrica			0 - 5 mm ⁽¹⁾			
Adición mineral activa (tabla 2.2)	-	PNZ ⁽²⁾	-	PNZ ⁽²⁾	-	PNZ ⁽²⁾
Relación agua/cemento (a/c)	0,61	0,62	0,53	0,61	0,48	
Extendido (flow)	130	80	120	115	110	-
Expansión del mortero a 14 días (%) ⁽³⁾	0,062 ⁽⁴⁾	0,021 ⁽⁴⁾	0,065 ⁽⁴⁾	0,019 ⁽⁴⁾	0,018 ⁽⁴⁾	0,013 ⁽⁴⁾

Cemento empleado en la elaboración del mortero: CP2 (1,16 % Na₂O_{eq})

1) Distribución granulométrica según IRAM 1647 (pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 0,150 mm)

2) PNZ: Puzolana natural (Zapala) en reemplazo de un 30 % (en peso) de cemento

3) Valor de expansión registrado a los 14 días de inmersión alcalina.

4) Morteros que, por cuestiones operativas, recibieron un curado inicial, en cámara húmeda, de 48 horas.

Tabla 3.14: Mezclas empleadas para el estudio del efecto de las AMA en la expansión del mortero IRAM 1674-1997

Agregado dolomítico	M7					M9	
	0 - 5 mm ⁽¹⁾			1 - 5 mm ⁽²⁾		0 - 5 mm ⁽¹⁾	
Fracción granulométrica	CP1	CP1	CP1	CP2	CP2	CP2	CP2
Cemento (tabla 2.1)							
Adición mineral activa (tabla 2.2)	-	PNZ ⁽³⁾	EGAH ⁽³⁾	-	CV1 ⁽³⁾	-	HS ⁽³⁾
Relación agua/cemento (a/c)	0,77	0,77	0,75	0,74	0,65	0,74	0,77
Extendido (flow)	110	106	113	98	69	107	105
Expansión del mortero a 14 días (%) ⁽⁴⁾	0,103 ⁽⁵⁾	0,141 ⁽⁵⁾	0,110 ⁽⁵⁾	0,196 ⁽⁵⁾	0,325 ⁽⁵⁾	0,093	0,072

1) Distribución granulométrica según IRAM 1647 (pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 0,150 mm)

2) Fracción granulométrica pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 1,18 mm

3) Porcentajes de reemplazo (en peso): PNZ (30 %); EGAH (60 %); CV1 (40 %); HS (10 %)

4) Valor de expansión registrado a los 14 días de inmersión alcalina.

5) Morteros que, por cuestiones operativas, recibieron un curado inicial, en cámara húmeda, de 48 horas.

En base a lo expuesto, es posible puntualizar las siguientes consideraciones:

- ✓ La incorporación de la puzolana natural (PNZ) en las mezclas elaboradas con los agregados de carácter inocuo (M2, M3 y M5) mejoró el desempeño de los morteros al reducir sus expansiones (tabla 3.13), atribuidas, en este caso, a la RAS. Este efecto inhibidor es debido, entre otros factores, a la contribución de la puzolana en la reducción del contenido de hidróxido de calcio (necesario para la formación del gel expansivo) y en la disminución de la porosidad capilar del mortero (que dificulta el ingreso de los álcalis necesarios para la reacción).

- ✓ Ninguna de las AMA utilizadas en estas experiencias (PNZ, EGAH, CV1 y HS) logró controlar de manera efectiva la conducta expansiva del agregado proveniente de Valcheta (M7 y M9). Más aún, con excepción del humo de sílice (HS), el resto de las AMA perjudicó el comportamiento del mortero, al potenciar las expansiones a largo plazo (figuras 3.38 y 3.39). Estos resultados coinciden con las experiencias informadas por Milanesi y Batic (1993a), al trabajar en prismas (40 mm x 40 mm x 160 mm) de hormigón, inmersos en solución 1N de NaOH, a 38 °C y 80 °C. Según el conocimiento del autor, este comportamiento, tan singular, no ha sido mencionado previamente en la literatura (Milanesi *et al.*, 2012).

Con el objeto de verificar la conducta que presentan las mezclas con AMA al ser ensayadas por el NBRI (figuras 3.38 y 3.39), se realizaron algunas experiencias con el método del prisma de hormigón (CSA A23.2-14A-M90). En las figuras 3.40 y 3.41 se representan los resultados obtenidos.

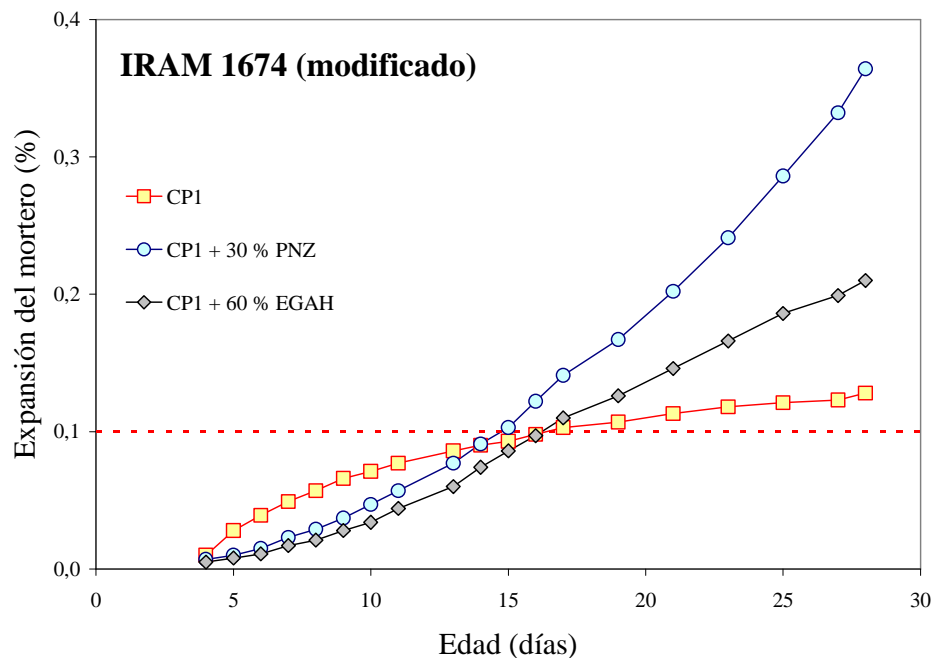


Figura 3.38 Evolución de la expansión de morteros elaborados con el agregado M7, con y sin puzolana natural (PNZ) o escoria granulada de alto horno (IRAM 1674-1997 modificado)

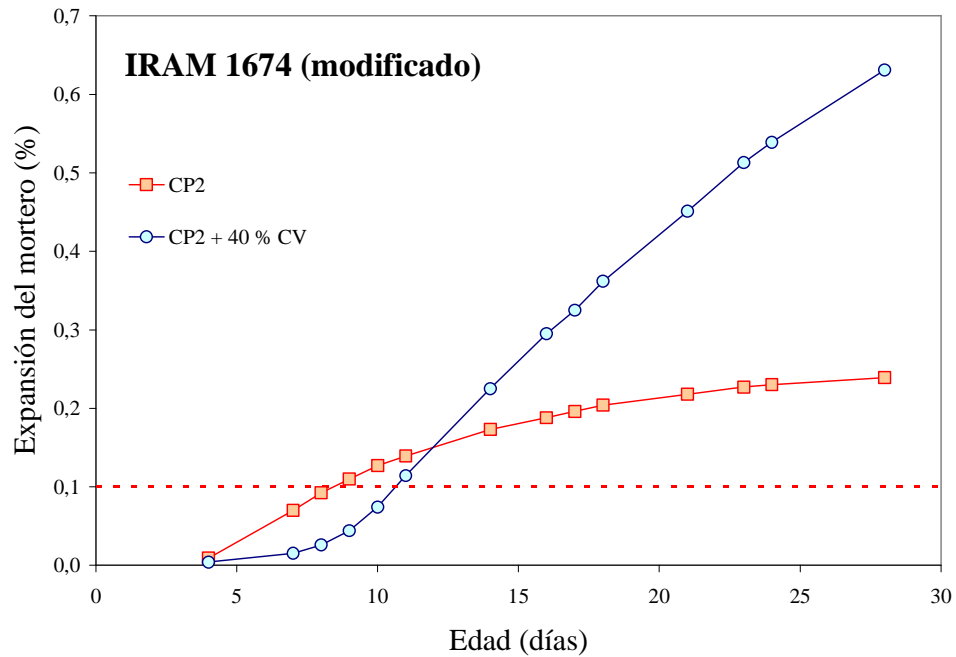


Figura 3.39 Evolución de la expansión de mortero elaborado con el agregado M7, con y sin ceniza volante (IRAM 1674-1997 modificado)

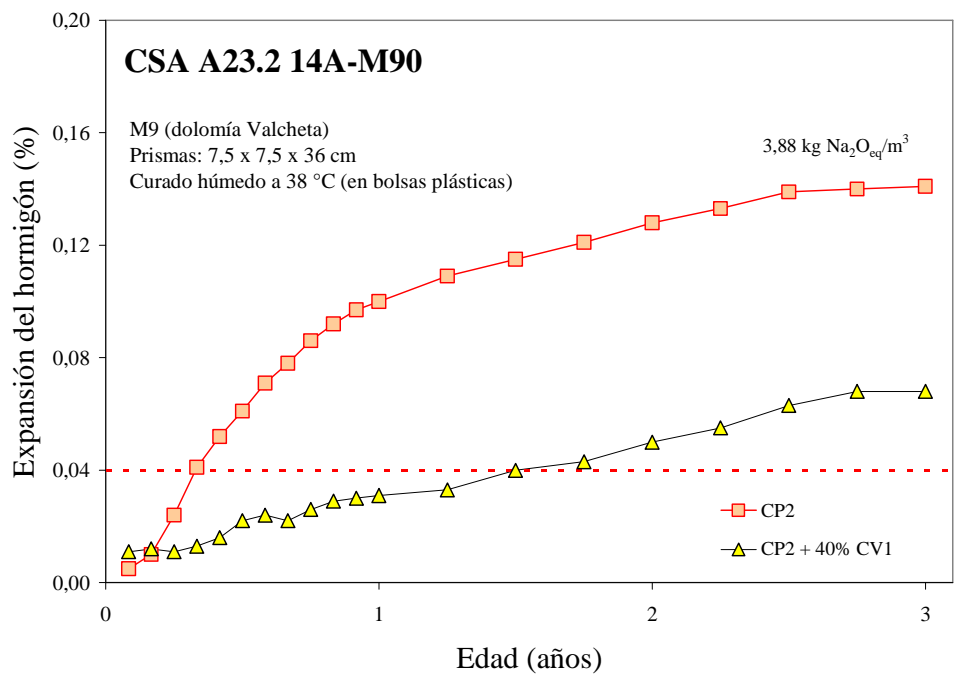


Figura 3.40 Expansión del hormigón elaborado con y sin ceniza volante (CSA A23.2-14A-M90)

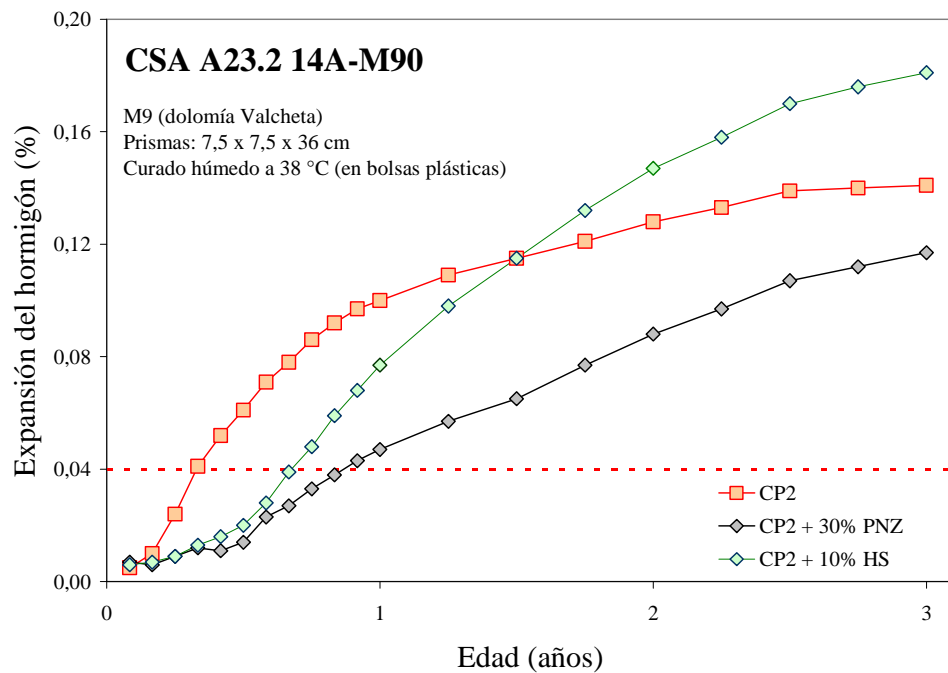


Figura 3.41 Expansión de hormigones elaborados con y sin puzolana natural o humos de sílice (CSA A23.2-14A-M90)

Del análisis de estas figuras, en coincidencia con lo expresado precedentemente, se concluye que la inclusión de la AMA sólo difiere el proceso expansivo del agregado. Como lo demuestran las pendientes de las curvas “Expansión vs. Tiempo” (figuras 3.40 y 3.41), ninguna de las AMA empleadas fue capaz de controlar en forma eficiente la estabilidad volumétrica de los hormigones elaborados con el agregado M9. Si bien todas las AMA redujeron la expansión del hormigón a edad temprana, ninguna resultó apta para inhibir la reacción deletérea. La puzolana natural (PNZ) y el humo de sílice (HS) tuvieron un efecto perjudicial a largo plazo al potenciar las expansiones del hormigón (figura 3.41). Aun cuando la expansión del hormigón elaborado con ceniza volante fue siempre inferior a la del hormigón sin adición, el nivel de expansión alcanzado por aquél a los dos años de edad (0,05 %) superó el límite máximo recomendado (0,04 %) por la CSA (2009g).

Otro aspecto a destacar es que el rango de efectividad de la AMA es diferente según cuál sea el método de ensayo aplicado para su valoración. Mientras para el método NBRI el humo de sílice es la AMA más efectiva (en términos relativos), para el método del prisma de hormigón es la de peor comportamiento.

La falta de eficiencia de las AMA para inhibir las expansiones generadas por la RAC es un hecho singular de esta reacción (Swenson y Guillott, 1964; Walker, 1978; Pagano y Cady, 1982; Thomas e Innis, 1998; Rogers y Hooton, 1992; Shu y Deng, 1996; Katayama y Sommer, 2008). Esto refuerza la idea de que las expansiones provocadas por el agregado dolomítico de la zona de Valcheta obedecen a la RAC.

3.2.3. Eficiencia de los aditivos químicos

En general, las experiencias indican que los compuestos a base de litio resultan efectivos para controlar las expansiones debidas a la RAS, pero no para inhibir la RAC.

Como se ha visto hasta aquí, de todas las muestras investigadas, sólo las provenientes de la zona de Valcheta (M4, M7, M9 y M10) han demostrado un comportamiento deletéreo, tanto en morteros como en hormigones. Aun cuando se han encontrado indicios que prueban que las expansiones generadas por este agregado pueden ser atribuidas a la RAC, tampoco se descarta la posibilidad que parte de los fenómenos deletéreos observados estén vinculados a la RAS, al menos en parte, como se indicó en 3.1.2.1.

Aprovechando los distintos efectos que produce la incorporación de los compuestos de litio, según sea la tipología de reacción presente (RAS o RAC), se realizaron algunas experiencias con el objeto de verificar la hipótesis anteriormente planteada.

En una primera etapa se estudió la influencia de la adición de cloruro de litio (LiCl) en dos series de mortero, ensayadas con el método IRAM 1637, con las modificaciones indicadas en el capítulo 2 (tabla 3.15). La primera de ellas, fue elaborada utilizando una arena natural, de características inocuas (AO), en la que se reemplazó un 10 % (en peso) por una arena de trituración (ACH), de elevada reactividad (RAS) debido a la presencia de ópalo. Las mezclas pertenecientes a la segunda serie fueron preparadas con el agregado M7. En ambos casos, se evaluó el efecto de la adición del LiCl (1% de en peso del cemento) comparando las expansiones de este mortero con las del mortero de referencia (sin aditivo).

En la figura 3.42 se representan las expansiones de las mezclas de mortero elaboradas con la arena con RAS.

Tabla 3.15: Mezclas empleadas para el estudio del efecto del LiCl y de la granulometría del agregado en la expansión del mortero IRAM 1637 (modificado)

Agregado	ACH-10 + AO-90 ⁽¹⁾		M7 ⁽²⁾	
LiCl (% en peso del cemento)	0%	1%	0%	1%
Relación agua/cemento (a/c)	0,44		0,71	

Cemento empleado en la elaboración del mortero: CP2 (1,16 % Na_2O_{eq})

(1) Arena constituida por la mezcla de un 10 % de arenisca del Chaco (ACH) con un 90 % de arena Oriental (AO). La distribución granulométrica del agregado responde a la norma IRAM 1637 (pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 0,150 mm)

(2) Fracción granulométrica pasa tamiz 4,75 mm, retiene tamiz 1,18 mm

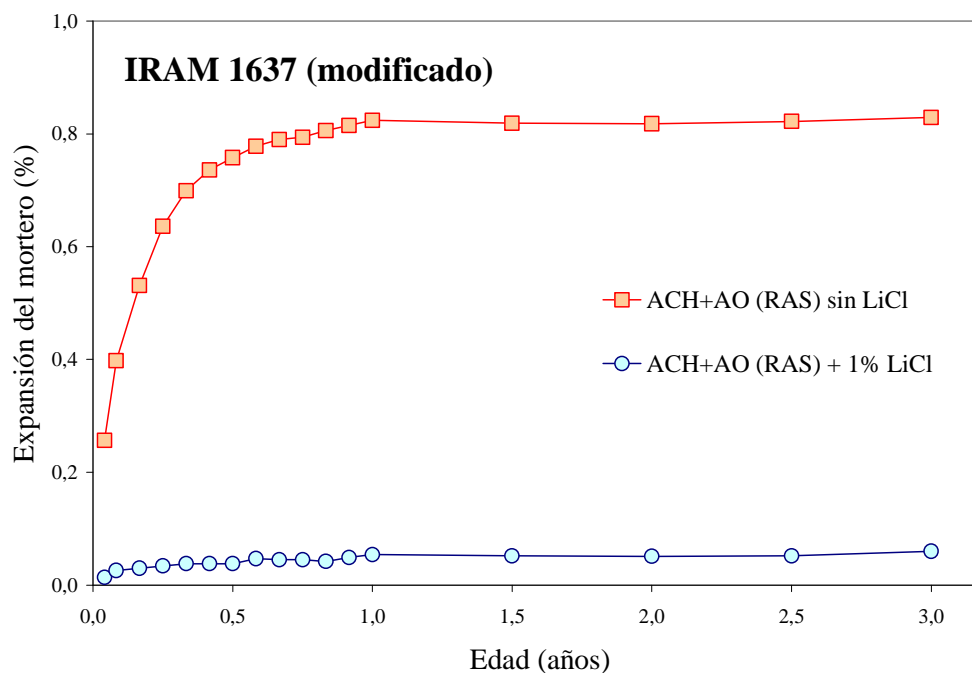


Figura 3.42 Influencia de la adición de LiCl sobre la expansión de un mortero afectado por la RAS (IRAM 1637 modificado)

Como es posible observar, el efecto del LiCl es sorprendente por cuanto logra disminuir la expansión del mortero sin aditivo (expansión a 3 años $\approx 0,83$ %) en un orden de magnitud (expansión del mortero con LiCl a 3 años $\approx 0,06$ %). A pesar de la acción tan potente que posee este aditivo sobre la RAS, su efecto sobre la expansión del agregado M7 es nulo (figura 3.43).

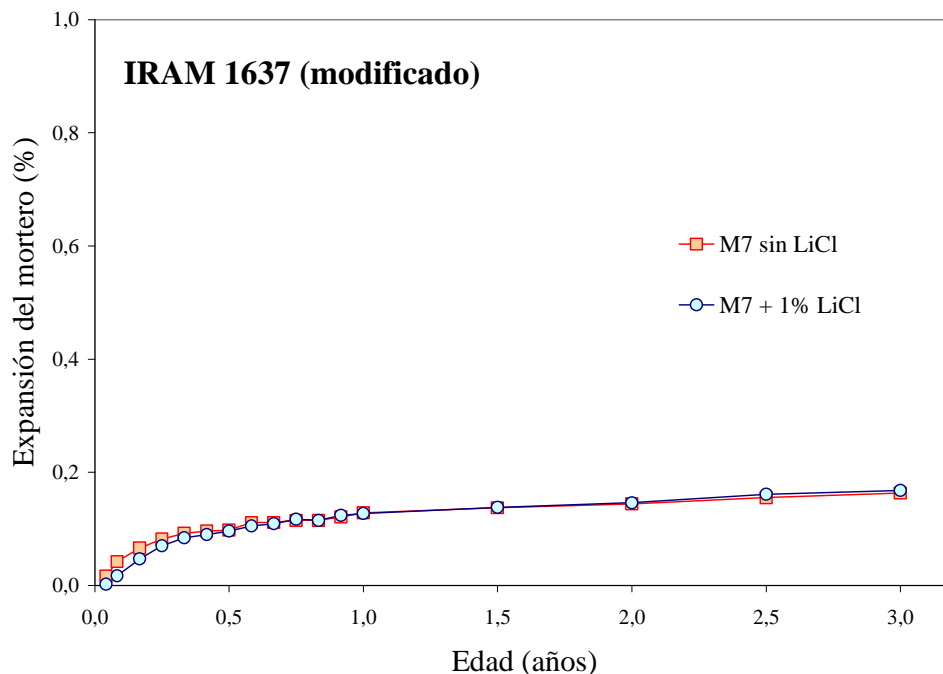


Figura 3.43 Influencia de la adición de LiCl sobre la expansión del mortero elaborado con el agregado M7 (IRAM 1637 modificado)

La figura 3.44 muestra el efecto que posee la incorporación de Li_2CO_3 y $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en mezclas de hormigón elaboradas con el agregado M9 (tamaño máximo 9,5 mm), ensayadas mediante el método CSA A23.2-14A-M90 (Milanesi *et al.*, 2012).

Según la hipótesis de Pagano y Cady (1982), si la conducta del agregado responde al mecanismo de expansión propuesto por Hadley (1964), el Li_2CO_3 podría actuar como inhibidor de la RAC al disminuir la presión osmótica que se genera alrededor de los cristales de dolomita, como resultado de la reacción de dedolomitización. Por su parte, el $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ actuaría disminuyendo la capacidad expansiva de las arcillas “activas” contenidas en la roca, según la hipótesis de Swenson y Guillott (1964).

Los resultados de estas experiencias demuestran que el Li_2CO_3 y el $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ no resultan útiles para inhibir los efectos expansivos de este agregado. A edad temprana, el efecto de estos aditivos es inverso al esperado, ya que ambos potencian la reacción expansiva. En el caso particular del Li_2CO_3 , este hecho podría atribuirse a la formación de LiOH, a partir de la reacción de aquel con el hidróxido de calcio de la pasta de cemento hidratada. Este LiOH podría incrementar el pH de la solución, lo cual, aceleraría la RAC. Este efecto, sin embargo, no fue constatado por Pagano y Cady (1982).

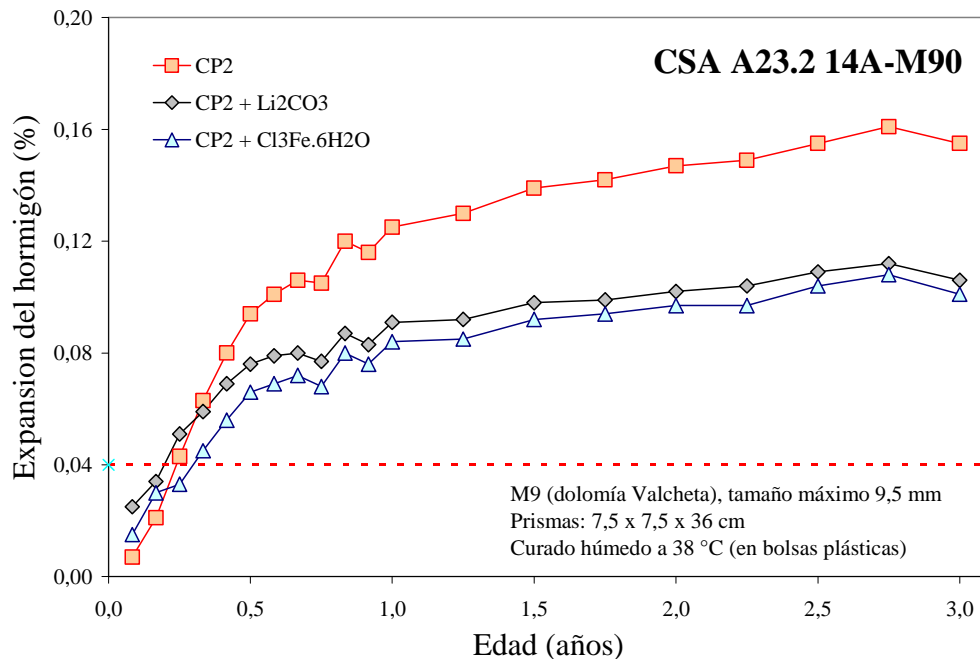


Figura 3.44 Influencia de la adición del Li_2CO_3 y $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ sobre la expansión del hormigón elaborado con el agregado M7 (CSA A23.2-14A-M90)

Más allá de los tres meses el efecto de los aditivos se invierte y comienzan a atenuar las expansiones del hormigón. A los ocho meses, la reducción obtenida es cercana al 25 %. En las experiencias realizadas por Pagano y Cady (1982), esta cifra alcanzó un valor del orden del 50 %.

3.2.4. Reducción del tamaño máximo del agregado grueso

Como se mencionó en 1.3.4, el estudio de la influencia que posee la granulometría del agregado dolomítico en la expansión generada por la RAC ocupa un lugar importante en los trabajos de investigación que figuran en la literatura (Sommer *et al.*, 2004, 2005; Lu *et al.*, 2008).

En la tabla 3.16 se resumen los resultados de expansión obtenidos por los métodos IRAM 1637 (figuras 3.11 y 3.37) e IRAM 1674 (figuras 3.32 y 3.33) donde el agregado de Valcheta ha sido empleado con distintas granulometrías.

Tabla 3.16: Efecto de la granulometría del agregado de Valcheta en la expansión del mortero en los ensayos IRAM 1637 e IRAM 1674

Método de ensayo	Edad	Expansión del mortero (%)		Incremento de la expansión (fracción gruesa/fina) (%)
		Fracción granulométrica (mm)		
		0,15 - 4,75	1,18 - 4,75	
IRAM 1637	12 meses	0,069 ⁽¹⁾	0,128 ⁽²⁾	86
IRAM 1674	14 días	0,103 ⁽³⁾	0,196 ⁽⁴⁾	90

1) Agregado M4 (CP1); 2) Agregado M7 (CP2)

3) Agregado M7 (CP1); 4) Agregado M7 (CP2)

Si bien la información contenida en esta tabla corresponde a muestras de agregado y cemento del mismo origen, sus datos no son rigurosamente comparables por haber sido obtenidos con diferentes partidas (M4 y M7; CP1 y CP2).

A pesar de lo expuesto, se ve, claramente, la existencia de un patrón de comportamiento: la eliminación de las partículas de tamaño inferior a 1,18 mm (pasa tamiz N° 16) produce un incremento significativo en la expansión del mortero (> 85 %) que va más allá de la diferencia que cabría esperar por un cambio en la partida del agregado o del error propio del método.

Si bien este comportamiento es típico en los agregados afectados por la RAC, también existen algunos ejemplos de esta conducta en agregados con RAS (Falcone y Milanesi, 2012a).

CAPÍTULO 4

Consideraciones finales

En este capítulo se resumen las principales conclusiones que se derivan del programa de investigación iniciado en 1991, destinado a evaluar la factibilidad de desarrollo de la RAC en rocas dolomíticas argentinas. Se estudiaron rocas dolomíticas, de distintos puntos del país, mediante un gran número de ensayos aplicados sobre muestras o testigos de roca y probetas de mortero y hormigón. Los resultados obtenidos han permitido detectar la existencia de una roca dolomítica, de elevada reactividad alcalina potencial, con características muy similares a las que señala la literatura como típicas de la RAC. En virtud de este hallazgo, se efectúan algunas consideraciones acerca de la relación que existe entre la reactividad de esta roca y sus características petrográficas. Se sintetizan las principales ventajas y limitaciones de cada uno de los métodos de ensayo aplicados y se realizan algunas recomendaciones tendientes a mejorar el desempeño de alguno de ellos. Se mencionan los avances logrados en el campo de la normalización para introducir requisitos específicos vinculados a la RAC. Por último, se proponen algunas líneas de investigación futura en éste área.

4.1. Conclusiones

A partir de la información recopilada durante la revisión bibliográfica y de los resultados obtenidos en esta investigación, es posible efectuar las siguientes consideraciones:

4.1.1 Acerca de la reactividad alcalina potencial de las muestras de roca seleccionadas

✓ La mayor parte de las rocas dolomíticas investigadas (M1, M2, M3, M5 y M8) mostraron un comportamiento estable en el hormigón. Estos resultados fueron corroborados por la mayoría de los ensayos físicos implementados. Sólo en los de moderada o alta temperatura (IRAM 1674, Larbi y Hudec) fue posible detectar una leve transformación mineralógica en el agregado (dedolomitización). Sin embargo, no queda claro aún cuál es el grado de vinculación que existe entre esta reacción y la expansión alcanzada por el mortero u hormigón.

✓ La dolomía procedente de la zona de Valcheta (M4, M7, M9 y M10) presentó una conducta expansiva en todos los ensayos físicos implementados (testigos de roca, barras de mortero

y prismas de hormigón). Las evaluaciones realizadas mediante DRX (ASTM C 586, Larbi y Hudec, CSA A23.2-14A) demuestran que el proceso expansivo de esta roca es acompañado por una clara transformación mineralógica, que da lugar a la formación de calcita y brucita, a expensas de la dolomita (dedolomitización). Los resultados obtenidos parecen sugerir que el grado de correlación que existe entre “expansión” y “reacción” (dedolomitización) es importante.

En los hormigones elaborados con el agregado de Valcheta se detectaron manchas de color claro, atribuidas a la carbonatación de la pasta (dedolomitización), y fisuras, que pudieron observarse a simple vista cuando la expansión del hormigón alcanzó valores del orden de 0,05 %. La existencia de depósitos de gel atribuidos a la RAS sólo fue constatada de manera circunstancial en las barras de mortero del ensayo IRAM 1637. Si bien este hecho abre la posibilidad de que la expansión del hormigón pueda estar vinculada, al menos en parte, a la RAS, la cantidad de gel detectada no guarda relación con la magnitud de las expansiones registradas.

La respuesta de la dolomía de Valcheta al etilen glicol fue negativa. No obstante, si bien estos resultados permiten minimizar la participación de la montmorillonita en el mecanismo expansivo de esta roca, es necesario profundizar estos estudios para confirmar esta presunción (ver 4.2).

Un aspecto a destacar es la ineficiencia que exhibieron las distintas estrategias empleadas para inhibir los efectos expansivos del agregado (AMA, aditivos químicos a base de litio, reducción del contenido de álcalis del hormigón). A pesar de haber empleado diversas AMA, de efectividad comprobada frente a la RAS, y en porcentajes adecuados o aún superiores a los de uso habitual, ninguna fue capaz de controlar los efectos de la reacción, en tanto que alguna de ellas llegaron incluso a potenciarla. Una consideración similar cabe para el caso de los aditivos químicos a base de litio. Es particularmente difícil explicar cómo un hormigón con un contenido de álcalis del orden de 1 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ pueda sufrir algún proceso expansivo generado por la RAS.

Las pruebas llevadas a cabo para evaluar la influencia que posee la granulometría del agregado en la expansión de mezclas de mortero demostraron que la conducta del agregado de Valcheta responde al patrón clásico de las rocas dolomíticas afectadas por la RAC (a medida que el tamaño de las partículas del agregado es mayor, mayor es la expansión del mortero).

A partir de lo expuesto, se considera que existen elementos de juicio suficientes para concluir que el comportamiento expansivo del agregado de Valcheta debe ser atribuido, en primer lugar, a la RAC. Es importante destacar que esta opinión ha sido compartida por Chris A. Rogers, un especialista en la materia, en una carta remitida al autor en el año 1994 (Anexo B).

4.1.2 Acerca de los métodos de ensayo

✓ Desde el punto de vista petrográfico, ninguna de las muestras de roca analizadas posee la textura característica distintiva de las rocas dolomíticas típicamente reactivas debido a la RAC (pequeños cristales de dolomita flotando en una matriz de calcita microcristalina). Sólo la roca de Valcheta posee las dos características esenciales para que la RAC pueda tener lugar (Ozol, 2006): estar constituida por cristales de dolomita de grano fino ($< 50 \mu\text{m}$) y ser suficientemente permeable para permitir el ingreso de los álcalis a la roca.

Como corolario de lo expuesto, surge que la sola aplicación del método petrográfico resulta insuficiente para pronosticar con certeza el comportamiento expansivo que tendrá el agregado, en base a los criterios normativos actuales (Jensen, 2012).

Es importante destacar que en el año 2006, Ozol realiza para la ASTM una revisión del estado del arte sobre la RAC. En esta publicación, menciona la existencia de algunas rocas dolomíticas expansivas que no poseen la textura “característica” de los carbonatos reactivos americanos, basándose en la experiencia china y en el trabajo de Milanesi *et al.* (1996). En el 2008, apoyándose en el trabajo de Ozol, la Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transporte de los EEUU, alerta a la comunidad técnica sobre estas excepciones en su reporte FHWA-HIF-09-001 (Thomas *et al.*, 2008).

✓ Los resultados de expansión obtenidos con el método del cilindro de roca “modificado” han sido coherentes con los obtenidos mediante el ensayo del prisma de hormigón. Esto habilita al método del cilindro de roca para ser aplicado con ventajas en tareas de investigación y en la detección de sectores de cantera que contengan material potencialmente reactivo. Sin embargo, su elevada dispersión limita su empleo en los controles de aceptación y rechazo de las distintas partidas de agregado.

✓ El método químico canadiense resultó inadecuado para identificar la conducta expansiva del agregado dolomítico de Valcheta, lo que pone en duda la aplicabilidad “universal” de este método. Según el conocimiento del autor, ésta es la primera vez que en la literatura se menciona la limitación de este método para pronosticar el comportamiento expansivo de una roca dolomítica frente a la RAC (Milanesi *et al.*, 2012).

✓ En coincidencia con lo señalado por diversos investigadores (Swenson, 1957; Bérubé y Fournier, 1992; Grattan-Bellew, 1983b; Shayan *et al.*, 1988; Grattan-Bellew, 1989; Lu *et al.*, 2008), ninguno de los métodos de ensayo de mezclas de mortero (IRAM 1637, IRAM 1674) resultó

adecuado para evaluar la RAC, en base a los criterios que habitualmente se adoptan para la RAS. Si bien, la conducta expansiva del agregado pudo ser detectada claramente, las expansiones registradas no fueron significativas. Lo dicho, faculta el empleo de estos métodos en investigación pero los inhabilita para su inclusión en normas o reglamentos de aplicación.

✓ El enfoque metodológico propuesto por el grupo RILEM, basado en la comparación de los resultados de los métodos acelerados AAR-2 y AAR-5, resultó adecuado para identificar la reactividad alcalina potencial de la dolomía de Valcheta. Este método posee un futuro promisorio, aunque su empleo aún es limitado ante la falta de normalización.

✓ El ensayo del prisma de hormigón es considerado en la actualidad como el método de mayor confiabilidad. Sin embargo, en la práctica, su utilización se ve a menudo impedida ya que el plazo requerido para la evaluación de sus resultados no suele ser compatible con los cronogramas de ejecución del proyecto de la mayoría de las obras civiles.

En base a la experiencia adquirida con el ensayo IRAM 1700 y dada la importancia que éste posee para definir la aptitud del agregado, se proponen a continuación algunas modificaciones en su metodología a fin de mejorar su desempeño:

- *Objeto y campo de aplicación:* Sería aconsejable, como ocurre en la norma canadiense, que el campo de aplicación del método pueda ser extendido a la evaluación de la “combinación” de los agregados gruesos y finos propuestos para la obra. Esta alternativa permitiría detectar algunos fenómenos particulares que no es posible identificar a través del estudio individual de los agregados.
- *Instrumental:* Es importante fijar la tolerancia en las medidas transversales de los moldes (75 ± 1 mm), como lo hace la norma canadiense (este factor influye de manera significativa en los resultados del ensayo). En cuanto a los contenedores de almacenamiento, sería importante precisar la cantidad de prismas que deben colocarse en los recipientes y las dimensiones de estos para asegurar la uniformidad de la temperatura y humedad relativa dentro de los mismos. También sería adecuado establecer un procedimiento similar al adoptado por la norma ASTM C 1293, que permita controlar la efectividad del sellado del contenedor para evitar las pérdidas de humedad.
- *Materiales:* Es necesario adecuar los requisitos que deben cumplir el cemento y los agregados a la normativa actual existente en el país. Adoptar el criterio utilizado por ASTM C 1293 o ASTM C 1105 para decidir cuándo es necesario ensayar la fracción del agregado grueso mayor a 19 mm. Aunque quizás no sea tan importante para la RAC, puede serlo para el estudio de la RAS. Es el caso

típico de algunos cantos rodados, como los del Río Uruguay, donde la composición petrográfica de cada fracción es diferente según su tamaño. Podría ser conveniente también, adecuar el requisito que se exige al agregado fino, no reactivo, que se emplea para evaluar la reactividad alcalina del agregado grueso, para asegurar que su empleo no tendrá efectos expansivos en el hormigón. Podría exigirse un requisito más estricto, como lo hace RILEM, especificando una expansión máxima menor a 0,05 % a los 14 días, en el método NBRI (IRAM 1674). También debería exigirse que el agregado fino no reactivo no aporte un contenido significativo de álcalis al hormigón (aunque ningún reglamento ha avanzado en este aspecto). Una consideración similar debería hacerse para el agregado grueso no reactivo.

- *Dosificación del hormigón:* es conveniente especificar cuál es el asentamiento adecuado para el moldeo de los prismas, a fin de acotar las variaciones que pudieran surgir en la proporción del hormigón, como resultado del criterio propio del operador ($8,0 \pm 2,0$ cm, por ejemplo). También sería importante que el método exija la determinación del asentamiento de la mezcla y su PUV, para poder recomponer la dosificación real del hormigón (en función de las pesadas) y controlar el contenido de aire naturalmente incorporado a la mezcla. Este contenido de aire debería ser limitado, en el caso de agregados con RAS, ya que su presencia puede disminuir la expansión del hormigón. Es importante señalar en este punto, que la norma IRAM 1700 exige informar la dosificación de la mezcla. Sería conveniente, además, permitir la posibilidad de incluir un aditivo superfluidificante, para ajustar la trabajabilidad de la mezcla, en caso de ser necesario.

- *Mezclado del hormigón:* si bien la norma IRAM 1700 exige que el mezclado sea mecánico, no establece cuál es el método que hay que aplicar (debería indicarse el IRAM 1534). Sería conveniente, por razones prácticas (el volumen de hormigón necesario para moldear tres prismas es del orden de 7 l), permitir que el mezclado pueda también realizarse en forma manual.

- *Calificación del laboratorio de ensayo:* Sería interesante (aunque difícil de implementar en lo inmediato) incluir una especificación que permita, como lo hace la norma canadiense, calificar la idoneidad del laboratorio interviniente para conducir el ensayo. Esto exigiría que algún laboratorio de prestigio, como el LEMIT o el INTI, por ejemplo, conforme un acopio importante de agregado reactivo, de comportamiento conocido, para que pueda ser adquirido por el resto de los laboratorios para su control.

✓ En resumen, ninguno de los métodos de ensayo disponibles es absolutamente efectivo al momento de pronosticar la reactividad alcalina potencial del agregado. Por este motivo, la mejor aproximación consiste en el empleo de dos o más métodos que permitan complementar sus

resultados. Una buena alternativa es integrar el método petrográfico con algún método acelerado (RILEM), hasta tanto se disponga de los resultados del comportamiento de mezclas de hormigón (IRAM 1700), en caso de que esto sea necesario.

4.1.3 Acerca del estado actual de los reglamentos y normas referentes a la RAC en Argentina

✓ En el mes de septiembre de 2012, en base a la gestión realizada por el autor, como miembro del Subcomité de Agregados del IRAM, aparece una nueva versión de la norma IRAM 1531 “Agregado grueso para hormigón de cemento – Requisitos” (IRAM, 2012). En esta norma se introducen algunos lineamientos para la identificación petrográfica de los agregados dolomíticos, desde el punto de vista de la RAC, y se establecen criterios de aceptación en base al ensayo IRAM 1700. Además, esta norma establece que, en caso de verificarse que el agregado es susceptible a la RAC, éste no debe utilizarse y debe ser reemplazado por otros de características inocuas.

Este documento constituye el primer antecedente a nivel nacional en el que se reconoce a la RAC como un problema de durabilidad del hormigón.

4.2. Propuestas para investigaciones futuras

El estudio de las causas que conducen a la expansión de los agregados dolomíticos afectados por la RAC constituye un tema de gran interés a nivel internacional.

Según las conclusiones a las que se arribó durante el último congreso internacional de la reacción álcali-agregado, celebrado en la ciudad de Austin (Texas, EEUU), en mayo de 2012, el mecanismo de expansión de esta reacción no ha sido aún resuelto y constituye, actualmente, una temática de gran controversia (Katayama, 2012; Katayama y Grattan-Bellew, 2012, Jensen, 2012).

En este contexto, una de las posibles líneas de investigación a abordar en el futuro es profundizar los estudios sobre la dolomía de Valcheta, haciendo foco en el mecanismo de expansión de esta roca, considerando su elevada reactividad alcalina.

Entre los aspectos que resultan de mayor interés se destaca el estudio de la relación que existe entre la dedolomitización del agregado (reacción) y la expansión del hormigón. Estos estudios deben estar dirigidos a responder los siguientes interrogantes: ¿Es la dedolomitización la causa directa de la expansión de la roca o sólo un paso intermedio que dispara algún otro mecanismo expansivo? ¿Por qué algunos agregados reaccionan (se dedolomitizan) pero no producen expansión en el hormigón?

El análisis de las curvas “expansión” vs. “tiempo” de los testigos de roca del ensayo ASTM C 586 puede aportar información valiosa. Dado que estas curvas, como se ha visto al discutir el punto 3.1.1.2, adoptan la clásica forma de “S”, es interesante indagar la razón de este comportamiento. En particular, se considera que es importante identificar los factores que inciden en la duración del período de inducción (como son el grado de reactividad de la roca o el diámetro del testigo) y las razones del agotamiento de la reacción durante la fase de expansión tardía (¿la expansión cesa al no haber más dolomita que pueda reaccionar?). El estudio de este método de ensayo es particularmente útil para investigar con detalle la relación que existe entre reacción (dedolomitización) y expansión. Es de esperar que estos resultados aporten información complementaria que ayude a interpretar la razón de la baja repetibilidad del método y los factores que inciden en la conducta expansiva de la roca, como, por ejemplo, la dirección de extracción de los testigos con relación a los planos de estratificación de la roca.

Un capítulo especial merece el estudio de la influencia que puede ejercer la naturaleza del catión alcalino (Na^+ , Li^+ , Ca^{2+}) en el mecanismo de expansión de la roca. En el caso del Ca^{2+} , el estudio debe orientarse a confirmar si una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, como la que caracteriza a la solución contenida en los poros del hormigón, es capaz de producir la dedolomitización de la roca y promover, además, su expansión (según el conocimiento del autor, no existen datos publicados de experiencias similares). Sería conveniente, además, investigar la respuesta de la roca frente a la acción del LiOH . En efecto, durante el proceso de dedolomitización de la roca, el Li_2CO_3 que se forma, al ser de baja solubilidad, precipita, dando lugar a la aparición de una nueva fase sólida que modifica el mecanismo clásico de la RAC.

Como se mencionó en el capítulo 1, Katayama y Sommer (2008) afirman que el comportamiento expansivo que se observa en los agregados dolomíticos que muestran signos característicos de RAC debe ser atribuido a la RAS. Por lo expuesto, se debería ahondar en esta línea, por ejemplo, valorando la cantidad de sílice soluble que es capaz de aportar esta roca.

Estudios realizados por Cortelezzi *et al.* (1986), en basaltos con arcillas expansivas (montmorillonita), han demostrado que, en ocasiones, el ensayo de inmersión en etilen glicol conduce a la obtención de falsos negativos (el basalto es inestable debido a la montmorillonita, pero el ensayo no es capaz de detectar su influencia perjudicial). Por ello, estos investigadores aconsejan realizar estudios complementarios (expansión de testigos de roca en agua, ensayo de mojado y secado) para definir con mayor certeza la aptitud del agregado. Esto plantea la necesidad de efectuar pruebas adicionales sobre la dolomía de Valcheta a fin de confirmar el verdadero rol que juega la componente arcillosa (montmorillonita) presente en esta roca.

Con los resultados y conclusiones de las experiencias propuestas en este apartado se propone la presentación de un trabajo de Tesis para aspirar al título de Doctor en Ingeniería.

CAPÍTULO 5

Referencias

AASHTO (2010): AASHTO PP 65-10 – Standard practice for determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction. *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing - Provisional Standards*. 444 North Capitol Street, N.W., Suite 249, Washington, D.C. 20001 (USA): AASHTO, 2010 (30th edition), 20 pp. (en CD-ROM)

ACI Committee 221 (1998): ACI 221.1R-98 (Reapproved 2008) – State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity. *ACI's 2011 Manual of Concrete Practice*. Farmington Hills, MI (USA): ACI, August 1998, 30 pp. (en CD-ROM)

ACI Committee 363 (2010): ACI 363R-10 – Report on high-strength concrete. *ACI's 2011 Manual of Concrete Practice*. Farmington Hills, MI (USA): ACI, March 2010, 67 pp. (en CD-ROM)

AFNOR (2004): Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction (essai de performance). *AFNOR P18-454*. Paris (France), 8 pp.

Aïtcin, P.C., Mindess, S. (2011): *Sustainability of concrete*. Milton Park, Abingdon, Oxon (UK): Spon Press (1st edition), 328 pp.

Alasali, M.M., Malhotra, V.M., Soles, J.A. (1991): Performance of various test methods for assessing the potential alkali-reactivity of some Canadian aggregates. *ACI Materials Journal*. 88 (6): 613-619

Alexander, M., Mindess, S. (2005): *Aggregates in concrete*. Bentur, A. & Mindess, S. (editors), Modern Concrete Technology Series (13). Abingdon, Oxon (UK), USA y Canada: Taylor & Francis, 2005, 436 pp.

ASTM (2010a): ASTM C 33/C 33M-08 – Standard specification for concrete aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 11 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010b): ASTM C 227-10 – Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method). *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 6 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010c): ASTM C 295-08 – Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 9 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010d): ASTM C 586-05 – Standard test method for potential alkali reactivity of carbonate rocks as concrete aggregates (rock-cylinder method). *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 6 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010e): ASTM C 618-05 – Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 3 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010f): ASTM C 856-04 – Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 17 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010g): ASTM C 1105-08a – Length change of concrete due to alkali-carbonate rock reaction. *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 5 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010h): ASTM C 1260-07 – Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 5 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010i): ASTM C 1293-08b – Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 5 pp. (en CD-ROM)

ASTM (2010j): ASTM C 1567-07 – Standard test method for determining the potential alkali reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (mortar-bar method). *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, Philadelphia (USA): ASTM International, October 2010, 04.02 (Concrete and Aggregates), 6 pp. (en CD-ROM)

Batic, O.R., Falcone, D.D., Milanesi, C.A., Violini, D. (2010): Evaluación de la reactividad de los agregados – Avances en la aplicación de un método acelerado del prisma de hormigón. *Revista Hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, enero/julio 2010, 48: 7-16

Batic, O.R., Milanesi, C.A. (1991): Experiencias sobre la reacción álcali-carbonato con rocas dolomíticas. *Revista Hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, enero/junio 1991, 19: 15-29

Batic, O.R., Milanesi, C.A. (1995): Consideraciones sobre el método de expansión de prismas de hormigón al estudio de la reactividad alcalina de los agregados. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): *Memorias, XII Reunión Técnica "Dra. Haydée V. Armándola"*. La Plata (Argentina), 149-162

Batic, O.R., Milanesi, C.A., Sota, J.D. (2000): Effects of alkali-silica and alkali-carbonate rock reaction on aggregate-mortar bond. In: Bérubé, M.A., Fournier, B., & Durand, B. (editors): *Proceedings, 11th International Congress on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*. Québec (Canada), June 2000. Québec (Canada): Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB) – Département de Génie Civil, Université Laval, 1-10

Batic, O.R., Sota, J.D. (2001): Reacciones deletéreas internas. En: Irassar E. F. (editor): *Durabilidad del hormigón estructural*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Capítulo 4: 157-216

Batic, O.R., Sota, J.D., Cortelezzi, C., Maiza, P.J. (1985): Observaciones realizadas en los productos de alteración obtenidos en hormigones afectados por la reacción álcali-agregado. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): *Memorias, Colloquia 85*. Buenos Aires (Argentina), 1: 275-289

Batic, O.R., Sota, J.D., Serrani, H.R. (1984): Estudio de las posibles causas de deterioro del hormigón de la pista de aterrizaje y zona de servicio del aeropuerto de Camba Punta – Corrientes. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): *Memorias, VI Reunión Técnica*. Bahía Blanca (Argentina), 2: 249-270

- Bérubé, M.A., Fournier, B. (1992): Accelerated test method for alkali-aggregate reactivity. In: Malhotra, V.M. (editor), *Proceedings, International Symposium on Advances in Concrete Technology*. CANMET/ACI, Athens (Greece), 583-627
- Buck, A.D., Dolch, W.L. (1966): Investigation of a reaction involving nondolomitic limestone aggregate in concrete. *Journal of the American Concrete Institute*. July 1966, Title No. 63-39: 755-765
- Cabrera, O.A. (1996): Agregado grueso dolomítico para hormigones. *Vivienda – La revista de la construcción*. Agosto 1996, 408: 87-90
- Cement & Concrete Association of New Zeland (2003): Minimising the risk of damage to concrete – Guidance notes and recommended practice (second edition). *Technical Report 3 (TR 3) – Alkali Silica Reaction*. CCANZ, 84 pp (<http://www.ccanz.org.nz/page/Alkali-Aggregate-Reaction.aspx>)
- Cengija, P., Baylac, M., Guaragna, A. (1989): Efectividad de la puzolana frente a la reacción álcalis-agregado. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): *Memorias, IX Reunión Técnica “Ing. Simón A. Delpech”*. Buenos Aires (Argentina), 2: 253:267
- Cortelezzi, C.R., Traversa, L.P., Giovambattista, A., Maiza, P.J., Pavlicevic, R. (1986): Durability of basalts contaminated with expansive clays. In: Congress Editors: *Proceedings, 5th International Congress of the International Association of Engineering Geology*. Buenos Aires (Argentina), 5: 1633-1638
- CSA (2009a): Alkali-aggregate reaction – Annex B (informative). *Concrete Materials and Methods of Concrete Construction (A23-1-09)*. Mississauga, Ontario (Canada): CSA, July 2009, 141-163
- CSA (2009b): A23.2-14A – Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C). *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*. Mississauga, Ontario (Canada): CSA, July 2009, 285-296
- CSA (2009c): A23.2-15A – Petrographic examination of aggregates. *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*. Mississauga, Ontario (Canada): CSA, July 2009, 297-328
- CSA (2009d): A23.2-25A – Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*. Mississauga, Ontario (Canada): CSA, July 2009, 358-365

- CSA (2009e): A23.2-26A – Determination of potential alkali-carbonate reactivity of quarried carbonate rocks by chemical composition. *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*. Mississauga, Ontario (Canada): CSA, July 2009, 366-370
- CSA (2009f): A23.2-27A – Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete. *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*. Mississauga, Ontario (Canada): CSA, July 2009, 317-384
- CSA (2009g): A23.2-28A – Standard practice for laboratory testing to demonstrate the effectiveness of supplementary cementing materials and lithium-based admixtures to prevent alkali-silica reaction in concrete. *Test Methods and Standard Practices for Concrete (A23-2-09)*. Mississauga, Ontario (Canada): CSA, July 2009, 385-390
- Deng, M., Han, S.F., Lu, Y.N., Lan, X.H., Hu, Y.L., Tang, M.S. (1993): Deterioration of concrete structures due to alkali-dolomite reaction in China. *Cement and Concrete Research*. 23: 1040-1046
- Deng, M., Lan, X.H., Xu, Z., Tang, M. (1992): Petrographic characteristics and distributions of reactive aggregates in China. In: Tang, M. & Deng, M. (editors): *Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Beijing (China). Beijing (China): International Academic Publishers – World Publishing Corporation, 1: 87-98
- Deng, M., Tang, M. (1993): Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks. *Cement and Concrete Research*. 23: 1397-1408
- Deng, M., Xu, Z., Lan, X., Tang, M. (1996): Railway ties affected by alkali-aggregate reactions. In: Shayan A. (editor): *Proceedings, 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Melbourne (Australia), August 18-23 1996. Melbourne (Australia): CSIRO Division of Building Construction and Engineering, 265-270
- Dolar-Mantuani, L. (1971): Late-expansion alkali-reactive carbonate rocks. *Highway Research Record*. Highway Research Board, Washington DC, Record No. 353: 1-14
- Duke, E.F., Hansen, M.R., Johnston, D.P. (1997): Microstructure of concrete from pavement containing alkali-reactive carbonate aggregate: An SEM and optical microscope study. In: Malhotra V.M. (editor): *Proceedings, 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*. ACI SP 170-32, Sydney (Australia), 1: 617-631

Falcone, D., Milanesi, C.A. (2012a): Avances en la aplicación de un nuevo método acelerado para la evaluación de la reacción álcali-agregado. En: Sota, J.D., Ortega, N.F. y Moro, J.M. (editores): Memorias, *XIX Reunión Técnica “Ing. Oscar R. Batic”*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Bahía Blanca, Buenos Aires (Argentina), 207-214

Falcone, D., Milanesi, C.A. (2012b): Método acelerado del prisma de hormigón – Evaluación de la RAS con agregados de diversas regiones de la Argentina. En: Sota, J.D., Ortega, N.F. y Moro, J.M. (editores): Memorias, *XIX Reunión Técnica “Ing. Oscar R. Batic”*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Bahía Blanca, Buenos Aires (Argentina), 215-222

Falcone, D., Milanesi, C.A., Violini, D., Batic, O.R. (2011): Evaluación de la reactividad de los agregados. Método acelerado del prisma de hormigón – Parte II. En: Memorias, *7º Congreso Internacional sobre Patología y Rehabilitación de Estructuras – Cinpar 2011*. Fortaleza (Brasil), 10 pp. (en CD-ROM)

Falcone, D.D., Sota, J.D., Batic, O.R. (2008): Discusión sobre métodos para evaluar agregados potencialmente reactivos. En: Rahhal V. y Sota J.D. (editores): Memorias, *XVII Reunión Técnica “Ing. José Fermín Colina”*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina), 329-336

Fava, A.S.C., Galupo, J.C. (1982): La reacción expansiva álcalis-carbonato en el hormigón de cemento pórtland. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): Memorias, *5ta. Reunión Técnica “Ing. Arturo M. Guzman”*. La Plata (Argentina), 2: 377-404

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 portland. *Revista LEMIT*. La Plata, Buenos Aires (Argentina), Serie II, No. 85, 43 pp.

Fournier, B., Bérubé, M.A. (1989): Alkali-reactivity potential of carbonate rocks from the St. Lawrence Lowlands (Québec, Canada). In: Okada, K., Nishibayashi, S., & Kawamura, M. (editors): Proceedings, *8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Kyoto (Japan). London (UK), New York (USA): Elsevier Applied Science, 363-368

Fournier, B., Bérubé, M.A. (2000): Alkali-aggregate reaction in concrete – A review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering – Special Issue on Alkali-Aggregate Reactivity in Canada*. April 2000, 27 (2): 167-191

- Fournier, B., Bérubé, M.A., Frenette, J. (2000): Laboratory investigations for evaluating potential alkali-reactivity of aggregates and selecting preventive measures against alkali-aggregate reaction (AAR) – What do they really mean? In: Bérubé, M.A., Fournier, B., & Durand, B. (editors): *Proceedings, 11th International Congress on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*. Québec (Canada), June 2000. Québec (Canada): Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB) – Département de Génie Civil, Université Laval, 287-296
- Fournier, B., Malhotra, V.M. (1996): Inter-laboratory study on the CSA A23.2-14A concrete prism test for alkali-silica reactivity in concrete. In: Shayan A. (editor): *Proceedings, 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Melbourne (Australia), August 18-23 1996. Melbourne (Australia): CSIRO Division of Building Construction and Engineering, 302-309
- Fournier, B., Nkinamubanzi, P.C., Lu, D., Thomas, M.D.A., Folliard, K.J., Ideker, J.H. (2006): Evaluating potential alkali-reactivity of concrete aggregates – How reliable are the current and new test methods? In: Fournier B. (editor): *Proceedings, Marc-André Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*. Montreal (Canada), May 2006, 21-43
- Fournier, B., Rogers, C.A. (2008): Multi-laboratory study of accelerated mortar bar test and concrete prism expansion tests at 38° and 60°C. In: Broekmans M.A.T.M. & Wigum B.J. (editors): *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Trondheim (Norway), 10 pp. (en CD-ROM, The Netherlands: Cd-design and Construct: Quick! Scan Communicatie)
- Giaccio, G., Giovambattista, A., Rocco, C., Zerbino, R. (1991): Hormigones elaborados con piedra partida calcárea. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*. CIC-LEMIT, Año 1, 2: 99-112
- Giaccio, G., Zerbino, R. (1994): Hormigones de alta performance. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*. CIC-LEMIT, Año 2, 3: 37-67
- Giaccio, G.M., Zerbino, R. (2004): Hormigones de alta performance. En: Irassar, E.F. (editor): *Hormigones especiales*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. La Plata, Buenos Aires (Argentina): Autoeditor, agosto 2004, Capítulo 2: 17-55
- Giovambattista, A. (2001): El diseño por durabilidad de las estructuras de hormigón y los reglamentos de seguridad: Soluciones actuales y en desarrollo. En: Irassar E. F. (editor): *Durabilidad del Hormigón Estructural*. [S. l.]: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2001. Capítulo 6: 259-306

- Giovambattista, A. (2004): Research and repair of a concrete building affected by alkali-silica reaction. In: Tang, M. & Deng, M. (editors): Proceedings, *12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Beijing (China). Beijing (China): International Academic Publishers – World Publishing Corporation, 2: 1229-1234
- Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1981): Durabilidad de hormigones de cemento pórtland. *Revista Hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires (Argentina), julio/diciembre 1981, 5: 5-20
- Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1985): Reacción álcali-sílice – Implicancias tecnológicas, ecológicas y económicas en la optimización de las soluciones ingenieriles. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): Memorias, *Colloquia 85*. Buenos Aires (Argentina), 2: 453-462
- Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. (1986): Reactivity of alkalis and sandstone cemented with opal and chalcedony. In: Grattan-Bellew P.E. (editor): Proceedings, *7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Ottawa (Canada). New Jersey (USA): Noyes Publications, 408-412
- Grattan-Bellew, P.E. (1981): Evaluation of miniature rock prism test for determining the potential alkali-expansivity of aggregates. *Cement and Concrete Research*. 11: 699-711
- Grattan-Bellew, P.E. (1983a): Re-evaluation of standard mortar bar and concrete prism tests for alkali-aggregate reactivity. *Materials and Structures*. RILEM, Paris, 16 (94): 243-250
- Grattan-Bellew, P.E. (1983b): Evaluation of test methods for alkali-aggregate reactivity. In: Idorn G.M. & Rostam S. (editors): Proceedings, *6th International Conference on Alkalies in Concrete*. Danish Concrete Institute, Copenhagen (Denmark), 303-314
- Grattan-Bellew, P.E. (1989): Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates. In: Okada, K., Nishibayashi, S., & Kawamura, M. (editors): Proceedings, *8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Kyoto (Japan). London (UK), New York (USA): Elsevier Applied Science, 279-294
- Grattan-Bellew, P.E. (1996a): A critical review of accelerated ASR tests. In: Shayan A. (editor): Proceedings, *10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Melbourne (Australia), August 18-23 1996. Melbourne (Australia): CSIRO Division of Building Construction and Engineering, 27-38

- Grattan-Bellew, P.E. (1996b): Microstructural investigation of deteriorated portland cement concrete. *Construction and Building Materials*. 10 (1): 3-16
- Grattan-Bellew, P., Guillott, J. (1987): Three decades of studying the alkali reactivity of Canadian aggregates. In: Scanlon J.M. (editor): *Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability*. American Concrete Institute, ACI SP 100-70, Atlanta, Georgia (USA), 2: 1365-1384
- Grattan-Bellew, P.E., Lefebvre, P.J. (1986): Effect of confinement on deterioration of concrete made with alkali-carbonate reactive aggregate. In: Grattan-Bellew P.E. (editor): *Proceedings, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Ottawa (Canada). New Jersey (USA): Noyes Publications, 280-285
- Grattan-Bellew, P.E., Margeson, J., Mitchell, L.D., Min, D. (2008): Is ACR just another variant of ASR? Comparison of acid insoluble residues of alkali-silica and alkali-carbonate reactive limestones and its significance for the ASR/ACR debate. In: Broekmans M.A.T.M. & Wigum B.J. (editors): *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Trondheim (Norway), 11 pp. (en CD-ROM, The Netherlands: Cd-design and Construct: Quick! Scan Communicatie)
- Guillott, J.E. (1963): Petrology of dolomitic limestones, Kingston, Ontario, Canada. *Bulleting of the Geological Society of America*. June 1963, 74 (6): 759-778
- Hadley, D.W. (1961): Alkali reactivity of carbonate rocks – Expansion and dedolomitization. In: *Proceedings, Highway Research Board*. 40: 462-474
- Hadley, D.W. (1964): Alkali reactivity of dolomitic carbonate rocks. In: *Proceedings, Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reactions, Highway Research Record*. Highway Research Transportation Board, Washington, DC, 45: 1-20.
- Higgs, N.B. (1976): Slaking basalts. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 8 (2): 151-162
- Hudec, P.P., Larbi, J.A. (1989): A study of alkali-aggregate reaction in concrete: Measurement and prevention – Part I: Measurement – Development of rapid AR test method. *Cement and Concrete Research*. 19 (6): 905-912

- Hugenberg, T. (1986): Alkali-carbonate rock reaction at Center Hill Dam, Tennessee. In: Scanlon J.M. (editor): *Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability*. American Concrete Institute, ACI SP 100-96, Atlanta, Georgia (USA), 2: 1883-1901
- Ideker, J.H., East, B.L., Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., Fournier, B. (2008): The current state of the accelerated concrete prism test. In: Broekmans M.A.T.M. & Wigum B.J. (editors): *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Trondheim (Norway), 11 pp. (en CD-ROM, The Netherlands: Cd-design and Construct: Quick! Scan Communicatie)
- Ideker, J.H., Folliard, K.J., Fournier, B., Thomas, M.D.A. (2006): The role of “non-reactive” aggregates in the accelerated (60 °C) concrete prism test. In: Fournier B. (editor): *Proceedings, Marc-André Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*. Montreal (Canada), May 2006, 45-70
- INTI-CIRSOC (1982): Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado y pretensado. *Reglamento CIRSOC 201*. Tomo 1, julio 1982 (actualización 1984), 179 pp. (<http://www.inti.gob.ar/cirsoc/reglamentos.htm>)
- INTI-CIRSOC (2005): Reglamento argentino de estructuras de hormigón. *CIRSOC 201*. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación, Edición julio 2005 (<http://www.inti.gob.ar/cirsoc/201.htm>)
- IRAM (1982): Rocas basálticas – Método de determinación de la estabilidad – Ensayo de inmersión en etanodiol (etilen glicol). *Norma IRAM 1519*. [S. l.]: IRAM, noviembre 1982, 6 pp.
- IRAM (1992): Reacción álcali-agregado – Determinación de la reactividad alcalina potencial – Método de la barra de mortero. *Norma IRAM 1637*. [S. l.]: IRAM, octubre 1992, 18 pp.
- IRAM (1997a): Agregados – Determinación de la reactividad alcalina potencial – Método acelerado de la barra de mortero. *Norma IRAM 1674*. [S. l.]: IRAM, junio 1997, 14 pp.
- IRAM (1997b): Agregados – Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado. *Norma IRAM 1700*. [S. l.]: IRAM, octubre 1997, 16 pp.
- IRAM (2008): Examen petrográfico de agregados para hormigón. *Norma IRAM 1649*. [S. l.]: IRAM, diciembre 2008, 20 pp.

IRAM (2012): Agregado grueso para hormigón de cemento – Requisitos. *Norma IRAM 1531*. [S. l.]: IRAM, Cuarta edición, septiembre 2012, 28 pp.

Jensen, V. (2012): The controversy of alkali carbonate reaction: State of art on the reaction mechanisms and behaviour in concrete. In: Drimalas, T., Ideker, J.H. & Fournier, B. (editors): *Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Austin, Texas (USA), 10 pp. (en CD-ROM)

Katayama, T. (1992): A critical review of carbonate rock reactions – Is their reactivity useful or harmful? In: Poole, A.B. (editor): *Proceedings, 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. London (UK), 27-31 July 1992. Slough (UK): Concrete Society, 1: 508-518

Katayama, T. (2004): How to identify carbonate rock reactions in concrete. *Materials Characterization*. 53: 85-104

Katayama, T. (2012): Rim-forming dolomitic aggregate in concrete structures in Saudi Arabia – Is dedolomitization equal to the so-called alkali-carbonate reaction? In: Drimalas, T., Ideker, J.H. & Fournier, B. (editors): *Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Austin, Texas (USA), 10 pp. (en CD-ROM)

Katayama, T., Grattan-Bellew, P.E. (2012): Petrography of the Kingston experimental sidewalk at age 22 years – ASR as the cause of deleteriously expansive, so-called alkali-carbonate reaction. In: Drimalas, T., Ideker, J.H. & Fournier, B. (editors): *Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Austin, Texas (USA), 10 pp. (en CD-ROM)

Katayama, T., Sommer, H. (2008): Further investigation of the mechanisms of so-called alkali-carbonate reaction based on modern petrographic techniques. In: Broekmans M.A.T.M. & Wigum B.J. (editors): *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Trondheim (Norway), 11 pp. (en CD-ROM, The Netherlands: Cd-design and Construct: Quick! Scan Communicatie)

Klaric, M.E. (1992): Estudio de la reacción álcali-sílice en estructuras existentes. *Revista Hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, julio/diciembre 1992, 22: 19-31

Larbi, J.A., Hudec, P.P. (1990): A study of alkali-aggregate reaction in concrete: Measurement and prevention – Part II: AR in saturated hot and cold NaCl solutions. *Cement and Concrete Research*. 20 (1): 73-78

- López-Buendía, A.M., Climent, V., Mar Urquiola, M., Bastida, J. (2008): Influence of dolomite stability on alkali-carbonate reaction. In: Broekmans M.A.T.M. & Wigum B.J. (editors): *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Trondheim (Noruega), 10 pp. (en CD-ROM, The Netherlands: Cd-design and Construct: Quick! Scan Communicatie)
- Lu, D., Fournier, B., Grattan-Bellew, P.E. (1992): Evaluation of the Chinese accelerated test for alkali-carbonate reaction. In: Tang, M. & Deng, M. (editors): *Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Beijing (China). Beijing (China): International Academic Publishers – World Publishing Corporation, 1: 386-392
- Lu, D., Fournier, B., Grattan-Bellew, P.E., Xu, Z., Tang, M. (2008): Development of a universal accelerated test for alkali-silica and alkali-carbonate reactivity of concrete aggregates. *Materials and Structures*. 41: 235-246
- Lu, D., Mei, L., Xu, Z., Tang, M., Fournier, B. (2006a): Alteration of alkali reactive aggregates autoclaved in different alkali solutions and application to alkali-aggregate reaction in concrete – (I) Alteration of alkali reactive aggregates in alkali solutions. *Cement and Concrete Research*. 36: 1176-1190
- Lu, D., Mei, L., Xu, Z., Tang, M., Mo, X., Fournier, B. (2006b): Alteration of alkali reactive aggregates autoclaved in different alkali solutions and application to alkali-aggregate reaction in concrete – (II) Expansion and microstructure of concrete microbar. *Cement and Concrete Research*. 36: 1191-1200
- Maiza, P.J., Marfil, S.A. (2000): Petrografía del hormigón endurecido – Estudio de un pavimento con patologías. *Revista Hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, enero/junio 2000, 35: 11-21
- Maiza, P.J., Marfil, S.A., Milanesi, C.A. (1999): Minerales desarrollados en hormigones deteriorados por la reacción álcali-sílice (Provincia de Córdoba). En: Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa (editor): *Memorias, VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*. COPROCNA, Santa Rosa, La Pampa (Argentina), 193-199
- Mather, K., Buck, A.D., Luke, W.I. (1964): Alkali-silica and alkali-carbonate reactivity of some aggregates from South Dakota, Kansas, and Missouri. In: *Proceedings, Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reactions*. Highway Research Record, Highway Research Transportation Board, Washington, DC, 45: 72-109

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1986): *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. Englewood Cliffs, New Jersey (USA): Prentice Hall, 1986 (3rd edition, The McGraw-Hill Companies, New York, 2006), 659 pp.

Milanesi, C.A., Batic, O.R. (1993a): Comportamiento de algunas adiciones minerales activas frente a la reacción álcali-carbonato. *Revista Hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, enero/junio 1993, 23: 41-51

Milanesi, C.A., Batic, O.R. (1993b): Experiencias con adiciones minerales activas tendientes a controlar la reacción álcali-carbonato. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): *Memorias, Congreso Internacional de Ingeniería Estructural y Tecnología del Hormigón Cba. 93'*. Córdoba (Argentina), 1: 79-91

Milanesi, C.A., Batic, O.R. (1993c): Comportamiento mecánico de hormigones afectados por la reacción álcali-agregado. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): *Memorias, Congreso Internacional de Ingeniería Estructural y Tecnología del Hormigón Cba. 93'*. Córdoba (Argentina), 1: 27-42

Milanesi, C.A., Batic, O.R. (1994): Alkali reactivity of dolomitic rocks from Argentina. *Cement and Concrete Research*. 24 (6): 1073-1084

Milanesi, C.A., Batic, O.R. (1995): Método de ensayo acelerado NBRI – Criterios a emplear en la evaluación de sus resultados. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editor): *Memorias, XII Reunión Técnica "Dra. Haydée V. Armándola"*. La Plata (Argentina), 179-190

Milanesi, C.A., Marfil, S., Batic, O.R., Maiza, P.J. (1996): The alkali-carbonate reaction and its reaction products – An experience with Argentinean dolomite rocks. *Cement and Concrete Research*. 26 (10): 1579-1591

Milanesi, C.A., Marfil, S., Maiza, P.J., Batic, O.R. (2012): An expansive dolostone from Argentina – The common dilemma: ACR or another variant of ASR? In: Drimalas, T., Ideker, J.H. & Fournier, B. (editors): *Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Austin, Texas (USA), 10 pp. (en CD-ROM)

Milanesi, C.A., Pappalardi, M., Perrone, F.H., Violini, D. (2010): Evaluación de la aptitud de una roca dolomítica para uso en hormigones frente a la reacción álcali-agregado. En: Cabrera, O. y Sota, J.D. (editores): *Memorias, XVIII Reunión Técnica*. Mar del Plata (Argentina), 315-322

- Milanesi, C.A., Pappalardi, M., Violini, D. (2008a): Consideraciones sobre la aplicación del criterio canadiense para inhibir la reacción álcali-sílice. En: Cámara de la Piedra de la Provincia de Buenos Aires (editor): *Memorias, 1^{er} Congreso Argentino de Áridos*. Mar del Plata (Argentina), 1: 475-481
- Milanesi, C.A., Souza, E., Marfil, S., Maiza, P.J. (2008b): Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra. En: Rahhal, V. y Sota, J.D. (editores): *Memorias, XVII Reunión Técnica “Ing. José Fermín Colina”*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina), 273-280
- Milanesi, C.A., Violini, D. (2008): Prevención de la RAS a través del control de los álcalis aportados por el cemento al hormigón – Aplicación del criterio canadiense en la construcción de la ruta nacional N° 14. En: Rahhal, V. y Sota, J.D. (editores): *Memorias, XVII Reunión Técnica*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina), 8 pp.
- Mindess, S., Young J.F. (1981): *Concrete*. New Jersey (USA): Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 671 pp.
- Mitchell, L.D., Grattan-Bellew, P.E., Margeson, J., Fournier, B. (1992): The mechanistic differences between alkali-silica and alkali-carbonate reactions as studied by X-ray diffraction. In: Tang, M. & Deng, M. (editors): *Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Beijing (China). Beijing (China): International Academic Publishers – World Publishing Corporation, 1: 154-162
- Monteiro, P.J.M., Mehta, P.K. (1986): Interaccion between carbonate rock and cement paste. *Cement and Concrete Research*. 16: 127-134
- Newlon, H.H., Sherwood, W.C. (1962): An occurrence of alkali-reactive carbonate rock in Virginia. *Carbonate Aggregate Reactions and Steam Curing of Concrete*. Highway Research Board, National Academy of Science, National Research Council, Bulletin 355: 27-44
- Nixon, P.J, Lindgård, J., Borchers, I., Wigum, B.J., Schouenborg, B. (2008): The EU “Partner” Project – European standard test to prevent alkali reactions in aggregates – Final results and recommendations. In: Broekmans M.A.T.M. & Wigum B.J. (editors): *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Trondheim (Norway), 10 pp. (en CD-ROM, The Netherlands: Cd-design and Construct: Quick! Scan Communicatie)

- Ozol, M.A. (2006): Alkali-carbonate rock reaction. In: Lamond, J.F. & Pielert, J.H. (editors): *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. STP 169D, American Society for Testing Materials, Philadelphia (USA), Chapter 35: 410-424
- Pagano, M.A., Cady, P.D. (1982): A chemical approach to the problem of alkali-reactive carbonate aggregates. *Cement and Concrete Research*. 12: 1-12
- Poole, A.B. (1981): Alkali-carbonate reactions in concrete. In: Proceedings, 5th *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Cape Town (South Africa), March 30 – April 3 1981, National Building Research Institute (NBRI), Paper S252/34, 8 pp.
- Qian, G., Deng, M., Lan, X., Xu, Z., Tang, M. (2002a): Alkali carbonate reaction expansion of dolomitic limestone aggregates with porphyrotopic texture. *Engineering Geology*. 63: 17-29
- Qian, G., Deng, M., Tang, M. (2002b): Expansion of siliceous and dolomitic aggregates in lithium hydroxide solution. *Cement and Concrete Research*. 32: 763-768
- Raphael, S., Sarkar, S.L., Aitcin, P.C. (1989): Alkali-aggregate reactivity – Is it always harmful? In: Okada, K., Nishibayashi, S. & Kawamura, M. (editors): Proceedings, 8th *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Kyoto (Japan). London (UK), New York (USA): Elsevier Applied Science, 809-814
- RILEM TC 106-AAR (2000a): International Assessment of aggregates for alkali-reactivity. *Materials and Structures*. March 2000, 33: 88-93
- RILEM TC 106-AAR (2000b): Detection of potencial alkali-reactivity of aggregates – The ultra-accelerated mortar-bar test. *Materials and Structures*. June 2000, 33: 283-289
- RILEM TC 106-AAR (2000c): Detection of potencial alkali-reactivity of aggregates – Method for aggregate combinations using concrete prisms. *Materials and Structures*. June 2000, 33: 290-293
- Rogers, C.A. (1979): Alkali aggregate reactions, concrete aggregate testing and problem aggregates in Ontario – A review. *Engineering Materials Report EM-31*. Ontario (Canada): Ontario Ministry of Transportation and Communications, Engineering Materials Office, Soils and Aggregates Section, September 1979 (5th edition revised, November 1985), 44 pp.
- Rogers, C.A. (1986a): Evaluation of the potential for expansion and cracking of concrete caused by the alkali-carbonate reaction. *Cement, Concrete, and Aggregates*. CCAGDP, Summer 1986, 8 (1): 13-23

Rogers, C.A. (1986b): Interlaboratory study of the concrete prism expansion test for the alkali-carbonate reaction. In: Grattan-Bellew P.E. (editor): *Proceedings, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Ottawa (Canada). New Jersey (USA): Noyes Publications, 270-274

Rogers, C.A. (1987): Interlaboratory study of the concrete prism expansion test for the alkali-carbonate reaction. *Engineering Materials Report EM-76*. Ontario (Canadá): Ontario Ministry of Transportation and Communications, Engineering Materials Office, Soils and Aggregates Section, January 1987, 35 pp.

Rogers, C.A. (1989): Alkali-aggregate reactivity in Canada. In: Okada, K., Nishibayashi, S., & Kawamura, M. (editors): *Proceedings, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Kyoto (Japan). London (UK), New York (USA): Elsevier Applied Science, 57-63

Rogers, C.A. (1990): Interlaboratory study of the concrete prism expansion test for the alkali-carbonate reaction. *Engineering Materials Report EM-92*. Ontario (Canada). Ontario Ministry of Transportation and Communications, Engineering Materials Office, Soils and Aggregates Section, March 1990, 13 pp.

Rogers, C.A., Hooton, R.D. (1989a): Evaluation of rapid test methods for detecting alkali-reactive aggregates. In: Okada, K., Nishibayashi, S., & Kawamura, M. (editors): *Proceedings, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Kyoto (Japan). London (UK), New York (USA): Elsevier Applied Science, 439-444

Rogers, C.A., Hooton, R.D. (1989b): Leaching of alkalis in alkali-aggregate reaction testing. In: Okada, K., Nishibayashi, S., & Kawamura, M. (editors): *Proceedings, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Kyoto (Japan). London (UK), New York (USA): Elsevier Applied Science, 327-332

Rogers, C.A., Hooton, R.D. (1992): Comparison between laboratory and field expansion of alkali-carbonate reactive concrete. In: Poole, A.B. (editor): *Proceedings, 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. London (UK), 27-31 July 1992. Slough (UK): Concrete Society, 2: 877-884

Rothstein, D., Carrasquillo, R.L., Garza, C. (2012): Field and laboratory assessment of cracking damage from alkali-aggregate reactions in concrete slabs on ground, column footings and perimeter foundations, Midwest USA. In: Drimalas, T., Ideker, J.H. & Fournier, B. (editors): *Proceedings*,

14th *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Austin, Texas (USA), 10 pp. (en CD-ROM)

Samuel, G., Wason, R.C., Mullick, A.K. (1989): Evaluation of AAR potential of limestone aggregates in India. In: Okada, K., Nishibayashi, S., & Kawamura, M. (editors): *Proceedings, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Kyoto (Japan). London (UK), New York (USA): Elsevier Applied Science, 235-240

Shayan A., Diggins R.G., Ivanusec I., Westgate P.L. (1988): Accelerated testing of some Australian and overseas aggregates for alkali-aggregate reactivity. *Cement and Concrete Research*. 18: 843-851

Shayan, A., Xu, A., Morris, H. (2008): Comparative study of the concrete prism test (CPT 60°C, 100 % RH) and other accelerated tests. In: Broekmans M.A.T.M. & Wigum B.J. (editors): *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Trondheim (Norway), 11 pp. (en CD-ROM, The Netherlands: Cd-design and Construct: Quick! Scan Communicatie)

Sherwood, W.C., Newlon, H.H. (1964): Studies of the mechanisms of alkali-carbonate reaction – Part I: Chemical reactions. In: *Proceedings, Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reactions, Highway Research Record*. Highway Research Transportation Board, Washington, DC, 45: 41-56

Shu, Z., Deng, M. (1996): Alkali-aggregate reactions in the cement concrete pavements of airport. In: Shayan A. (editor): *Proceedings, 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Melbourne (Australia), August 18-23 1996. Melbourne (Australia): CSIRO Division of Building Construction and Engineering, 251-256

Sims, I. (1981): The application and reliability of standard testing procedures for potential alkali-reactivity. In: *Proceedings, 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Cape Town (South Africa), National Building Research Institute (NBRI), Paper S252/13, 13 pp.

Sims, I., Nixon, P.J. (2006): Assessment of aggregates for alkali-aggregate reactivity potential – RILEM international recommendations. In: Fournier B. (editor): *Proceedings, Marc-André Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*. Montreal (Canada), May 2006, 69-89

Soles, J.A., Malhotra, V.M., Chen, H. (1989): CANMET investigations of supplementary cementing materials for reducing alkali-aggregate reactions: Part I – Granulated/pelletized blast furnace slags. In: Malhotra, V.M. (editor): *Proceedings, 3rd International Conference on Fly Ash*,

Silica Fume, Slag, & Natural Pozzolans in Concrete. Trondheim (Norway), ACI SP-114, 2: 1637-1656

Sommer, H., Grattan-Bellew, P., Katayama, T., Tang, M. (2004): Development and inter-laboratory trial of the RILEM AAR-5 rapid preliminary screening test for carbonate aggregates. In: Tang, M. & Deng, M. (editors): *Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Beijing (China). Beijing (China): International Academic Publishers – World Publishing Corporation, 1: 407-412

Sommer, H., Nixon, P.J., Sims, I. (2005): AAR-5 rapid preliminary screening test for carbonate aggregates. *Materials and Structures*. 38: 787-792

Swenson, E.G. (1957): A reactive aggregate undetected by ASTM tests. *ASTM Bulletin*. December 1957, 226: 48-51

Swenson, E.G., Guillott, J.E. (1964): Alkali-carbonate rock reaction. In: *Proceedings, Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reactions, Highway Research Record*. Highway Research Transportation Board, Washington, DC, 45: 21-40

Tang, M., Deng, M., Lan, X., Han, S. (1994): Studies on alkali-carbonate reaction. *ACI Materials Journal*. January–February 1994, 91 (1): 26-29

Tang, M., Deng, M., Xu, Z., Lan, X., Han, S. (1996): Alkali-aggregate reactions in China. In: Shayan A. (editor): *Proceedings, 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Melbourne (Australia), August 18-23 1996. Melbourne (Australia): CSIRO Division of Building Construction and Engineering, 195-201

Tang, M.S., Liu Z., Han S.F. (1986): Mechanism of alkali carbonate reaction. In: Grattan-Bellew P.E. (editor): *Proceedings, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Ottawa (Canada). New Jersey (USA): Noyes Publications, 275-279

Tang, M., Liu, Z., Lu, Y., Han, S. (1991): Alkali-carbonate reaction and pH value. *Il Cemento*. 88 (3): 141-150

Tang, M., Lu, Y. (1986): Rapid method for determining the alkali reactivity of carbonate rock. In: Grattan-Bellew P.E. (editor): *Proceedings, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Ottawa (Canada). New Jersey (USA): Noyes Publications, 286-287

- Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K. (2008): Report on determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction. *Report FHWA-HIF-09-001*. Washington (USA): Office of Pavement Technology, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, April 2008, 21 pp.
- Thomas, M.D.A., Innis, F.A. (1998): Effect of slag on expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete. *ACI Materials Journal*. November–December 1998, 95 (6): 716-724
- Tong, L., Tang, M. (1996): Concurrence of alkali-silica and alkali-dolomite reaction. In: Shayan A. (editor): *Proceedings, 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Melbourne (Australia), August 18-23 1996. Melbourne (Australia): CSIRO Division of Building Construction and Engineering, 742-749
- Traversa, L.P., Giovambattista, A. (1987): Durability of basaltic aggregates contaminated with montmorillonite. In: Scanlon, J.M. (editor): *Proceedings, Katherine and Bryan Mather International Conference on Concrete Durability*. ACI SP-100, Atlanta (USA), 2: 1285-1295
- Traversa, L.P., Giovambattista, A., Cortelezzi, C.R., Pavlicevic, R. (1987): Evaluación de basaltos contaminados con arcillas expansivas. En: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (editores): *Memorias, VIII Reunión Técnica de la AATH*. Córdoba (Argentina), 1: 31-39
- Walker, H.N. (1978): Chemical reactions of carbonate aggregates in cement paste. In: *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM STP 169-B, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pensilvania (USA), Chapter 41: 722-743
- Williams, D.A., Rogers, C.A. (1991): Field trip guide to alkali carbonate reactions in Kingston, Ontario. *Report MI-145*. Ontario (Canada): Engineering Materials Office, Ministry of Transportation, April 1991, 26 pp.
- Xu, Z., Lan, X., Deng, M., Tang, M. (2002): A new accelerated method for determining the potential alkali-carbonate reactivity. *Cement and Concrete Research*. 32: 851-857
- Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Zhang, N. (1999): Influence of dimension of test specimen on alkali-aggregate reactive expansion. *ACI Materials Journal*. March–April 1999, 96 (2): 204-207

Anexo A

Resultados de los ensayos de DRX

Tabla A.1: Dolomía M1. Muestra de roca natural

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	20,830	179	0,165	4,261	1	Q
2	23,060	166	0,150	3,854	1	C
3	24,020	171	0,210	3,702	1	D
4	26,610	638	0,180	3,347	5	Q
5	27,860	176	0,195	3,200	1	F
6	29,420	1449	0,195	3,034	12	C
7	30,930	12169	0,225	2,889	100	D
8	31,310	207	0,045	2,855	2	C
9	33,520	359	0,240	2,671	3	D
10	35,290	246	0,210	2,541	2	D
11	36,040	205	0,285	2,490	2	C
12	37,330	233	0,270	2,407	2	D
13	39,450	266	0,210	2,282	2	C
14	41,100	819	0,195	2,194	7	D
15	43,210	214	0,210	2,092	2	C
16	44,920	438	0,195	2,016	4	D
17	47,580	214	0,270	1,910	2	C
18	48,610	200	0,225	1,872	2	C
19	49,260	134	0,180	1,848	1	D
20	49,280	127	0,045	1,848	1	D
21	50,520	823	0,255	1,805	7	D
22	51,060	613	0,210	1,787	5	D
23	58,880	125	0,195	1,567	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						
NOTA: Se observaron reflexiones de muy baja intensidad en 10,11 y 7,17 Å adjudicadas a illita y caolinita, respectivamente.						

Tabla A.2: Dolomía M1. Muestra de roca natural
(ensayo realizado sobre un cilindro de roca sin tratar)

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	20,940	105	0,390	4,239	2	Q
2	22,120	78	0,330	4,015	1	D
3	23,140	90	0,360	3,841	1	C
4	24,180	128	0,360	3,678	2	D
5	26,740	378	0,330	3,331	6	Q
6	28,020	101	0,330	3,182	1	F
7	29,520	1234	0,360	3,024	18	C
8	31,080	6765	0,360	2,875	100	D
9	33,660	221	0,330	2,660	3	D
10	35,440	186	0,360	2,531	3	D
11	36,100	127	0,300	2,486	2	C
12	36,640	196	0,300	2,451	3	Q
13	37,480	208	0,360	2,398	3	D
14	39,560	149	0,390	2,276	2	C
15	40,400	77	0,300	2,231	1	Q
16	41,260	600	0,360	2,186	9	D
17	43,300	128	0,330	2,088	2	C
18	43,920	120	0,330	2,060	2	D
19	45,060	329	0,360	2,010	5	D
20	45,980	67	0,330	1,972	1	Q
21	47,280	80	0,270	1,921	1	C
22	47,620	182	0,360	1,908	3	C
23	48,640	140	0,390	1,870	2	C
24	49,420	116	0,390	1,843	2	D
25	50,260	98	0,240	1,814	1	D
26	50,660	555	0,390	1,800	8	D
27	51,180	538	0,420	1,783	8	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.3: Dolomía M2. Muestra de roca natural

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	21,220	129	***	4,184	1	F
2	21,990	121	***	4,039	1	D
3	24,030	223	0,255	3,700	2	D
4	27,880	164	0,255	3,198	1	F
5	29,410	208	0,180	3,035	2	C
6	30,940	13398	0,240	2,888	100	D
7	33,530	515	0,210	2,671	4	D
8	35,320	333	0,210	2,539	2	D
9	37,350	340	0,210	2,406	3	D
10	41,120	953	0,240	2,193	7	D
11	43,810	163	0,195	2,065	1	D
12	44,930	567	0,210	2,016	4	D
13	49,300	193	0,255	1,847	1	D
14	50,550	1060	0,240	1,804	8	D
15	51,060	911	0,240	1,787	7	D
16	58,870	155	0,195	1,567	1	D
17	59,830	242	***	1,545	2	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Feldespato						

Tabla A.4: Dolomía M3. Muestra de roca natural

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	20,880	285	0,180	4,251	2	Q
2	24,080	216	0,240	3,693	2	D
3	26,690	946	0,225	3,337	8	Q
4	27,930	171	0,225	3,192	1	F
5	29,490	203	0,180	3,027	2	C
6	30,990	11396	***	2,883	100	D
7	33,570	393	0,195	2,667	3	D
8	35,320	285	0,255	2,539	2	D
9	36,590	155	0,165	2,454	1	Q
10	37,400	338	0,225	2,403	3	D
11	39,530	152	0,165	2,278	1	Q
12	41,160	874	0,225	2,191	8	D
13	43,840	171	0,195	2,063	1	D
14	44,980	454	0,210	2,014	4	D
15	49,260	167	0,165	1,848	1	D
16	50,170	219	0,180	1,817	2	Q
17	50,580	841	0,330	1,803	7	D
18	51,100	770	0,210	1,786	7	D
19	58,960	153	0,165	1,565	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.5: Dolomía M4. Muestra de roca natural

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	11,630	200	0,165	7,603	7	Y
2	21,970	105	0,165	4,042	3	D
3	23,990	214	0,210	3,706	7	D
4	30,860	3025	0,480	2,895	100	D
5	33,450	207	0,180	2,677	7	D
6	35,250	182	0,180	2,544	6	D
7	37,390	187	0,420	2,403	6	D
8	41,070	802	0,300	2,196	26	D
9	43,700	134	0,165	2,070	4	D
10	44,880	413	0,390	2,018	14	D
11	49,200	149	0,195	1,850	5	D
12	50,440	378	0,240	1,808	12	D
13	50,920	481	0,315	1,792	16	D
14	59,750	214	0,150	1,546	7	D
(*) D: Dolomita; Y: Yeso						
NOTA: Se observó una reflexión de muy baja intensidad en 7,60 Å que se adjudicó a yeso						

Tabla A.6: Dolomía M4. Muestra de roca natural
(ensayo realizado sobre un cilindro de roca sin tratar)

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	21,920	74	0,450	4,052	3	D
2	23,980	163	0,420	3,708	7	D
3	27,760	61	0,450	3,211	3	F
4	30,840	2244	0,540	2,897	100	D
5	33,440	146	0,510	2,677	6	D
6	35,200	138	0,510	2,548	6	D
7	37,260	258	0,450	2,411	11	D
8	41,020	619	0,510	2,199	28	D
9	43,680	117	0,390	2,071	5	D
10	44,840	356	0,450	2,020	16	D
11	49,220	124	0,360	1,850	6	D
12	50,460	313	0,570	1,807	14	D
13	50,960	408	0,450	1,791	18	D
(*) D: Dolomita; F: Feldespato						

Tabla A.7: Dolomía M4. Residuo insoluble

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	20,800	428	0,255	4,267	28	Q
2	21,960	320	0,240	4,044	21	F
3	23,630	306	0,270	3,762	20	F
4	24,360	276	***	3,651	18	F
5	25,540	262	***	3,485	17	F
6	26,590	1531	0,270	3,350	100	Q
7	27,770	523	0,225	3,210	34	F
8	27,970	385	0,210	3,187	25	F
9	36,480	198	0,270	2,461	13	Q
10	39,380	179	0,255	2,286	12	Q
11	40,230	166	0,210	2,240	11	Q
12	42,430	182	0,225	2,129	12	Q
13	49,770	159	0,210	1,831	10	Q
14	50,090	189	0,270	1,820	12	Q
15	53,170	212	0,255	1,721	14	F
16	54,860	164	0,255	1,672	11	Q
17	59,900	171	***	1,543	11	Q
(*)Q: Cuarzo, F: Feldespato NOTA: La elevación del fondo del difractograma entre 20° y 30° (2 θ) se debe a la presencia de material amorfo.						

Tabla A.8: Dolomía M4. Fracción arcillosa concentrada de la muestra de roca

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	5,090	380	0,225	17,348	70	M
2	6,880	415	0,225	12,838	77	M
3	7,350	378	0,150	12,018	70	M
4	7,770	300	0,165	11,369	55	M
5	19,440	274	0,120	4,562	51	M
6	19,720	342	0,240	4,498	63	M
7	20,770	311	0,285	4,273	57	Q
8	21,950	268	0,240	4,046	50	F
9	22,760	258	0,210	3,904	48	F
10	23,580	274	0,135	3,770	51	F
11	26,610	541	0,255	3,347	100	Q
12	27,020	308	0,180	3,297	57	F
13	27,760	388	0,195	3,211	72	F
14	28,000	484	0,225	3,184	90	F
15	30,920	413	0,240	2,890	76	D
16	34,770	331	0,135	2,578	61	M
17	35,000	331	0,150	2,562	61	M
18	35,220	329	0,150	2,546	61	F
19	35,420	287	0,135	2,532	53	F
20	36,630	276	0,180	2,451	51	Q
21	37,290	270	0,180	2,409	50	F
22	38,000	252	0,180	2,366	47	F
23	39,430	262	0,195	2,283	48	Q
24	39,830	250	0,165	2,261	46	F
25	41,050	234	***	2,197	43	F
26	42,430	219	0,195	2,129	41	Q
27	45,240	193	0,180	2,003	36	F
(*) D: Dolomita; Q: Cuarzo, F: Feldespato; M: Montmorillonita						

Tabla A.9: Dolomía M5. Muestra de roca natural

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	22,120	65	0,330	4,015	0	D
2	23,160	67	0,360	3,837	0	C
3	24,120	106	0,330	3,687	1	D
4	27,980	184	0,330	3,186	1	F
5	29,540	2346	0,360	3,022	13	C
6	31,040	18158	0,330	2,879	100	D
7	33,640	331	0,330	2,662	2	D
8	35,400	238	***	2,534	1	D
9	36,120	95	0,390	2,485	1	C
10	37,460	234	0,360	2,399	1	D
11	39,540	104	0,360	2,277	1	C
12	41,220	712	0,360	2,188	4	D
13	43,280	125	0,360	2,089	1	C
14	43,920	93	0,300	2,060	1	D
15	45,040	298	0,360	2,011	2	D
16	47,640	155	0,360	1,907	1	C
17	48,660	125	0,360	1,870	1	C
18	49,360	98	0,330	1,845	1	D
19	50,620	788	0,390	1,802	4	D
20	51,160	597	0,360	1,784	3	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; F: Feldespato						

Tabla A.10: Dolomía M8. Muestra de roca natural

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	22,010	141	0,240	4,035	2	D
2	24,040	225	0,240	3,699	4	D
3	26,650	138	0,240	3,342	2	Q
4	27,870	121	0,240	3,199	2	F
5	29,420	132	0,210	3,034	2	C
6	30,920	5700	0,315	2,890	100	D
7	33,510	304	0,270	2,672	5	D
8	35,280	219	0,360	2,542	4	D
9	37,340	349	0,285	2,406	6	D
10	41,110	889	0,315	2,194	16	D
11	43,770	163	0,270	2,067	3	D
12	44,910	515	0,285	2,017	9	D
13	49,270	159	0,270	1,848	3	D
14	50,540	625	0,375	1,804	11	D
15	51,060	644	0,345	1,787	11	D
16	58,870	131	0,300	1,567	2	D
17	59,800	240	0,345	1,545	4	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.11: Dolomía M1. Muestra representativa de la sección transversal (integral) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	21,000	131	0,360	4,227	2	Q
2	22,160	71	0,390	4,008	1	D
3	24,200	125	0,420	3,675	1	D
4	26,800	278	0,390	3,324	3	Q
5	28,040	106	0,330	3,180	1	F
6	29,560	371	0,360	3,020	4	C
7	31,120	8614	0,390	2,872	100	D
8	33,700	308	0,390	2,657	4	D
9	35,460	219	0,390	2,529	3	D
10	37,520	216	0,390	2,395	3	D
11	39,580	83	0,420	2,275	1	C
12	41,300	634	0,390	2,184	7	D
13	43,960	113	0,390	2,058	1	D
14	45,100	338	0,360	2,009	4	D
15	49,420	116	0,360	1,843	1	D
16	50,280	155	0,270	1,813	2	D
17	50,680	653	0,420	1,800	8	D
18	51,220	619	0,390	1,782	7	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.12: Dolomía M1. Muestra representativa de la zona superficial (borde) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	23,990	214	0,165	3,706	15	D
2	26,610	302	0,180	3,347	21	Q
3	29,430	231	0,300	3,033	16	C
4	30,950	1463	0,240	2,887	100	D
5	33,540	186	0,255	2,670	13	D
6	35,250	172	0,270	2,544	12	D
7	37,340	198	0,255	2,406	14	D
8	41,120	395	0,285	2,193	27	D
9	43,830	122	0,225	2,064	8	D
10	44,940	236	0,195	2,015	16	D
11	49,190	116	0,150	1,851	8	D
12	50,550	283	0,285	1,804	19	D
13	50,820	144	0,075	1,795	10	?
14	51,060	289	0,300	1,787	20	D
15	51,250	174	0,135	1,781	12	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, ?: Indeterminado						

Tabla A13: Dolomía M4. Muestra representativa de la sección transversal (integral) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	18,580	100	0,165	4,772	4	B
2	21,980	89	0,270	4,041	4	D
3	24,010	191	0,240	3,703	7	D
4	26,650	171	0,165	3,342	7	Q
5	27,530	94	0,150	3,237	4	F
6	29,380	454	0,225	3,038	18	C
7	30,870	2544	0,360	2,894	100	D
8	33,480	152	0,225	2,674	6	D
9	35,290	171	0,180	2,541	7	D
10	37,280	317	0,345	2,410	12	D
11	37,970	105	0,270	2,368	4	B
12	41,060	686	0,300	2,196	27	D
13	43,750	156	0,210	2,067	6	D
14	44,870	405	0,315	2,018	16	D
15	48,500	121	0,225	1,875	5	C
16	49,200	138	0,165	1,850	5	D
17	50,520	366	0,180	1,805	14	D
18	51,000	415	0,435	1,789	16	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.14: Dolomía M4. Muestra representativa de la zona superficial (borde) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	24,010	229	***	3,703	36	D
2	26,740	223	***	3,331	35	Q
3	29,430	254	0,135	3,033	40	C
4	30,870	634	***	2,894	100	D
5	30,950	561	0,360	2,887	88	D
6	31,400	200	***	2,847	31	C
7	33,270	167	***	2,691	26	D
8	35,310	174	0,165	2,540	27	D
9	37,320	166	0,255	2,408	26	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo						

Tabla A.15: Dolomía M5. Muestra representativa de la sección transversal (integral) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	22,120	70	0,330	4,015	0	D
2	23,160	51	0,330	3,837	0	C
3	24,140	153	0,330	3,684	1	D
4	27,960	214	0,300	3,189	1	F
5	29,520	830	0,360	3,024	4	C
6	31,040	22201	0,360	2,879	100	D
7	31,240	1106	***	2,861	5	C
8	31,400	352	***	2,847	2	C
9	33,600	326	0,330	2,665	1	D
10	35,360	234	0,330	2,536	1	D
11	37,440	227	0,330	2,400	1	D
12	39,540	79	0,360	2,277	0	C
13	41,200	915	0,330	2,189	4	D
14	43,880	114	0,330	2,062	1	D
15	45,020	393	0,360	2,012	2	D
16	47,640	88	0,360	1,907	0	C
17	48,600	77	0,390	1,872	0	C
18	49,340	208	0,360	1,846	1	D
19	50,600	848	0,360	1,802	4	D
20	51,140	647	0,360	1,785	3	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; F: Feldespatato						

Tabla A.16: Dolomía M5. Muestra representativa de la zona superficial (borde) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	22,010	201	0,150	4,035	14	D
2	24,060	256	0,135	3,696	18	D
3	27,730	200	0,150	3,214	14	F
4	29,440	246	0,165	3,032	18	C
5	30,950	1406	0,225	2,887	100	D
6	31,480	179	0,150	2,840	13	C
7	33,500	166	0,105	2,673	12	D
8	35,330	171	0,195	2,538	12	D
9	37,360	248	0,210	2,405	18	D
10	41,130	408	0,225	2,193	29	D
11	43,790	121	0,150	2,066	9	D
12	44,950	233	0,210	2,015	17	D
13	49,280	135	0,180	1,848	10	D
14	50,280	104	0,120	1,813	7	C
15	50,530	272	0,285	1,805	19	D
16	51,060	375	0,240	1,787	27	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; F: Feldespato						

Tabla A.17: Dolomía M9. Muestra de roca natural, sin tratamiento (M9-1)

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	D (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	12,260	83	***	7,214	2	K
2	22,000	116	0,330	4,037	3	D
3	24,040	229	0,330	3,699	6	D
4	27,840	75	***	3,202	2	F
5	30,920	3660	0,390	2,890	100	D
6	33,500	229	0,390	2,673	6	D
7	35,260	203	0,390	2,543	6	D
8	37,340	388	0,390	2,406	11	D
9	40,340	82	0,270	2,234	2	?
10	41,100	977	0,390	2,194	27	D
11	43,780	171	0,390	2,066	5	D
12	44,900	543	0,390	2,017	15	D
13	49,220	167	0,420	1,850	5	D
14	50,140	163	0,210	1,818	4	D
15	50,520	484	0,420	1,805	13	D
16	51,040	638	0,390	1,788	17	D
17	58,860	146	0,390	1,568	4	D
18	59,800	304	0,420	1,545	8	D
(*) D: Dolomita; F: Feldespato; K: Caolinita; ?: Indeterminado						
NOTA: Se observó una reflexión de muy baja intensidad en 7,21 Å que se adjudicó a caolinita.						

Tabla A.18: Dolomía M9. Muestra de un testigo de roca (M9-1) del ensayo ASTM C 586 modificado, luego de 4 meses de tratamiento

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	8,760	122	0,450	10,086	4	I
2	12,280	89	0,540	7,202	3	K
3	18,520	70	0,480	4,787	3	B
4	21,960	95	0,480	4,044	3	D
5	22,940	63	0,420	3,874	2	C
6	23,980	172	0,510	3,708	6	D
7	26,620	125	0,450	3,346	4	Q
8	27,800	79	0,480	3,207	3	F
9	29,340	250	0,480	3,042	9	C
10	29,940	78	0,120	2,982	3	?
11	30,860	2789	0,540	2,895	100	D
12	33,440	187	0,510	2,677	7	D
13	35,240	179	0,510	2,545	6	D
14	35,920	73	0,420	2,498	3	C
15	37,280	291	0,480	2,410	10	D
16	37,920	89	0,420	2,371	3	B
17	39,980	78	0,450	2,286	3	C
18	41,060	743	0,510	2,196	27	D
19	43,120	74	0,420	2,096	3	C
20	43,740	140	0,480	2,068	5	D
21	44,860	423	0,510	2,019	15	D
22	45,420	60	0,180	1,995	2	?
23	47,480	77	0,450	1,913	3	C
24	48,440	77	0,450	1,878	3	C
25	49,200	146	0,510	1,850	5	D
26	50,460	408	0,480	1,807	15	D
27	51,000	509	0,480	1,789	18	D
28	54,900	53	0,420	1,671	2	?
29	58,820	124	0,540	1,569	4	D
30	59,740	262	0,510	1,547	9	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato; I: Illita; K: Caolinita; ?: Indeterminado						
NOTA: Se identificaron reflexiones de muy baja intensidad en 10,1 y 7,2 Å adjudicadas a illita y caolinita, respectivamente.						

Tabla A.19: Dolomía M9. Muestra de roca natural (M9-2) sin tratamiento

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	21,900	106	0,330	4,055	3	D
2	23,940	234	0,330	3,714	7	D
3	27,680	79	***	3,220	2	F
4	30,820	3511	0,390	2,899	100	D
5	33,420	201	0,420	2,679	6	D
6	35,200	193	0,420	2,548	5	D
7	37,240	366	0,360	2,413	10	D
8	41,020	923	0,420	2,199	26	D
9	43,700	163	0,390	2,070	5	D
10	44,820	526	0,390	2,021	15	D
11	49,260	128	0,540	1,848	4	D
12	50,460	449	0,420	1,807	13	D
13	50,960	552	0,450	1,791	16	D
14	58,780	144	0,420	1,570	4	D
15	59,700	283	0,420	1,548	8	D
(*) D: Dolomita; F: Feldespato						

Tabla A.20: Dolomía M9. Muestra de un testigo de roca (M9-2) del ensayo ASTM C 586 modificado, luego de 4 meses de tratamiento

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	12,220	90	***	7,237	4	K
2	18,540	214	0,360	4,782	8	B
3	21,940	90	***	4,048	4	D
4	22,980	114	0,330	3,867	4	C
5	23,960	176	0,330	3,711	7	D
6	27,860	95	0,300	3,200	4	F
7	29,340	870	0,360	3,042	34	C
8	30,860	2576	0,420	2,895	100	D
9	33,420	163	0,450	2,679	6	D
10	35,220	158	0,390	2,546	6	D
11	35,920	166	0,330	2,498	6	C
12	37,280	268	0,360	2,410	10	D
13	37,960	262	0,360	2,368	10	B
14	39,360	194	0,360	2,287	8	C
15	41,060	689	0,420	2,196	27	D
16	43,080	167	0,360	2,098	6	C
17	43,720	134	0,330	2,069	5	D
18	44,860	383	0,390	2,019	15	D
19	47,000	87	0,330	1,932	3	C
20	47,460	174	0,330	1,914	7	C
21	48,440	181	0,360	1,878	7	C
22	49,180	122	0,390	1,851	5	D
23	50,460	349	0,390	1,807	14	D
24	51,000	465	0,420	1,789	18	D
25	56,460	64	***	1,628	2	C
26	57,320	103	0,360	1,606	4	C
27	58,640	116	0,330	1,573	4	B
28	58,780	118	0,360	1,570	5	D
29	59,780	216	0,390	1,546	8	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; F: Feldespato; K: Caolinita						

Tabla A.21: Dolomía M8. Muestra de agregado extraída de una barra de mortero IRAM 1674 de 28 días de edad

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	18,560	152	0,315	4,777	3	B
2	22,010	153	0,255	4,035	3	D
3	23,070	110	***	3,852	2	C
4	24,030	244	0,315	3,700	4	D
5	26,640	110	***	3,343	2	Q
6	27,870	122	0,210	3,199	2	F
7	29,390	625	0,300	3,037	11	C
8	30,920	5862	0,345	2,890	100	D
9	33,510	287	0,315	2,672	5	D
10	35,290	248	0,315	2,541	4	D
11	35,930	120	0,225	2,497	2	C
12	37,330	331	0,315	2,407	6	D
13	37,990	125	0,255	2,367	2	B
14	39,420	128	0,255	2,284	2	C
15	41,100	867	0,390	2,194	15	D
16	43,120	117	0,225	2,096	2	C
17	43,780	171	0,300	2,066	3	D
18	44,900	506	***	2,017	9	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.22: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,600	238	0,270	4,767	5	B
2	20,810	184	0,240	4,265	3	Q
3	22,020	121	0,240	4,033	2	D
4	23,020	134	0,240	3,860	3	C
5	24,060	163	0,255	3,696	3	D
6	26,620	670	0,255	3,346	13	Q
7	27,450	104	0,240	3,247	2	F
8	27,890	103	0,210	3,196	2	F
9	29,390	965	0,270	3,037	18	C
10	30,960	5293	0,270	2,886	100	D
11	33,550	250	0,285	2,669	5	D
12	35,320	236	0,270	2,539	4	D
13	35,970	149	0,240	2,495	3	C
14	37,370	236	0,240	2,404	4	D
15	38,000	242	0,300	2,366	5	B
16	39,440	244	0,300	2,283	5	C
17	41,120	696	0,270	2,193	13	D
18	42,460	103	0,240	2,127	2	Q
19	43,140	152	0,300	2,095	3	C
20	43,820	129	0,255	2,064	2	D
21	44,940	390	0,285	2,015	7	D
22	47,080	100	0,195	1,929	2	C
23	47,490	181	0,285	1,913	3	C
24	48,480	169	0,300	1,876	3	C
25	49,260	122	0,270	1,848	2	D
26	50,140	161	0,240	1,818	3	Q
27	50,550	619	0,300	1,804	12	D
28	51,090	613	0,285	1,786	12	D
29	57,370	115	0,285	1,605	2	C
30	58,610	101	0,225	1,574	2	D
31	58,910	134	0,255	1,566	3	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.23: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,620	270	0,270	4,762	3	B
2	20,820	135	0,360	4,263	2	Q
3	22,020	100	0,240	4,033	1	D
4	23,010	112	0,285	3,862	1	C
5	24,060	158	0,240	3,696	2	D
6	26,640	501	0,240	3,343	6	Q
7	27,880	161	0,255	3,198	2	F
8	29,390	1126	0,285	3,037	15	C
9	30,950	7766	0,285	2,887	100	D
10	33,540	281	0,255	2,670	4	D
11	35,320	238	0,285	2,539	3	D
12	35,960	141	0,225	2,495	2	C
13	37,370	254	0,270	2,404	3	D
14	37,990	238	0,300	2,367	3	B
15	39,410	177	0,270	2,285	2	C
16	41,130	692	0,285	2,193	9	D
17	43,120	169	0,240	2,096	2	C
18	43,860	101	0,345	2,063	1	D
19	44,940	393	0,270	2,015	5	D
20	47,490	182	0,255	1,913	2	C
21	48,490	207	0,255	1,876	3	C
22	49,270	131	0,315	1,848	2	D
23	50,550	657	0,300	1,804	8	D
24	51,080	653	0,300	1,787	8	D
25	57,380	87	0,240	1,605	1	C
26	58,580	98	0,210	1,575	1	D
27	58,940	106	0,300	1,566	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.24: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,600	378	0,330	4,767	17	B
2	23,060	240	0,270	3,854	11	C
3	29,410	2174	0,300	3,035	100	C
4	30,900	425	0,345	2,892	20	D
5	35,980	322	0,270	2,494	15	C
6	37,230	104	0,180	2,413	5	D
7	37,410	86	0,105	2,402	4	D
8	38,020	535	0,315	2,365	25	B
9	39,440	418	0,285	2,283	19	C
10	41,080	184	0,255	2,195	8	D
11	43,190	368	0,345	2,093	17	C
12	47,160	172	0,255	1,926	8	C
13	47,510	395	0,285	1,912	18	C
14	48,520	418	0,300	1,875	19	C
15	50,880	256	0,270	1,793	12	D+B
16	56,590	100	0,270	1,625	5	C
17	57,440	181	0,450	1,603	8	C
18	58,660	163	0,330	1,573	7	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita						

Tabla A.25: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,580	242	0,270	4,772	16	B
2	23,030	144	0,285	3,859	10	C
3	24,020	129	0,255	3,702	9	F
4	27,770	498	0,225	3,210	33	F
5	29,390	1238	0,285	3,037	83	C
6	30,890	1497	0,375	2,892	100	D
7	33,490	132	0,255	2,674	9	D
8	35,980	184	0,240	2,494	12	C
9	37,320	196	0,300	2,408	13	D
10	37,990	298	0,315	2,367	20	B
11	39,410	238	0,285	2,285	16	C
12	41,080	408	0,360	2,195	27	D
13	43,140	229	0,270	2,095	15	C
14	44,890	240	0,300	2,018	16	D
15	47,490	244	0,270	1,913	16	C
16	48,500	244	0,300	1,875	16	C
17	50,490	207	0,270	1,806	14	D
18	50,990	313	0,315	1,790	21	D+B
19	57,410	108	0,345	1,604	7	C
20	58,640	113	0,270	1,573	8	D
21	59,790	161	***	1,546	11	D

(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; F: Feldespato

Tabla A.26: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,590	70	***	4,769	1	B
2	22,020	88	0,240	4,033	1	D
3	23,090	63	0,300	3,849	1	C
4	24,040	140	0,255	3,699	1	D
5	27,890	140	0,225	3,196	1	F
6	29,420	1283	0,300	3,034	11	C
7	30,930	11881	0,285	2,889	100	D
8	33,530	304	0,285	2,671	3	D
9	35,290	210	0,270	2,541	2	D
10	37,370	229	0,285	2,404	2	D
11	39,460	113	0,300	2,282	1	C
12	41,130	631	0,300	2,193	5	D
13	43,140	101	0,255	2,095	1	C
14	43,780	124	0,285	2,066	1	D
15	44,940	418	0,300	2,015	4	D
16	47,530	141	0,285	1,911	1	C
17	48,520	96	0,270	1,875	1	C
18	49,270	101	0,315	1,848	1	D
19	50,500	830	0,300	1,806	7	D
20	51,060	631	0,285	1,787	5	D
21	58,900	90	0,300	1,567	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; F: Feldespato						

Tabla A.27: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,630	80	0,210	4,759	1	B
2	22,010	98	0,255	4,035	1	D
3	23,040	95	0,240	3,857	1	C
4	24,040	120	0,270	3,699	1	D
5	26,640	101	0,255	3,343	1	Q
6	27,900	159	0,240	3,195	1	F
7	29,430	1790	0,270	3,033	15	C
8	30,950	11732	0,285	2,887	100	D
9	33,530	250	0,315	2,671	2	D
10	35,320	187	0,300	2,539	2	D
11	35,990	124	0,255	2,493	1	C
12	37,360	223	0,255	2,405	2	D
13	39,430	171	0,240	2,283	1	C
14	41,130	606	0,285	2,193	5	D
15	43,200	114	0,255	2,092	1	C
16	43,800	113	0,255	2,065	1	D
17	44,950	356	0,270	2,015	3	D
18	47,540	149	0,270	1,911	1	C
19	48,560	152	0,360	1,873	1	C
20	49,300	121	0,285	1,847	1	D
21	50,540	520	0,315	1,804	4	D
22	51,060	582	0,285	1,787	5	D
23	57,470	68	0,270	1,602	1	C
24	58,910	94	0,285	1,566	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.28: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,600	600	***	4,767	11	B
2	20,870	219	0,195	4,253	4	Q
3	23,000	161	0,285	3,864	3	C
4	24,020	129	0,255	3,702	2	D
5	26,610	380	0,225	3,347	7	Q
6	27,890	116	***	3,196	2	F
7	29,390	1833	***	3,037	35	C
8	30,950	5220	***	2,887	100	D
9	33,540	250	0,255	2,670	5	D
10	35,310	176	0,270	2,540	3	D
11	36,060	161	0,420	2,489	3	C
12	37,340	207	0,195	2,406	4	D
13	37,980	532	***	2,367	10	B
14	39,480	208	***	2,281	4	C
15	41,110	449	0,360	2,194	9	D
16	43,840	113	***	2,063	2	D
17	44,920	242	***	2,016	5	D
18	47,510	300	0,495	1,912	6	C
19	48,480	264	***	1,876	5	C
20	49,290	132	***	1,847	3	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.29: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	20,870	155	***	4,253	1	Q
2	22,040	155	***	4,030	1	D
3	24,060	250	0,210	3,696	2	D
4	26,620	619	0,225	3,346	5	Q
5	27,920	210	***	3,193	2	F
6	29,400	156	***	3,036	1	C
7	30,950	11881	0,300	2,887	100	D
8	33,540	393	0,285	2,670	3	D
9	35,340	331	0,255	2,538	3	D
10	37,390	331	0,390	2,403	3	D
11	41,140	1101	0,360	2,192	9	D
12	43,800	196	***	2,065	2	D
13	44,930	538	***	2,016	5	D
14	49,280	176	***	1,848	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.30: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,570	498	0,225	4,774	17	B
2	23,010	315	0,195	3,862	11	C
3	28,000	182	0,150	3,184	6	F
4	29,370	2889	0,240	3,039	100	C
5	30,860	114	0,135	2,895	4	D
6	31,410	129	0,210	2,846	4	C
7	35,940	388	0,210	2,497	13	C
8	37,970	597	0,285	2,368	21	B
9	39,400	473	0,300	2,285	16	C
10	43,150	444	0,240	2,095	15	C
11	47,180	210	0,240	1,925	7	C
12	47,500	503	0,270	1,913	17	C
13	48,480	484	0,225	1,876	17	C
14	50,850	264	0,285	1,794	9	D+B
15	56,500	104	0,270	1,627	4	C
16	57,390	216	0,285	1,604	7	C
17	58,630	179	0,225	1,573	6	D+B
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; F: Feldespato						

Tabla A.31: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,560	221	0,375	4,777	12	B
2	23,040	194	0,285	3,857	11	C
3	24,010	106	0,255	3,703	6	D
4	26,600	240	0,165	3,348	13	Q
5	29,380	1812	0,255	3,038	100	C
6	30,840	946	***	2,897	52	D
7	35,950	254	0,345	2,496	14	C
8	37,270	149	0,255	2,411	8	D
9	38,000	380	0,255	2,366	21	B
10	39,400	349	0,225	2,285	19	C
11	41,030	311	0,300	2,198	17	D
12	43,150	315	0,240	2,095	17	C
13	44,810	169	***	2,021	9	D
14	47,470	363	0,225	1,914	20	C
15	48,460	331	0,240	1,877	18	C
16	50,930	250	0,150	1,792	14	D+B
17	57,420	152	0,240	1,604	8	C
18	58,680	141	0,120	1,572	8	D+B
19	59,690	127	0,150	1,548	7	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo						

Tabla A.32: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I _o	Mineral (*)
1	12,520	116	0,165	7,064	2	?
2	18,760	166	0,150	4,726	3	B
3	23,090	193	0,240	3,849	3	C
4	24,090	189	0,165	3,691	3	D
5	25,120	210	0,165	3,542	3	?
6	26,660	361	0,150	3,341	6	Q
7	27,940	191	0,165	3,191	3	F
8	29,440	1458	0,210	3,032	24	C
9	30,980	6162	0,210	2,884	100	D
10	31,170	329	***	2,867	5	C
11	33,560	169	0,225	2,668	3	D
12	35,330	156	0,180	2,538	3	C
13	36,000	198	0,195	2,493	3	C
14	37,380	134	0,195	2,404	2	D
15	39,460	207	0,210	2,282	3	C
16	41,160	313	0,210	2,191	5	D
17	43,200	208	0,195	2,092	3	C
18	44,950	229	0,225	2,015	4	D
19	47,170	129	0,165	1,925	2	C
20	47,550	184	0,195	1,911	3	C
21	48,540	244	0,195	1,874	4	C
22	50,570	313	0,240	1,803	5	D
23	51,090	326	0,195	1,786	5	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato; ?: Indeterminado						

Tabla A.33: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	22,030	187	0,165	4,032	6	D
2	23,100	196	0,150	3,847	6	C
3	26,660	378	0,180	3,341	12	Q
4	27,930	186	***	3,192	6	F
5	29,420	498	0,210	3,034	15	C
6	30,960	3270	0,210	2,886	100	D
7	33,540	184	0,240	2,670	6	D
8	35,310	169	0,165	2,540	5	D
9	37,390	176	0,225	2,403	5	D
10	41,140	338	0,195	2,192	10	D
11	43,190	122	0,225	2,093	4	C
12	44,950	223	0,225	2,015	7	D
13	47,550	129	0,225	1,911	4	C
14	50,540	274	0,300	1,804	8	D
15	51,080	260	0,195	1,787	8	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.34: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,040	91	0,210	4,913	1	B
2	18,600	89	0,210	4,767	1	B
3	20,870	291	0,225	4,253	3	Q
4	22,060	95	0,240	4,026	1	D
5	24,040	172	0,285	3,699	2	D
6	26,650	529	0,255	3,342	6	Q
7	27,900	156	0,225	3,195	2	F
8	29,410	256	0,285	3,035	3	C
9	29,930	120	0,210	2,983	1	?
10	30,970	8441	0,270	2,885	100	D
11	31,720	120	0,165	2,819	1	NaCl
12	33,560	293	0,285	2,668	3	D
13	35,330	216	0,270	2,538	3	D
14	37,360	268	0,270	2,405	3	D
15	41,150	837	0,285	2,192	10	D
16	42,450	98	0,240	2,128	1	Q
17	43,810	164	0,285	2,065	2	D
18	44,940	385	0,300	2,015	5	D
19	49,270	128	0,270	1,848	2	D
20	50,190	171	0,225	1,816	2	Q
21	50,570	746	0,315	1,803	9	D
22	51,100	663	0,300	1,786	8	D
23	59,000	95	***	1,564	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato; NaCl: Cloruro de sodio						

Tabla A.35: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,010	114	0,225	4,921	2	B
2	20,830	219	0,255	4,261	3	Q
3	22,000	108	0,270	4,037	2	D
4	24,040	166	0,270	3,699	2	D
5	26,620	666	0,255	3,346	10	Q
6	27,880	205	0,315	3,198	3	F
7	29,390	214	0,240	3,037	3	C
8	30,950	6683	0,285	2,887	100	D
9	33,540	266	0,270	2,670	4	D
10	35,320	219	0,270	2,539	3	D
11	36,510	127	0,225	2,459	2	Q
12	37,360	250	0,255	2,405	4	D
13	39,460	105	0,240	2,282	2	C
14	41,120	716	***	2,193	11	D
15	42,460	101	0,240	2,127	2	Q
16	43,760	147	0,255	2,067	2	D
17	44,930	398	0,300	2,016	6	D
18	49,310	141	0,300	1,847	2	D
19	50,150	164	0,225	1,818	2	Q
20	50,540	641	0,315	1,804	10	D
21	51,080	653	0,285	1,787	10	D
22	58,920	104	0,285	1,566	2	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.36: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	21,930	93	0,240	4,050	4	D
2	23,010	87	0,210	3,862	4	C
3	23,970	159	0,315	3,710	7	D
4	29,340	484	0,270	3,042	20	C
5	30,830	2364	0,345	2,898	100	D
6	31,630	147	0,300	2,826	6	Q
7	33,440	167	0,255	2,677	7	D
8	35,190	140	0,360	2,548	6	D
9	35,910	112	0,225	2,499	5	C
10	37,260	281	0,270	2,411	12	D
11	37,950	84	0,240	2,369	4	B
12	39,260	90	0,165	2,293	4	C
13	39,410	96	0,195	2,285	4	C
14	41,030	588	0,375	2,198	25	D
15	42,110	74	0,210	2,144	3	?
16	43,120	110	0,255	2,096	5	C
17	43,700	122	0,270	2,070	5	D
18	44,810	311	0,405	2,021	13	D
19	47,480	99	0,240	1,913	4	C
20	48,450	127	0,300	1,877	5	C
21	49,080	125	0,285	1,855	5	D
22	50,420	320	0,480	1,808	14	D
23	51,050	295	0,510	1,788	12	D
24	58,780	121	0,285	1,570	5	D
25	59,740	172	0,465	1,547	7	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo; ?: Indeterminado						

Tabla A.37: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	21,960	93	0,270	4,044	4	D
2	23,030	81	0,240	3,859	3	C
3	23,970	166	0,285	3,710	7	D
4	27,810	82	0,240	3,205	3	F
5	29,380	366	0,285	3,038	15	C
6	30,860	2500	0,360	2,895	100	D
7	31,670	152	0,240	2,823	6	C
8	33,430	176	0,315	2,678	7	D
9	35,230	156	0,390	2,545	6	D
10	35,960	89	0,285	2,495	4	C
11	37,280	293	0,315	2,410	12	D
12	39,490	78	0,420	2,280	3	Q
13	41,070	692	0,330	2,196	28	D
14	43,210	77	0,300	2,092	3	C
15	43,720	140	0,255	2,069	6	D
16	44,850	354	0,435	2,019	14	D
17	47,510	91	0,270	1,912	4	C
18	48,420	103	0,240	1,878	4	C
19	49,190	129	0,285	1,851	5	D
20	50,440	347	0,375	1,808	14	D
21	50,910	378	0,270	1,792	15	D
22	56,580	55	0,240	1,625	2	C
23	58,850	114	0,315	1,568	5	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.38: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	22,010	101	0,255	4,035	1	D
2	23,060	82	0,240	3,854	1	C
3	24,040	121	0,270	3,699	1	D
4	26,600	140	0,315	3,348	1	Q
5	27,880	171	0,225	3,198	1	F
6	29,420	1502	0,285	3,034	10	C
7	30,950	15098	0,255	2,887	100	D
8	31,500	141	0,135	2,838	1	C
9	33,520	371	0,255	2,671	2	D
10	35,310	210	0,270	2,540	1	D
11	36,010	103	0,225	2,492	1	C
12	37,340	205	0,285	2,406	1	D
13	39,440	118	0,255	2,283	1	C
14	41,130	647	0,300	2,193	4	D
15	43,200	120	0,315	2,092	1	C
16	43,770	93	0,255	2,067	1	D
17	44,930	403	0,285	2,016	3	D
18	47,520	140	0,270	1,912	1	C
19	48,490	156	0,255	1,876	1	C
20	49,280	106	0,330	1,848	1	D
21	50,520	760	0,330	1,805	5	D
22	51,050	647	0,285	1,788	4	D
23	57,430	58	0,210	1,603	0	C
24	58,910	155	0,315	1,566	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.39: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,060	80	0,225	4,908	0	B
2	22,010	89	0,255	4,035	0	D
3	23,080	67	0,210	3,850	0	C
4	24,080	140	0,270	3,693	1	D
5	26,640	156	0,240	3,343	1	Q
6	27,900	203	0,240	3,195	1	F
7	29,430	1216	0,285	3,033	7	C
8	30,980	18360	0,255	2,884	100	D
9	31,490	174	***	2,839	1	C
10	33,550	298	0,270	2,669	2	D
11	35,310	216	0,270	2,540	1	D
12	36,020	95	0,300	2,491	1	C
13	37,370	246	0,270	2,404	1	D
14	39,450	144	0,240	2,282	1	C
15	41,150	908	0,285	2,192	5	D
16	43,190	105	0,255	2,093	1	C
17	43,790	109	0,240	2,066	1	D
18	44,940	390	0,300	2,015	2	D
19	47,530	291	0,270	1,911	2	C
20	48,550	122	0,285	1,874	1	C
21	49,280	116	0,255	1,848	1	D
22	50,550	760	0,315	1,804	4	D
23	51,070	606	0,300	1,787	3	D
24	57,470	53	0,210	1,602	0	C
25	58,880	147	0,285	1,567	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.40: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	20,840	248	0,240	4,259	3	Q
2	21,980	120	0,240	4,041	2	D
3	24,040	203	0,240	3,699	3	D
4	26,600	760	0,240	3,348	10	Q
5	27,840	221	0,240	3,202	3	F
6	29,380	260	0,255	3,038	3	C
7	30,940	7526	0,285	2,888	100	D
8	33,530	329	0,255	2,671	4	D
9	35,300	242	0,270	2,541	3	D
10	36,530	150	0,240	2,458	2	Q
11	37,360	291	0,270	2,405	4	D
12	39,450	135	0,240	2,282	2	C
13	41,130	834	0,285	2,193	11	D
14	42,400	89	0,225	2,130	1	Q
15	43,770	131	0,240	2,067	2	D
16	44,920	431	0,300	2,016	6	D
17	45,450	89	0,195	1,994	1	?
18	45,800	105	0,255	1,980	1	?
19	49,240	156	0,255	1,849	2	D
20	50,130	163	0,225	1,818	2	Q
21	50,530	767	0,285	1,805	10	D
22	51,070	702	0,300	1,787	9	D
23	58,890	158	0,270	1,567	2	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Tabla A.41: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	20,820	184	0,225	4,263	4	Q
2	22,020	131	0,240	4,033	3	D
3	24,040	176	0,270	3,699	4	D
4	26,640	942	0,240	3,343	19	Q
5	27,820	155	0,315	3,204	3	F
6	29,380	270	0,270	3,038	5	C
7	30,950	4909	0,285	2,887	100	D
8	31,700	118	0,195	2,820	2	NaCl
9	33,540	302	0,285	2,670	6	D
10	35,330	252	0,270	2,538	5	D
11	35,960	93	0,225	2,495	2	C
12	37,360	320	0,270	2,405	6	D
13	39,420	131	0,240	2,284	3	C
14	41,140	770	0,315	2,192	16	D
15	42,440	91	0,225	2,128	2	Q
16	43,800	147	0,270	2,065	3	D
17	44,930	446	0,285	2,016	9	D
18	49,290	150	0,285	1,847	3	D
19	50,170	137	0,210	1,817	3	Q
20	50,550	726	0,300	1,804	15	D
21	51,090	699	0,285	1,786	14	D
22	58,880	114	0,270	1,567	2	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; Q: Cuarzo, F: Feldespato; NaCl: Cloruro de sodio						

Tabla A.42: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,550	75	***	4,779	3	B
2	21,970	90	0,240	4,042	4	D
3	23,020	82	0,195	3,860	3	C
4	24,000	200	0,270	3,705	8	D
5	29,390	403	0,300	3,037	16	C
6	30,860	2506	0,345	2,895	100	D
7	33,410	156	0,375	2,680	6	D
8	35,260	167	0,330	2,543	7	D
9	35,970	91	0,285	2,495	4	C
10	37,310	293	0,300	2,408	12	D
11	39,420	110	0,255	2,284	4	C
12	41,040	631	0,360	2,193	25	D
13	43,200	86	0,270	2,092	3	C
14	43,750	135	0,255	2,067	5	D
15	44,840	375	0,315	2,020	15	D
16	45,490	82	0,255	1,992	3	?
17	47,480	95	0,240	1,913	4	C
18	48,490	118	0,255	1,876	5	C
19	49,210	128	0,270	1,850	5	D
20	50,420	326	0,345	1,808	13	D
21	50,990	420	0,330	1,790	17	D
22	56,500	63	0,240	1,627	3	C
23	58,820	129	0,300	1,569	5	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; ?: Indeterminado						

Tabla A.43: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	21,980	81	***	4,041	4	D
2	22,980	72	***	3,867	4	C
3	23,980	146	0,270	3,708	8	D
4	27,740	72	***	3,213	4	F
5	29,360	324	0,330	3,040	17	C
6	30,820	1903	0,390	2,899	100	D
7	31,620	118	0,090	2,827	6	C
8	33,380	137	0,150	2,682	7	D
9	35,240	137	0,270	2,545	7	D
10	35,940	80	0,180	2,497	4	C
11	37,260	277	0,300	2,411	12	D
12	39,380	96	0,180	2,286	5	C
13	41,020	558	0,420	2,199	29	D
14	43,140	80	0,180	2,095	4	C
15	43,820	91	0,210	2,064	5	D
16	44,840	306	0,210	2,020	16	D
17	45,380	80	0,180	1,997	4	?
18	47,480	101	0,180	1,913	5	C
19	48,420	101	0,180	1,878	5	C
20	49,200	121	0,150	1,850	6	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; ?: Indeterminado						

Tabla A.44: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

No.	2θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	22,020	82	0,240	4,033	0	D
2	23,050	77	0,225	3,855	0	C
3	24,040	147	0,255	3,699	1	D
4	27,870	194	0,225	3,199	1	F
5	29,440	1177	0,345	3,032	7	C
6	30,930	16609	0,255	2,889	100	D
7	33,510	420	0,255	2,672	3	D
8	35,280	227	0,270	2,542	1	D
9	36,060	89	0,285	2,489	1	C
10	37,320	236	0,270	2,408	1	D
11	41,100	949	0,285	2,194	6	D
12	43,770	105	0,255	2,067	1	D
13	44,920	311	0,315	2,016	2	D
14	47,480	101	0,210	1,913	1	C
15	50,500	791	0,330	1,806	5	D
16	51,030	631	0,285	1,788	4	D
17	58,850	105	0,285	1,568	1	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; F: Feldespato						

Tabla A.45: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

No.	2 θ (grados)	Intensidad (cps)	Ancho (grados)	d (Å)	I/I ₀	Mineral (*)
1	18,020	89	0,225	4,919	1	B
2	22,030	91	0,210	4,032	1	D
3	23,100	80	0,300	3,847	1	C
4	24,050	124	0,255	3,697	1	D
5	27,890	182	0,240	3,196	1	F
6	29,430	1691	0,270	3,033	11	C
7	30,960	15688	0,270	2,886	100	D
8	33,530	283	0,285	2,671	2	D
9	35,320	272	0,255	2,539	2	D
10	36,010	112	0,225	2,492	1	C
11	37,360	221	0,270	2,405	1	D
12	39,440	131	0,270	2,283	1	C
13	41,140	686	0,300	2,192	4	D
14	43,800	152	0,285	2,065	1	D
15	44,920	342	0,285	2,016	2	D
16	47,550	124	***	1,911	1	C
17	48,540	127	0,270	1,874	1	C
18	49,260	106	0,285	1,848	1	D
19	50,110	62	0,180	1,819	0	Q
20	50,540	760	0,315	1,804	5	D
21	51,070	749	0,300	1,787	5	D
22	57,450	58	0,240	1,603	0	C
23	59,040	63	0,405	1,563	0	D
(*) D: Dolomita; C: Calcita; B: Brucita; Q: Cuarzo, F: Feldespato						

Anexo B

Nota de Chris A. Rogers



Ministry of
Transportation

Ministère des
Transports

Soils and Aggregates Section
1201 Wilson Avenue
Central Building, Room 311
Downsview, Ontario
Canada M3M 1J8

Tele: (416) 235-3734
Fax: (416) 235-4101

November 30, 1994

File No.: 3162-2-4-6.2

Séñor Carlos A. Milanest
Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la
Investigación Tecnológica (CIC-LEMIT)
Calle 52 entre 121 y 12
La Plata (1900), Argentina

Dear Séñor Milanest:

I have just read your most interesting paper "Alkali Reactivity of Dolomitic Rocks from Argentina" (Cement & Concrete Research V.24, pp.1073-1084, 1994). Your excellent work seems to clearly show that you have a case of alkali-carbonate reaction.

Have you got a chemical analysis for sample R2? I would like to know CaO, MgO, Al_2O_3 , and SiO_2 . What geological age is the rock, and do you have a brief description of the formation it came from. If possible, I would like to receive a small sample so I can compare its texture with well-known alkali-carbonate reactive rocks from Ontario.

Best Wishes for Christmas and the New Year,

A handwritten signature in cursive script that reads "Chris Rogers".

Chris A. Rogers, Manager,
Soils and Aggregates Section.

CAR/jlp

Made from recovered materials / Fait de matériaux récupérés

Anexo C

Representación gráfica de las intensidades
de las reflexiones identificadas en los DRX
indicados en el Anexo A

Figura C.1: Dolomía M1. Muestra representativa de la sección transversal (integral) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

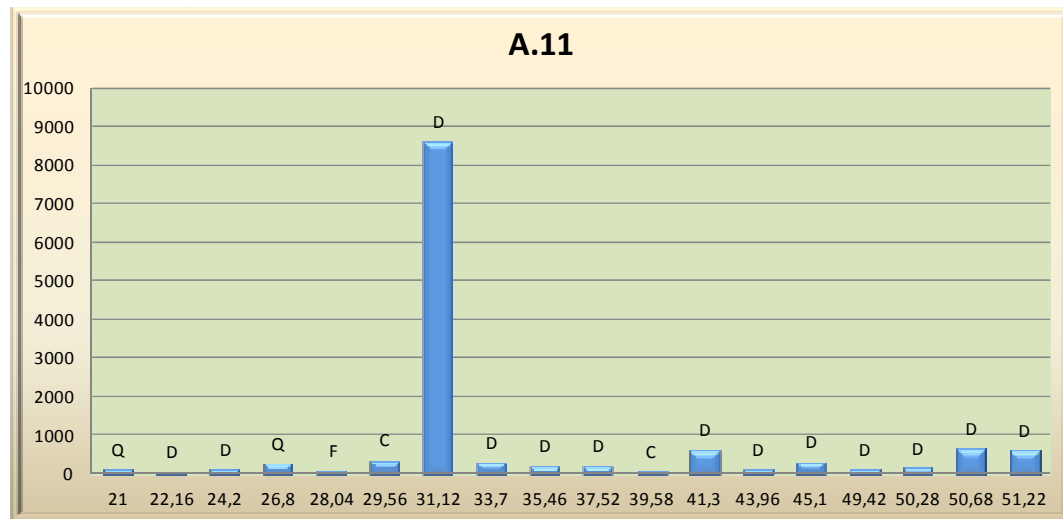
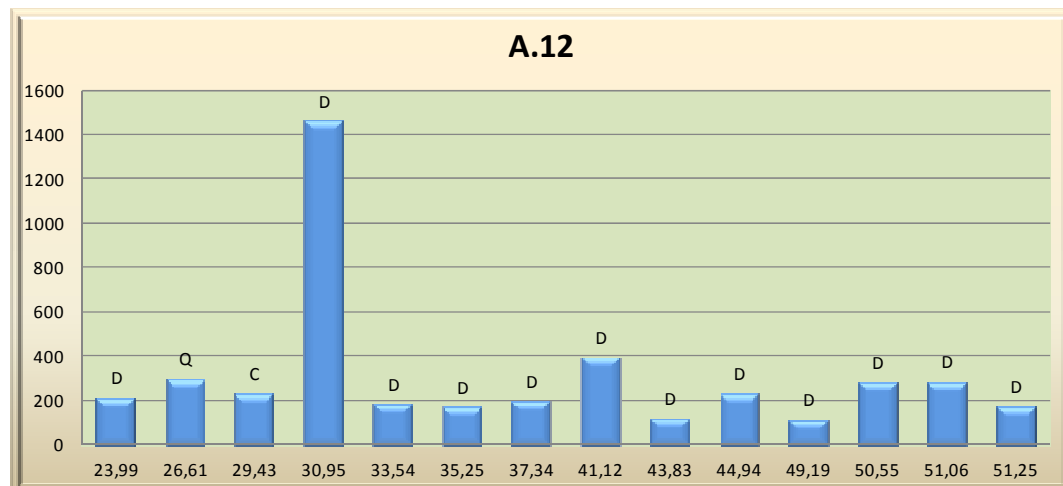


Figura C.2: Dolomía M1. Muestra representativa de la zona superficial (borde) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C3: Dolomía M4. Muestra representativa de la sección transversal (integral) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

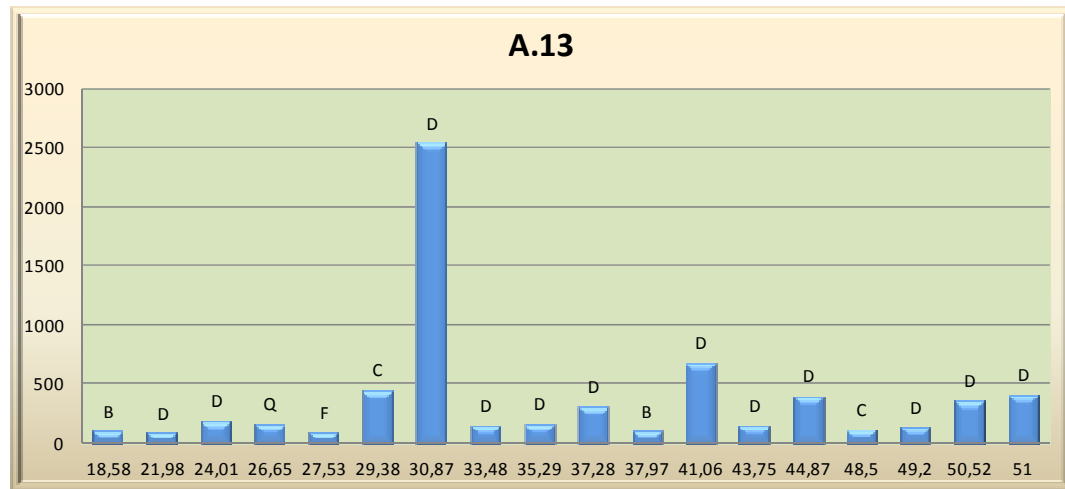
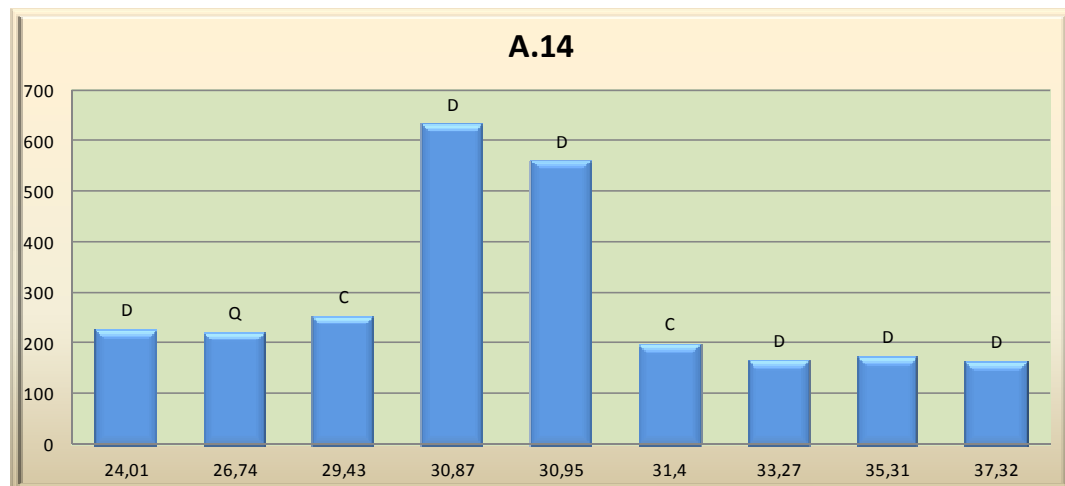


Figura C.4: Dolomía M4. Muestra representativa de la zona superficial (borde) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.5: Dolomía M5. Muestra representativa de la sección transversal (integral) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)

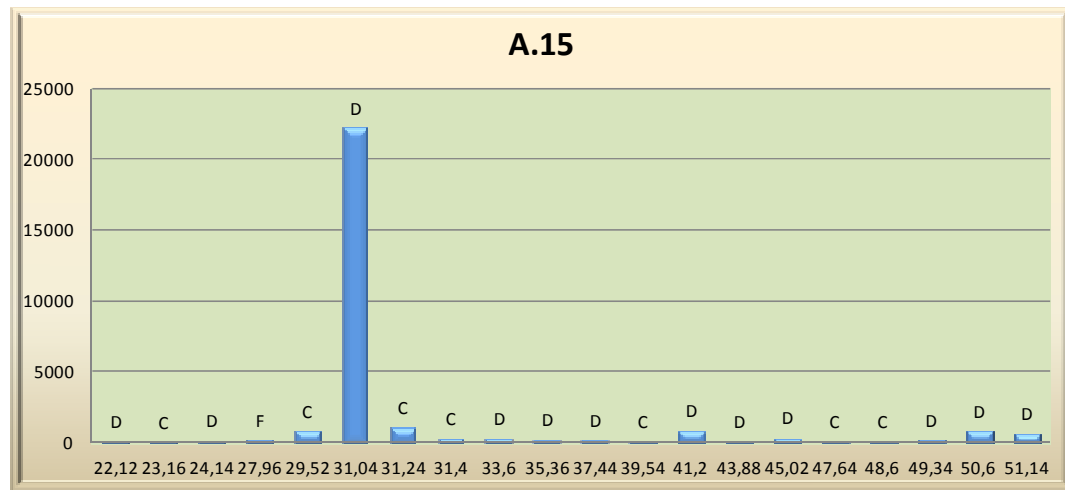
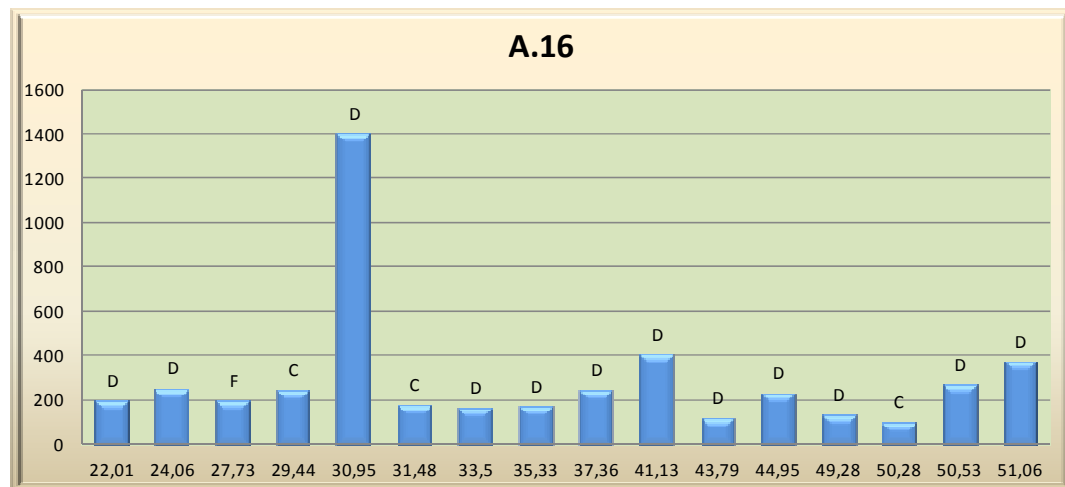
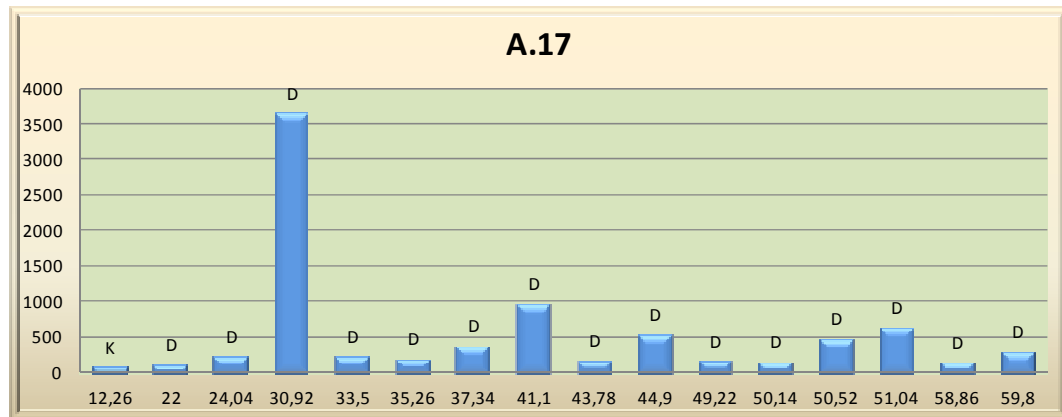
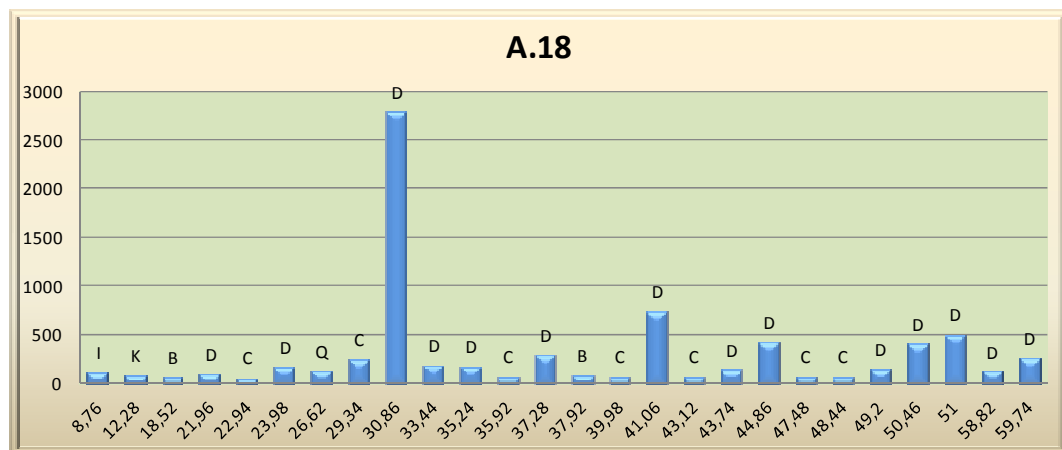


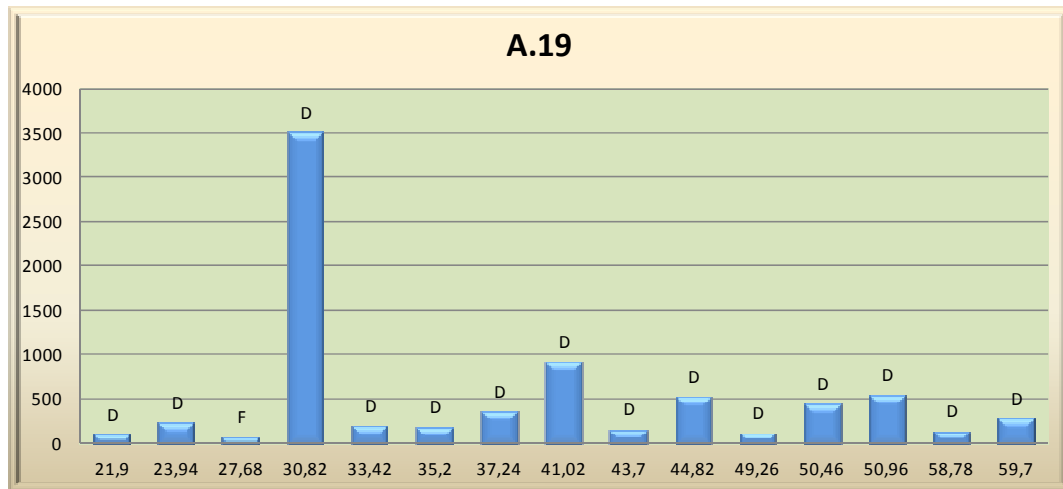
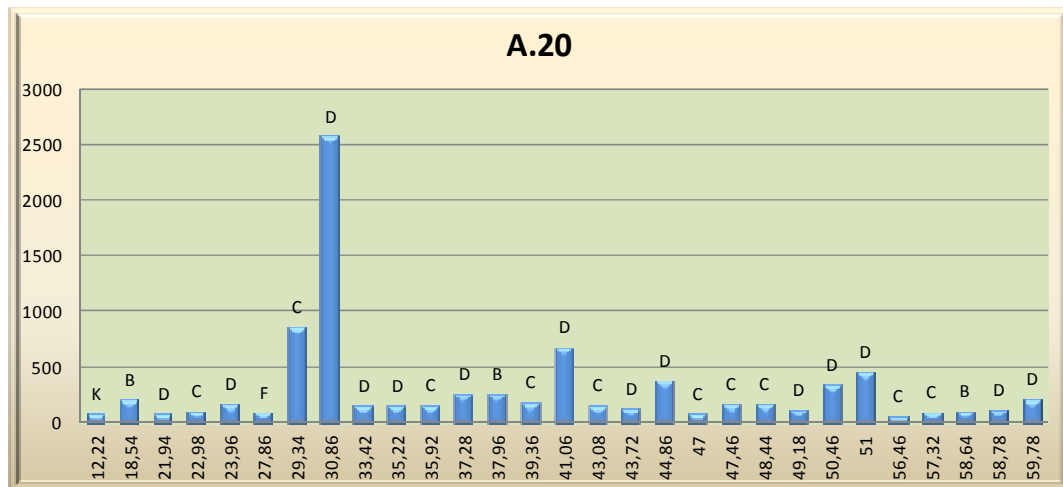
Figura C.6: Dolomía M5. Muestra representativa de la zona superficial (borde) del cilindro de roca del ensayo ASTM C 586 modificado (8 meses)



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.7: Dolomía M9. Muestra de roca natural, sin tratamiento (M9-1)**Figura C.8:** Dolomía M9. Muestra de un testigo de roca (M9-1) del ensayo ASTM C 586 modificado, luego de 4 meses de tratamiento

NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.9: Dolomía M9. Muestra de roca natural (M9-2) sin tratamiento**Figura C.10:** Dolomía M9. Muestra de un testigo de roca (M9-2) del ensayo ASTM C 586 modificado, luego de 4 meses de tratamiento

NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.11: Dolomía M8. Muestra de agregado extraída de una barra de mortero IRAM 1674 de 28 días de edad

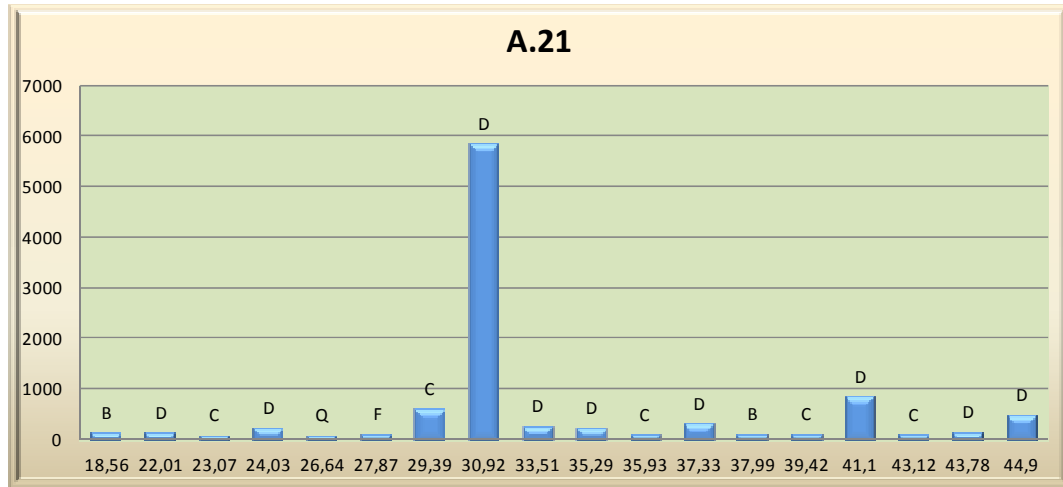
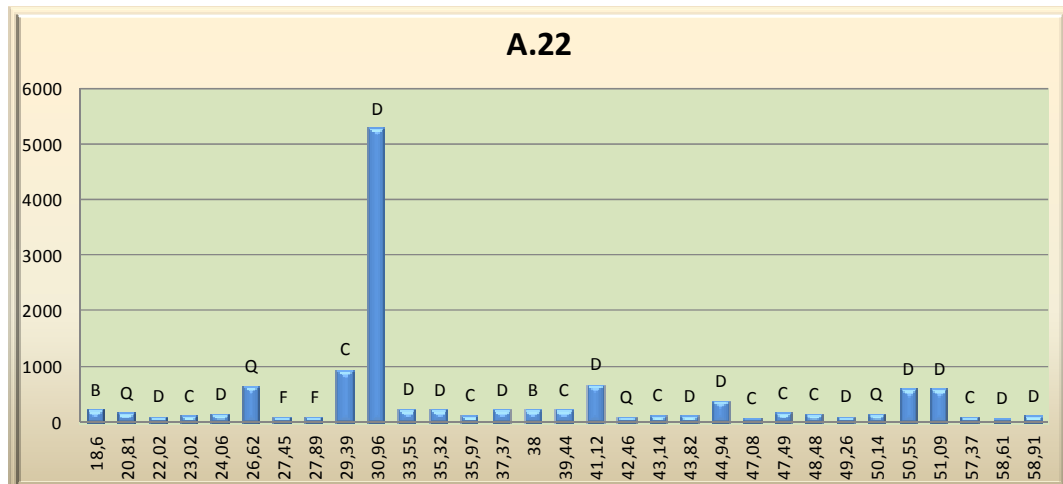


Figura C.12: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.13: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

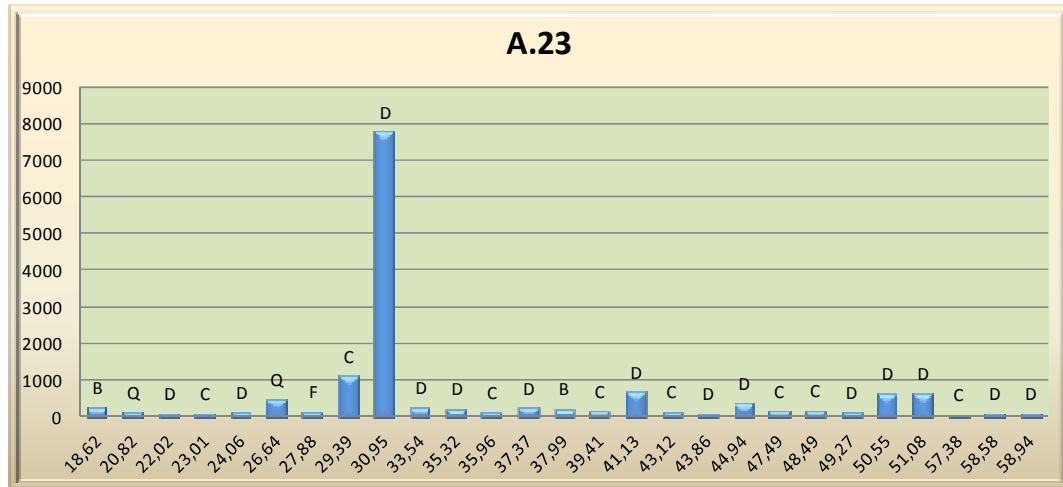
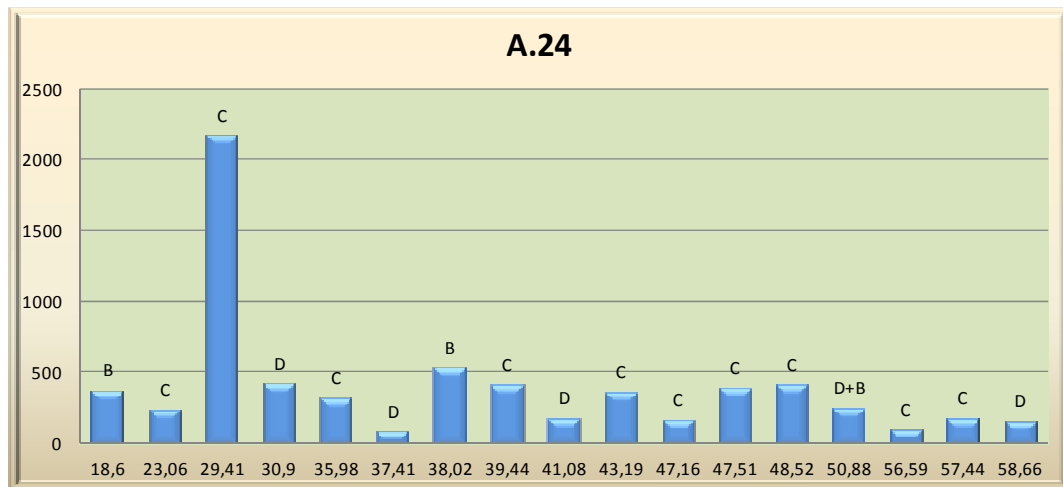


Figura C.14: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.15: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

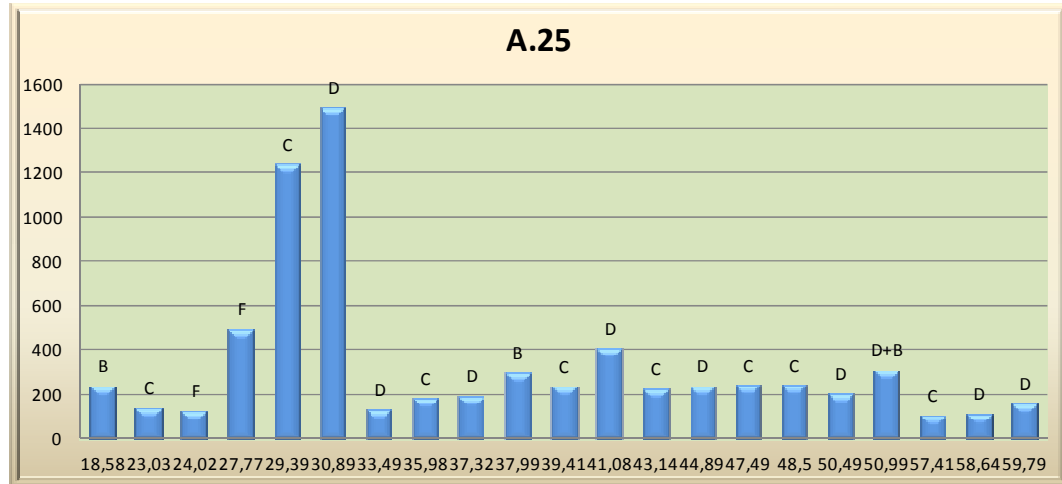
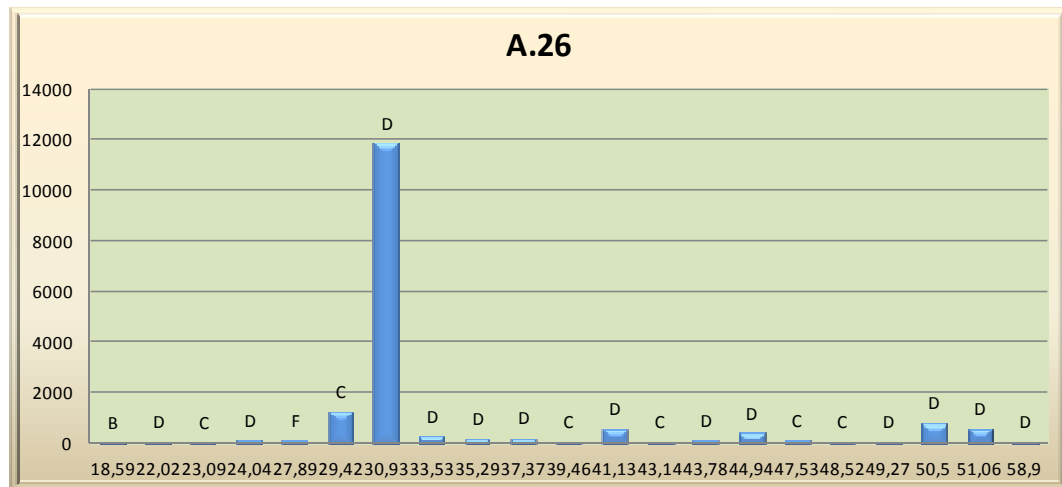


Figura C.16: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.17: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución 1N de NaOH a 38 °C

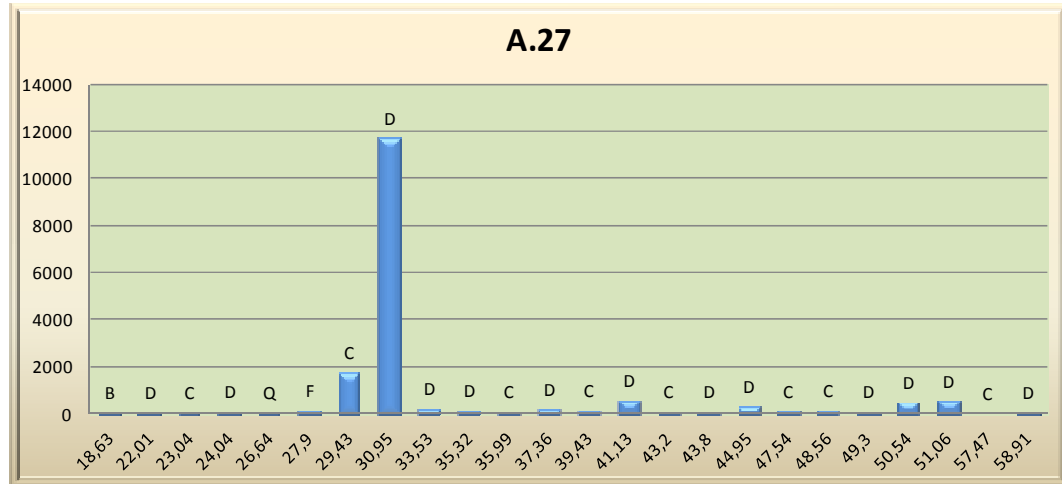
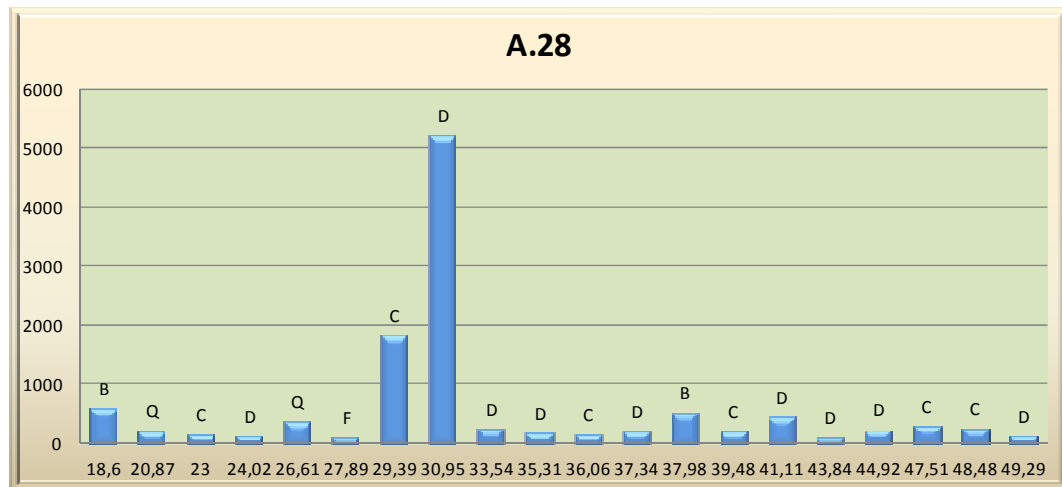


Figura C.18: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.19: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

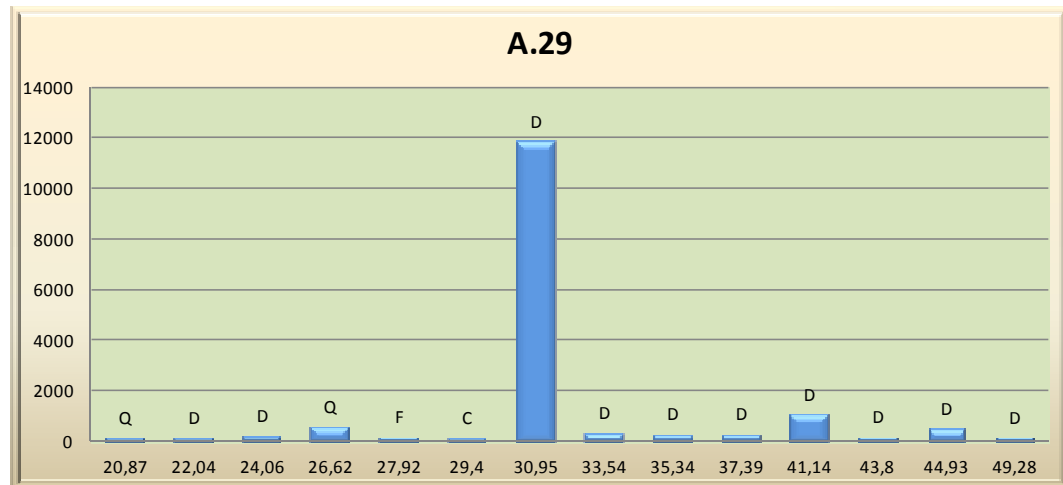
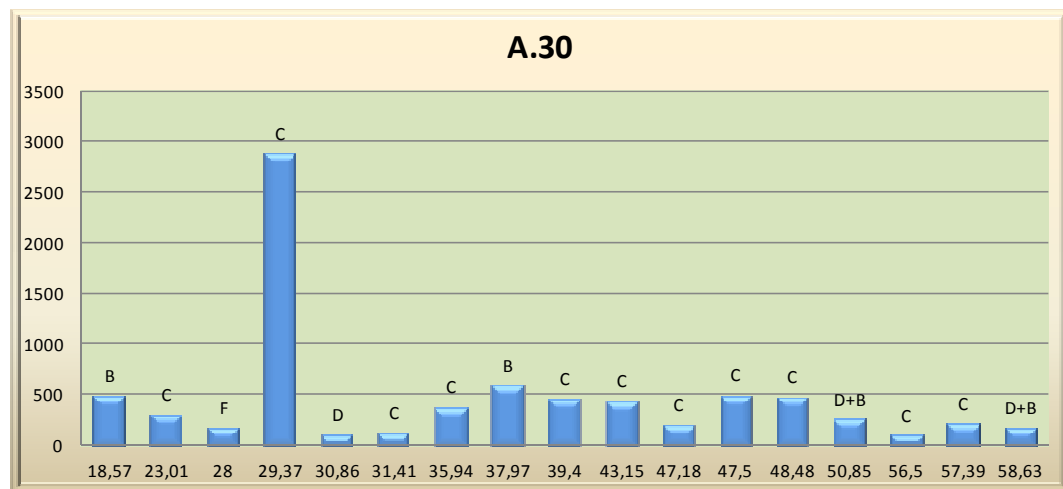


Figura C.20: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.21: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

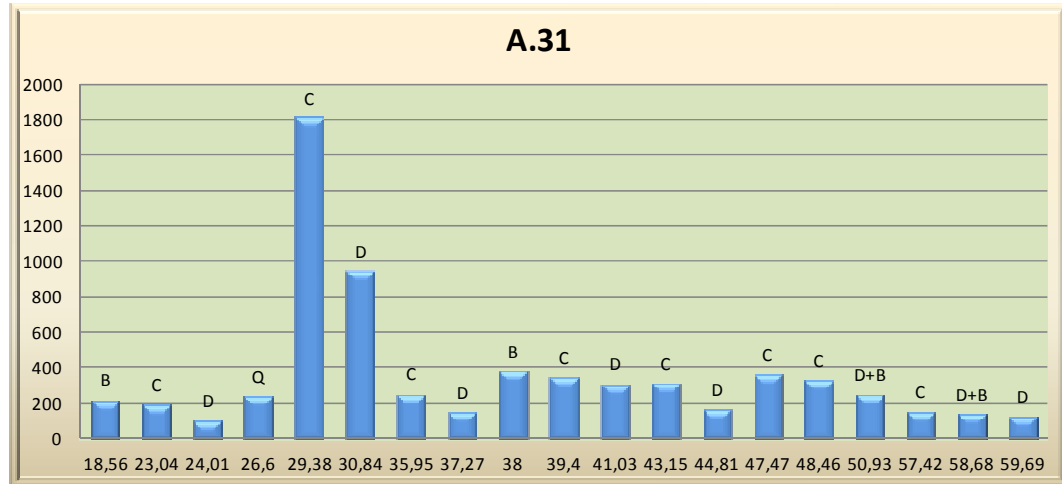
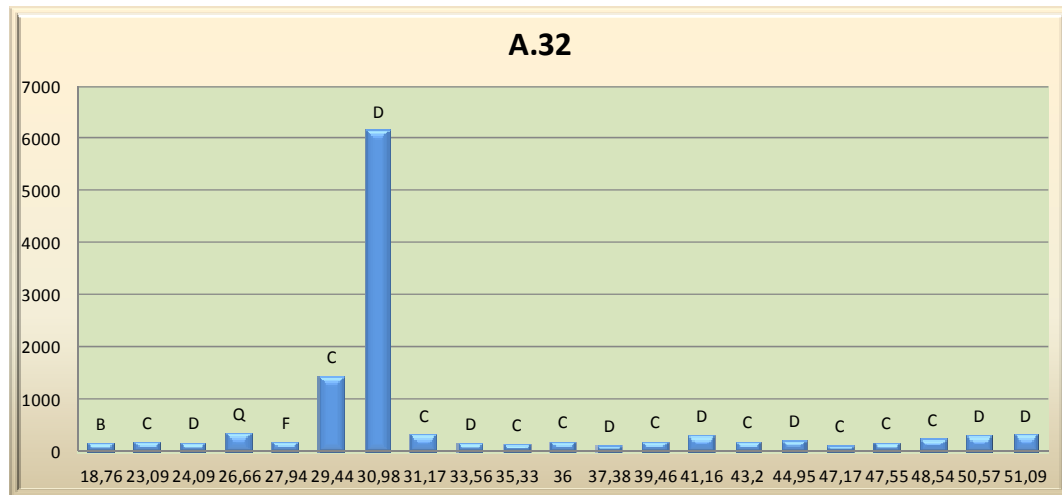


Figura C.22: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.23: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 56 días de inmersión en solución 1N de NaOH a 80 °C

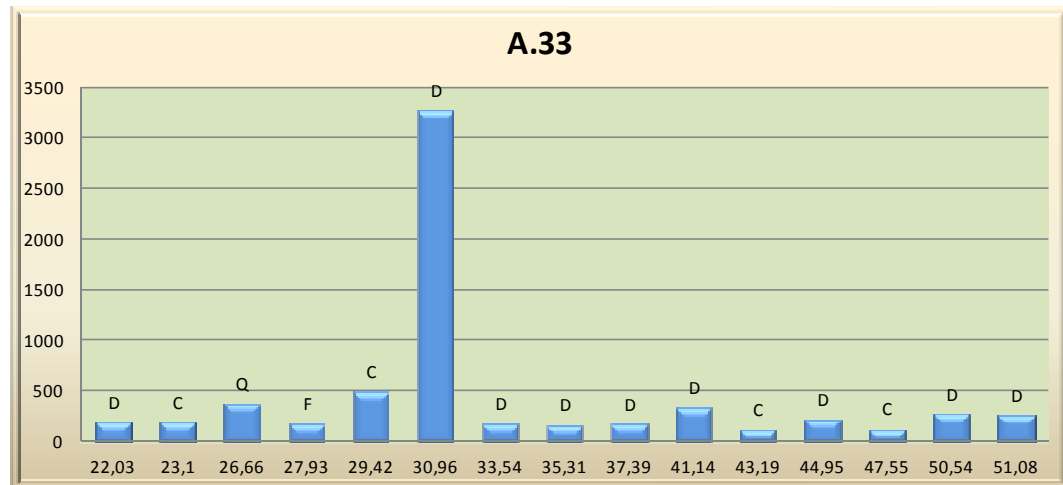
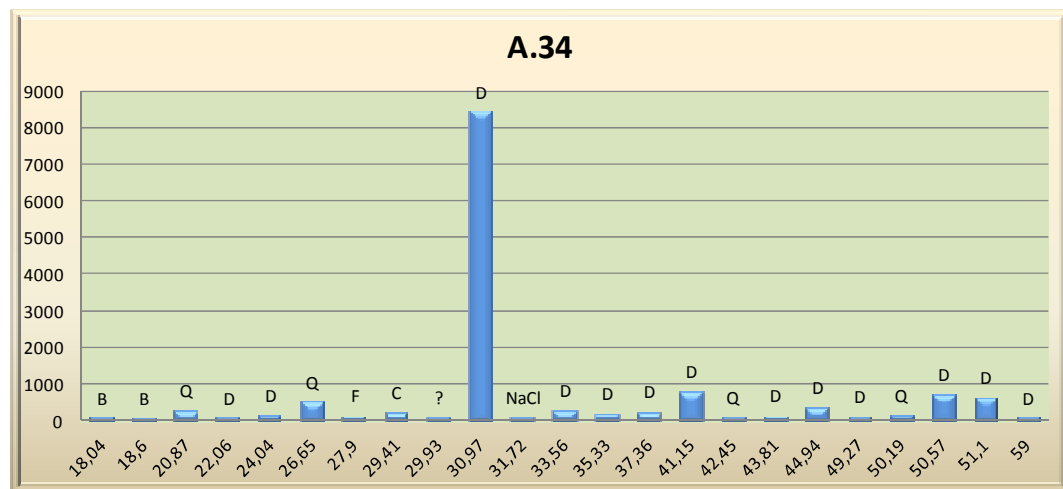


Figura C.24: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.25: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

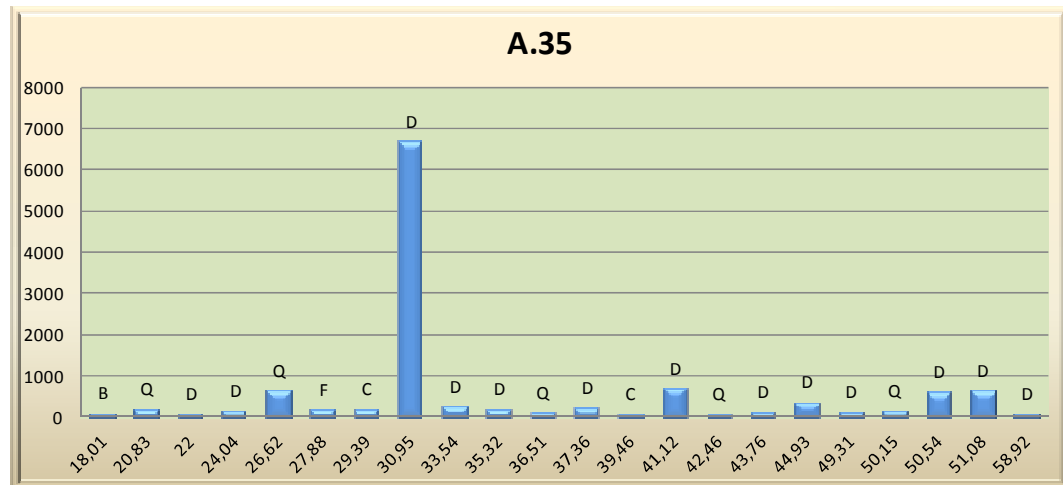
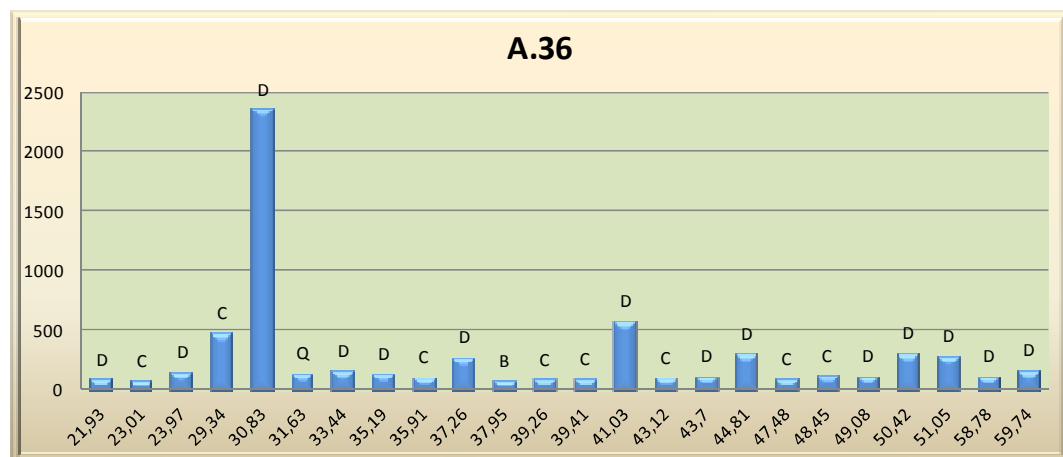


Figura C.26: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.27: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

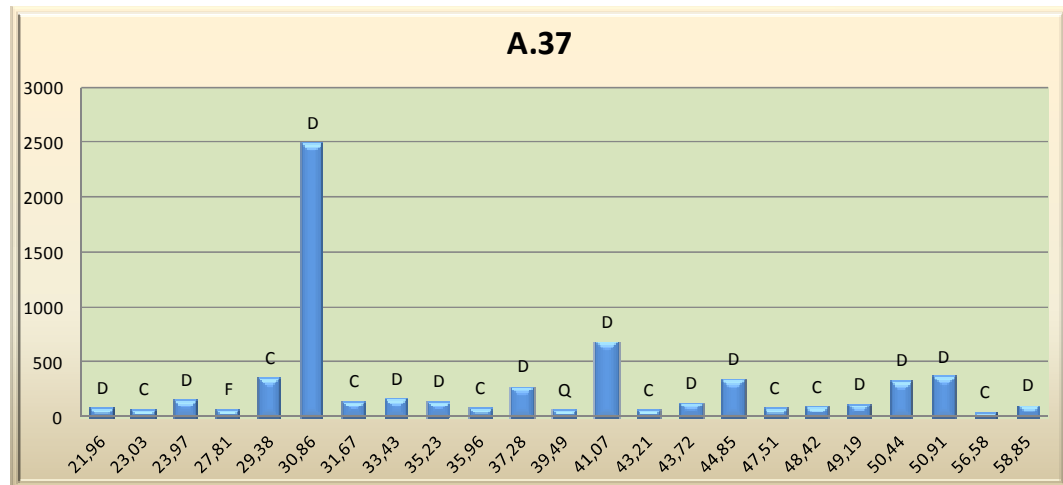
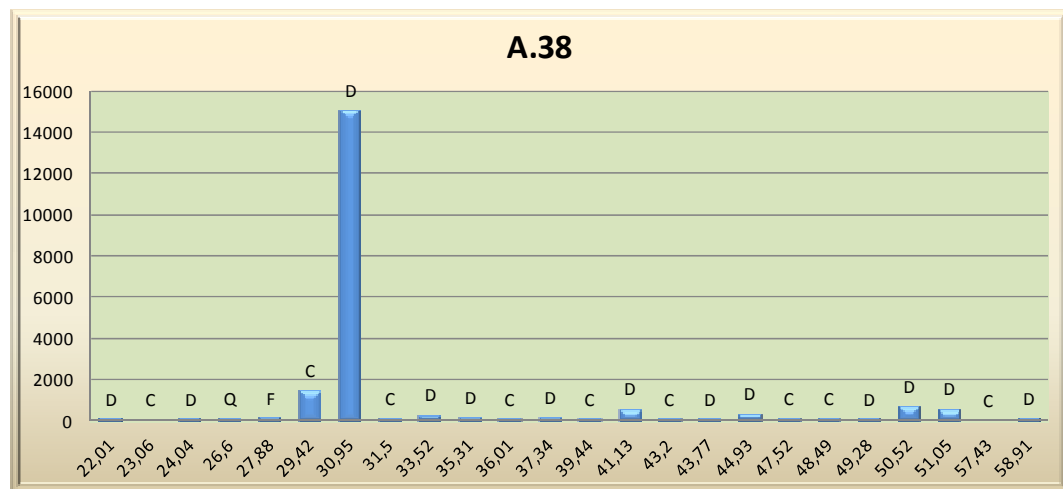


Figura C.28: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.29: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 23 °C

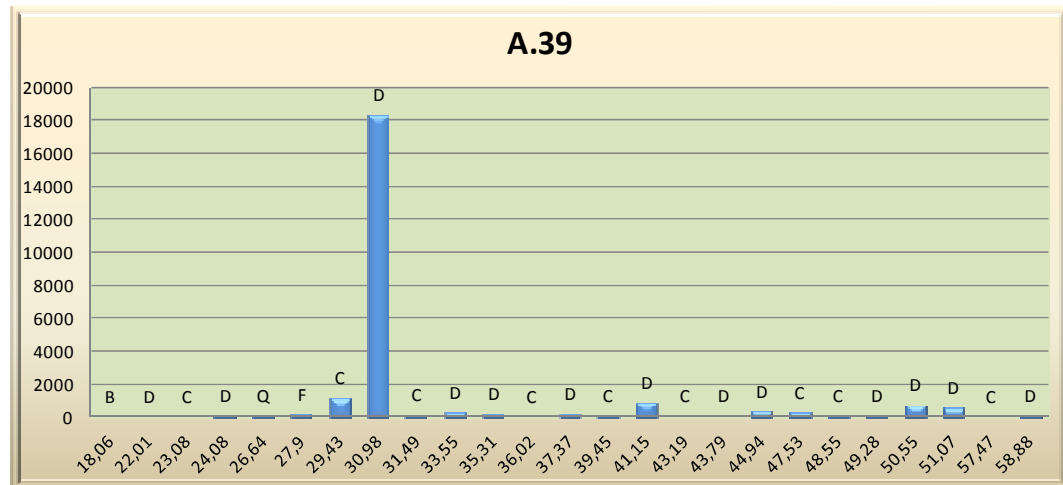
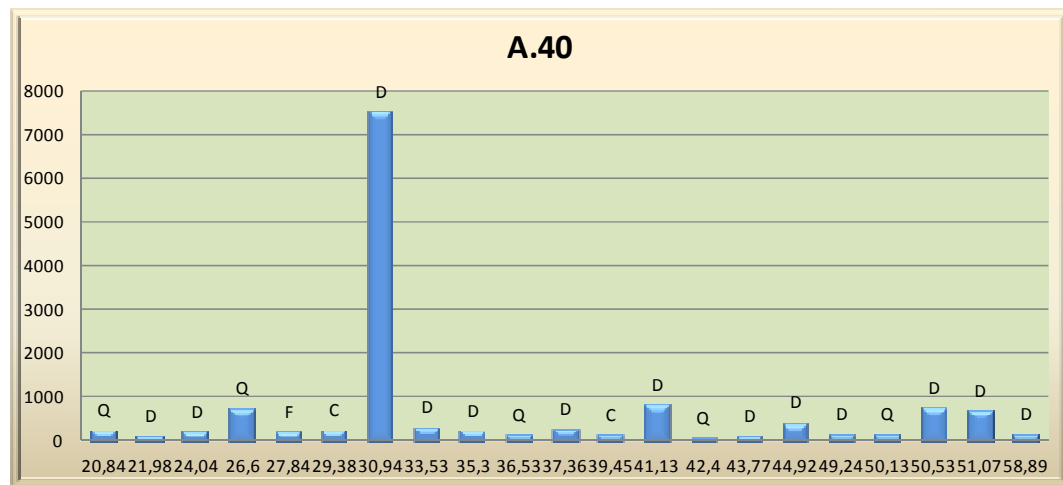


Figura C.30: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.31: Dolomía M1. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

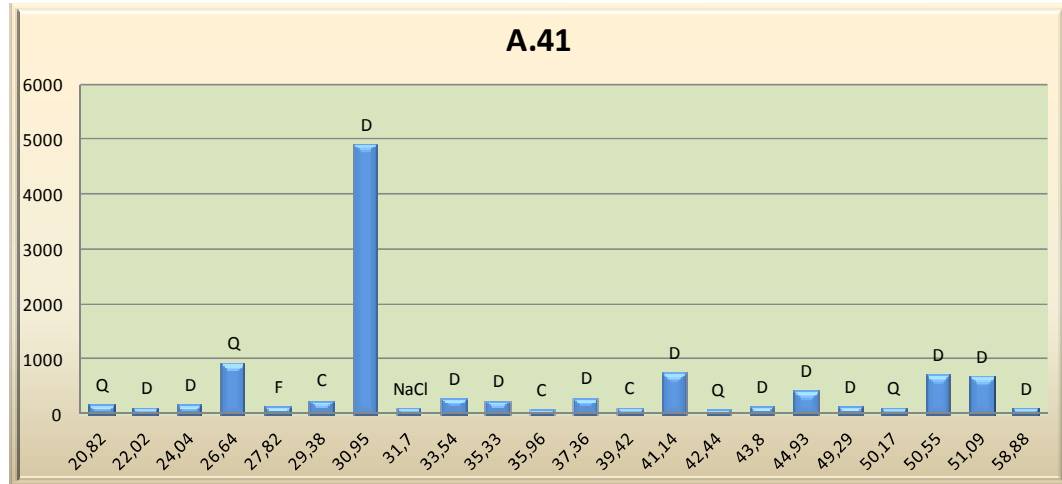
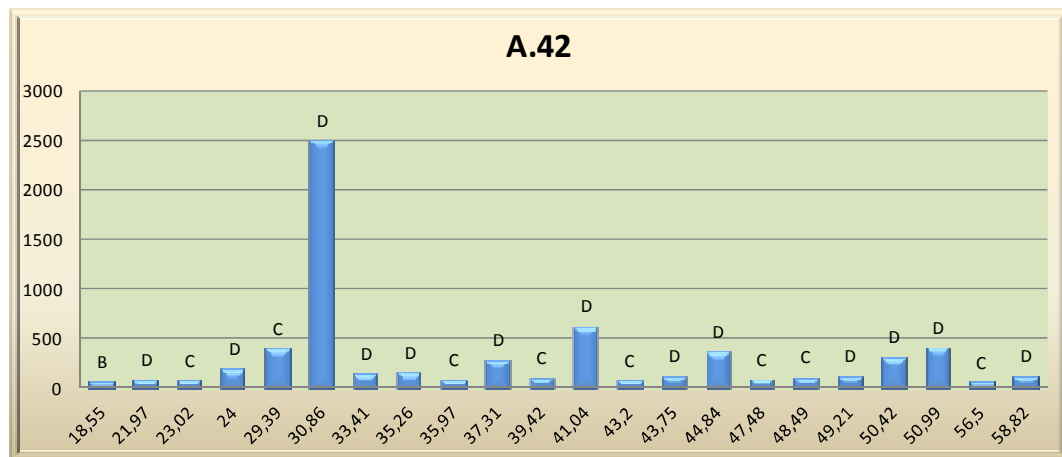


Figura C.32: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.33: Dolomía M4. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C

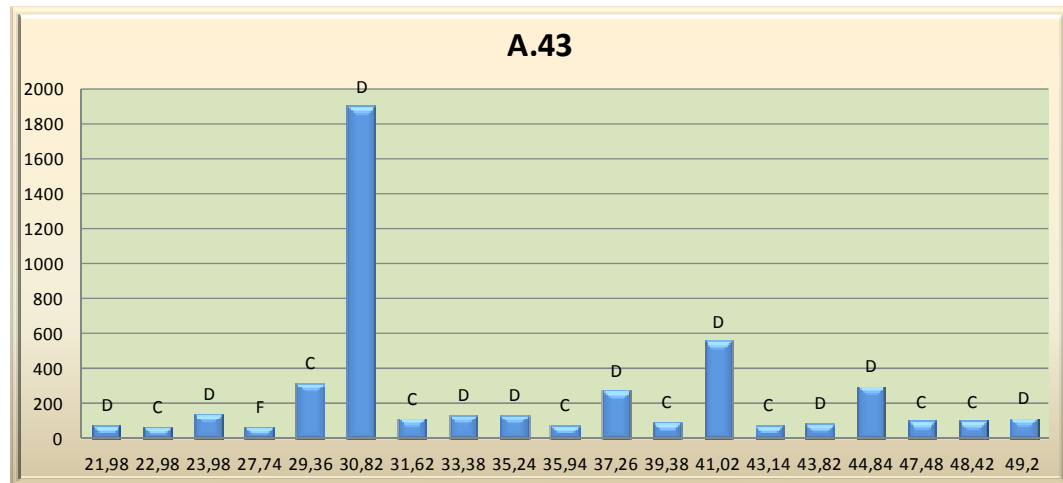
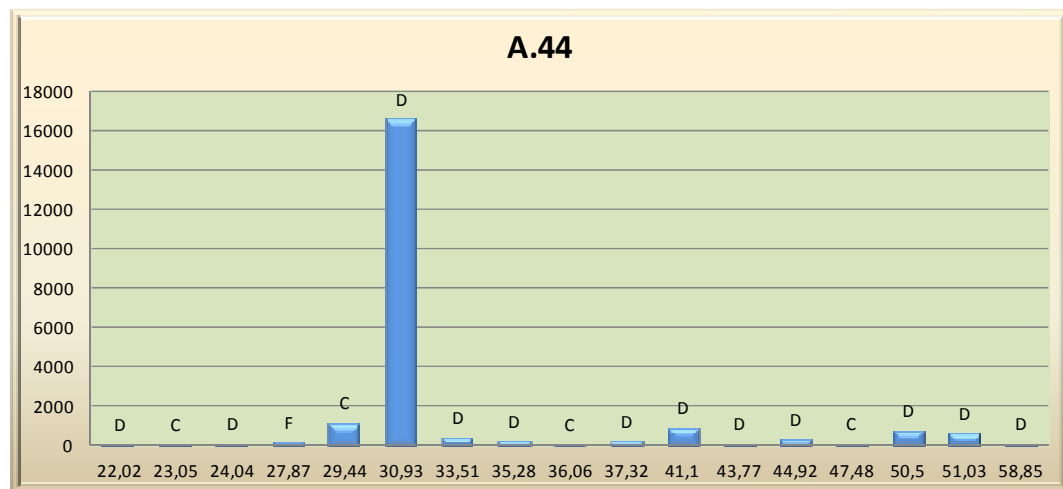
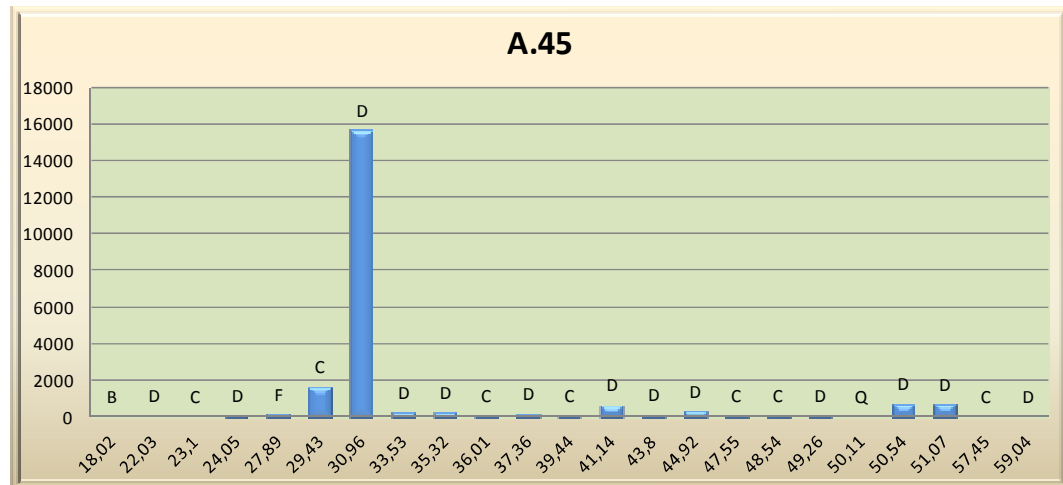


Figura C.34: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona exterior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.

Figura C.35: Dolomía M5. Muestra de agregado grueso extraída de la zona interior de un testigo de hormigón del ensayo de Larbi y Hudec modificado, luego de 8 meses de inmersión en solución saturada de NaCl a 38 °C



NOTA: El título inserto en el gráfico de cada figura hace referencia a la designación de la tabla (Anexo A) de la que se extraen los datos para la construcción del mismo.